

Norges teknisk-
naturvitenskapelige universitet
NTNU



Institutt for bygg, anlegg og transport
Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Faggruppe for bygnings- og materialteknikk

Postadresse
Høgskoleringen 7A
7491 Trondheim
Telefon 73 59 46 40
Telefax 73 59 70 21

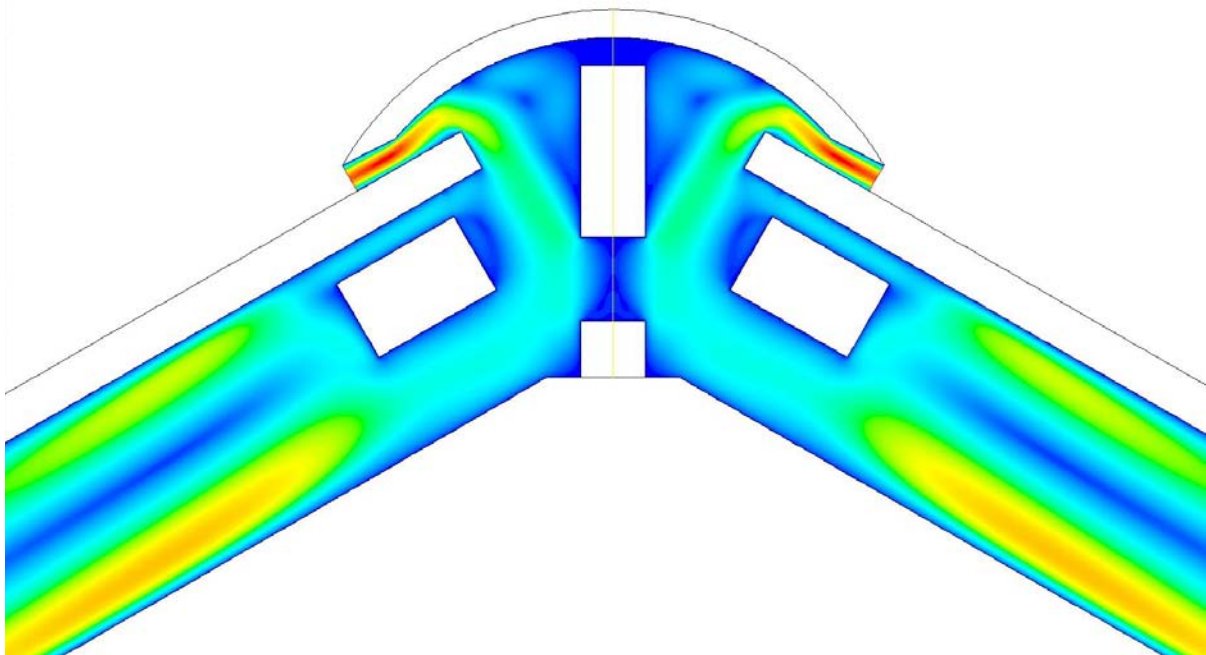
PROSJEKTOPPGAVE

HØSTEN 2003

for

Stud. Techn. Vidar Hofseth

Lufting av skrå isolerte tak





Oppgavens tittel:	Dato: 19.12.2003		
Lufting av skrå isolerte tak	Antall sider (inkl. bilag): 84		
	Hovedoppgave	Prosjektoppgave	X
Navn: Stud.techn.	Vidar Hofseth		
Faglærer/veileder:	Arild Gustavsen		
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:	Sivert Uvsløkk ved Norges byggforskningsinstitutt		

Ekstrakt:

Det er to hovedgrunner til en lufter tak, det er for å hindre temperaturøkning på taktekingen som kan føre til snøsmelting, og det er for å kunne tørke ut fukt i takkonstruksjonen. Hvordan luftingen blir utført avhenger av taktype. Dette prosjektet tar for seg skrå isolerte tak, hvor luftingen blir utført med luftekanal som går fra møne til raft. Det er to hovedmåter å bygge opp skrå isolerte tak med hensyn på lufting. Dette er lufting under undertak og lufting ved bruk av kombinert undertak og vindspærre. Det er tak med bruk av kombinert undertak og vindspærre som er undersøkt i dette prosjektet. Det er da kun en luftespalte som går fra raft til møne, størrelsen på denne avhenger av høyden på sløyfelektene og høyden på steinlektene.

Drivtrykket bak luftstrømningen gjennom luftekanalene kommer av naturlig oppdrift og vindtrykk. For den naturlige oppdriften er det densitetsforskjeller mellom innløp og utløp som skaper drivtrykket. Dette prosjektet tar kun for seg luftstrømning hvor drivtrykket består av naturlig oppdrift. I kanalen oppstår det trykktap som kommer av friksjon og singulærtap. Friksjonstapet kommer av at det oppstår friksjon mellom luften og kanalveggen. Singulærtap oppstår der hvor det oppstår momentane endringer i strømmen, dette kan være innsnevninger i kanalen, utvidelser i kanalen eller ved retningsendringer i kanalen.

Oppgaven min gikk ut på å simulere luftstrømningene i forskjellige takkonstruksjoner. Dette er gjort ved hjelp av et CFD-program (CFD = Computational Fluid Dynamics). FLUENT som er et CFD-program ble brukt til simuleringene. Et tak ble brukt som utgangspunkt, deretter ble en og en del av taket variert. Detaljene som ble variert var kanallengde, sløyfehøyde, lekkehøyde og takvinkel. I tre av tilfellene ble deler av takkonstruksjonen fjernet. I et tilfelle ble lektene fjernet, i et annet ble raft og møne fjernet og i det siste tilfellet ble både raft, møne og lekter fjernet.

Resultatene fra beregningene viste at temperaturen og hastigheten i luftekanalene varierte med tiden. For enkelte av takene varierte strømmingene med tiden uten noe fast mønster, andre ganger ble strømningsbildet gjentatt. Ved hjelp av middelhastigheten, densiteten og tverrsnittsarealet i utløpet ble massestrømmen gjennom utløpet bestemt. Siden det er kun et utløp i takkonstruksjonene blir massestrømmen gjennom utløpet, det samme som massestrømmen gjennom hele luftekanalene. Massestrømmen og temperaturen på taksteinen ble bestemt for hvert tilfelle. Da så man en klar sammenheng mellom luftgjennomstrømning og temperatur på taktekingen. Tak med stor luftgjennomstrømning hadde lavere temperatur enn tak med liten luftgjennomstrømning. Dette viser at det er gunstig å lufte takene for å unngå temperaturøkning på taktekingen. Sammenlignes massestrømmen fra takene ser en at ved å øke kanallengden eller å redusere takvinkelen blir massestrømmen redusert. Ved å øke høyden på kanalen, enten ved å øke steinlekt høyden eller ved å øke sløyfelekt høyden, øker luftgjennomstrømningen. Det kommer imidlertid ikke klart frem hva som er mest gunstig å øke sløyfehøyden eller steinlekt høyden.

Stikkord:

- | |
|-------------------|
| 1. Lufting av tak |
| 2. CFD-simulering |
| 3. FLUENT |
| 4. Singulærtap |

Forord

Denne rapporten er resultatet av et fordypningsprosjekt høsten 2003 ved NTNU. Alle studenter ved Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi skal gjennomføre et fordypningsprosjekt i 9. semester. Oppdragsgiver for prosjektet har vært Norges byggforskningsinstitutt (Byggforsk). De er i gang med et forskningsprosjekt som heter Klima 2000 – Klimatilpassning av bygningskonstruksjoner. Klima 2000 er delt opp i mange underprosjekter, blant annet delprosjekt P4 - Studie av kompakte og luftede isolerte tak. Det er i forbindelse med dette delprosjektet at problemstillingen til oppgaven min er utarbeidet.

Jeg vil rette en stor takk til Arild Gustavsen og som har vært veilederen min under arbeidet med prosjektoppgaven. Han har vært til stor hjelp ved å motivere, komme med faglige råd og ved å være en støttespiller gjennom arbeidet med prosjektet. Jeg vil også takke Sivert Uvsløkk som har vært kontaktpersonen min i Byggforsk. Han har vært til stor hjelp med faglige råd under arbeidet med prosjektet.

Trondheim, 19.12.2003

Vidar Hofseth

Sammendrag

Det er to hovedgrunner til en lufte tak, det er for å hindre temperaturøkning på taktekkingen som kan føre til snøsmelting, og det er for å kunne tørke ut fukt i takkonstruksjonen. Ved snøsmelting på taket vil vannet renne ned langs taket, når vannet kommer ned til raften som er kald kan vannet fryse til is. Isen kan demme opp for vannet som renner ned langs taket, slik at taktekkingen blir stående under vanntrykk. Dette vil ofte føre til lekkasjer i taket. Is kan også sprenges i stykker taktekkning, takrenner, nedløp og vinkelrenner. Oppfukning av konstruksjonen kan komme enten utenfra, innenfra eller så kan det være byggfukt fra byggeperioden. Hvis det ikke finnes lufting av taket eller denne er dårlig kan fukten akkumuleres. Dette kan føre til råte og sopp dannelse i takkonstruksjonen.

Hvordan luftingen blir utført avhenger av taktype. Dette prosjektet tar for seg skrå isolerte tak, hvor luftingen blir utført med luftekanal som går fra møne til raft. Skrå isolerte tak kan også i tillegg utføres med lufteåpninger i gavlen. Da vil en få en ekstra lufteeffekt av kryssluftingen. Det er to hovedmåter å bygge opp skrå isolerte tak med hensyn på lufting. Dette er lufting under undertak og lufting ved bruk av kombinert undertak og vindsperre. Det er tak med bruk av kombinert undertak og vindsperre som er undersøkt i dette prosjektet. Det er da kun en luftespalte som går fra raft til møne, størrelsen på denne avhenger av høyden på sløyfelektene og høyden på steinlektene.

Drivtrykket bak luftstrømningen gjennom luftekanalen kommer av naturlig oppdrift og vindtrykk. For den termiske oppdriften er det densitetsforskjeller mellom innløp og utløp som skaper drivtrykket. Når det gjelder vindtrykket er det differansen mellom statisk trykk ved innløp og ved utløp som utgjør drivkraften. Dette prosjektet tar kun for seg luftstrømning hvor drivtrykket består av naturlig oppdrift. I kanalen oppstår det trykktap som kommer av friksjon og singularøstap. Friksjonstapet kommer av at det oppstår friksjon mellom luften og kanalveggen. Singularøstap oppstår der hvor det oppstår momentane endringer i strømmen, dette kan være innsnevring i kanalen, utvidelser i kanalen eller ved retningsendringer i kanalen.

Ved Norges byggforskningsinstitutt er det utarbeidet et regneark for å beregne luftgjennomstrømning, drivtrykk, trykktap og lufthastighet for luftekanalen. Dette regnearket er bygd opp ved hjelp av generelle formler og regler fra fluid dynamikken. Utgangspunktet for oppgaven var å kontrollere om singularøstapkoefisientene som ble brukt i regnearket, stemte overens med avansert CFD-simulering (CFD = Computational Fluid Dynamics). Det viste seg gjennom prosjektets gang at dette ikke var så enkelt. Det oppstod luft sirkulasjoner mellom lektene i kanalen, dette førte til at det ble nesten ingen luftstrøm som gikk fra raft til møne. Problemet var å bestemme en hastighet som kunne brukes i beregningene av singularøstapkoefisientene. Derfor ble oppgaven litt omdefinert, til isteden å beskrive strømningsforholdene i kanalen.

FLUENT er et CFD-program, dette brukes til å simulere fluid strømninger og varmetransport mm. Dette programmet ble brukt til å simulere luftstrømningen i luftekanalen. Det ble modellert åtte forskjellige takkonstruksjoner. Et tak ble brukt som utgangspunkt, deretter ble en og en del av taket variert. Detaljene som ble variert var kanallengde, sløyfehøyde, lektehøyde og takvinkel. I tre av taktilfellene ble deler av takkonstruksjonen fjernet. I et tilfelle ble lektene fjernet, i et annet ble raft og møne fjernet og i det siste tilfellet ble både raft, møne og lekter fjernet.

Det viste seg at de ikke var stasjonær løsning av noen av takene. Transiente simuleringer ble derfor utført. Resultatene som er presentert er derfor enten transiente eller så er de øyeblikksbilder av situasjonen. For å registrere resultater under de transiente beregningene må en velge punkt eller snitt der data skal registreres, og en må bestemme hvilke resultat som skal registreres. Det ble brukt tre punkt i kanalen til å registrere resultater, det var et punkt ved innløpet, et forholdsvis midt i kanalen og et ved utløpet. I tillegg ble utløpet brukt til å registrere resultat. I punktene ble temperatur og hastighet registrert, i utløpet ble middelhastigheten registrert. For øyeblikksresultatene kunne en hente ut disse i etterkant av beregningene, blant annet ble temperaturen på overflaten av taktekkningen registrert som øyeblikksresultat.

Resultatene fra punktene i kanalen viste at temperaturen og hastigheten varierte med tiden. For enkelte av takene varierte strømmingene med tiden uten noe fast mønster, andre ganger ble strømningsbildet gjentatt. Ved hjelp av middelhastigheten, densiteten og tverrsnittsarealet i utløpet ble massestrømmen gjennom utløpet bestemt. Siden det er kun et utløp i takkonstruksjonene blir massestrømmen gjennom utløpet, det samme som massestrømmen gjennom hele luftkanalen. Massestrømmen og temperaturen på taksteinen ble bestemt for hvert tilfelle. Da så man en klar sammenheng mellom luftgjennomstrømning og temperatur på taktekkningen. Tak med stor luftgjennomstrømning hadde lavere temperatur enn tak med liten luftgjennomstrømning. Dette viser at det er gunstig å lufte takene for å unngå temperaturøkning på taktekkningen.

Luftgjennomstrømningen for takene var generelt lav for alle takene. For taket med minst luftgjennomstrømning strømmer kun $3,003e^{-5}$ kg/s gjennom luftkanalen i taket. Temperaturene på taktekkningen for takene økte lite i forhold til uttemperaturen. Taket som hadde høyest temperaturøkning hadde en økning på 0,108 K. Temperaturforskjellen mellom takene er også liten, forskjellen mellom laveste og høyeste verdi er 0,014 K. Dette kommer av at takene er velisolerte, derfor går det lite varme gjennom taket.

Sammenlignes massestrømmen fra takene ser en at ved å øke kanallengden eller å redusere takvinkelen blir massestrømmen redusert. Ved å øke høyden på kanalen, enten ved å øke steinlekt høyden eller ved å øke sløyfelekt høyden, øker luftgjennomstrømningen. Det viser at det er gunstig å øke kanalhøyden for å øke gjennomstrømningen. Det kommer imidlertid ikke klart frem hva som er mest gunstig å øke sløyfehøyden eller steinlekt høyden.

Innholdsfortegnelse

1	SYMBOLLISTE	3
2	INNLEDNING	4
2.1	HVORFOR LUFTE TAK.....	4
2.2	DAGENS REGLER FOR LUFTING AV TAK.....	4
2.3	SIMULERING	5
3	TEORI	6
3.1	LUFTING AV TAK.....	6
3.1.1	<i>Skader og problemer</i>	7
3.2	FLUENT	11
3.3	STRØMNINGSTEORI.....	12
3.3.1	<i>Trykk i strømming</i>	13
3.3.2	<i>Drivkrefter</i>	15
3.3.3	<i>Energitap</i>	16
3.4	BESKRIVELSE AV REGNEARK	18
3.4.1	<i>Drivtrykk</i>	18
3.4.2	<i>Trykktap</i>	19
4	METODE	21
4.1	LITTERATURSTUDIE	21
4.2	DATASIMULERING	21
4.3	FREMANGSMÅTE VED MODELLERINGEN OG SIMULERING	22
4.3.1	<i>Oppbygging av takkonstruksjonene i GAMBIT</i>	22
4.3.2	<i>Fluent</i>	23
4.4	FORENKLET METODE (REGNEARK).....	25
5	RESULTAT	26
5.1	INNLEDNING	26
5.2	SINGULÆRTAPSKOEFFISIENTER	29
5.3	RESULTATER FRA TAK 1.2	30
5.3.1	<i>Transiente resultat</i>	32
5.3.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	34
5.4	RESULTATER FRA TAK 1.3	39
5.4.1	<i>Transiente resultat</i>	39
5.4.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	41
5.5	RESULTATER FRA TAK 2.3	42
5.5.1	<i>Transiente resultat</i>	42
5.5.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	44
5.6	RESULTATER FRA TAK 3.3	44
5.6.1	<i>Transiente resultat</i>	45
5.6.2	<i>Øyeblikksresultater</i>	46
5.7	RESULTATER FRA TAK 5.1	47
5.7.1	<i>Transiente resultat</i>	47
5.7.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	48
5.8	RESULTATER FRA TAK 6.1	49
5.8.1	<i>Transiente resultat</i>	51
5.8.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	53
5.9	RESULTATER FRA TAK 6.2	57
5.9.1	<i>Transiente resultat</i>	59
5.9.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	60
5.10	RESULTATER FRA TAK 6.3	64
5.10.1	<i>Transiente resultat</i>	65
5.10.2	<i>Øyeblikksresultat</i>	67
5.11	RESULTATER FRA REGNEARK	72

6	DISKUSJON	73
6.1	MASSESTRØM	73
6.2	TEMPERATUR PÅ TAKSTEIN.....	75
6.3	SINGULÆRTAP	75
6.4	VURDERING AV RESULTATENE.....	76
6.5	VIDERE ARBEID.....	77
7	KONKLUSJON	78
8	REFERANSER	79
8.1	KILDER	79
8.2	BIBLIOGRAFI.....	80
9	VEDLEGG	81

1 Symbolliste

ρ	Densitet	kg/m^3
λ	Friksjonsfaktor	
ν	Kinematisk viskositet	m^2/s
μ	Kontraksjonskoeffisient	
π	Pi	3,1416
ξ	Singulærtapskoeffisient	
σ	Stefan – Boltzmann konstanten	$5,672e^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
β	Termisk ekspansjons koeffisient	$1/T$
ΔP	Trykkdifferanse	Pa
ΔP_{frik}	Trykktap pga. friksjonstap	Pa
ΔP_{sing}	Trykktap pga. singulærtap	Pa
a	Gass absorpsjons koeffisient	$1/\text{m}$
a, b	Sidelengder	m
A_1	Tverrsnittsareal mellom lekt (m^2)	
A_2	Tverrsnittsareal under lekt (m^2)	
D_h	Hydraulisk diameter	m
g	Gravitasjon	$9,81 \text{ m/s}^2$
h	Høyde	m
H	Total høyde forskjell	m
I	Strålingsintensitet	W
K_t	Kompressibilitetsmodul	$\approx P = 101325 \text{ Pa}$
P	Absolutt trykk	Pa
P_d	Dynamisk trykk	Pa
P_s	Statisk trykk	Pa
P_t	Total trykk	Pa
R	Gasskonstant	J/kgK
Re	Reynoldstall	
s	Strekning	m
T	Absolutt temperatur	K
T_o	Operativ temperatur	K
v	Middelhastighet	m/s
V	Volum	m^3

2 Innledning

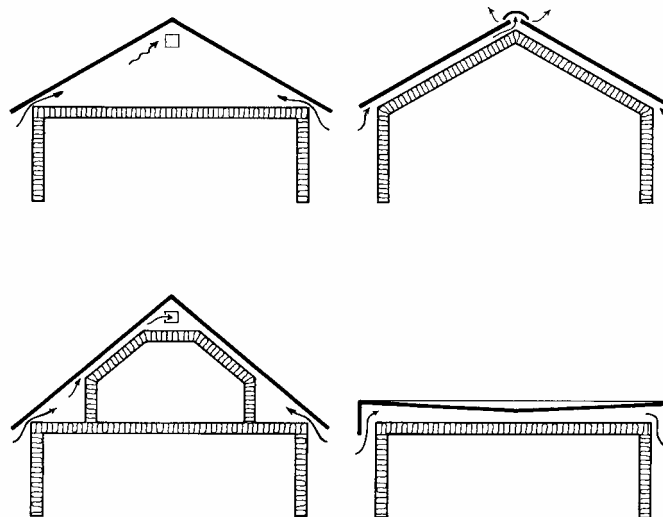
2.1 Hvorfor lufte tak

Isolerte tak over oppvarmede rom må luftes av to grunner:

- Fukt som trenger inn i takkonstruksjonen og byggefukt skal ha mulighet til å tørke ut.
- Takflaten må holdes kald for å forhindre at snøen smelter, og smeltevannet fryser til is ved raften.

Hvordan luftingen av taket blir utført avhenger av takets oppbygning. Figur 2-1 viser prinsipielt hvorledes luftingen bør utføres på forskjellige taktyper. Denne rapporten tar for seg skrå tak med isolasjon i takplanet. Det er to hovedmåter å bygge opp isolerte skrå tak, det er med lufting under undertaket og med kombinert undertak og vindsperre. Kapittel 2.3 vil ta for seg oppbyggingen av taket og prinsipielt hvordan luftningen utføres.

Ved manglende eller dårlig lufting kan det oppstå problemer og skader på taket. Det største problemet ved manglende lufting er isdannelse på taket. Isdannelsen kan føre til flere skadetyper. Dårlig lufting kan også føre til oppfukning av konstruksjonen på grunn av byggefukt eller fukt fra innemiljøet, overoppheting av takkonstruksjonen sommerstid og kondensfare under tekking. Lufting av tak har ikke bare positive sider. Ved store luftekanaler og store åpninger i møne og raft er det lettere for drivsnø og slagregn å trenge inn. Luftekanaler i takkonstruksjonen er generelt uheldig med hensyn på brannspredning. Branngasser kan raskt spres i takflaten gjennom luftekanalene.



Figur 2-1: Prinsipper for lufting av forskjellige taktyper [1].

2.2 Dagens regler for lufting av tak

Dagens regler for lufting av skrå tak er generelle. For lufting under undertak sier reglene hvor høy luftespalten må være i forhold til taklengden, lengden fra raft til møne. For tak med lufting kun mellom opplektet tekking tar en også hensyn til takvinkelen. Byggforsk er i gang

med et forskningsprosjekt som heter ”Klima 2000 – Klimatilpassning av bygningskonstruksjoner”. Klima 2000 er delt opp 14 mindre delprosjekter, og et av delprosjektene til Klima 2000 heter ”P4 Studie av kompakte og luftede isolerte tak”. Delprosjekt P4 har som et av målene å utarbeide mer spesifikke regler for lufting av isolerte tak. Resultatene og erfaringene fra dette prosjektet (Lufting av skrå isolerte tak) skal gå inn som en del av det prosjektet.

2.3 Simulering

I dette prosjektet blir flere takkonstruksjon med kombinert undertak og vindsperre studert ved hjelp av CFD-analyse, (CFD = Computational Fluid Dynamics). Luftstrømningene som går gjennom luftekanalene i taket blir simulert og beskrevet. Dette gjøres med et dataprogram som heter FLUENT. FLUENT er et generelt fluiddynamikk program, som kan brukes til å modellere og simulere strømning, varmetransport, kjemiske reaksjoner og lignende fenomen.

En del vanlige måter å bygge opp taket på blir modellert, og deretter simulert. Gjennom simuleringen finner en data om luftstrømningen gjennom kanalen og temperaturforhold i kanalen og taket.

Denne rapporten legger hovedvekt på å beskrive luftstrømmen som går gjennom taket, og å bestemme temperatur, trykkfordeling, hastigheter og massestrøm gjennom luftekanalen i taket. Rapporten legger også vekt på å sammenligne resultter fra CFD-analyse med resultater fra beregninger med forenklet metoder.

Det er tidligere utført forskningsprosjekt og doktoringeniør avhandlinger på temaet lufting av tak. De har tilfelles at de enten har brukt formelverk til å beregne seg frem til luftstrømningene, eller det har vært utført feltforsøk. I feltforsøkene er det blitt bygd opp modeller av forskjellige taksystem, hvor en da har registrert data for luftstrømmen gjennom luftekanalen i taket. Det er ikke til nå vært brukt avansert datasimuleringsprogram til å analysere effekten av luftekanalene.

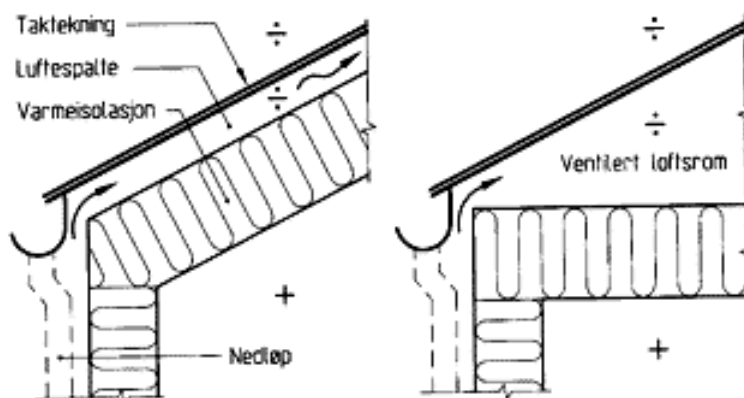
Denne rapporten tar kun for seg en taktype, nemlig et skrått isolert tak med kombinert vindsperre og undertak. Ingen andre taktyper vil bli sett på i prosjektet. Drivkreftene bak luftstrømningen kommer av naturlig oppdrift eller vindtrykk. I denne oppgaven blir kun luftstrømning med naturlig oppdrift simulert. Luftekanalen som blir simulert er en enkel kanal som går fra raft til møne, effekter fra kryssløfting blir ikke tatt hensyn til. Det er heller ikke tatt hensyn til strømningshindringer som ventilasjonshatter og piper.

Rapporten tar først for seg teorien bak resultatene, hvordan FLUENT regner, hvorledes fluiddynamikken virker og hvorfor det er gunstig å lufte tak. Metode kapittelet inneholder informasjon om hvorledes FLUENT og GAMBIT ble brukt til å bestemme luftstrømningen i kanalen. Resultatene for hvert enkelt taktilfelle blir presentert, med en diskusjons og oppsummering av resultatene.

3 Teori

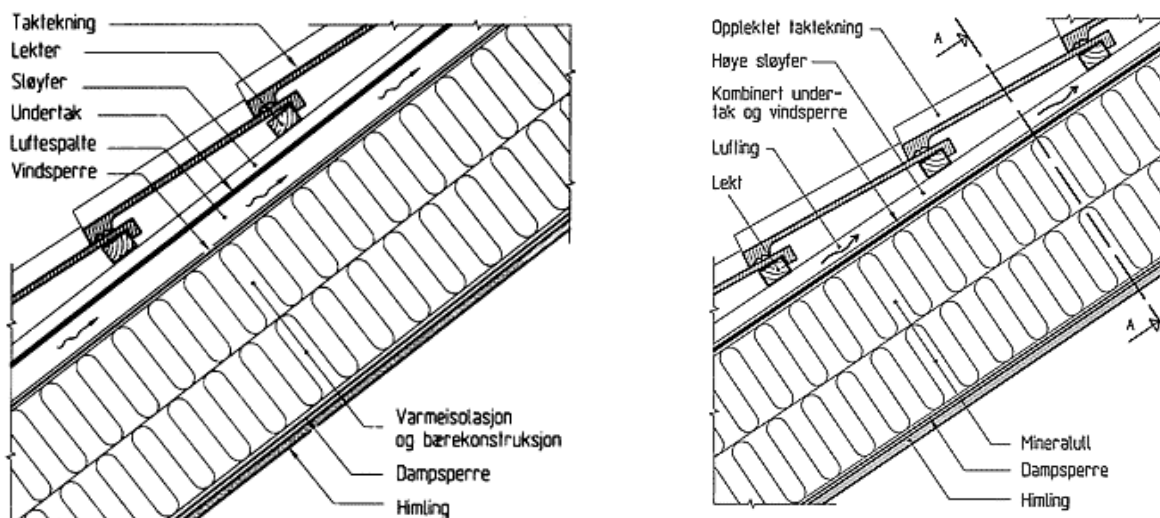
3.1 Lufting av tak

Tak deles inn i to hovedtyper: varme- og kaldetak, avhengig om de har innvendig eller utvendig nedløp av vann og om de er luftet. Varme tak har som regel innvendig nedløp og er utført uten lufting under tekkingen. Varme tak kalles ofte kompakte eller massive tak, og er mye brukt til flate tak og tak med liten takvinkel. Kalde tak har utvendig nedløp av vann og må derfor ha lufting under tekkingen for at snø på taket ikke skal smelte, renne ned til raften og fryse til is. Kalde tak kan ha isolasjonen i takplanet mellom sperrene, eller en kan isolere i golvplanet, og dermed ha et kaldt loft. Dette er den beste løsningen med hensyn på å unngå kuldebroer og fuktskader [2]. Figur 3-1 viser de to forskjellige isolasjonsprinsippene.



Figur 3-1: Konstruksjonsprinsipper for tak med isolasjon i takplanet til venstre og tak med kaldt loft til høyre [2].

En ønsker ofte å utnytte arealet på loftet, og da må en isolere i takplanet for å kunne ha et oppvarmet rom. Det er blitt mer og mer populært å utføre isoleringen på denne måten. Det finnes to hovedmetoder å utføre luftingen av skrå tretak med isolasjonen i takplanet. Disse er skrå tretak med lufting under undertak og skrå tretak med kombinert undertak og vindsperre. Figur 3-2 viser hovedprinsippene for hvordan et skrått tretak skal luftes.



Figur 3-2: Isolert skrått tretak med lufting under undertak til venstre og skrått tretak med kombinert undertak og vindsperre til høyre [3 og 4].

Bruk av tak med lufting under undertak er den tradisjonelle måten å utføre lufting av et tak med isolasjon i takplanet. Denne type lufting må alltid brukes når en legger taktekking av shingel, folie eller annen takking uten opplekting. Metoden med lufting under undertak må også brukes for opplektet tekking når undertaket er diffusjonstett. Denne type skrå tretak egner seg best for småhus og med hus med enkel saltaksform eller pulttak der lengden fra raft til møne er under 15 meter [3].

Ved bruk av kombinert undertak og vindsperre gjøres all luftingen av taket direkte under opplektet tekning. Undertaket må da samtidig være vann og lufttett og tilstrekkelig dampåpent, og isolasjonen kan derfor legges helt oppunder undertaket. Undertaket må være dampåpent for at eventuell fukt i konstruksjonen skal ha mulighet til å tørke ut. Undertaksproduktene som brukes til kombinert undertak og vindsperre har begrenset tetthet mot vannlekasjer og bør derfor brukes sammen med taktekking som har god tetthet mot slagregn. Denne type takkonstruksjon egner seg best til tretak som isoleres langs hele takflate fra møne til raft. Minste takvinkel på et slikt tak er ca 20 grader, og lengden på taket bør ikke være mer enn 15 meter [4].

For tak med kombinert undertak og vindsperre og lengde på 7 meter eller mindre gjelder følgende regler, per 2003, for lufspaltehyden:

Takvinkel $\leq 33^\circ$:	36 mm
Takvinkel $34^\circ - 39^\circ$:	30 mm
Takvinkel $\geq 40^\circ$:	23 mm

For tak med lengde lenger enn 7 meter, bør tekkingen lektes opp ytterlige ca. 100 mm [4].

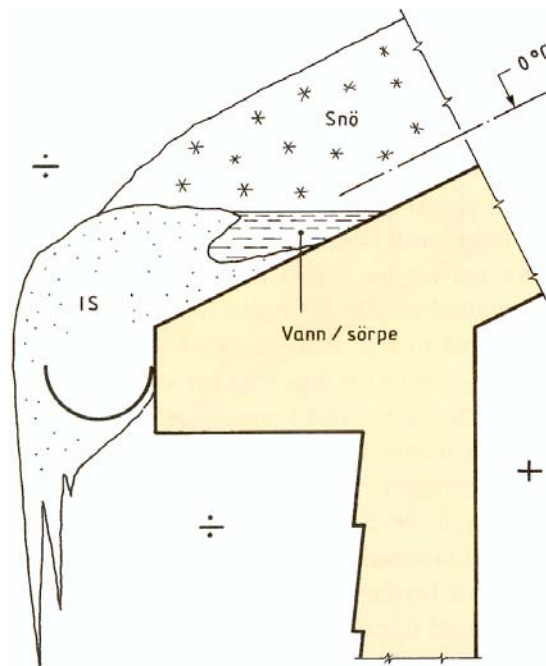
Skrå tretak med lufting under undertak og med en lengde på 7 meter eller mindre er minste krav til luftehøyde 50 mm. For tak som er lenger enn 7 meter bør luftespalten økes til 75 – 100 mm [5].

3.1.1 Skader og problemer

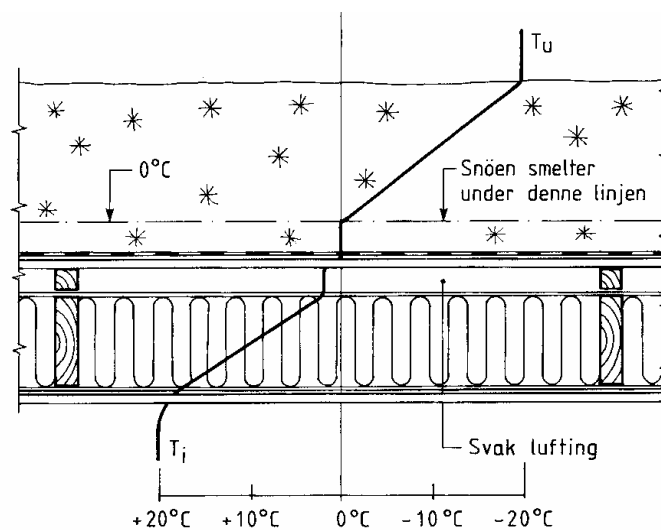
Snøsmelting

Som tidligere nevnt lufter en taket for å hindre at snøen smelter og for å ventilere bort fukt. Snøsmelting på taket starter når temperaturen i sjiktet mellom taket og snøen blir null grader eller mer. Snøen smelter til vann og renner nedover takflaten. Når vannet kommer ned til raften, som ikke har en oppvarmet flate under seg, vil vannet fryse til is hvis temperaturen er under null grader (se Figur 3-3). I tillegg til størrelsen og utformingen av luftkanalen finnes det mange andre faktorer som spiller inn når det gjelder snøsmelting på taket. Det vil oppstå en varmestrøm innefra og utover som er avhengig av isolasjonsmengden i taket. Derfor er eldre hus med dårlig isolering mer utsatt for snøsmelting på taket og de skader dette kan føre med seg. Med mye snø på taket vil snøen ha en isolerende effekt slik at temperaturen under snøen vil stige. Figur 3-4 illustrerer dette. Luftlekasjer innenfra vil føre med seg varm fuktig luft som øker temperaturen i luftkanalen, i tillegg til å kunne kondensere og skape fuktproblemer. Luftlekasjer og kondensasjon i isolasjonen fører også til at isolasjonsverdien til isolasjonen blir redusert. Derfor er det viktig med en riktig og god utførelse av dampsperre og vindsperre i skrå isolerte tak. Utetemperaturen har selvsagt en stor innvirkning på om det blir snøsmelting. Er det veldig kaldt vil temperaturen i sjiktet mellom taket og snøen aldri komme

opp i null grader. I tillegg vil også solinnstråling og langbølget avstråling mot himmelen ha innvirkning på temperaturen i grensesjiktet [6].



Figur 3-3: Når snøen smelter på taket kan det renne ned til raften og fryse til is [1].



Figur 3-4: Temperaturfordelingen i et tak med snø [1].

Fuktventilasjon

Den andre grunnen til at vi lufter takene er for å ventilere bort fuktighet. Fuktighet i taket kan komme av mange forhold for eksempel innebygd byggfukt, fukt blir transportert ut i taket innen fra, lekkasjer på grunn av nedbør eller kondensasjon i taket.

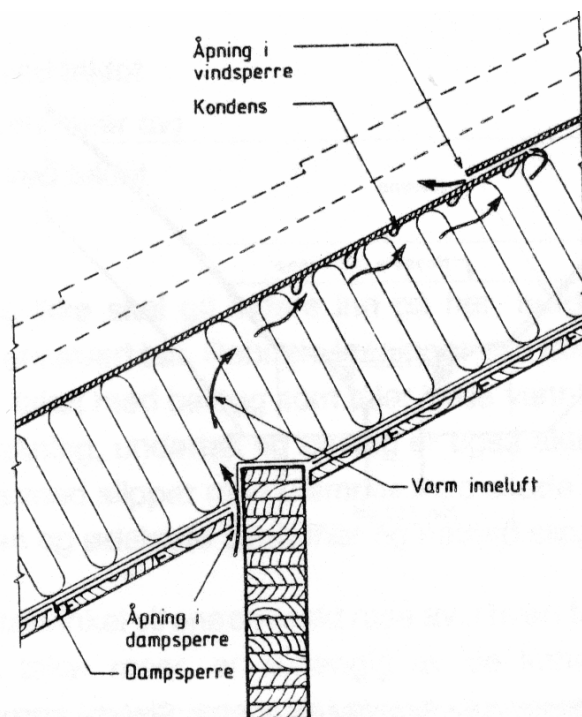
Byggfukt

Byggfukt er fuktighet i byggematerialene som var der før bygging eller som har kommet inn i materialene under bygging. Treematerialene en bruker i dag har ofte overskudd av fuktighet i

forhold til luften i takkonstruksjonen. Et fuktinnhold på 20 vektprosent er ikke uvanlig i nytt trevirke. Denne byggfukten må ventileres bort, dette gjelder spesielt for nybygg og ombygging [5].

Fukt innenfra

Gjennom store deler av året er luftens relative fuktinnhold større inne enn ute. Dette fører til at partialtrykket til vanndampen er større inne enn ute, vi har en trykkgradient som er rettet utover. Det blir et potensial for netto fukttransport utgjennom takkonstruksjonen. Dette kan skje både ved konveksjon der luftens totaltrykkforskjell er drivkraften og ved diffusjon der damptrykkforskjellen er drivkraften. Tak utføres med en innvendig dampspærre som skal hindre denne fukttransporten i takkonstruksjonen. Problemer kan oppstå hvis det oppstår hull, rifter eller dårlige skjøter, da kan fukt transporteres utover i taket. Derfor er det viktig å ha ei mest mulig dampåpen vindspærre slik at fukten ikke blir sperret inne mellom to damptette sjikt, men kan tørke opp utover mot luftkanalen. Figur 3-5 viser hvordan luft som slipper gjennom dampspærren stiger opp i konstruksjonen og kan forårsake oppfukning og skader.

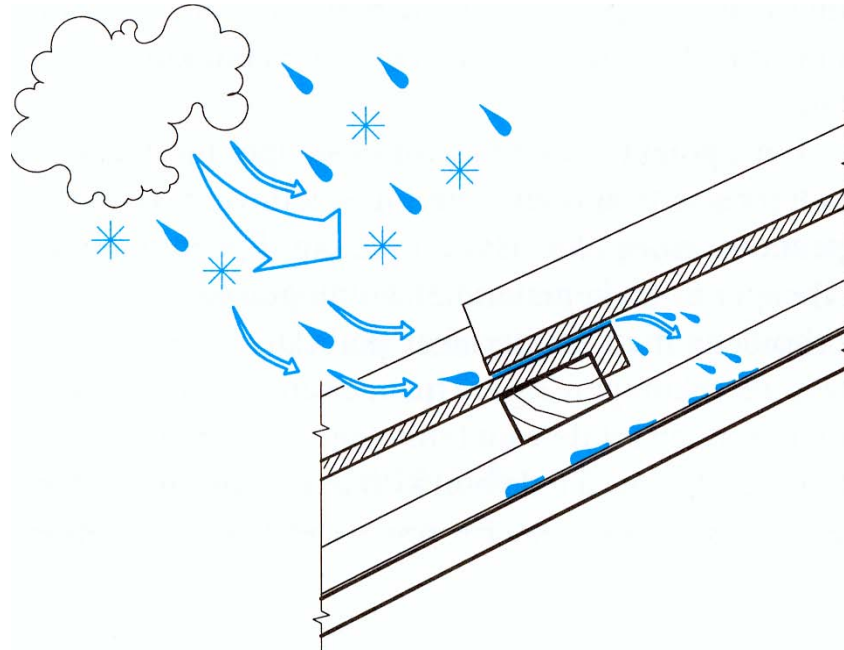


Figur 3-5: Ved hull i dampspærren vil varm fuktig luft trenge opp i takkonstruksjonen [6].

Inntrenging av fukt utenfra

Luftekanalen i taket har som regel et innløp i raften og et utløp i mønet. Dette kan føre til at regn og snø trenger inn i takkonstruksjonen. Nedbør og smeltevann kan også trenge inn ved skjøtene i tekkingen. Fordi vindhastigheten er størst ved mønet, er risikoen for inndrev av snø og regn størst der. Dette tar man hensyn til ved å variere spalteåpningen fra landsdel til landsdel. I Nord-Norge, der det er store snømengder og ofte kombinert med mye vind, er det vanlig med tak uten åpning i mønet i det hele tatt. Det er også vanlig å legge inn et mønebånd og en plastfolie. Plastfolien fører regn og snø som kommer inn over på undertaket, mens mønebåndet hindrer store mengder snø å trenge inn. Plastfolien og mønebåndet i mønet øker strømningsmotstanden i mønet, noe som er med på å redusere luftstrømmen gjennom taket.

Innløpet ved raften er ikke like utsatt for snø og regn inndrev som mønet. I enkelte deler av landet med mye fokksnø kan noe snø trenge inn i takkonstruksjonen. I det meste av landet regnes det som tilstrekkelig å tette innløpet med netting mot innsekter og fugler [6]. Inntrenging av vann gjennom taktekkingen er avhengig av takhelningen og utformingen på skjøtene til taksteinen. Tak med kombinert vindsperre og undertak er mer utsatt enn tak med lufting under undertak hvis det trenger vann gjennom tekkingen. Kombinert vindsperre og undertak er ikke like vanntette og vann kan renne ned gjennom isolasjonen. Det vil også ta lenger tid å tørke ut et slikt tak.



Figur 3-6: Nedbør og smeltevann vil kunne lekke gjennom ende- og sideomleggene på taksteinen [5].

Kondensasjon i taket

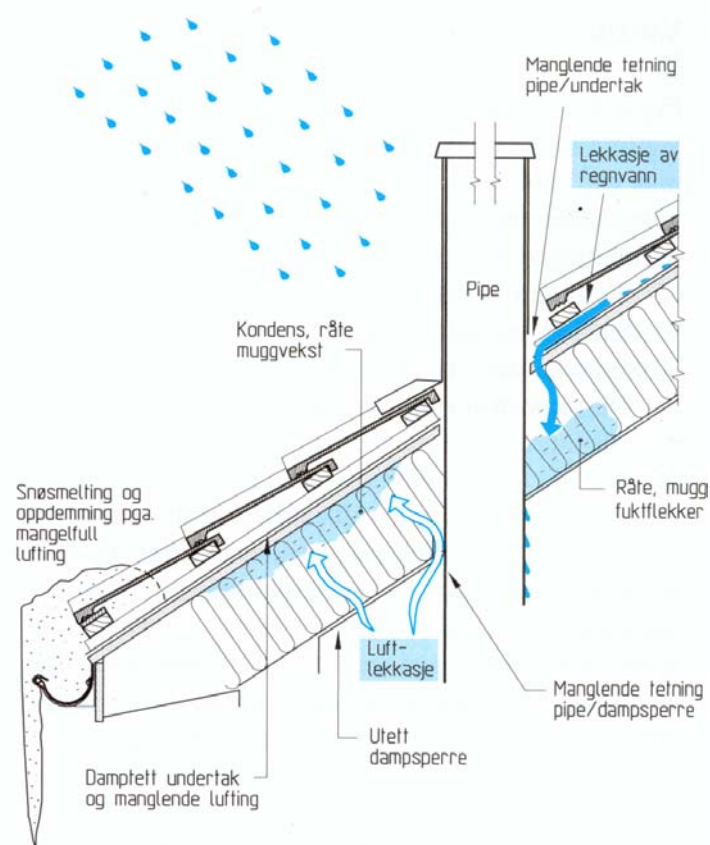
Kondensasjon kan oppstå når lufttemperaturen i kanalen blir lavere enn temperaturen til uteluften. Dette fenomenet kan oppstå når taket i klarvær står i langbølget strålingsutveksling mot himmelen. Dette kan føre til at kanalluften blir flere grader kaldere enn uteluften, og luften kan nå metningspunktet og kondens blir avfelt. Dette kan for eksempel skje når uteluften stiger over null grader og det fortsatt ligger snø på taket som kjøler ned kanalluften, da blir kanalluften kaldere enn uteluften. Dette er som regel ikke noe problem i seg selv, da det er snakk om små vannmengder som raskt tørker opp. Større problem kan oppstå hvis varm og fuktig luft lekker opp i taket fra innemiljøet, da kan store mengder vann kondensere i takkonstruksjonen.

Skader

Ovenfor er det beskrevet argumenter for at en skal lufte taket. Om taket ikke er tilfredsstillende luftet kan noen av de problemene som er beskrevet oppstå, disse problemene kan føre med seg mange typer skader på taket. Når snø smelter på taket og vannet fryser til is ved raften, kan taket bli stående under vanntrykk, og hvis ikke tekkingen står mot dette vanntrykket, fører dette til lekkasjer i taket. Is kan også sprenges i stykker taktekkingen, vinkelrenner, takrenner og nedløp. Ved isdannelse ved raften vil det ofte oppstå istapper som kan falle ned og skade personer eller underliggende takflater.

Tekking som er mest utsatt for frostsprengning er eldre typer asfaltbelegg og tegltakstein. Moderne tekkingsmaterialer har betraktelig høyere frostmotstand, og frostsprengning er ikke noe stort problem på moderne tak. Problemer kan oppstå hvis stigtrinn, ventilasjonshatter eller lignende blir revet ned av is og snøras [6].

Oppfukting av konstruksjonen innenfra eller utenfra kan blant annet føre til råte på treverk, muggvekst, vannlekkasjer til andre deler av konstruksjonen og fuktmerker på innvendige overflater. Figur 3-7 viser vanlige oppfuktingsmekanismer og skadetyper i skrå isolerte tak.



Figur 3-7: Typiske oppfuktingsmekanismer og skadetyper i skrå isolerte tak [5].

3.2 FLUENT

FLUENT er et CFD-program (CFD = Computational Fluid Dynamics) til å modellere og simulere fluid strømming, varmetransport, massetransport, kjemiske reaksjoner, mekanisk bevegelse og lignende fenomen. CFD oversatt til norsk blir beregning av fluid dynamikk, og det er akkurat det FLUENT gjør. FLUENT beregner de aller fleste typer strømningsbilde både i 2D og 3D. For å kunne simulere strømming må systemet kunne bygges opp numerisk.

Først må en bygge opp geometrien til det systemet eller innretningen en vil studere. Deretter generer en et rutenett for geometrien. Dette gjøres i et forprosesseringsprogram som generer ei datafil FLUENT kan lese. GAMBIT er et slikt program, som står for "Geometry And Mesh

Building Intelligent Tollkit.” Geometrien bygges opp som i et vanlig DAK tegneprogram. Beregningene i FLUENT er basert på finite volum metode (numerisk metode), derfor må en bygge opp et rutenett over konstruksjonen. I GAMBIT må en også angi hvilken type grensebetingelser systemet er omgitt av, og hvilke områder som er luft og hvilke områder som er fast materiale. Tilslutt genererer en ei datafil til det CFD-programmet som skal simulere systemet.

Det teoretiske systemet blir importert til FUEENT, der en må angi hvilke beregningsmodeller en skal regne med. Dette kan for eksempel være om en skal gjøre beregninger med varmeledning, strålingsutveksling mellom flater, forbrenning eller turbulens. Alle materialeegenskaper og grensebetingelser må angis. Så lenge en kjenner egenskapene til materialene kan alle typer materialer tas med i simuleringen. I tillegg må en angi hvilket forhold systemet skal beregnes i, det vil si hvilke absoluttrykk, gravitasjon, temperatur og densitet som et utgangspunkt for beregningene.

Når en kjører simuleringen bygger programmet opp et ligningssystem for hvert rute som ble laget i GAMBIT, basert på generelle bevaringsligninger for foreksempel masse, energi og bevegelsesmengde. De algebraiske ligningene for hver rute blir løst numerisk. Beregningene må gjentas flere ganger for å redusere feilene i beregningene, det trengs ofte mange gjentakelser for å oppnå konvergens. Det vil si at løsningen av ligningssystemet går mot en bestemt løsning. Løsningen kan enten være stasjonær eller transient. Er løsningen stasjonær er den ikke tidsavhengig. Transient løsning vil si at løsningen er tidsavhengig, at den varierer med tiden. Alle beregningene i FLUENT er gjort i versjon 6.1.22.

Etter at beregningen er ferdig vil en analysere simuleringen, dette er det gode muligheter for i FLUENT. En kan studere fargeplott av de fysiske størrelsene som temperatur, trykk, hastighet, densitet og stråling. En kan få tallverdien av de fysiske størrelsene i hvilket som helst punkt eller snitt i geometrien, eller en kan få generert grafer og kurver av verdiene.

3.3 Strømningsteori

Strømningen gjennom luftespalten i isolerte skrå tak kan beskrives med fluid dynamiske begreper og regler. Følgende kapittel vil beskrive de teoretiske begrepene og modeller som brukes ved beregningene av luftstrømningen i taket.

En strømning i gass eller væske kan beskrives ved hjelp av uttrykkene laminær og turbulent strømning, inkompressibel og kompressibel strømning og transient og stasjonær strømning.

To forskjellige strømningstyper kan opptre i en kanal, det er laminær og turbulent strømning. Laminær strømning karakteriseres ved at fluidet beveger seg rolig uten hurtige variasjoner i retning og hastighet. Laminær strøm oppstår kun ved lave hastigheter. Ved høyere strømningshastigheter oppstår turbulent strømning. Turbulent strømning kjennetegnes ved hurtige variasjoner i retning og hastighet. For å undersøke om en strøm er laminær eller turbulent brukes Reynolds tallet. Reynolds tallet er definert som [7]

$$\text{Re} = \frac{vD_h}{\nu}, \quad 3-1$$

Hvor: v = Middelhastigheten i strømmen (m/s)
 D_h = Hydraulisk diameter (m)
 ν = Kinematisk viskositeten (m^2/s)

For rektangulære tverrsnitt kan hydraulisk diameter bestemmes ved

$$D_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}, \quad 3-2$$

Hvor: a og b = Sidekanter i rektangelet.

For strømnings med Reynolds tall under 2000 er strømmingen som regel laminær, og for Reynolds tall over 4000 er strømmingen som regel turbulent [7]. For strømnings i området mellom disse verdiene, overgangsområdet, kan strømmen opptre både som laminær og turbulent. Den verdien av Reynolds tall hvor strømmen går fra å være laminær til turbulent kalles kritisk Reynolds tall [8]. Størrelsen av kritisk Reynolds tall avhenger om det er forstyrrelser i strømmen som kan starte turbulensen. Slike forstyrrelser reduserer kritisk Reynolds tall, forstyrrelsene kan være skarpe kanter, bend i kanalen eller synkende strømningshastighet. Strømning uten forstyrrelser har en høyere kritisk Reynolds tall.

Luftstrømnings i ventilasjonskanaler og strømnings i bygningskonstruksjoner er det en kaller inkompressibel. Det vil si at den ikke forandrer volum når den blir utsatt for trykkpåkjenning. For at en strømning skal være inkompressibel må følgende gjelde [8]:

$$\frac{\Delta P}{K_t} \ll 1 \quad 3-3$$

Hvor: ΔP = Trykkdifferanse på strømmingen.
 K_t = Kompressibilitetsmodul $\approx p = 101325 \text{ Pa}$

Når strømmingen varierer med tiden kalles den for transient strømning, den dynamiske effekten av strømningsvariasjonen i tid har innvirkning på strømningsforløpet [3]. Strømnings som ikke varierer med tiden kalles stasjonær strømnings.

3.3.1 Trykk i strømning

Prosjektrapporten omtaler mange trykkbegrep, og siden trykk er en så viktig parameter i beregningene, vil det følge forklaringer og eksempler på de forskjellige trykkbegrepene som går igjen i rapporten.

Absolutt trykk

Trykket i et stillestående fluid er definert som normaltrykket per arealenheter på en plan overflate nedsenket i fluidet. Trykket kommer av bombardementet av fluidmolekyl. Absolutt trykk er uttrykt ved den ideelle gassloven, hvor absolutt nulltrykk kun finnes i perfekt vakum [9].

$$P = \frac{\rho RT}{m_g} \quad 3-4$$

Hvor: P = Absolutt trykk (Pa)
 ρ = Densitet til fluidet (kg/m³)
 T = Absolutt temperatur (K)
 R = Gass konstant (8,314 J/molK)
 m_g = Molmasse (kg/mol)

Atmosfærisk trykk

Atmosfærisk trykk er det absolutte trykket som oppleves ute ved havets overflate, men det varierer med høyde over havet og med klimatiske forandringer. Det atmosfæriske trykket er bestemt gjennom en internasjonal avtale til å være 101330 Pa [7].

Gage trykk

I mange tilfeller er det praktisk å måle trykket relativt til det lokale absolutte trykket, og målt på denne måten kalles trykket gage trykk. Det absolutte trykkes kan bestemmes ved å legge til det atmosfæriske trykket. Ved et gage trykk på null vil det absolutte trykket være lik det lokale atmosfæriske trykket. Absolutt trykk vil alltid være positivt, men gage trykk kan både være positiv og negativ. Det atmosfæriske trykket kalles i FLUENT operativt trykk. Absolutt trykk kan da bestemmes ved [10]:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atmos}} + P_{\text{gauge}} \quad 3-5$$

Statisk trykk

Når fluidet er i bevegelse, kommer det noen andre trykk begrep inn i bildet. Et av disse er statisk trykk. Statisk trykk kan måles i en strøm ved at en måler det absolutte trykket på en liten flate som står parallell med strømningsretningen. Statisk trykk er det trykket som vil virke på kanalveggen, eller på en gjenstand som flyter med strømmen. Figur 3-8 viser forskjellen på statisk trykk og dynamisk trykk [9].

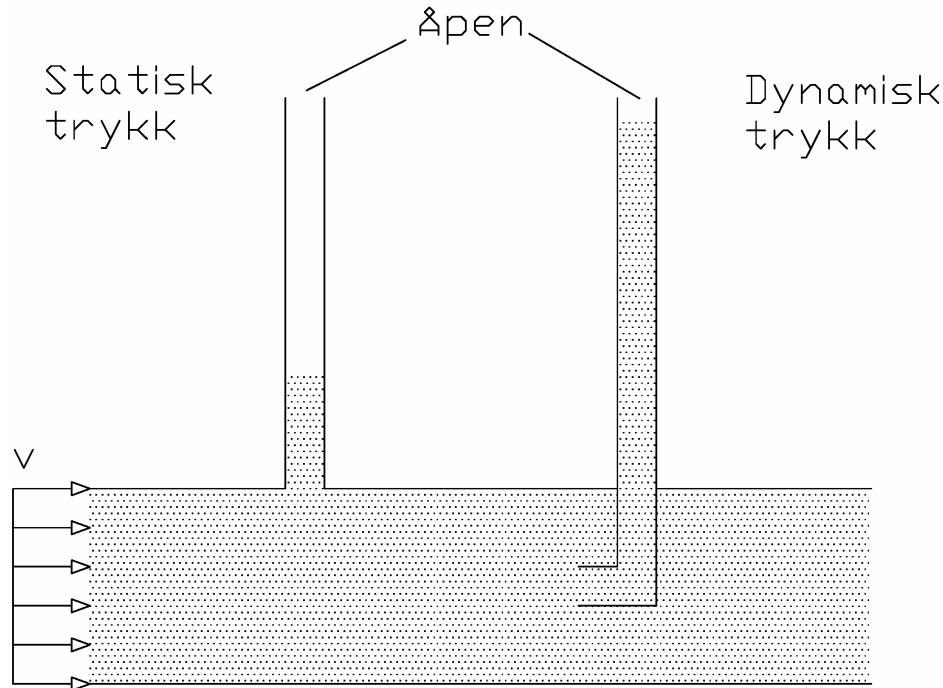
Dynamisk trykk

Fra Bernullis ligning er dynamisk trykk definert som [8]:

$$P_d = \frac{1}{2} v^2 \rho \quad 3-6$$

Hvor: v = Middelhastighet i strømmen (m/s)
 ρ = Densitet til fluidet

Stikker en et rør ned i en strøm med innløpet mot strømningsretningen, som på Figur 2-1, måler en det dynamiske trykket i fluidet ved å se på høyden på fluidsøylen. Det samme prinsippet brukes i pitot-rør for å bestemme det dynamiske trykket.



Figur 3-8: Forskjellen mellom dynamisk trykk og statisk trykk

Total trykk

Summen av dynamisk-og statisk trykk er totaltrykket. Totaltrykket kan bestemmes ved å måle trykket på en liten flate som står vinkelrett på fluidstrømmen [9].

3.3.2 Drivkrefter

Det er to typer drivkrefter for luftstrømning i et tak, vindkrefter og oppdriftskrefter. Vinden er største og viktigste drivkraften, vinden skaper trykkforskjeller mellom inn- og utløp og dermed får vi påtvunget konveksjon. Når det ikke blåser er det termisk oppdrift som kan være drivkraften bak luftstrømningene [6].

Vindtrykk

Vindtrykk er ofte den viktigste og største drivkraften for luftstrømning gjennom luftekanalen i taket. Drivtrykket fra vinden er avhengig av forskjellen i statisk trykk mellom kanalens innløp og utløp. Det statiske trykket kan bestemmes når den ytre trykkkoeffisienten på taket er kjent. Denne må måles eller så kan formfaktorene for tak fra vindlaststanderen (NS 3491-4) brukes. Vindtrykk som drivkraft vil ikke bli nærmere omhandlet i denne rapporten, siden vi har valgt å se på mest mulig ugunstige forhold for luftgjennomstrømning.

Termisk oppdrift

I vindstille perioder kan termisk oppdrift sørge for luftvekslinger i luftekanalen, på grunn av densitets forskjeller mellom kald og varm luft. Kanalluften kan få varmetilførsel innenfra, kanalluften blir da varmere og lettere enn uteluften og vi får en luftstrøm fra raft til møne. Denne varmetilførselen, og dermed luftstrømningen, blir redusert med økende isolasjonsmengde. Kanalluften kan bli kaldere og dermed tyngre en uteluften ved sterk stråling mot himmelen nattetid. Da kan vi få en luftstrøm som går fra møne til raft.

Temperaturen og densiteten til luften varierer langs kanalen. Drivtrykket fra termisk oppdrift kan bestemmes ved integrasjon fra innløp til utløp [8].

$$\Delta P = \rho_e \cdot g \cdot H - g \cdot \int_i^u \rho_g(h) \cdot dh \quad 3-7$$

Hvor: ΔP = Drivtrykk (Pa)

$\rho_g(h)$ = Kanalluftens lokale densitet i den aktuelle høyden (kg/m^3)

ρ_e = Densitet til uteluften (kg/m^3)

H = Total høydeforskjell (m)

g = Gravitasjon (m/s^2)

3.3.3 Energitap

Antar at luftstrømmen i takkanalen er inkompressibel, stasjonær og laminær. Kan derfor bruke etablerte beregningsmetoder for kanalstrømning trykktap og friksjon.

For et punkt i en friksjonsfri strømning, og for et lite volum luft med en konstant densitet, kan en beskrive den totale mekaniske energien med energiligningen [8]:

$$\frac{\rho V}{2} v^2 + p_s V + \rho V g h = \text{konstant} \quad 3-8$$

Hvor: ρ = Densitet (kg/m^3)

V = Volum (m^3)

v = Fart (m/s)

P_s = Statisk trykk (Pa)

= Kinetisk energi (J)

PV = Trykkenergi (J)

$\rho V g h$ = Potensiell energi (J)

Ved strømning i luftkanalen i tak er det forskjeller i potensiell energi som utgjør drivkraften. En tar også hensyn til friksjonstap og singularørtap i kanalen. Ser en på strømning fra et punkt med trykk P_1 og til et punkt med et trykk P_2 får energiligningen følgende form:

$$\frac{\rho}{2} v_1^2 + p_1 + \rho g h_1 = \frac{\rho}{2} v_2^2 + p_2 + \rho g h_2 + \Delta p_t \quad 3-9$$

Hvor: ΔP_t = Energitap på grunn av friksjon og enkelttap over strekningen.

Energitap fra strømning i en kanal skjer på to måter:

- Singularørtap (enkelttap)
- Friksjonstap

Singulærtap

Singulærtap får en på steder i kanalen der det skjer momentane endringer i strømmen. Det er ved tre hovedtilfeller det oppstår singulærtap: ved innsnevring av kanaltverrsnittet, ved økning av kanaltverrsnittet og ved rettningsendringer. Singulærtap kan uttrykkes ved [7]:

$$\Delta P_s = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad 3-10$$

Hvor: ΔP_s = trykktap (Pa)

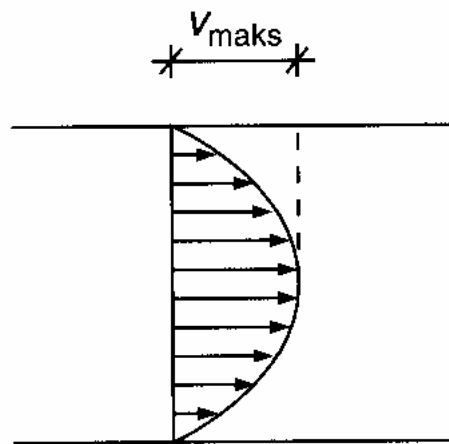
ξ = Singulærtapskoeffisient

ρ = Densitet (kg/m³)

v = Fluid hastighet (m/s)

Friksjons tap

Når et fluid strømmer gjennom en kanal i lav hastighet (laminærstrømning) blir hastighetsprofilen for væskestrømmen omtrent som i Figur 3-8. Friksjonen mellom veggen og fluidet gjør at hastigheten er lik null helt inntil kanalveggen, og øker til maksimal hastighet i sentrum av kanalen. Økningen i hastighet fra veggen og ut mot midten følger en tilnærmet parabelkurve. Siden de enkelte partiklene beveger seg med ulik hastighet, oppstår det skjærspenninger mellom fluidpartiklene og mellom fluidpartiklene og kanalveggen. Det er skjærspenningene som gir friksjonstap. Størrelsen på tapet ved laminær strøm er avhengig av hastigheten på fluidet, hydraulisk diameter for kanalen, densiteten på fluidet og friksjonsfaktoren, som igjen er avhengig av reynoldstallet og viskositeten på fluidet.



Figur 3-9: Hastighetsprofil over et kanaltverrsnitt (6).

Energitalp på grunn av friksjon er gitt ved formelen [9]:

$$\Delta P_f = \lambda \frac{l}{D_h} \rho \frac{v^2}{2} \quad 3-11$$

Hvor: ΔP_f = Energitalp (J)

λ = Friksjonsfaktor

D_h = Hydraulisk diameter

$\rho \frac{v^2}{2}$ = Dynamisk trykk

Friksjonsfaktoren λ avhenger om strømmen er laminær eller turbulent, i laminær strøm er friksjonsfaktoren omvendt proporsjonal med reynolds tall. For laminær strøm i et rektangulært tverrsnitt har friksjonsfaktoren form som i Tabell 3-1.

Tabell 3-1: Friksjonsfaktor avhenger av reynoldstallet og utformingen av kanalen [7].



$$\lambda = \frac{\text{Tabellverdi}}{\text{Re}}$$

a/b	$\lambda * \text{Re}$
0	96,00
1/20	89,91
1/10	84,68
1/8	82,34
1/6	78,81
2/5	72,93
1/2	65,47
3/4	62,19
1	56,91

Når en tar med tap fra friksjon og singulærtap kan en skrive det totale trykktapet som:

$$\Delta P_t = \frac{\rho}{2} v_g^2 \left(\lambda \frac{l}{D_h} + \sum K \right) \quad 3-12$$

Hvor: $\sum K$ = Singulærtapsfaktorer for innløp, innsnevring, utvidelser, rettningsendringer og utløp for kanalstrømmen.

3.4 Beskrivelse av regneark

Det er utarbeid et regneark for beregning av luftgjennomstrømning, trykktap og drivtrykk i luftekanalen i taket. Regnearket er bygd opp etter vanlig fluid dynamisk regelverk. I regnearket må det angis geometriparametere, temperatur data, eventuell vindpåkjønning, faktorer for vindtrykk og midlere lufthastighet i kanalen. Verdien for lufthastigheten er en verdi en må prøve seg frem med, en må finne den rette hastigheten slik at drivtrykket og trykktapet blir like stor.

3.4.1 Drivtrykk

Drivtrykket består av naturligoppdrift og vindtrykk. Siden prosjektet tar for seg tilfeller med vindstille forhold blir heller ikke drivkrefter fra vindtrykk beskrevet her. Så i dette tilfelle bestemmes drivtrykket fra densitet forskjeller ved innløp og utløp og høydedifferansen mellom innløp og utløp.

$$\Delta P = (\rho_{\text{innløp}} - \rho_{\text{utløp}}) g H \quad 3-13$$

Hvor: $\rho_{\text{innløp}} = \text{Densitet ved innløp (kg/m}^3\text{)}$
 $\rho_{\text{utløp}} = \text{Densitet ved utløp (kg/m}^3\text{)}$
 $g = \text{Tyngdens akselerasjon (m/s}^2\text{)}$
 $H = \text{Høydeforskjell mellom innløp og utløp}$

Densiteten ved raft og møne bestemmes i regnearket ut fra temperaturen i raft og møne.

$$\rho_{\text{innløp}} = \rho_0 \cdot \frac{273 + 20}{273 + t_{\text{innløp}}} \quad 3-14$$

$$\rho_{\text{utløp}} = \rho_0 \cdot \frac{273 + 20}{273 + t_{\text{utløp}}} \quad 3-15$$

Hvor: $\rho_0 = 1,205 \text{ kg/m}^3$

3.4.2 Trykktap

Trykktapet i luftekanalene består av to typer tap, det er friksjonstap og singulærtap. I regnearket kan en velge om en vil regne med friksjon i systemet eller ikke.

Singulærtap

Singulærtapene bestemmes etter ligning 3-10. Regnearket bestemmer singulærtap for raft, møne og steinleker. En kan summere opp alle singulærtapene til slutt for å finne totalt trykktap på grunn av singulærtap. For å bruke ligning 3-10 må en kjenne singulærtapskoeffisientene.

Lekt

Når luftstrømmen passerer ei lekt oppstår det et singulærtap ved innsnevringen og et ved utvidelsen av kanalen etter lekten. Så det må bestemmes en singulærtapskoeffisient ved innsnevring og en ved utvidelsen. I regnearket er singulærtapskoeffisienten ved innsnevring bestemt som [8]:

$$\xi_{\text{inns.}} = \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 \quad 3-16$$

Hvor: $\mu = \text{kontraksjonskoeffisient}$

Kontraksjonskoeffisienten bestemmes som en funksjon av arealforholdet A_2/A_1 , hvor A_1 er tverrsnittsarealet før innsnevring og A_2 er tverrsnittsarealet etter innsnevring [8].

$$\mu = 1,1509 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^4 - 1,5258 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^3 + 0,7804 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 - 0,0069 \left(\frac{A_2}{A_1} \right) + 0,6012 \quad 3-17$$

Ved utvidelse av kanalen bestemmes singulærtapskoeffisienten i regnearket ved [8]:

$$\xi_{utv.} = \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad 3-18$$

Hvor: $A_2 =$ Tverrsnittsareal under lekt (m^2)
 $A_1 =$ Tverrsnittsareal mellom lekt (m^2)

Ved å legge sammen singulærtapskoeffisientene fra innsnevring og utvidelse, og sette de inn i ligning 3-10 kan en bestemme singulærtapet over en lekt.

Raft

Når luften passerer raften oppstår det et singulærtap, dette består av tap ved innsnevring og ved utvidelse. For å bestemme singulærtapet over raften må singulærtapskoeffisientene for raft bestemmes, det blir en koeffisient for innsnevring og en for utvidelse. Ved å summere disse får en singulærtapskoeffisienten for hele raften. Dette er analogt med det som skjer når strømmingen passerer lektene. Singulærtapskoeffisienten for innsnevringen bestemmes ut fra ligning 3-16. Arealforholdet mellom uteluften og førstedel av kanalen blir null.

Kontraksjonskoeffisienten bestemmes da fra ligning 3-17. Når luften strømmer fra innsnevringen i innløpet til kanalen blir det et singulærtap, singulærtapskoeffisienten fra denne utvidelsen bestemmes fra ligning 3-18. En kan så bestemme det totale singulærtapet for raft ved å legge sammen disse singulærtapskoeffisientene og bruke summen i ligning 3-10.

Møne

Singulærtapet i mønet består som for lektene og raften av innsnevring og utvidelse, i tillegg består det av ei retningsendring. Singulærtapskoeffisientene for innsnevring og utvidelse bestemmes som for lektepasseringene og raften ved ligningene 3-16, 3-17 og 3-18. For singulærtapet ved en retningsendring er vinkelen på retningsendringen viktig. I regnearket er singulærtapskoeffisienten ved retningsendring i mønet bestemt ved:

$$\xi_{bend} = \frac{\alpha}{90} \cdot 1 \quad 3-19$$

Hvor: $\alpha =$ retningsendring på strømmen

Friksjonstap

Friksjonstapet over strekningen kan bestemmes ut fra ligning 3-11, verdiene som inngår blir bestemt ut fra ligninger som er beskrevet i kapittel 3.2.

4 Metode

Prosjektet har bestått av litteraturstudium og datasimuleringer. Litteraturstudiets hensikt var å gi teoretisk grunnlag for oppgaven. Dette har også hjulpet til å danne et bilde av hvilke forskningsarbeider som er gjort tidligere, på det området prosjektoppgaven dekker. Datasimuleringene har vært hoveddelen av arbeidet. Simuleringen har hatt som mål å beskrive så korrekt som mulig luftstrømmen i taket.

4.1 Litteraturstudie

Utgangspunktet for litteratursøket var to hovedtema, fluidmekanikk og lufting og oppbygging av takkonstruksjoner. Universitetsbibliotekets søkesystem bibsys har blitt brukt til finne litteratur om fluidmekanikk. Det finnes et utall utgivelser om temaet, derfor ble det lagt vekt på om litteraturen tok for seg de spesifikke temaene innen fluidmekanikk som er studert i prosjektet. For lufting og oppbygging av tak, hadde veileder noen tips om litteratur som dekket området. I tillegg ble bibsys til å finne mer litteratur om temaet, fant der lite litteratur om forskning på tilsvarende problemstillinger. Peter Blom leverte en doktorgrads avhandling i 1990, som tok for seg lufting av skrå isolerte tak. Til avhandlingen ble testhuset til byggforsk på Voll i Trondheim brukt til å gjøre tester og observasjoner. Avhandlingen til Blom, byggforskblad og byggforsk rapporter ble brukt til å få et teoretisk grunnlag for hvorfor og hvordan en lufter skrå isolerte tak.

4.2 Datasimulering

Datasimuleringene er blitt utført i dataprogrammet FLUENT. Programmet har en forholdsvis høy brukerterskel. Derfor har mye av arbeidet med prosjektarbeidet vært brukt til lære seg programmet. I den forbindelse var jeg på et ukes FLUENT-kurs som ble arrangert ved NTNU. Dette kurset tok for seg programmets oppbygning og brukermuligheter. Mye av tiden ble brukt til å gjøre øvingsoppgaver. Kurset tok ikke for seg strømningsstyper som er beskrevet i dette prosjektet. Derfor ble mye tid brukt til å bestemme hvilke beregningsmodeller og inngangsverdier som skulle brukes i dette prosjektet. Ved prøving og feiling, studering i manualen og ved god hjelp fra veileder ble beregningsmodellene og inngangsverdiene bestemt. Det har vist seg at det ikke har vært gjort lignende type simuleringer med FLUENT, derfor har det ikke vært mulig å høste erfaring fra andres arbeid. Alle antagelser, inngangsverdier og beregningsmodeller må da bestemmes uten å ha noe å referere til.

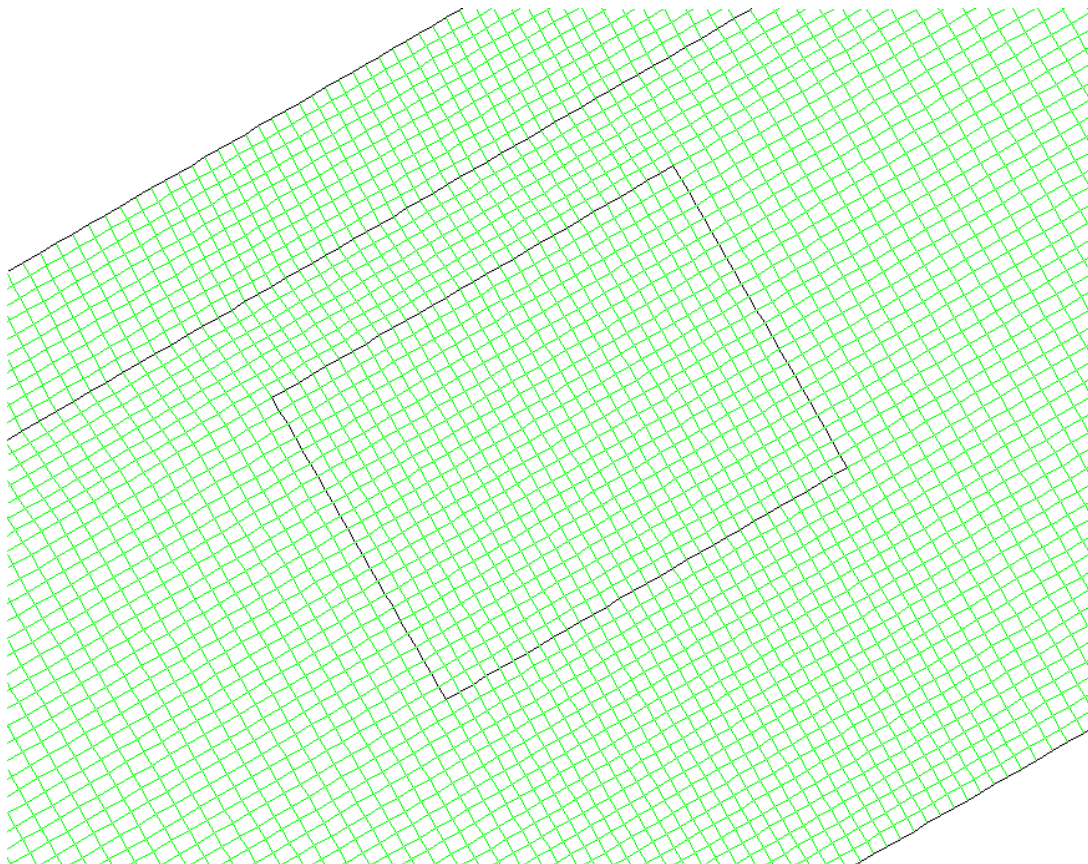
Det er lettere å analysere data fra FLUENT når man har stasjonære resultater. Det viste seg imidlertid at alle taksystemene som ble simulert ikke konvergente. Dette førte til at det ble mer arbeid å hente ut data fra beregningene. En må lage de snittene og punktene i geometrien en vil ha resultat fra, før en beregner. Hvilken operativ temperatur (se kapittel 4.3.2) som skulle brukes i beregningene var noe som var et spørsmål lenge. Etter kontakt med support avdelingen til FLUENT i Sveige ble dette avgjort.

4.3 Fremgangsmåte ved modelleringen og simulering

4.3.1 Oppbygging av takkonstruksjonene i GAMBIT

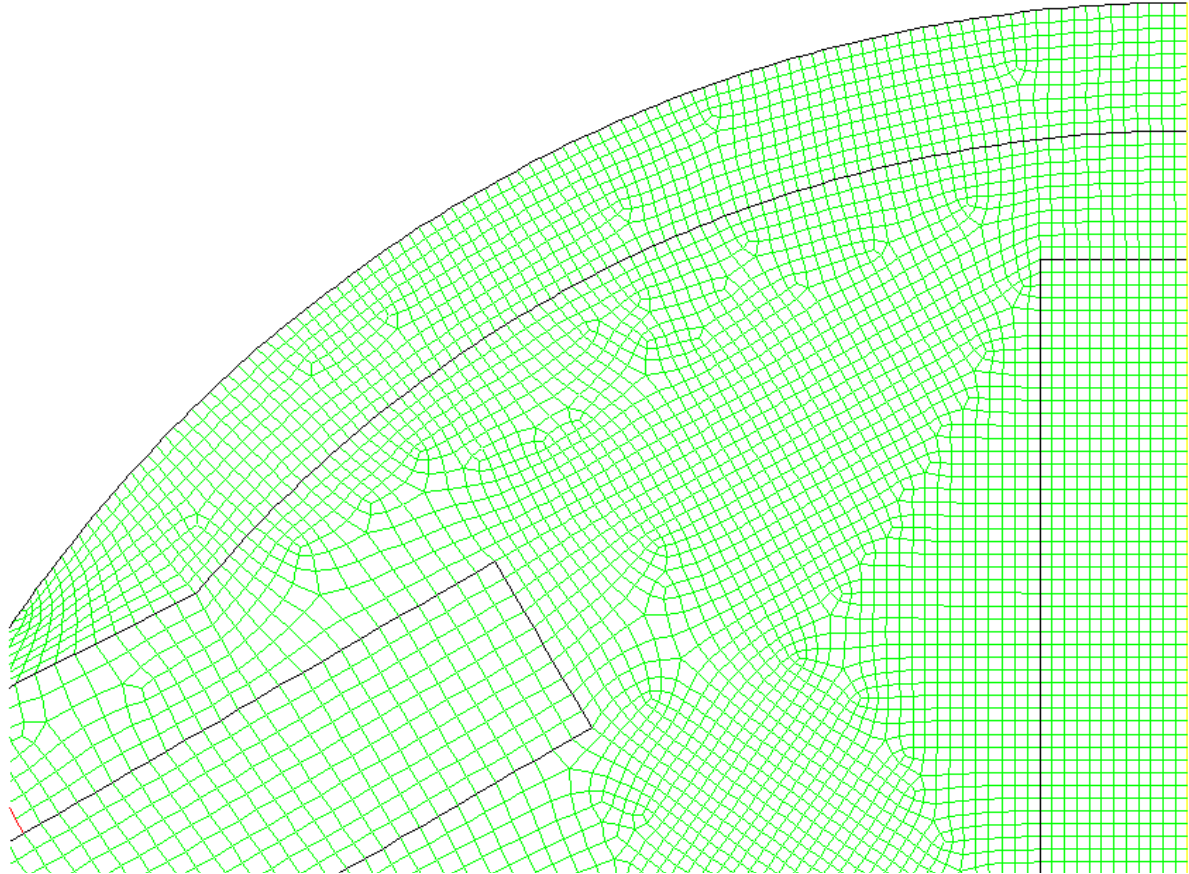
Takkonstruksjonene ble tegnet i GAMBIT, videre ble det bygd opp rutenettet over konstruksjonen. Hvordan oppbyggingen av rutenettet gjøres har mye å si for beregningene. Jo flere celler en har jo lengre tid tar beregningene. Har en for grovt rutenett blir feilmarginen i beregningen større og har en for fint rutenett kan avrundingsfeilene i beregningen blir forholdsvis store. GAMBIT kan analysere kvaliteten på rutenettet, har en et dårlig rutenett kan resultatene bli unøyaktige eller en kan få problem med å oppnå konvergens.

For å redusere celleantallet kan det være lurt bruke små celler hvor det er nødvendig og større celler hvor det ikke er så viktig med høyt celle antall. Det er viktig med små celler der hvor det er store gradienter, altså ved store forandringer over små områder. Dette er blitt tatt noe hensyn til i oppbyggingen av rutenettet, i området mellom lektene er cellestørrelsen økt noe. Figur 4-1 viser hvordan rutenettet langs kanalen er oppbygd. I GAMBIT kan en variere mellom rektangulære og trekantede. Langs hele tak et er det brukt rektangulære celler, som er generert ved funksjonen Quad – Submap i GAMBIT. Dette vil si at det er like mange celler langs motstående sidekanter i et rektangel. Denne type celler passer bra til enkle rektangulære geometrier.



Figur 4-1: Rutenett over ei lekt i kanalen, rutenett som er brukt er qud – submap

I raft og møne er geometrien litt mer komplisert og det er vanskeligere å bygge opp et like godt rutenett. Figur 4-2 viser hvordan cellene over mønet er oppbygd. Cellene er firkantete, men lengdene på sidene varierer slik de skal passe inn i geometrien. For mønet og deler av raften er det brukt funksjonen Quad – pave i GAMBIT for å generere rutenettet. Som en ser på figurene er cellene forholdsvis små og for å dekke hele taket brukes det ca 200 000 celler.



Figur 4-2: Rutenett over deler av mønet, kombinasjon av quad – submap og quad – pave.

4.3.2 Fluent

Etter at geometrien er importert til FLUENT må en angi grensebetingelseler, materialparametere, hvilke beregningsmodeller som skal brukes, operative forholdne, hvilke beregnings prosedyrer som skal følges og hvordan en skal overvåke beregningene.

Grensebetingelser og materialparametere

Fra GAMBIT er det fire typer grenseområder som er angitt. Det er "Wall", "Pressure inlet", "Pressure outlet" og "symmetry". "Pressure outlet" er det området hvor luftstrømmen går ut av konstruksjonen, dette er i mønet mellom mønepannen og taksteinen. Siden vi har vindstille forhold er trykket ved innløp og utløp likt. Trykket er likt det operative trykket, det vil si at gage trykk er 0. Det kan forekomme at en kan få tilbakestrømning gjennom "pressure outlet". Derfor må en tilbakestrømningstemperatur angis. Her er denne temperaturen sett lik utetemperaturen. "Pressure inlet" er det området hvor luftstrømmen går inn i kanalen. Det er to slike områder. Begge er i raft, et under taksteinen og et mellom husveggen og raftbordet.

Temperaturen på luften som strømmer inn er sett lik utetemperaturen. Det er kun modulert ene siden av taket. Det er isteden angitt symmetrilinjer på høyre siden av mønet, slik at en kan få resultater fra hele taket ved å speile systemet om symmetrilinjene. Resten av grenseområdene er angitt som "wall". For disse grenseområdene må det angis eventuell isolasjonsverdi, emmisivitet, overflatetemperatur. Disse verdiene er angitt i Tabell 5-2.

Konstruksjonen består av tre og betongtakstein, hvor egenskapene til disse materialene må angis i FLUENT. Det er tre parametere som er viktig for beregningene. Det er densitet, konduktivitet og varmekapasitet. Disse er angitt i Tabell 5-2. For luft varierer parameterene med temperaturen, derfor blir de angitt for hvert enkelt testtilfelle.

Operative forhold

Operative forhold er fysiske størrelser som påvirker systemet, det er hvilken gravitasjon som virker, hvilket trykk som er rundt systemet og hvilken operativtemperatur som skal brukes. Hustaket er plassert på jordens overflate derfor regnes gravitasjonen og operativt trykk i systemet som middelverdien på jorden, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ og $P = 101325 \text{ Pa}$. For beregningene er det viktigere med hvilken operativ temperatur som brukes. For beregning av naturlig oppdrift brukes Boussinesq modellen. Denne modellen er avhengig av den operative temperaturen. Operativ temperatur settes til middelverdien av temperaturen til den strømmende luften i kanalen. Middelverdien på kanaltemperaturen er en verdi en får ved å gjøre beregningen. Derfor må en først gjette en verdi, utføre en del beregninger lese av middeltemperaturen, og bruke denne som ny operativ temperatur. Utgangspunktet for beregningene blir da forandret og en får nye resultat. Derfor må en gjøre mange slike beregninger og lese av middeltemperaturen, slik at avviket mellom hver avlesing blir liten.

The Boussinesq model

Drivkreftene på grunn av naturlig oppdrift kommer av densitet forskjeller mellom luften i kanalen og uteluften. Istedenfor å bruke en modell hvor densiteten er en funksjon av temperaturen, kan en bruke Boussinesq modellen, som ofte fører til hurtigere konvergens i beregninger med naturlig oppdrift. Boussinesq modellen er en beregningsmodell hvor en regner densiteten i luften som konstant i alle ligningene bortsett fra oppdriftsdelen i moment ligningen [12].

$$(\rho - \rho_0)g \approx \rho_0\beta(T - T_0)g \quad 4-1$$

Hvor: ρ = Densitet (kg/m^3)
 ρ_0 = Konstant densitet (kg/m^3)
 g = gravitasjon (m/s^2)
 T = Den lokale temperaturen i kanalen (K)
 T_0 = Operativ temperatur (K)
 β = Termisk ekspansjons koeffisient ($1/T$)

Ligning 4-1 er oppnådd ved å bruke boussinesq tilnærmingen $\rho = \rho_0(1 - \beta \Delta T)$, til å eliminere densiteten (ρ) fra oppdriftsligningen. Denne tilnærmingen er kun gyldig når forskjellene i densitet er små. Boussinesq tilnærmingen er gyldig når $\beta(T - T_0) \ll 1$ [12].

The Discrete Transfer Radiation Modell

Mellom alle flatene i konstruksjonen vil det foregå en strålingsutveksling. Alle flatene vil sende ut og motta strålingsenergi. Hvor mye strålingsenergi som blir reflektert og hvor mye som blir absorbert er avhengig av overflatens emissivitet (ϵ). Ved emissivitet på 1,0 vil all stråling bli absorbert og ved emissivitet på 0 vil all strålingen bli reflektert. De fleste bygningsmaterialer har en emissivitet på ca 0,9 [13].

For å ta hensyn til strålingsutvekslingen mellom flater i FLUENT kan en bruke forskjellige beregningsmodeller. The Discrete Transfer Radiation Modell (DTRM) er modellen som er brukt til beregningene.

Beregingsprosedyre

I FLUENT er det flere muligheter å velge forskjellige algoritmer og beregningsprosedyrer som skal brukes til beregningene. De forskjellige prosedyrene vil ikke bli gått inn på her, det vil kun bli angitt hvilke som er blitt brukt. Som interpoleringssystem for trykket er PRESTO! brukt, denne egner seg best til naturlig oppdrift ved rektangulært rutenett. For koblingen mellom hastighet og trykk er SIMPLEC algoritmen brukt. Videre er beregningene gjort med førsteordens oppstrømsdiskretisering for energi og bevegelsesmengde.(First order upwin).

4.4 Forenklet metode (regneark)

Det er i byggforsk miljøet laget et regneark i Excel som beregner luftgjennomstrømning, lufthastighet, drivtrykk, trykktap fra friksjon og trykktap fra singulærtap. Inngangsverdiene i regnearket er geometridata fra konstruksjonen, temperatur ved innløp og utløp, eventuelt vindtrykk og vindtrykk koeffisienter. I en kanal er det slik at drivtrykket er likt trykktapet over kanal strekningen. Dette bruker regnearket til å bestemme middel verdien av lufthastighet gjennom kanalen. En må prøve seg frem med en verdi for lufthastigheten, til en får en verdi der trykktapet dividert drivtrykket blir en. Regnearket er bygd opp med formelverk fra [8].

5 Resultat

5.1 Innledning

I forbindelse med delprosjektet "P4 – Studie av kompakte og luftede isolerte tak" til Klima 2000, har Byggforsk utarbeid en del typiske saltaksgeometrier som skal etterregnes. En del parametere skal varieres. Husbredde og dermed også kanallengden, takvinkel, sløyfehøyde og steinlekt-høyde varieres. Ut ifra disse takttypene er det plukket ut et utvalg som undersøkes i denne oppgaven, der det er brukt et tak som standardtak og variert de ulike parametrene ut i fra det. Tabell 5-1 viser de ulike testtilfellene.

Tabell 5-1: Tabellen viser de testtilfellene som er undersøkt i prosjektet.

Tilfelle	Lektavstand [mm]	Sløyfe- høyde [mm]	Steinlekt -høyde [mm]	Husbredde [m]	Kanallengde [mm]	Takvinkel [o]	Antall lekter
1.2	350	36	30	10	5998	30	18
1.3	350	36	30	20	11598	30	42
2.3	350	36	30	10	5321	20	17
3.3	350	48	30	10	5998	30	18
5.1	350	36	36	10	5998	30	18
6.1				10	5998	30	0
6.2	350	36	30	10	5998	30	18
6.3				10	5998	30	0

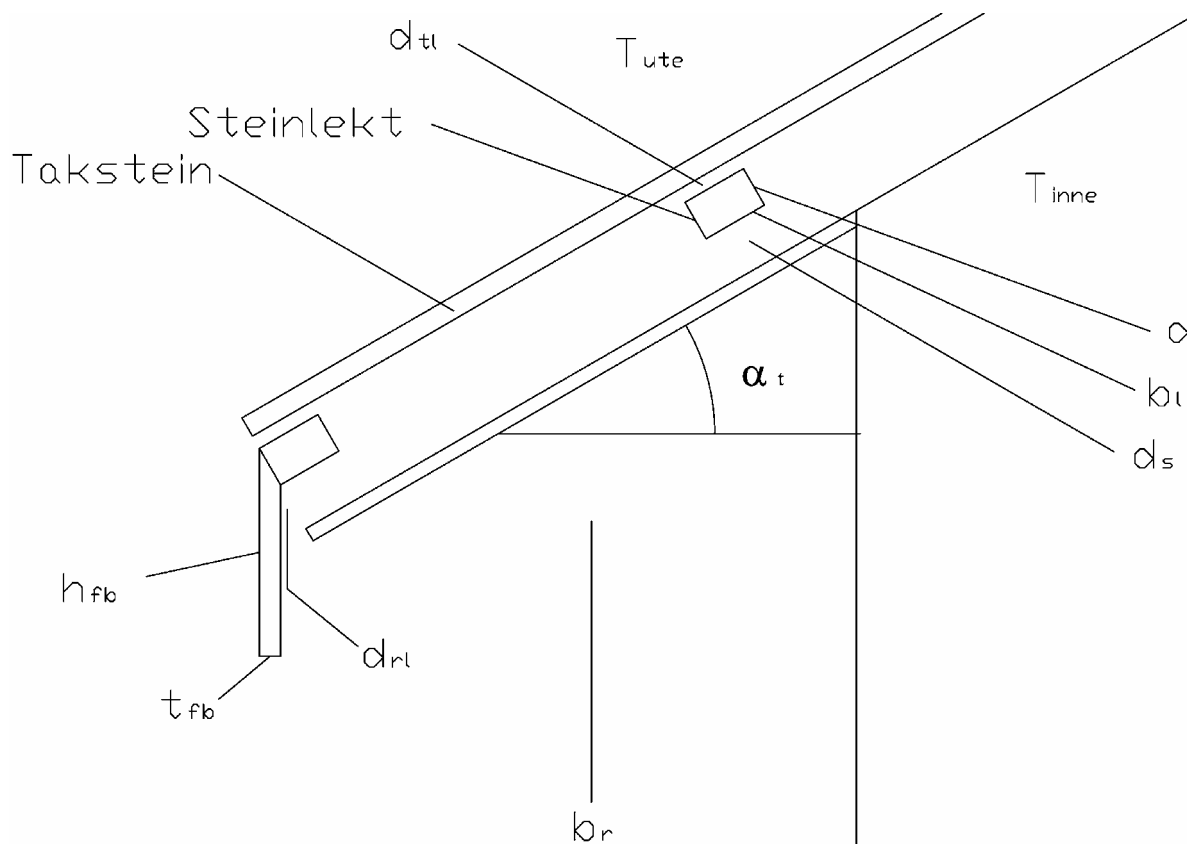
Nummereringen er i hovedsak gjort i samsvar med nummereringen som Byggforsk har brukt i delstudiet P4 - Studie av kompakte og luftede isolerte tak. Dette gjelder ikke for tilfelle 6.1, 6.2 og 6.3. Tilfelle 6.1 er en kanal uten lekter, men med raft og møne, tilfelle 6.2 er en kanal med lekter, men uten raft og møne. Tilfelle 6.3 er en enkel kanal uten verken raft, møne eller lekter. Disse tilfellene er tatt med for å se på virkningen lektene, mønet og raften har for luftstrømmen i kanalen. Byggforsk har ikke disse tilfellene med i forskningsstudiet sitt. Tilfelle 1.2 er brukt som standard tilfelle og er utgangspunkt for de andre tilfellene, der det er forandret kun en parameter av gangen.

Alle takkonstruksjonene er tak med kombinert undertak og vindsperre. Disse er forenklet slik at de kan modelleres og simuleres. Takene er modellert som todimensjonale modeller, og dermed er kun en todimensjonal strøm simulert. I reelle takkonstruksjoner ligger sløyfelektene med en senteravstand på 0,6 meter. Fordi beregningene er todimensjonale og vi studerer et snitt som ligger mellom sløyfelektene, ser en ved beregningene på kanalen som uedelig dyp. Resultatene som blir oppgitt er regnet med en dybde på kanalen på en meter. Dette prosjektet tar altså for seg en kanal som går fra møne til raft og ser hvilke luftmengder som går gjennom denne. Effekter fra krysslufting blir da ikke med i resultatene. Møne og raft er også forenklet. Raften er utført uten raftekasse, kun med raftebord. I mønet er det vanlig å legge inn mønebånd og plastfolie for å hindre at vann og snø trenger inn i takkonstruksjonen. Dette med fører strømningsmotstanden i mønet øker. Mønebånd og plastfolie er vanskelig å

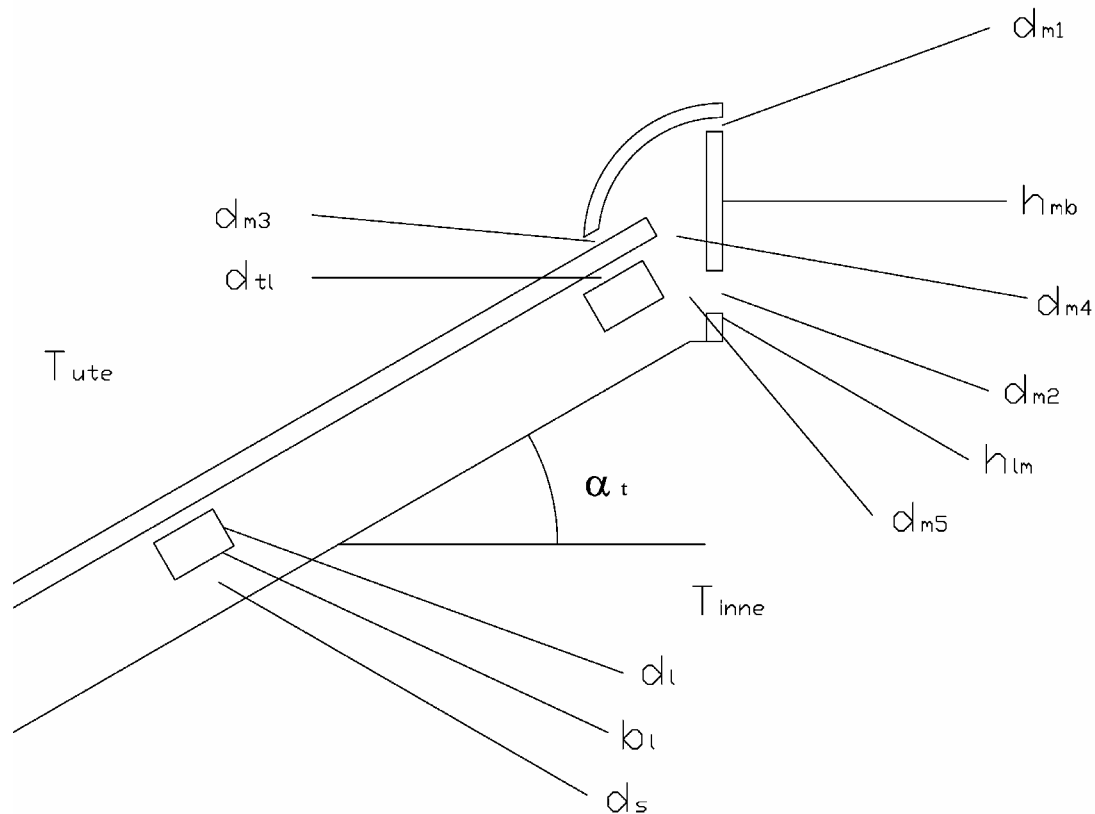
modellere, derfor reduseres avstanden fra mønepannen til taksteinen til ti millimeter for å kompensere for dette. Dette er en skjønsmessig forenkling av virkeligheten.

Alle simuleringene tar utgangspunkt i vindstille forhold, slik at det kun er naturlig oppdrift som er drivkraften til luftstrømmen. Dette er det mest ugunstige for taket, det vil da gå mindre luft gjennom taket enn når vinden også skaper et drivtrykk. Ved naturlig oppdrift er det densitets forskjeller mellom kanalluften og uteluften som skaper drivkreftene.

De ulike takene som er simulert er i hovedtrekk ganske lik hverandre, Figur 5-1 og Figur 5-2 viser henholdsvis raft og møne på et av takene som er simulert. For de andre takene er det gjort de forandringene som er nevnt ovenfor. Symbolene i figuren er beskrevet i Tabell 5-2.



Figur 5-1: Forenklet raft konstruksjon på takene som er simulert.



Figur 5-2: Forenklet møne konstruksjon som er brukt i simuleringene.

De fleste av parametrene som er brukt i beregningene er de samme for alle takene. Dette gjelder både dimensjoner, grensebetingelser og de beregningsmessige inngangsverdiene i FLUENT. I Tabell 5-2 er de tak dimensjoner og grensebetingelsene som er like for alle tak opplistet.

Tabell 5-2: Felles parametere for alle takkonstruksjonene.

Bygningsdel	Parameter	Symbol	Verdi	Enhet
<i>Geometridata</i>				
Taktekking	tykkelse	t_t	20	mm
Ekv. avst. tekning - steinlekt	høyde	d_{tl}	10	mm
Steinlekt	bredde	b_l	48	mm
Raft	Raftutstikk, horisontal avstand	b_r	400	mm
Forkantbord	høyde	t_{fb}	148	mm
Spalteåpning mønepanne - mønebord	bredde	d_{m1}	10	mm
Mønebord	høyde	h_{mb}		
Spalteåpning mønebord - klelekt	høyde	d_{m2}	30	mm
Spalteåpning mønepanne - takstein	bredde	d_{m3}	10	mm
Spalteåpning mønebord - takstein	bredde	d_{m4}	30	mm

Spalteåpning steinlekt - mønebord	bredde	d_{m5}	30	mm
<i>Isolasjons og material parametere</i>				
U-verdi fra luftspalte - inne	varmegjennomgangs - koeffisient		0,15	W/m^2K
U-verdi yttervegg	varmegjennomgangs - koeffisient		0,22	W/m^2K
Treverk	konduktivitet	λ	0,12	W/mK
Takstein	konduktivitet	λ	1,7	W/mK
Utvendig overgangsmotstand	varmemotstand		0,04	m^2K/W
Treverk	varmekapasitet	C_p	800	J/kgK
Takstein	varmekapasitet	C_p	895	J/kgK
Treverk	densitet	ρ	500	kg/m^3
Takstein	densitet	ρ	2300	kg/m^3
Emmisivitet alle overflater	refleksjon	ϵ	0,9	
<i>Klimaparametere</i>				
Innvendig temperatur	temperatur	T_{inne}	293,15	K
Utvendig temperatur	temperatur	T_{ute}	273,15	K
Vindhastighet	hastighet		0	m/s

Oppbygningen av taket er gjort i henhold til preaksepterte løsninger som er gitt i byggforskserien. Dette gjelder både utforming og isolering. Kravene til isolasjon i et bolighus i Teknisk forskrift er $0,15 W/m^2K$ for tak og $0,22 W/m^2K$ for vegg, med innetemperatur over $20^\circ C$. Alle takene er modellert med denne isolasjonsverdien. Dette er krav som gjelder nye hus i dag, og er en høy isolasjonsverdi. Som nevnt tidligere øker faren for snøsmelting ved minskene isolasjon, derfor kunne det ha vært aktuelt å ha sett på et tak med dårligere isolasjon. Det hadde vært større varmetransport ut i luftekanalen, som også hadde økt luftstrømmen i kanalen i tillegg til å øke temperaturen på taket. I dette prosjektet er det valgt å kun se på tak som er oppbygd etter dagens regler. Dette er gjort fordi dette prosjektet skal gå inn som en del av byggforsk sitt arbeid med å utarbeide nye retningslinjer for luftingen av tak på ny bygg [14 og 15].

Temperaturen henholdsvis inne og ute er 20 og $0^\circ C$. For at problemer med snøsmelting og frysing skal oppstå må temperaturen være null eller kaldere, men det kan heller ikke være for kaldt. Med et velisolert tak som er brukt her vil normalt ikke snøen smelte ved så mange minusgrader. Derfor er null grader valgt som utetemperatur. Innnetemperaturen er valgt til 20 grader fordi 20 grader benyttes i internasjonale standarder som innetemperatur.

5.2 Singulærtapskoeffisienter

Utgangspunktet for prosjektoppgaven var at singulærtapskoeffisienter for lekter, raft og møne skulle bestemmes, og kontrolleres opp mot verdier fra formelverket. Dette medførte større vansker enn først antatt. I luftekanalen oppstod det ingen rett og jamn strøm gjennom kanalen. Det oppstod sirkulasjoner mellom hver lekt, og svært lite luft strømte gjennom kanalen. I tillegg var strømmingene transiente. Det gjorde det vanskelig å bestemme hastigheten på luftstrømmen, som en trenger i for å bestemme singulærtapskoeffisienten. For et tak ble det likevel forsøkt. For å finne en hastighet som kunne brukes i beregningene, ble det beregnet en

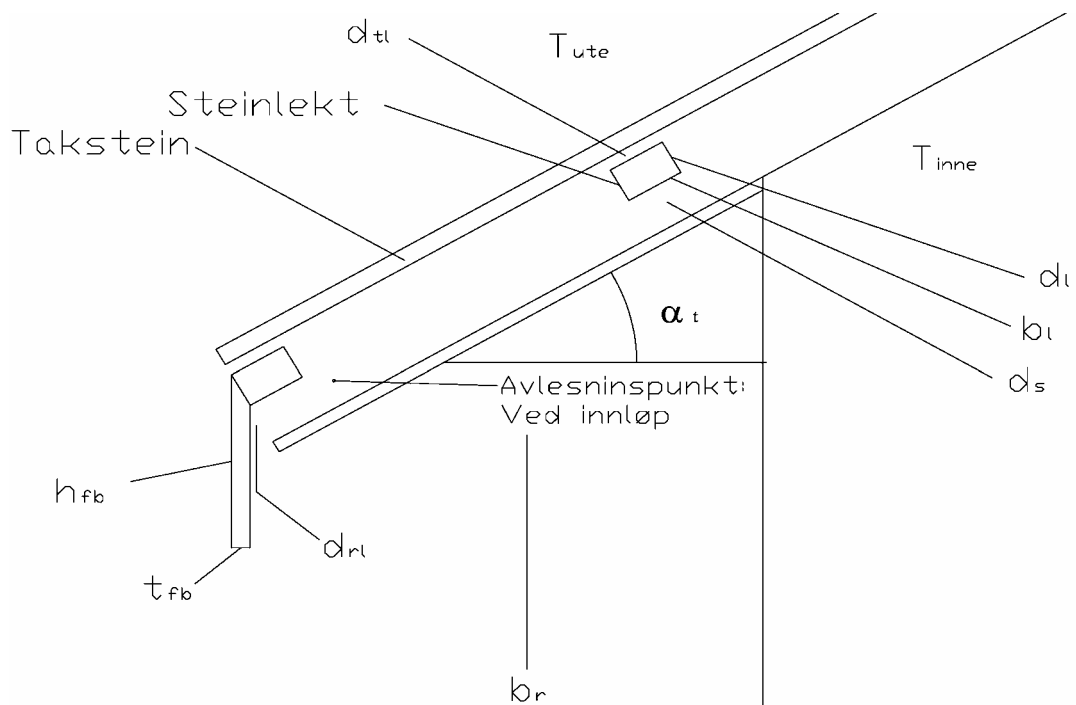
ekvivalent hastighet for snittet mellom lektene, ut i fra massestrømmen gjennom utløpet. Ut i fra denne hastigheten og data som ble hentet fra FLUENT ble singulærtapskoeffisienten for en lekt beregnet. Den fikk en verdi på 33,5. Dette virker altfor høyt. Singulærtapskoeffisienter som er beskrevet for lignende type strømningsmotstand ligger langt under denne verdien [8]. Den ekvivalente hastigheten mellom lektene blir svært lav (0,0031 m/s). Det gjør at det dynamiske trykket blir svært lavt, dette virker inn på singulærtapskoeffisienten. Det er mulig at beregningene ikke blir korrekte ved å bruke ekvivalent hastighet mellom lektene. Beregningene av singulærtapet for lektene i tak 1.2 er vist i vedlegg 1.

I regnearket som er beskrevet i kapittel 3.4, er det brukt metoder for å finne singulærtapskoeffisienter som er brukt for beregninger i ventilasjonsbransjen. Et av hovedmålene med prosjektet var å kontrollere om disse metodene var korrekt å bruke for luftstrømninger i luftekanaler i tak. Dette er ikke oppnådd, i regnearket er for eksempel summen av alle singulærtapskoeffisientene til lektene lik 8,8. Dette samsvarer ikke med beregningene som er gjort ut i fra resultat fra FLUENT. Beregningene av strømmingen i tak 1.2 ved regnearket er lagt ved som vedlegg 2.

5.3 Resultater fra tak 1.2

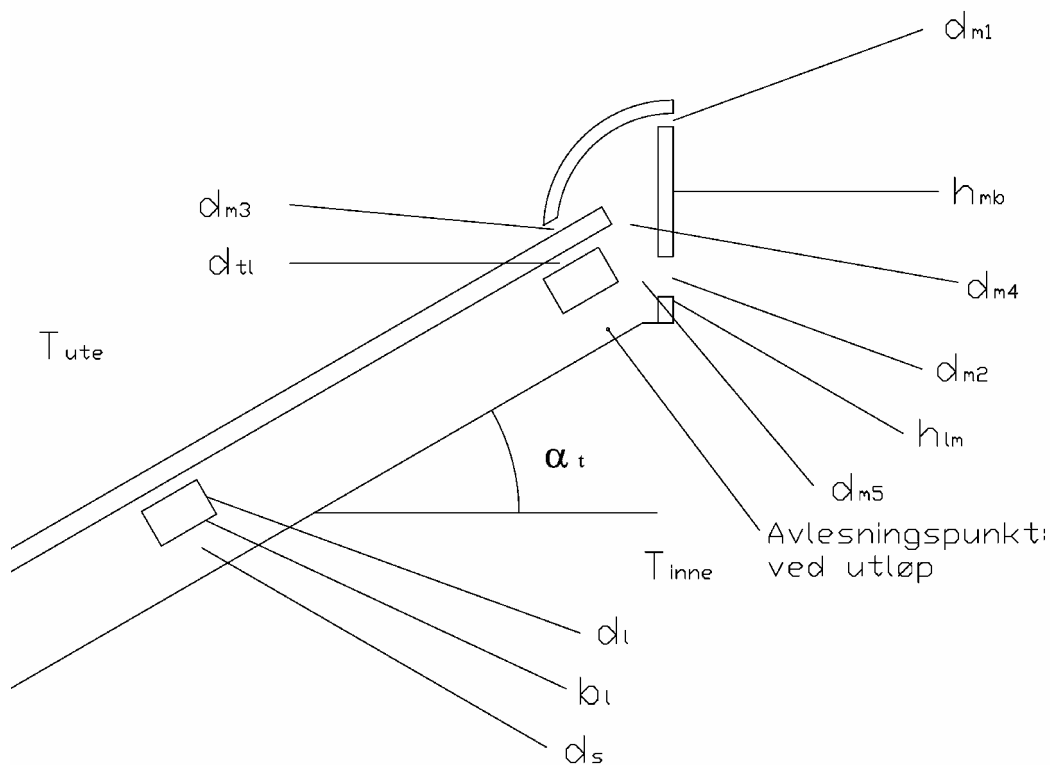
Tak 1.2 er brukt som utgangspunkt for alle andre tak, det er gjort en forandring i gangen på de andre takene. Strømningene i tak 1.2 viste seg å være transiente. Løsningene som blir presentert er derfor tidsavhengige, noen av resultatene er øyeblikksbilder av luftstrømmen som går gjennom luftekanalen i taket.

Det ble laget tre punkt i luftekanalen som ble brukt til å registrere transiente data for luftstrømmen i kanalen. Et punkt ligger ved innløpet i raften, Figur 5-3 viser hvor i kanalen punktet ligger. Neste punkt er plassert mellom lekt nummer 12 og 13, når en teller nedenfra. Punktet er plassert ved samme høyde i kanalen som punktet ved innløpet i raften. Det siste punktet ligger som vist på Figur 5-4 ved utløpet. I tillegg til disse tre punktene ble utløpet brukt til å registrere data. Utløpet er området (d_{m3}) mellom mønepannen og taksteinen på Figur 5-4. I figurene hvor de transiente resultatene er presentert, er hastighet og temperatur langs den vertikale aksens, og tid er langs den horisontale aksens. Tid null er ikke ved starten av simuleringene, den er kun et referansepunkt



Figur 5-3: Raftkonstruksjonen for tak tilfelle 1.2

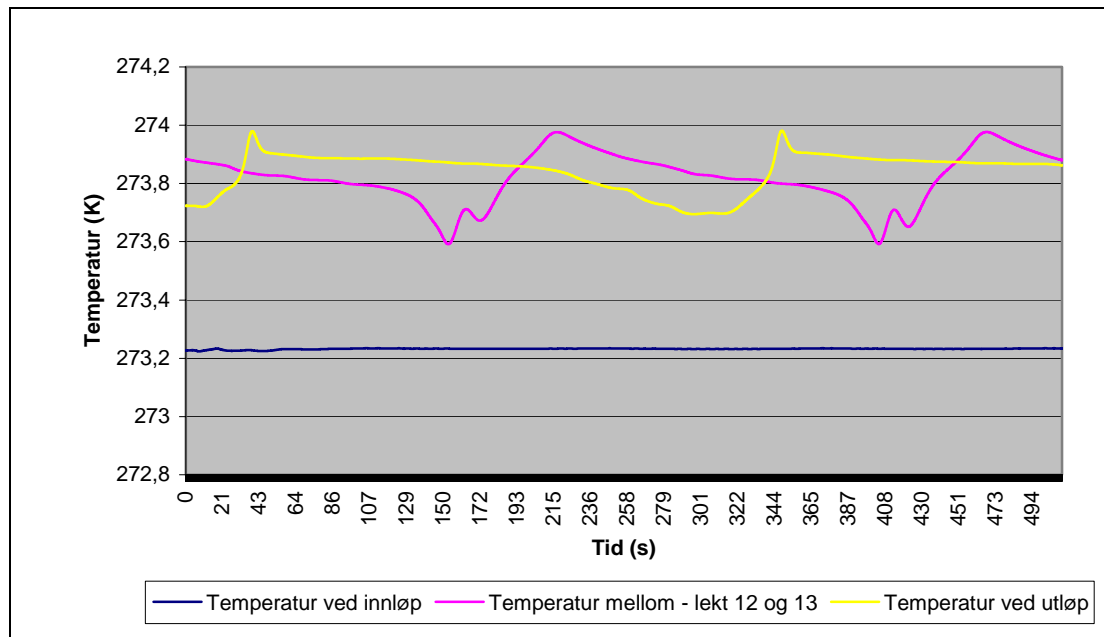
Punktene i kanalen ble brukt til å registrere temperatur og hastighet. En får verdier for punktene som varierer med tiden, og kan da se hvorledes hastigheten og temperaturen utvikler seg. For utløpet ble gjennomsnittshastigheten over hele tverrsnittet registrert. Ved å bruke tverrsnittsarealet for utløpet og densiteten kan massestrømmen bestemmes, den også vil variere med tiden.



Figur 5-4: Mønekonstruksjon for tak tilfelle 1.2

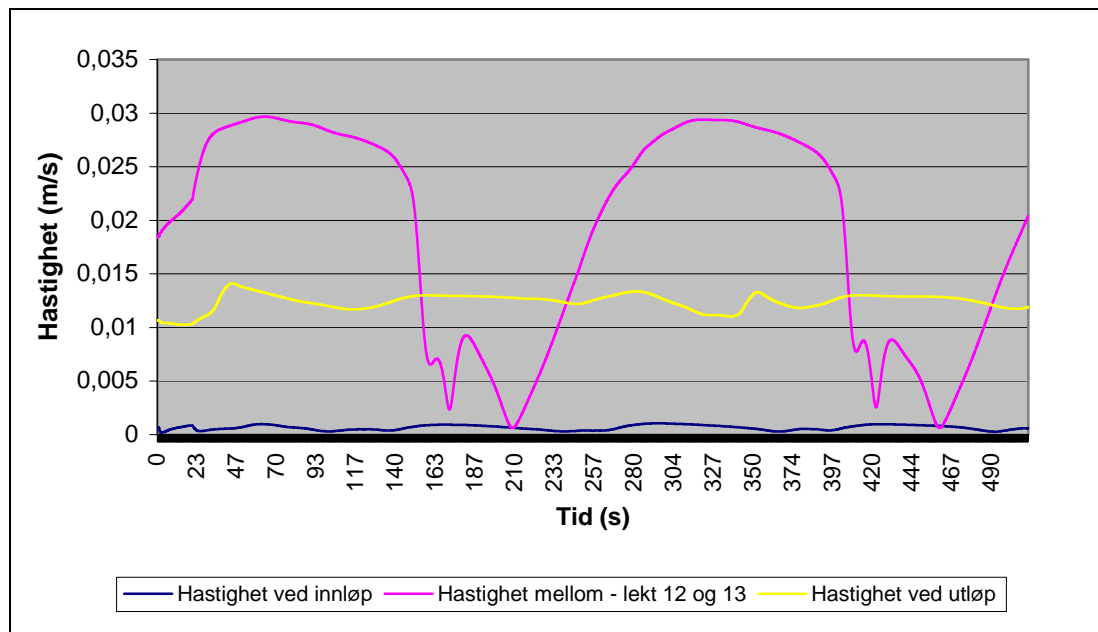
5.3.1 Transiente resultat

Figur 5-5 viser at temperaturen ved innløpet er stabil med en temperatur rett i overkant av 273 K, dette er naturlig når det ikke er noen varmepåvirkning på kanalen før kanalen kommer innom husveggen. Ved punktet mellom lekt 12 og lekt 13, en kan der se at temperaturen har økt noe, og den har periodiske svingninger mellom 273,6 K og 274 K. Temperaturen ved utløpet ligger på samme nivå som ved punktet lenger ned i kanalen. Temperaturen ved utløpet svinger også med periodiske svingninger. Det totale tidsrommet temperaturen er simulert over er på cirka ni og et halvt minutt, og en ser at en periode er på cirka fire og et halvt minutt.



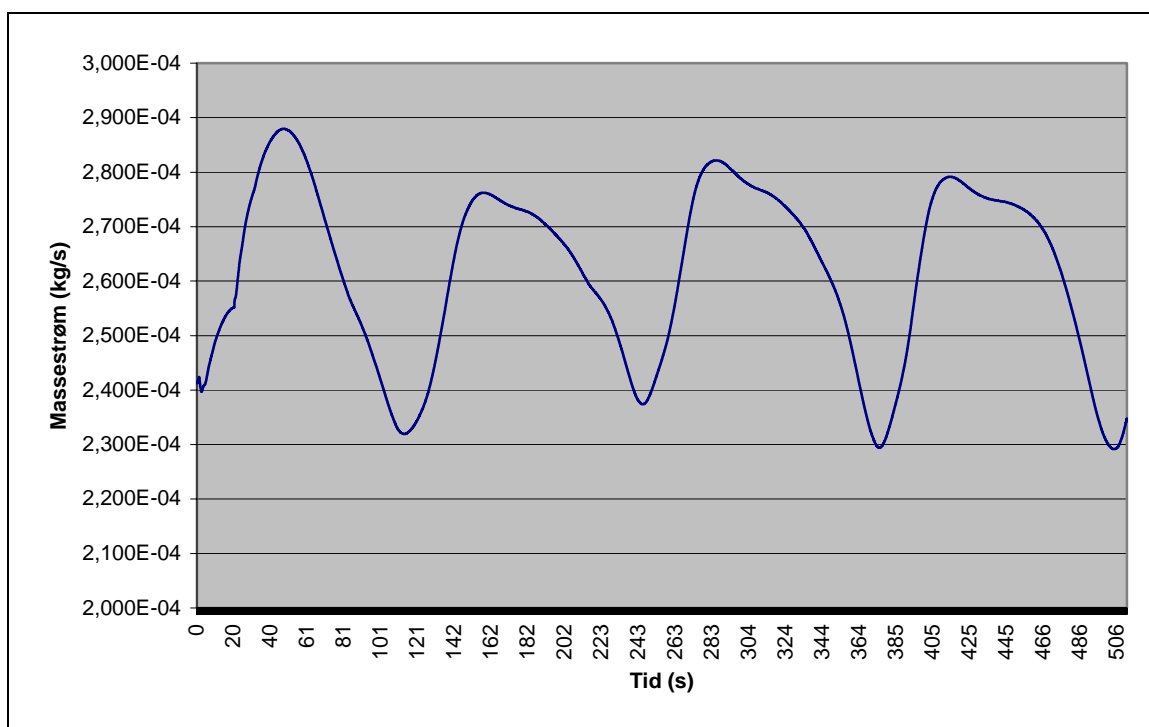
Figur 5-5: Diagrammet viser temperaturfordelingen over tid i tre punkt i luftekanalene i taket

Figur 5-6 viser hastighetsfordelingen i samme punktene som ble brukt til temperatur beskrivelsen. Hastigheten ved innløpet ligger stabilt lavt, med en gjennomsnittshastighet på 0,0007 m/s. Dette virker kanskje overraskende lavt i forhold til de andre verdiene. Hastigheten ved utløpet er en del høyere, den er også forholdsvis stabil og har en gjennomsnitt på 0,0124 m/s /Vedlegg 4/. For hastigheten mellom lekt 12 og 13 varierer den omtrent på samme måten som temperaturen varierte i samme punktet. Svingningsperioden for hastigheten, i punktet mellom lekt 12 og 13, er den samme som for temperaturen.



Figur 5-6: Diagrammet viser hastighetsfordelingen over tid i tre punkt i luftekanalen i taket

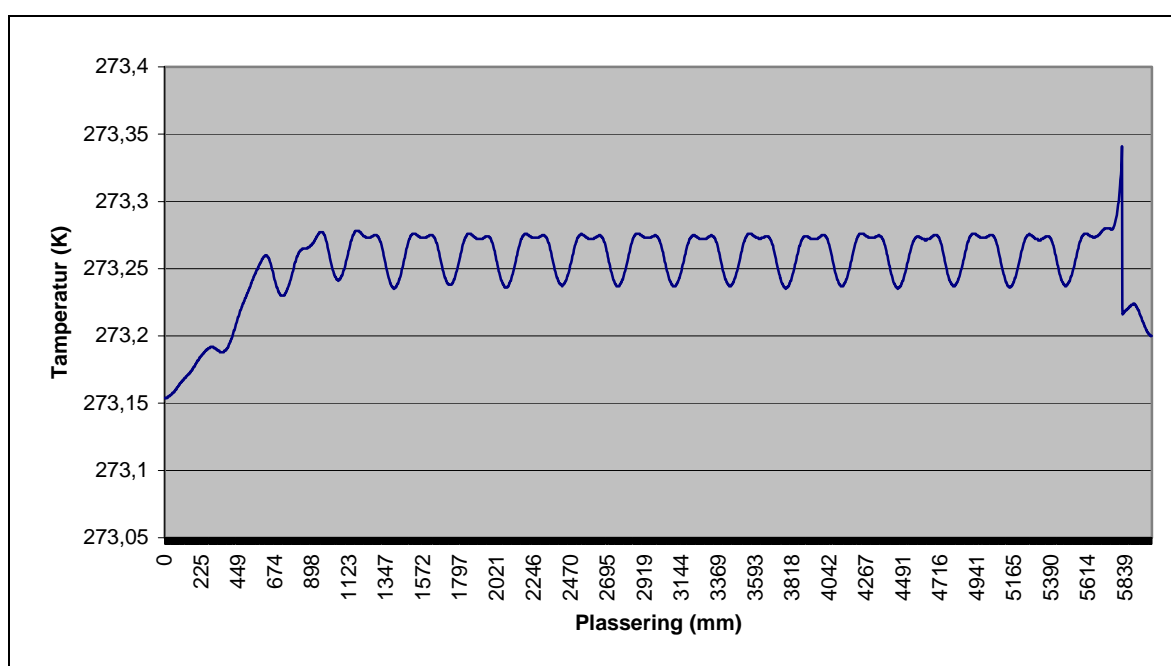
Siden taket har kun et utløp og strømmen går kun en vei gjennom utløpet, vil luftstrømmen gjennom utløpet tilsvare den totale luftstrømmen gjennom taket. Luftstrømmen varierer med tiden, med periodiske svingninger. Periodene er i underkant av halvparten av periodene ved temperatur og hastighet betraktningene. Perioden er på omtrent to minutter. Gjennomsnittlig verdi av luftstrømmen gjennom luftekanalen er $2,028e^{-04} \text{ m}^3/\text{s}$ / Vedlegg 5/.



Figur 5-7: Diagrammet viser massestrømmen ut utløpet, dette tilsvarer den totale massestrømmen gjennom taket

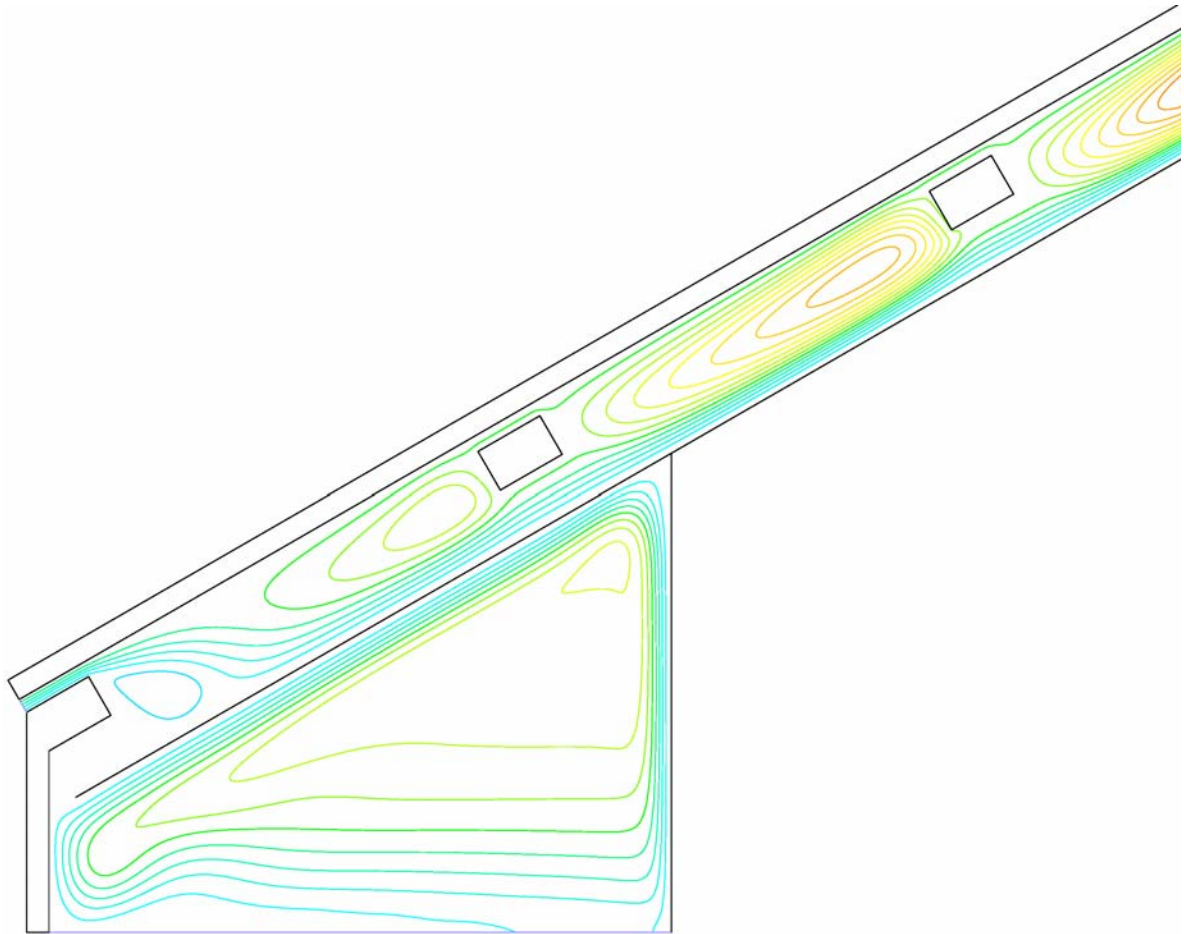
5.3.2 Øyeblikksresultat

Resultatene som blir presentert videre for tak 1.2 vil være øyeblikksbilder av luftstrømmen gjennom luftkanalen. En av hovedgrunnene til at en bør utføre tak med luftespalte er som kjent for å unngå snøsmelting på taket. Derfor er temperaturen i sjiktet mellom snøen og taksteinen av interesse. Øker denne temperaturen over 0 °C er det fare for at snøen smelter og det kan føre til forskjellige skadetyper. Figur 5-8 viser temperaturfordelingen på taksteinen langs hele takplanet. Tilfellet er simulert uten snø på taket. Raften med rafteutstikket er til venstre på figuren, der ser en at temperaturen på taksteinen har utetemperatur. Taksteinen blir så gradvis oppvarmet når den kommer over det oppvarma området. Temperaturen på taksteinen starter å svinge med jamne perioder på 350 mm. Dette er den samme lengden som lektaavstanden for taket. Gjennomsnittsverdien for temperaturen på taksteinen er 273,25 K. Den gjennomsnittlige temperaturhevingen på taksteinen blir da bare på 0,1 K.



Figur 5-8: Diagrammet viser temperaturen på taksteinen langs hele takplanet

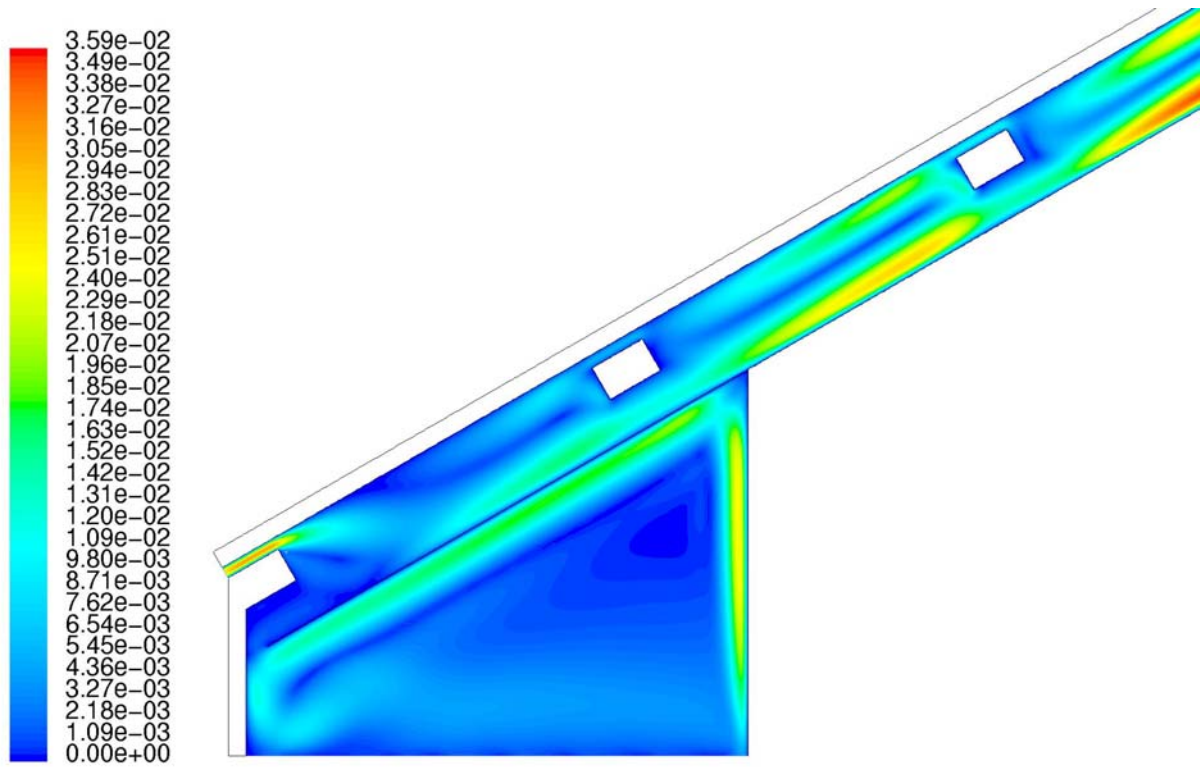
Figur 5-9 viser hvordan luften strømmer i innløpet til luftkanalen. Under rafteutstikket ser en at luften strømmer opp langs den varme husveggen, deretter følger den underkanten av taket ned mot innløpet. I stedet for å strømme inn i innløpet synker luften, og strømmer bort mot husveggen hvor den stiger opp igjen. Luften sirkulerer her uten å strømme opp gjennom taket. Ved innløpet mellom nederste lekt og taksteinen strømmer luft inn, denne luften fortsetter opp langs luftkanalen. Ser en på luftkanalen mellom to lekter vil luften mot varmside strømme oppover langs kanalen. Når luften møter en lekt vil det aller meste av luften stige opp mot kald side, og deretter strømme nedover langs kanalen til den møter en lekt. Luftstrømmen sirkulerer her, og lite luft strømmer oppover langs kanalen. Dette gjentar seg for hvert mellomrom mellom lektene i kanalen.



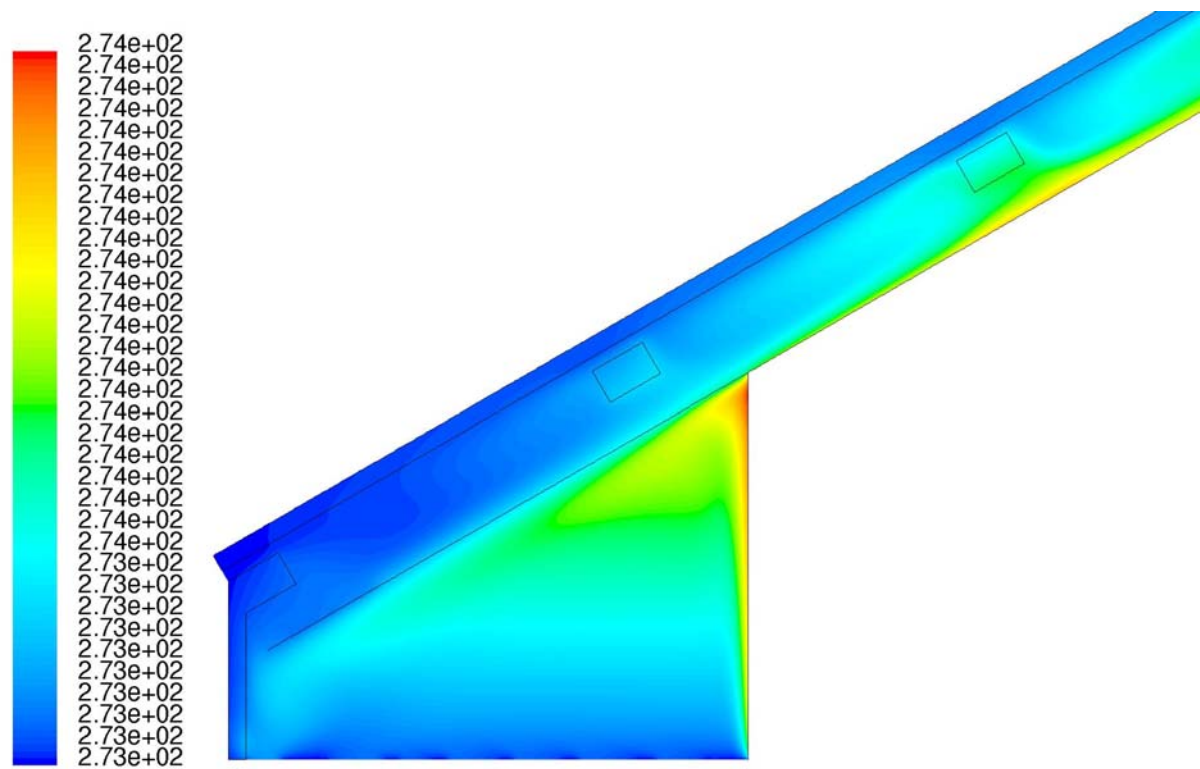
Figur 5-9: Strømningslinjer for raftkonstruksjonen

Figur 5-10 viser hastighetsfordelingen i raftkonstruksjonen. I området under raftutstikket ser en hastigheten er høyest inne ved husveggen og ned langs undersiden av taket. Dette er analogt med hva figuren av strømningslinjene viser. I området mellom lektene ser en at hastigheten er høyest i nedre og øvre område. Dette samsvarer med at det går en sirkulasjon av luft mellom lektene. I Figur 5-6 virket det som om innløpshastigheten var unaturlig lav i forhold til de andre hastighetene. Ser en på Figur 5-10 og sammenligner den med hvor punktet for avlesing ved innløpet er plassert, forklarer det saken. Nesten all luften som går gjennom kanalen strømmes inn gjennom åpningen under taksteinen.

Figur 5-11 viser at temperaturen øker opp langs veggen i området under raftutstikket. I luftekanalen ser en at temperaturen begynner å stige langs undersiden av kanalen.

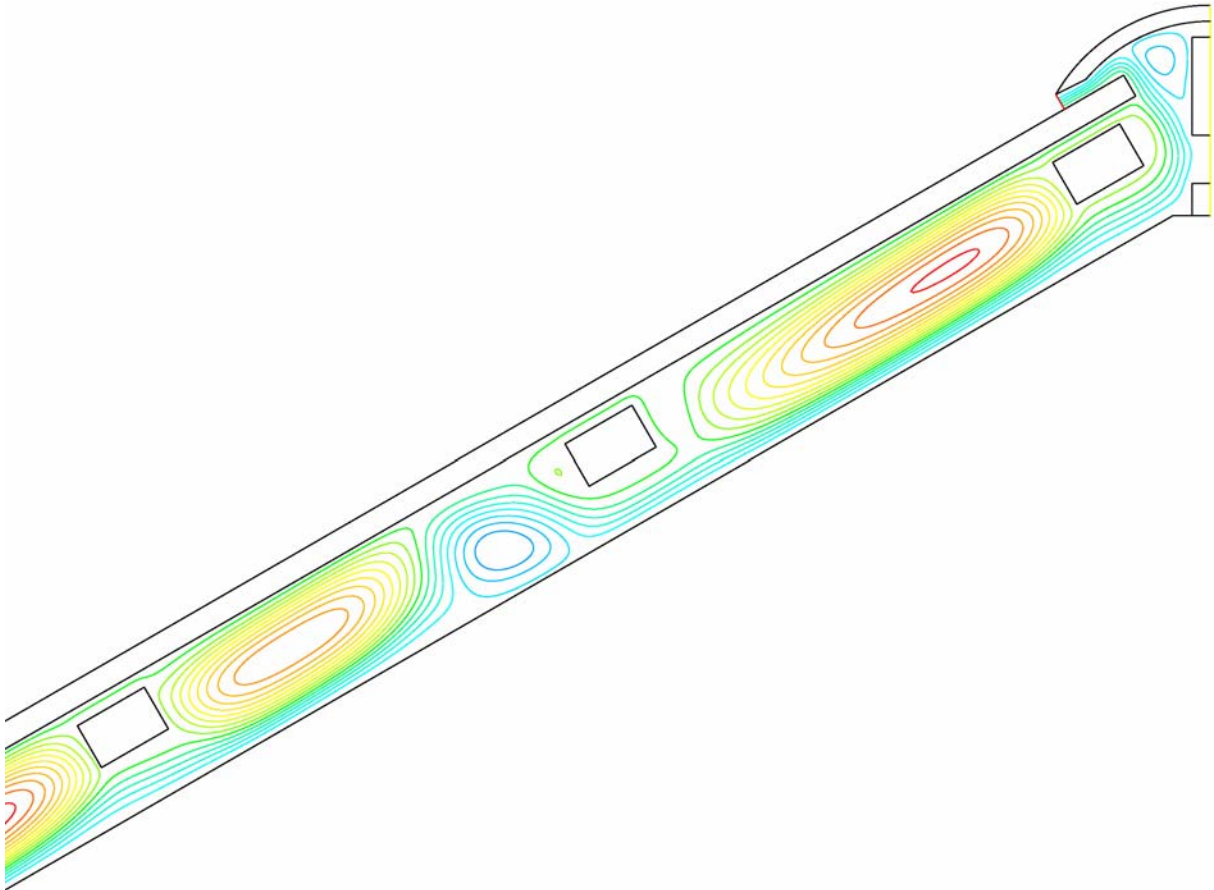


Figur 5-10: Hastighetsfordeling i raften (m/s)



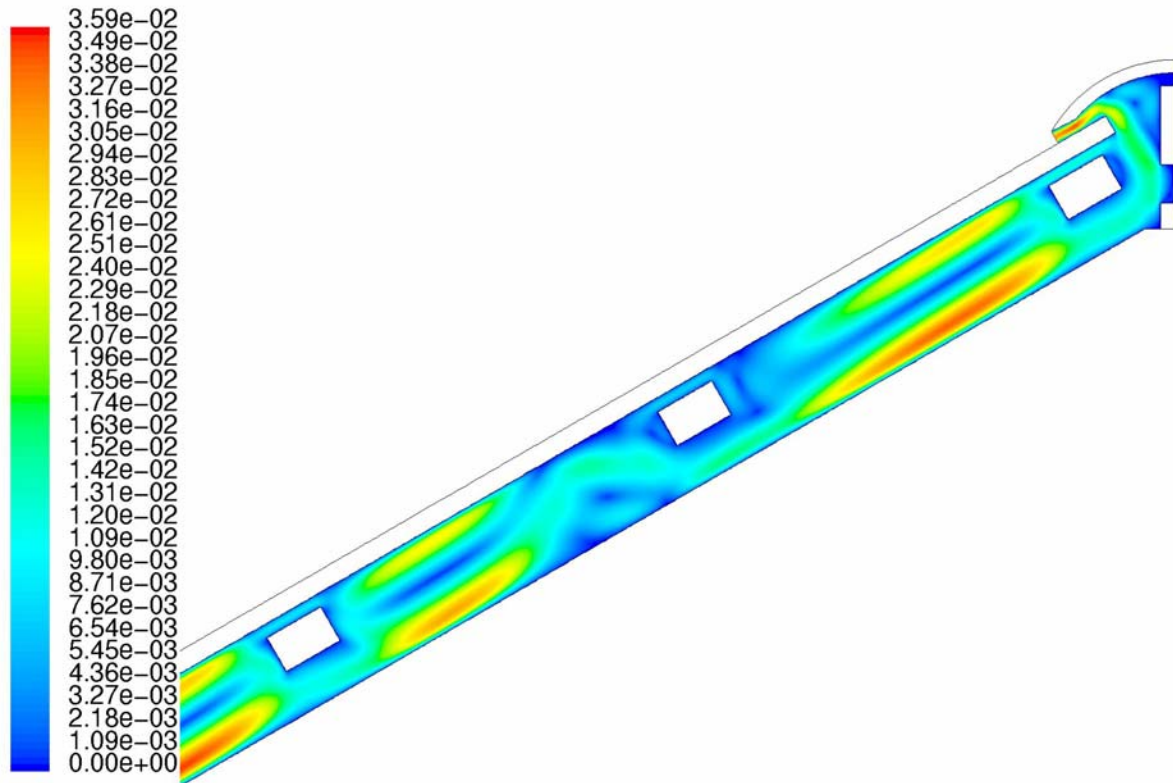
Figur 5-11: Temperatur fordeling i raft (K)

Fra Figur 5-12 ser en at sirkulasjonen mellom lektene som en så ved raften også foregår i enden av kanalen. Det går en strøm rett over den varme siden, denne strømmen går forholdsvis uforstyrret opp langs hele kanalen. Rett før nest siste lekt er det en liten sirkulasjon av luft, luft strømmen som går oppover langs kanalen går over denne luftsirkulasjonen.

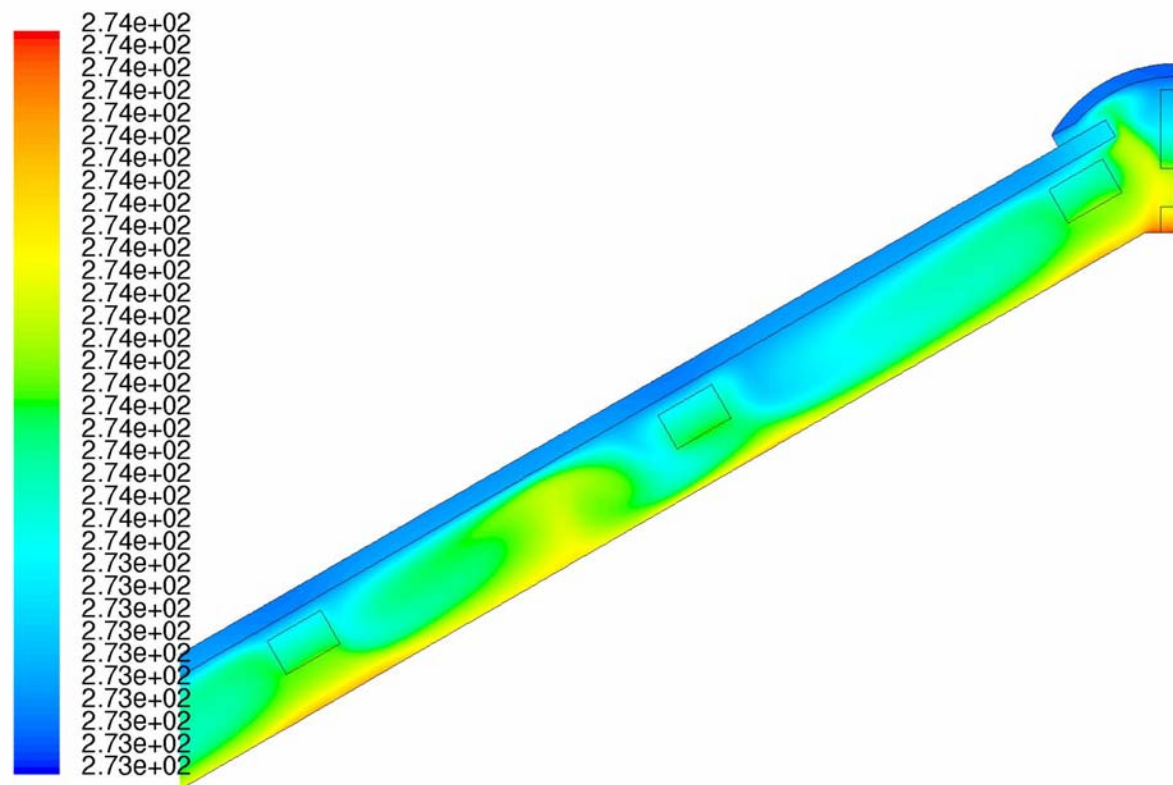


Figur 5-12: Strømningslinjer i mønekonstruksjonen

Figur 5-13 viser hastighetsfordelingen i kanalen, en ser at hastigheten er størst i øvre og nedre del av sirkulasjonene som går mellom lektene. Hastigheten øker også når luften passerer ut utløpet, tverrsnittsreduksjonen her fører til hastigheten øker. Temperaturen i mønekonstruksjonen er stabil langs hele luftekanalen. Ved luftsirkulasjonene mellom lektene vil varmluft stige opp når luften nærmer seg lekten, og deretter bli nedkjølt når den strømmer ned langs toppen av luftekanalen. Den synker der ned til bunnen av luftekanalen, hvor den stiger oppover igjen og blir oppvarmet.



Figur 5-13: Hastighetsfordelingen i mønekonstruksjonen (m/s)



Figur 5-14: Temperaturfordeling i møne konstruksjonen (K)

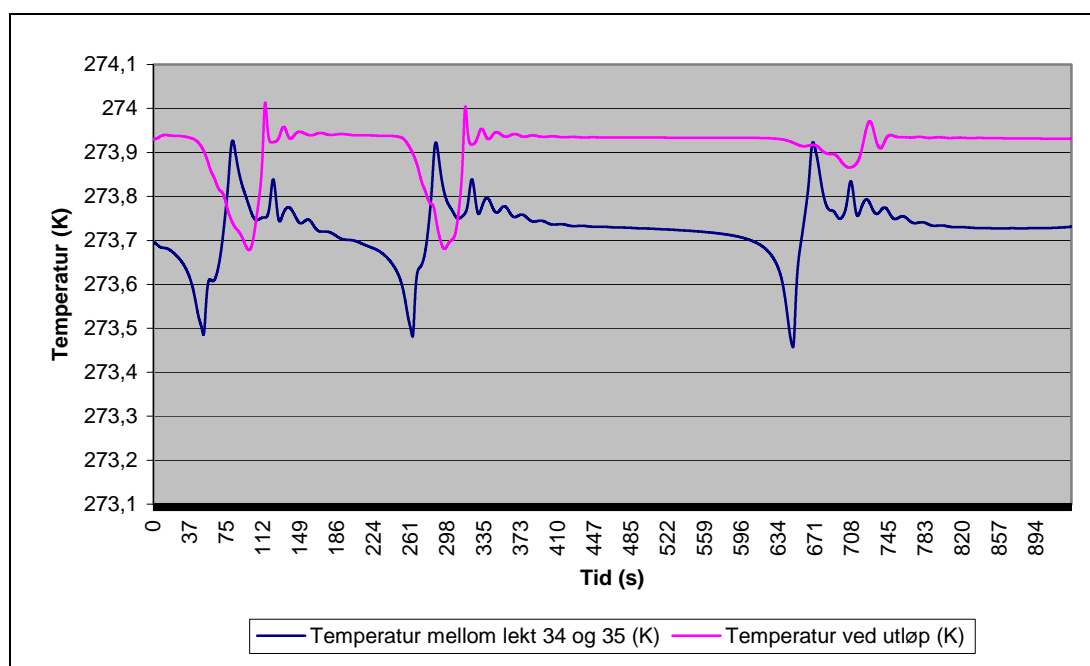
5.4 Resultater fra tak 1.3

For tak 1.3 er husbredden 20 meter i forhold til ti meter for tak 1.2. Dette fører til at kanallengden blir 11,6 meter lang. Tak 1.3 ble tatt med for å se på hva økning av kanallengden fører til for luftstrømmen gjennom taket. Tilfellet vil bli sammenlignet med tak 1.2, og se på hvorledes forskjeller i kanallengden har innvirkning på luftstrømningen. Strømningene i tak 1.3 viste seg å være transiente, derfor er noen av resultatene tidsavhengige, og noen av resultatene er øyeblikksbilder av situasjonen.

For å registrere transiente resultat er det lagt inn tre punkt i kanalen. Et punkt ligger i innløpet, på samme plass som punktet for tak 1.2. Et punkt ligger mellom lekt nummer 34 og lekt nummer 35 talt nedenfra. Punktet ligger i samme høyde over undertaket som punktet i innløpet. Det siste punktet ligger i utløpet, tilsvarende som på Figur 5-3 for tak 1.2. I tillegg er utløpet brukt til å registrere transiente resultat. De tre punktene i luftekanalen er brukt til å registrere temperatur og hastighet. Utløpet er brukt til å beregne middelhastigheten, som igjen er brukt til å beregne tidsavhengig volumstrøm.

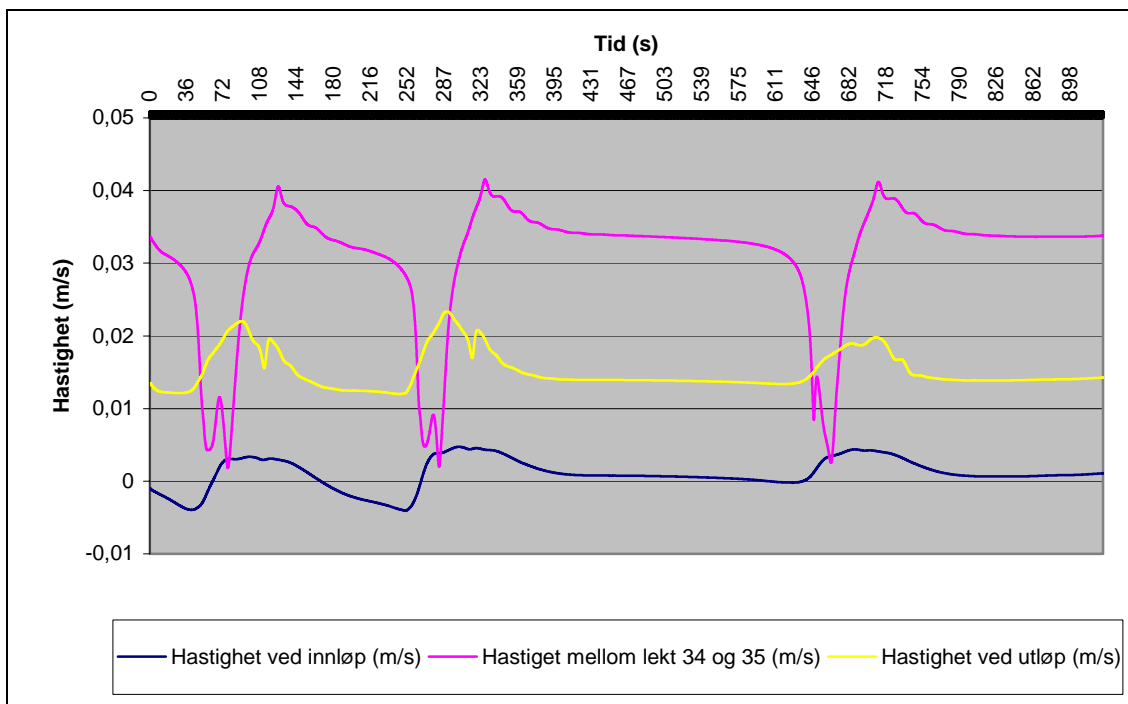
Temperaturfordelingen over tid i taket er registrert i to punkt, punktet i innløpet er ikke presentert fordi der vil verdien ligge nært innløpsverdien og dermed være lite inntresang. I Figur 5-15 ser vi at temperaturen i punktet mellom lekt 34 og 35 varierer med tiden. Figuren viser to gjentakende perioder, men lengden på perioden varierer. Tiden fra første til andre topp er omtrent 3,75 minutt, mens tiden fra andre til tredje topp er omtrent 6,3 minutt. Temperaturen mellom lekt 34 og 35 varierer fra 273,5 til 273,9, og har en gjennomsnittsverdi på 273,72 °K. Temperaturen ved utløpet har en noe høyere gjennomsnittsverdi, den er 273,90 °K. Temperaturen i utløpet varierer også med samme perioder som temperaturen mellom lekt 34 og 34. Utslagene er noe mindre her, spesielt det siste /Vedlegg 7/.

5.4.1 Transiente resultat



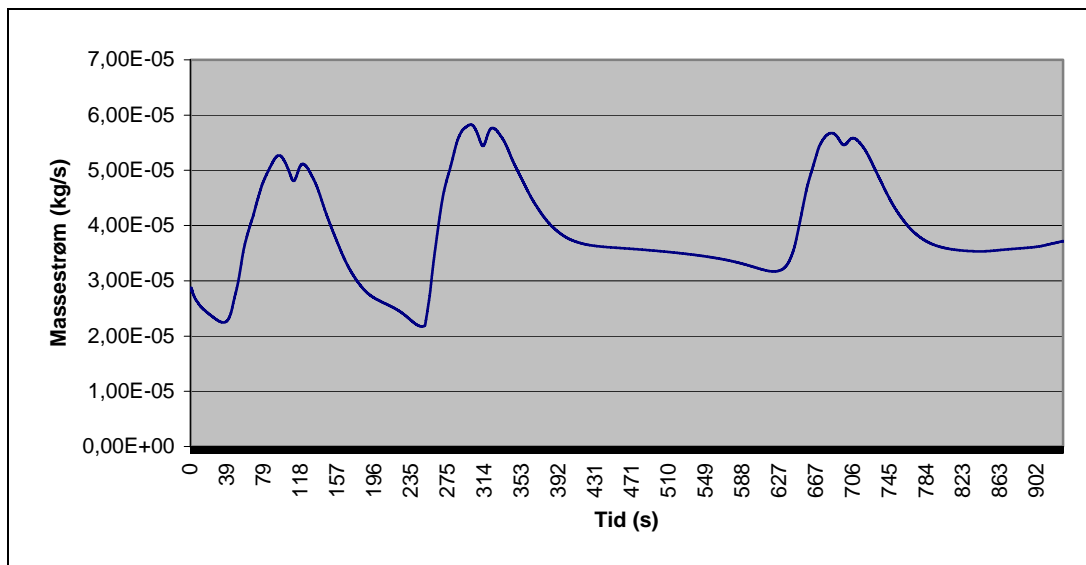
Figur 5-15: Tidsavhengig temperatur fordeling i tak 1.3

Figur 5-16 viser temperatur fordelingen over tid for taket med de samme punktene som i Figur 5-15, i tillegg viser den hastigheten ved innløpet. Figuren viser de samme periodiske svingningene som er vist for temperaturen, det er også for hastigheten punktet mellom lekt 34 og 35 som svinger mest. Hastigheten svinger der fra 0,04 m/s til nesten null. Gjennomsnittshastigheten er 0,031 m/s. Hastigheten ved innløpet varierer fra negativ til positiv verdi, det vil si at luftstrømmen går begge veier i punktet. Verdien er generelt svært lav i punktet ved innløpet, det går altså en meget liten luftstrøm gjennom punktet. Dette samsvarer med hva vi så for tak 1.2. Selv om hastigheten ved utløpet er mer stabil enn hastigheten lenger nede i kanalen, varierer den også med samme periodene. Gjennomsnittsverdien her er 0,015 m/s /Vedlegg 8/.



Figur 5-16: Tidsavhengig hastighetsfordeling i tak 1.3

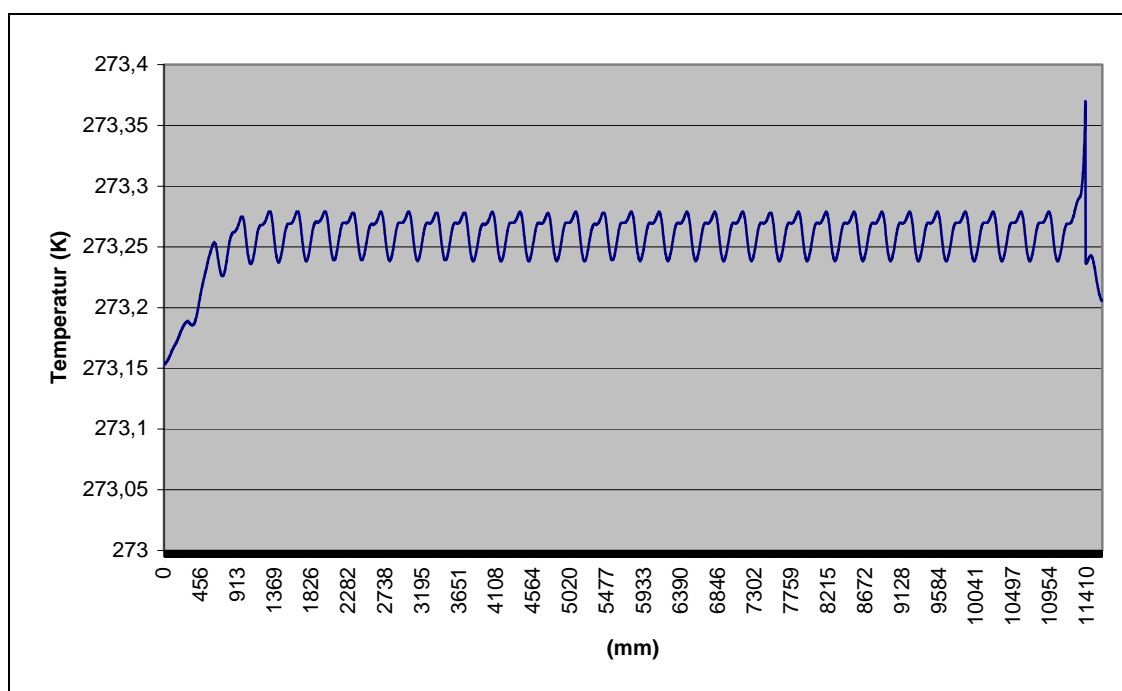
Figur 5-17 viser massestrømmen ut gjennom utløpet også massestrømmen varierer med samme periode som vi har sett ved hastigheten og temperaturen. Luften i kanalen har en densitet på $1,2903 \text{ kg/m}^3$. Gjennomsnittlig massestrøm gjennom kanalen er $3,906e^{-05} \text{ kg/s}$ /Vedlegg 9/



Figur 5-17: Massestrøm ut gjennom utløpet i taket

5.4.2 Øyeblikksresultat

Figur 5-18 viser temperatur på overflaten av taksteinen til tak 1.3. Den starter på 273,15 °K som er utetemperatur. Temperaturen stiger når den kommer over det oppvarma området, og den starter å svinge. Ei svingning tilsvarer avstanden mellom to lekter. Gjennomsnittstemperaturen på taksteinen er 273,26 °K /Vedlegg 10/



Figur 5-18: Temperaturen på overflaten av taksteinen

Figurer og beskrivelse av strømning, temperaturfordeling og hastighetsfordeling er ikke tatt med for tak 1.3 og blir heller ikke presentert for tak 2.3, 3.3, 5.1. Temperatur, strømning og hastighetsforhold i takene er forholdsvis ensartet derfor er figurene for hvert enkelt lagt ved som vedlegg isteden.

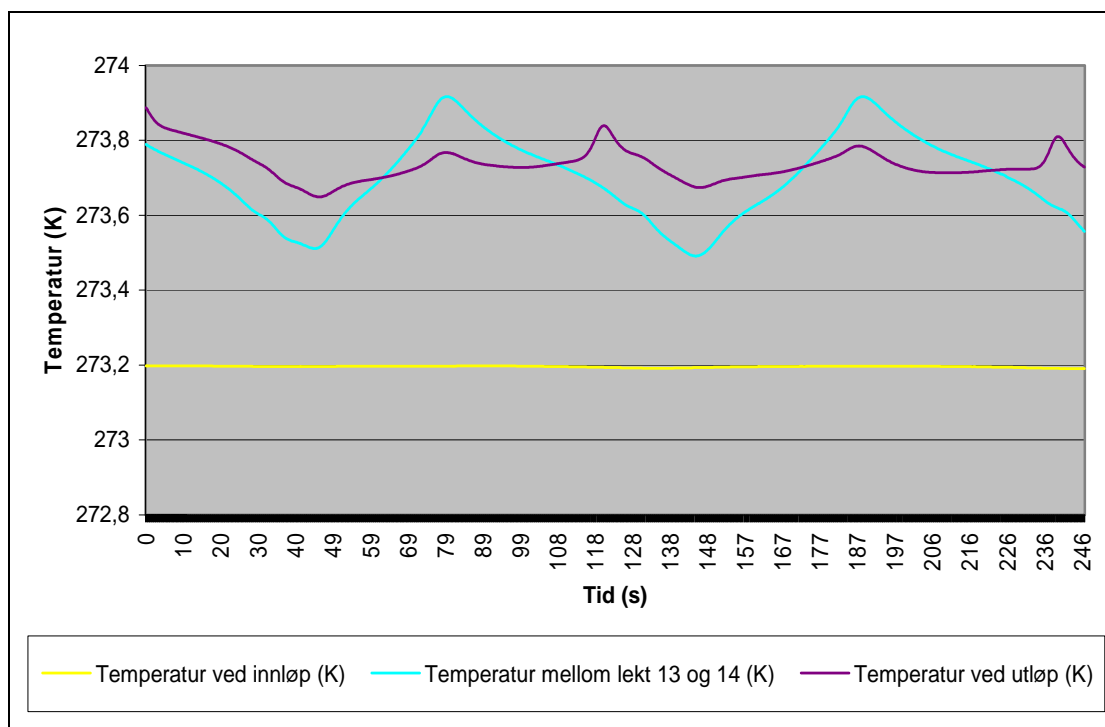
5.5 Resultater fra tak 2.3

Tak 2.3 har en takvinkel på 20 grader husbredden er som for tak 1.2, ti meter, derfor blir kanallengden redusert til omtrent 5,3 meter. Lekteantallet blir også redusert til 16 lekter. Foruten disse forandringene har tak 2.3 lik oppbygning som tak 1.2. Dette taktilfelle er tatt med for å undersøke hvordan takvinkelen har innvirkning på luftstrømmen gjennom taket. Strømningen i taket ble transiente derfor er resultatene som blir presentert tidsavhengige, eller øyeblikksbilder av strømmen.

Det er for tak 2.3 også lagt inn tre punkt for å registrere transiente resultater, punktene i raft og møne er lagt i samme punkt som for tak 1.2. Det er også lagt inn et punkt mellom lekt 13 og 14, dette punktet ligger i samme høyde over kanalen som de to andre punktene. Disse punktene registrerer temperatur og hastighet over tid. I tillegg er utløpet brukt til å registrere middelhastigheten, den er brukt til å bestemme massestrømmen gjennom kanalen.

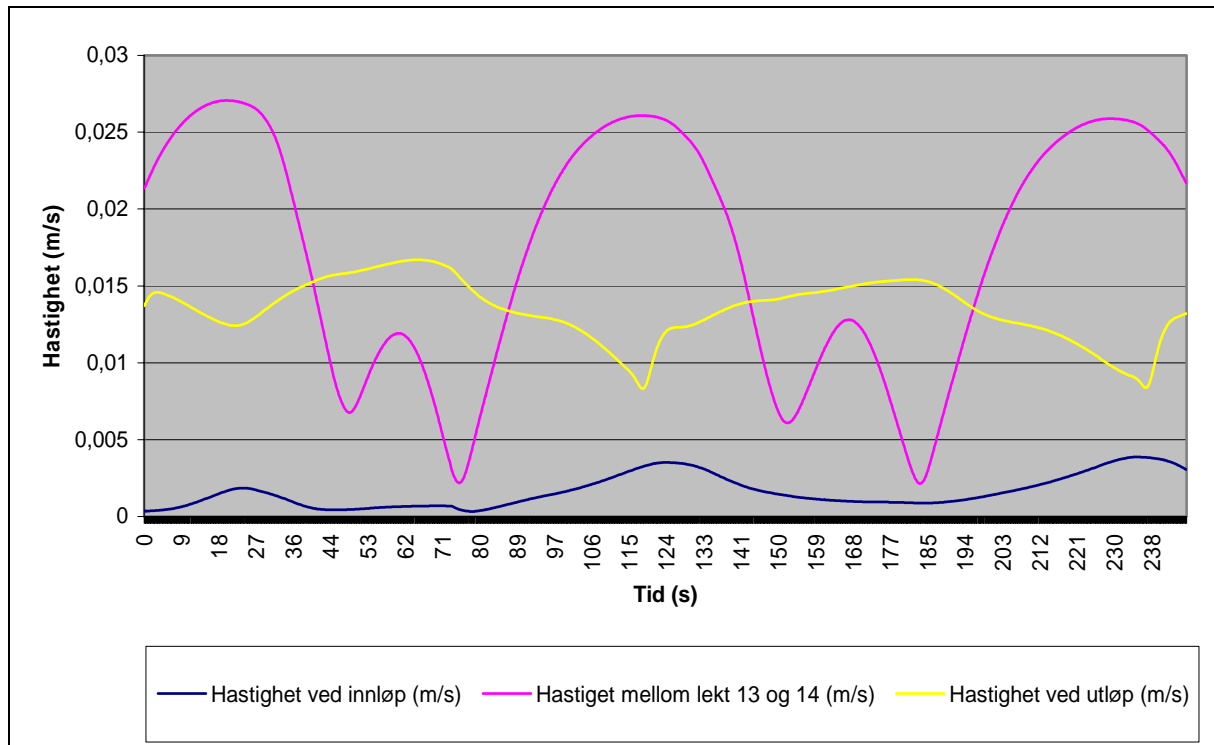
5.5.1 Transiente resultat

Temperaturen i innløpet er ligger stabilt rett i overkant av uttemperaturen, mens temperaturen mellom lekt 13 og 14 og temperaturen ved utløpet varierer med faste perioder, se Figur 5-19. Både temperaturen mellom lekt 13 og 14 og ved utløpet har middelverdi på 273,7 K. Perioden varierer over et tidsrom på omtrent et og et halvt minutt /Vedlegg 17/.



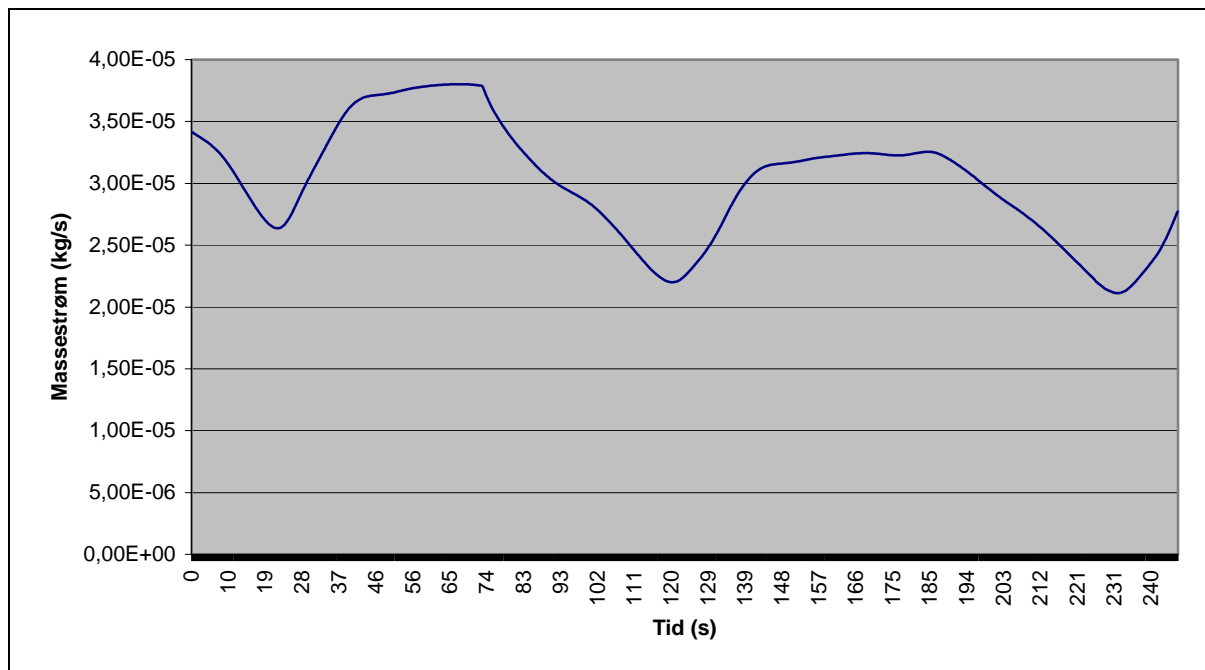
Figur 5-19: Temperaturvariasjoner over tid for tak 2.3

Hastighetsvariasjonene over tid for tak 2.3 er lik variasjonene vi har sett for de andre takene. Hastigheten for punktet ved innløpet er svært lav, mens hastigheten for de to andre punktene er noe høyere og varierer med faste perioder (Se Figur 5-20). Gjennomsnittshastigheten er henholdsvis 0,017 m/s og 0,013 m/s for punktet mellom lekt 13 og 14 og punktet ved utløpet. Perioden hastigheten svinger med ligger rundt to minutter både for punktet mellomlekt 13 og 14 og punktet ved utløpet /Vedlegg 18/.



Figur 5-20: Hastighetsvariasjoner over tid for tak 2.3

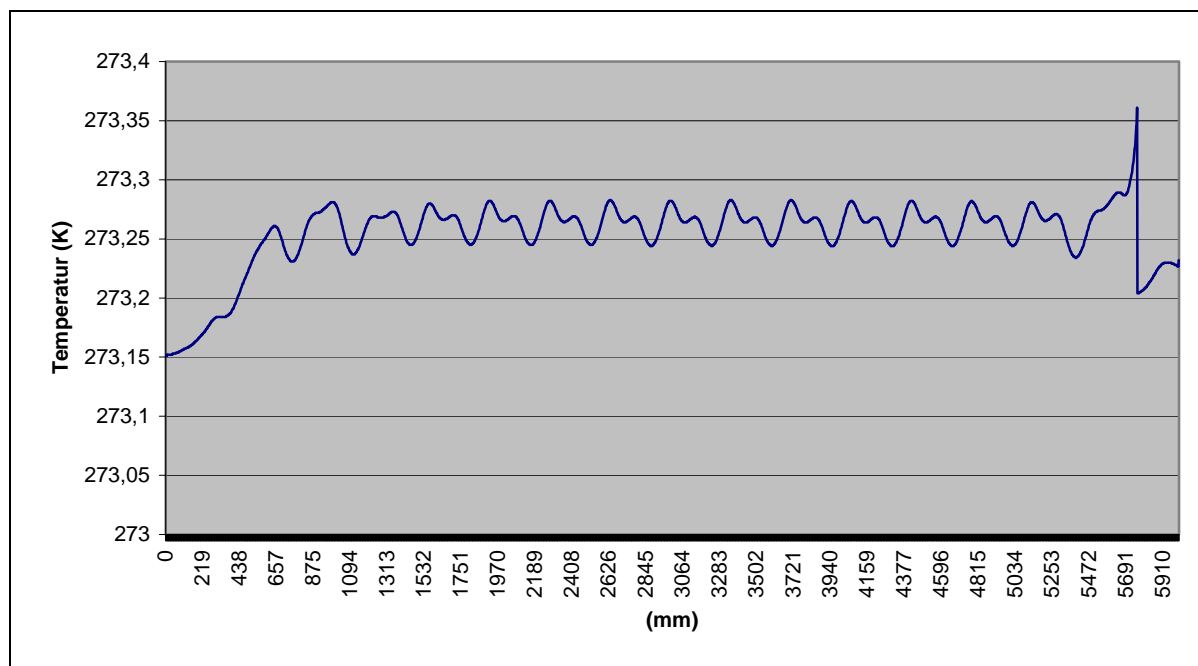
Luftstrømmen gjennom luftespalten til tak 2.3 er en av de laveste av alle takene som er simulert. Middelveidien av massestrømmen er $3,003e^{-5}$ /Vedlegg 19/. Verdien av varierer med tiden med faste svingninger, svingningene har en periode på omtrent 1,8 minutter.



Figur 5-21: Massestrøm gjennom utløpet for tak 2.3

5.5.2 Øyeblikksresultat

Temperaturforholdene på taksteinen for tak 2.3 er lik de andre takene som er simulert, temperaturen svinger med en periode som er lik lekteavstanden. Middelerdien av temperaturen på taket er 273,254 K /Vedlegg 20/



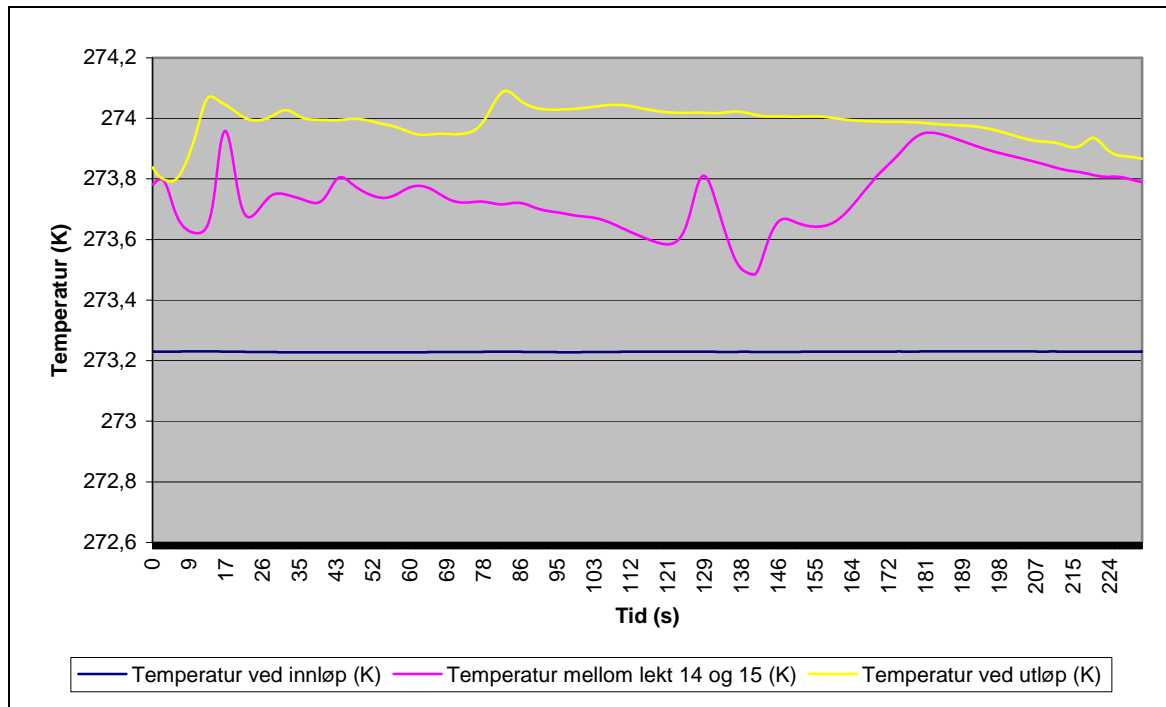
Figur 5-22: Temperatur på takstein for tak 2.3

5.6 Resultater fra tak 3.3

For tak 3.3 er sløyfehøyden økt fra 36 mm til 48 mm, ellers er taket likt tak 1.2. Ved å øke sløyfehøyden til 48 mm øker en hele luftekanalens høyde med 12 mm, til 88 mm. Tak 3.3 er tatt med for å undersøke om økning i spaltehøyden fører til økning i luftgjennomstrømmingen. Det kan være interessant å sammenligne dette taket med tak 5.1, der blir steinlekt høyden økt med 6 mm. Strømningen for tak 3.3 ble transient, derfor er resultatene som blir presentert tidsavhengig eller så er de øyeblikksbilde av situasjonen i taket.

Det er for tak 3.3 lagt inn tre punkt i kanalen for å registrere temperatur og hastigheter, det er et punkt i raft og et i møne. Disse er plassert som for tak 1.2. Det siste punktet ligger mellom lekt 14 og 15. I tillegg er utløpet brukt til å registrere middelhastigheten som er brukt til å regne ut en midlere massestrøm over tid.

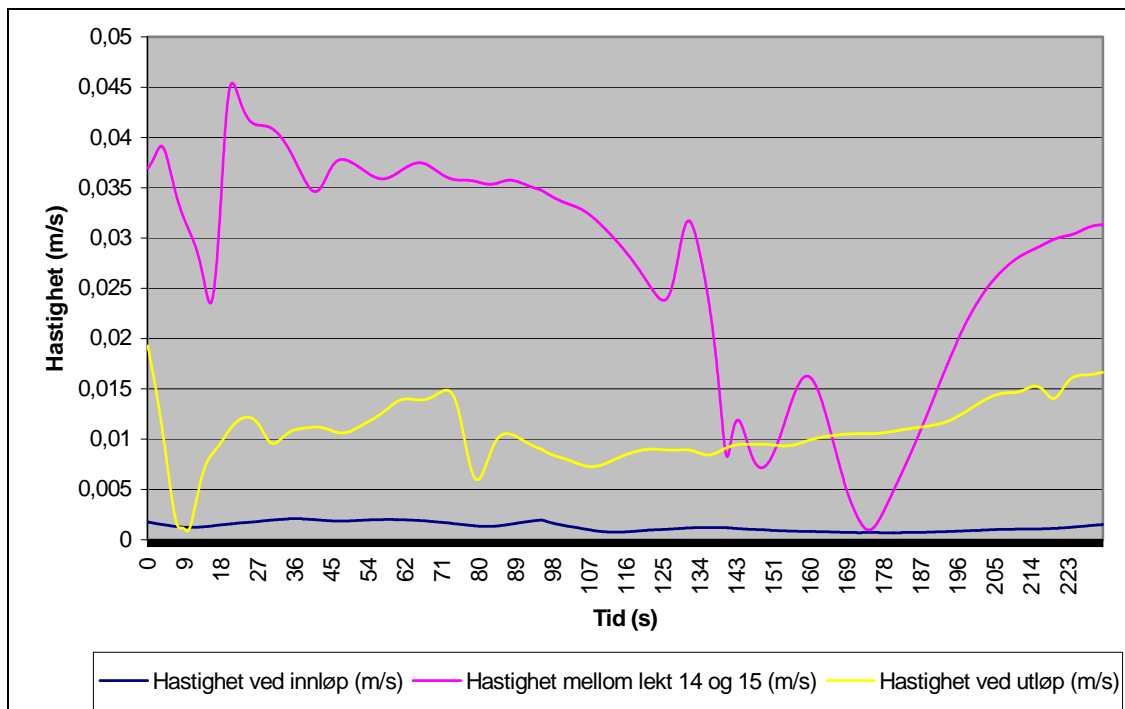
Temperaturen ved innløpet ligger som for de andre takene som er sett på stabilt rett i overkant av utetemperaturen. For temperaturen ved utløp og mellom lekt 14 og 15 usystematiske variasjoner. En har sett for de andre takene at verdiene varierte med faste perioder, dette ser en ikke hos tak 3.3. Temperaturfordelingen er angitt for i underkant av fire minutter, en hadde kanskje sett mer til periodiske gjentakelser om en hadde utvidet tidsrommet.



Figur 5-23: Temperaturfordeling over tid for tak 3.3

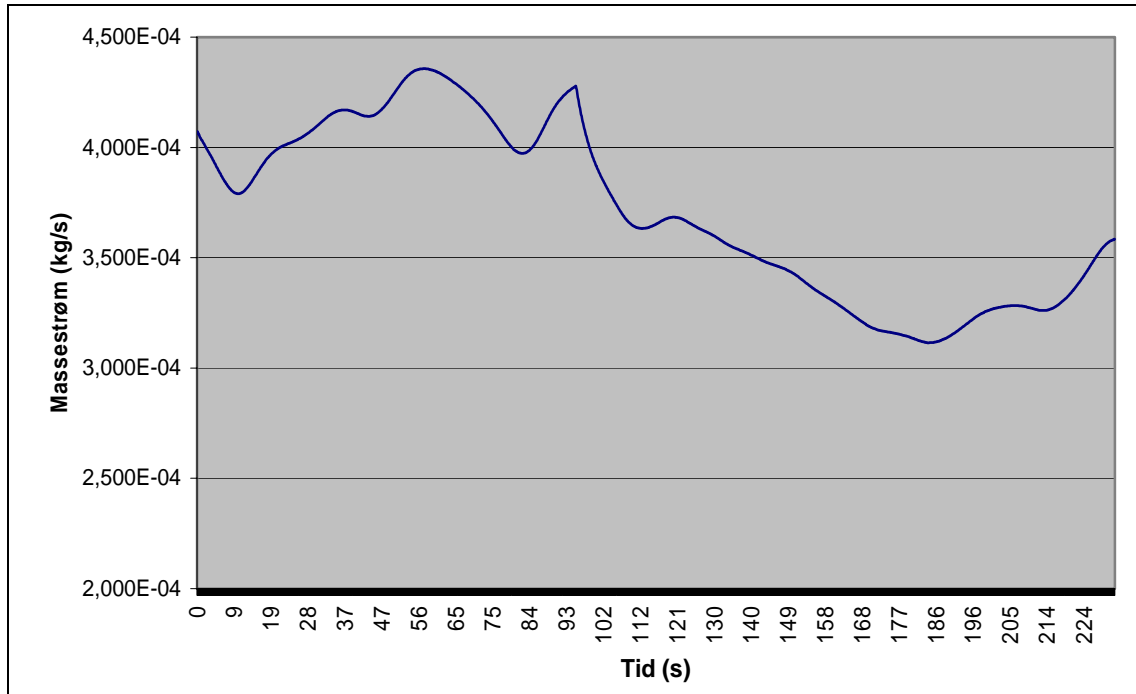
5.6.1 Transiente resultat

En ser samme tendensene for hastighetene i kanalen som for temperaturen, ved innløpet er verdien stabil, mens verdiene mellomlekt 14 og 15 og utløpet varierer mer. Spesielt verdien for punktet mellom lekt 14 og 15 varierer mye. En ser også fra Figur 5-24 at det er ingen periodiske gjentakelser av resultatene.



Figur 5-24: Hastighetsfordeling over tid for tak 3.3

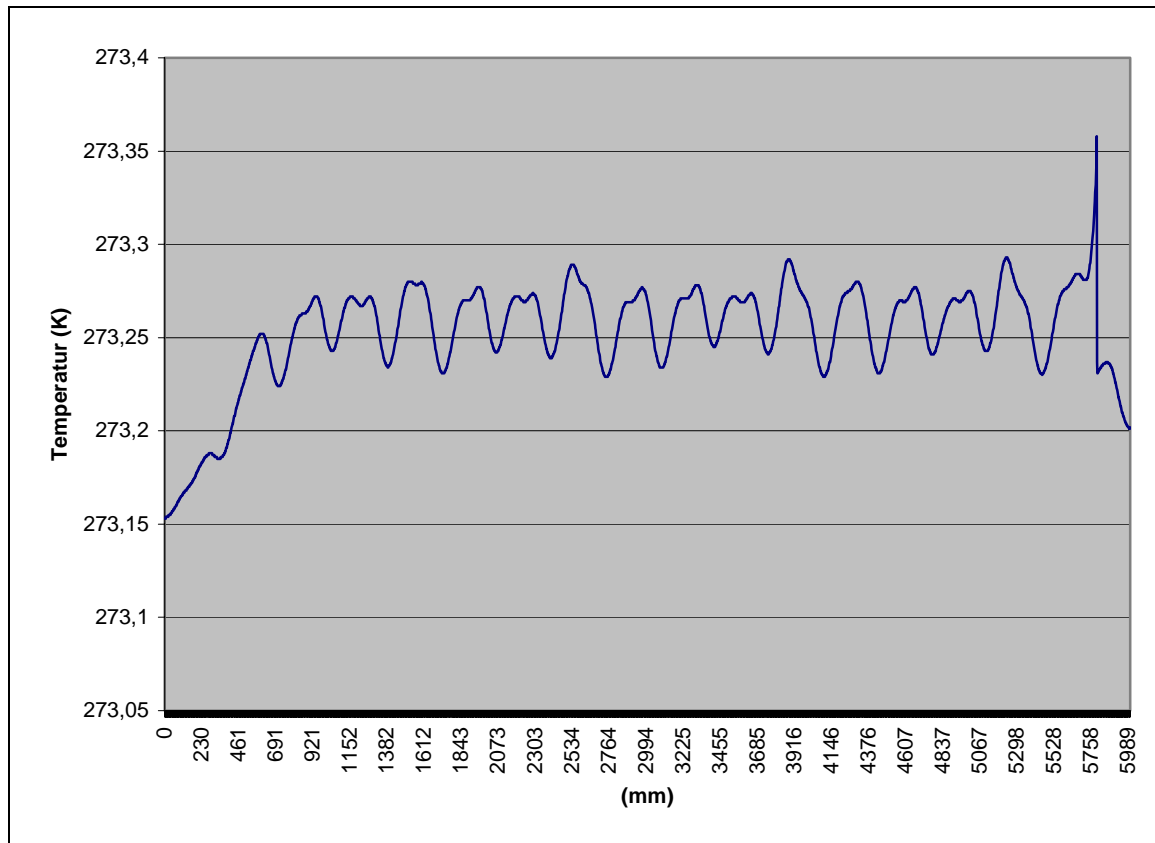
Figur 5-25 angir massestrømmen gjennom luftkanalen, middelverien på $3,708e^{-4}$ kg/s er noe høyere enn for tak 1.2. De viser at ved økning av sløyfehøyden får en økning i luftstrømmingen i kanalen.



Figur 5-25: Massestrøm gjennom luftkanalen til tak 3.3

5.6.2 Øyeblikksresultater

Temperaturen på taksteinen til tak 3.3 varierer med periodiske variasjoner langs hele taket, lengden på perioden er lik lektaavstanden. Denne svingningen går igjen alle takene som er sett på tidligere, men noen av svingningene har større utslag enn andre. Gjennomsnitt verdien på temperaturen på taksteinen er 273,253 K /Vedlegg 30/



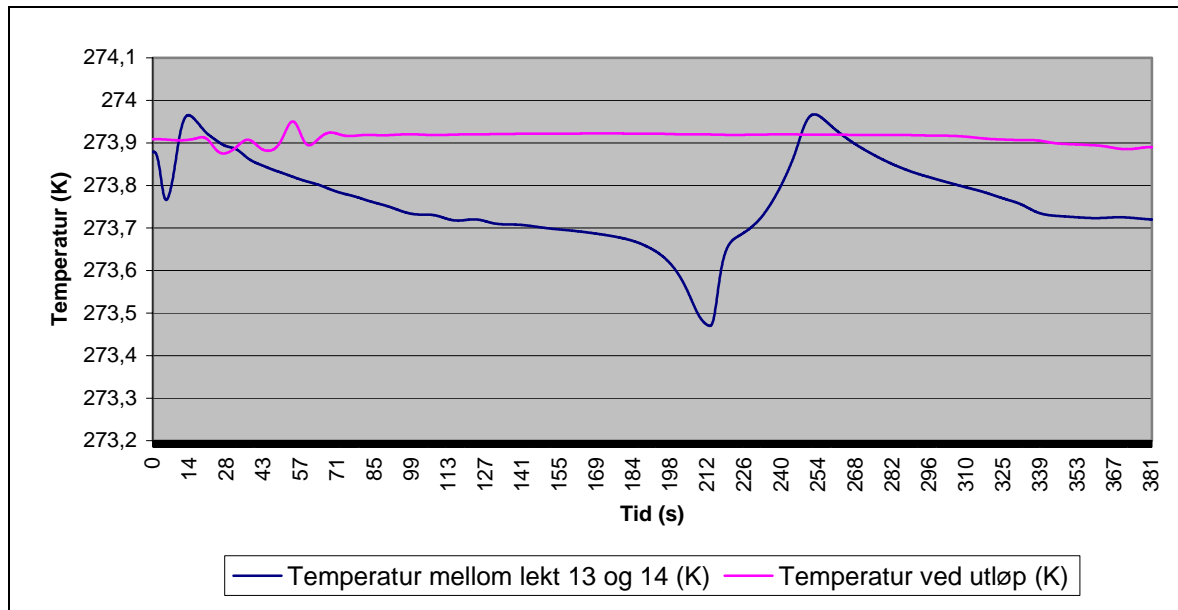
Figur 5-26: Temperatur på takstein for tak 3.3

5.7 Resultater fra tak 5.1

For tak 5.1 er steinlekt høyden økt med 6 mm, fra 30 til 36 mm. Total høyde på luftespalten blir da 82 mm. Dette er den eneste forandringen som er gjort fra tak 1.2. Strømningen for taket viste seg å være tidsavhengige, derfor er resultatene som er presentert transiente eller øyeblikksbilder fra forholdene i kanalen. For å registrere resultat ble det lagt inn to punkt i kanalen, et punkt ligger ved utløpet. Dette punktet ligger på samme plass som for tak 1.2, se Figur 5-4. Det siste punktet ligger mellom lekt 13 og 14 i samme høyde over kanalen som det første punktet. Disse punktene ble brukt til å registrere temperaturforandringer over tid. I tillegg ble utløpet brukt til å registrere middelhastigheten, denne ble brukt til å bestemme massestrømmen gjennom kanalen.

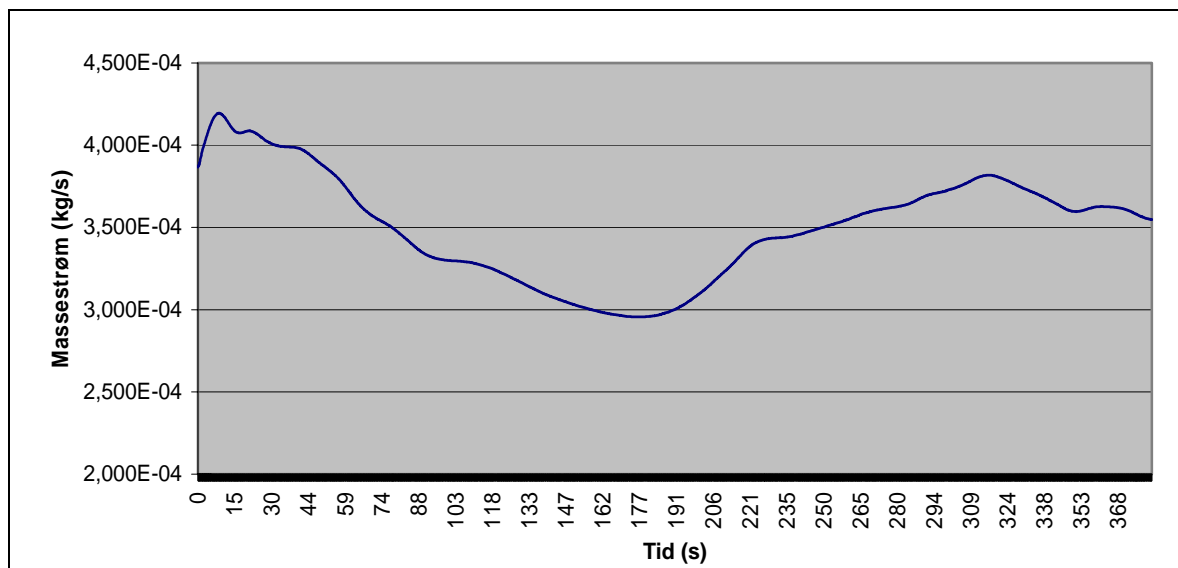
5.7.1 Transiente resultat

Figur 5-27 viser temperaturfordelingen over tid i to punkt i luftekanalene. Temperaturen i punktet mellom lekt 13 og 14 varierer med forholdsvis store utslag, mens temperaturen i utløpet er nesten helt stabil. Ut fra figuren er det vanskelig å se om det er gjentakende perioder for temperaturen i punktet mellom lekt 13 og 15, hvis tidsrommet ble økt hadde det kanskje vært mulig å se gjentakende periode. For temperaturen i utløpet er den mye mer stabil enn hva vi har sett i mange andre tak.



Figur 5-27: Temperaturfordeling over tid for tak 5.1

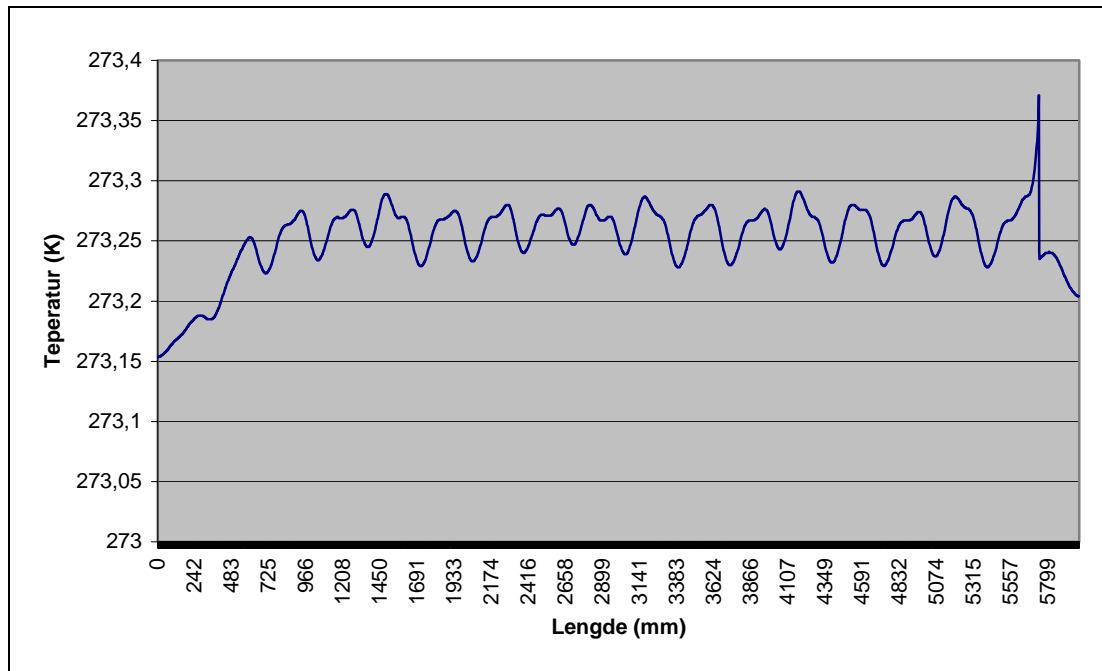
Figur 5-28 angir massestrømmen over tid gjennom luftkanalen. Middelerdien for massestrømmen er $3,503e^{-4}$ kg/s, dette er en økning på $8,87e^{-5}$ kg/s fra tak 1.2. Dette viser at ved å øke steinlekt høyden øker luftgjennomstrømningen /Vedlegg 38/.



Figur 5-28: Massestrøm gjennom utløpet til tak 5.1

5.7.2 Øyeblikksresultat

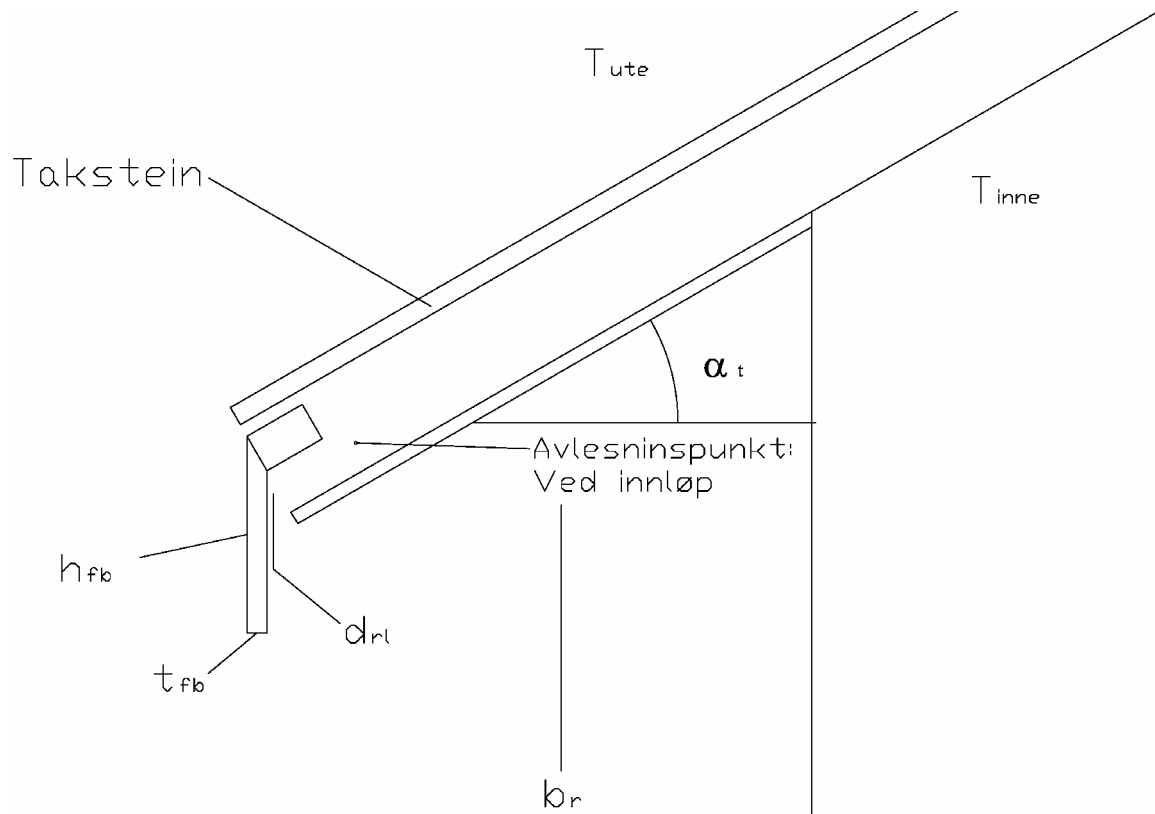
Temperaturfordelingen på taksteinen for tak 5.1 er sammenfallende med de andre takene som er studert. Temperaturen varierer med perioder som er lik lektaavstanden for taket. Middelerdien for temperaturen er 273,253 K /Vedlegg 39/.



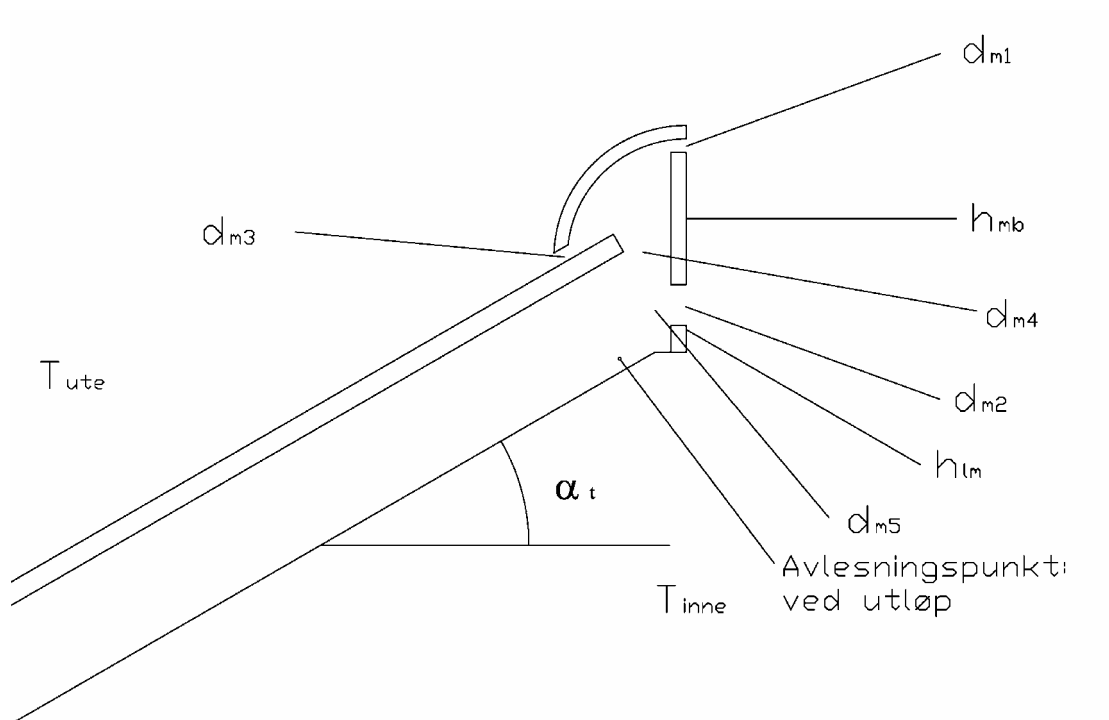
Figur 5-29: Temperaturfordeling på taksteinen til tak 5.1

5.8 Resultater fra tak 6.1

For resultatene fra takene 6.1, 6.2 og 6.3, vil det bli presentert flere data enn hva det er blitt gjort med mange av de andre takene. Disse takene skiller seg mer ut de andre takene fordi her er det fjernet deler av takkonstruksjonen, for å se hvilken innvirkning dette har for luftgjennomstrømningen i kanalen. I tak 6.1 er lektene i konstruksjonen fjernet, Figur 5-30 viser hvordan raftkonstruksjonen for taket ser ut. Strømningen for taket ble transient, derfor er resultatene som blir presentert tidsavhengig eller så er de øyeblikksbilder av luftstrømmen. Det er for tak 6.1 også lagt inn tre punkt i kanalen for å registrere resultat, ett ved innløpet og et i midten av kanalen og et ved utløpet, fig 1 og 2 viser punktene ved innløp og utløp.



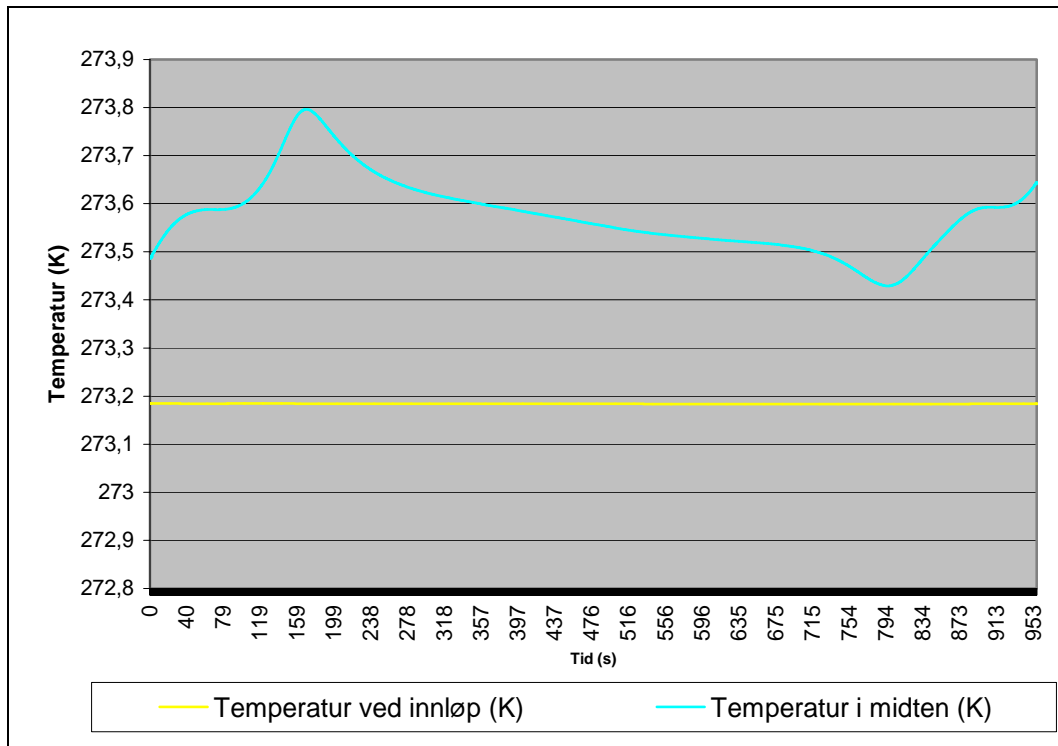
Figur 5-30: Utforming av raft konstruksjonen til tak 6.1



Figur 5-31: Utforming av mønekonstruksjonen til tak 6.1

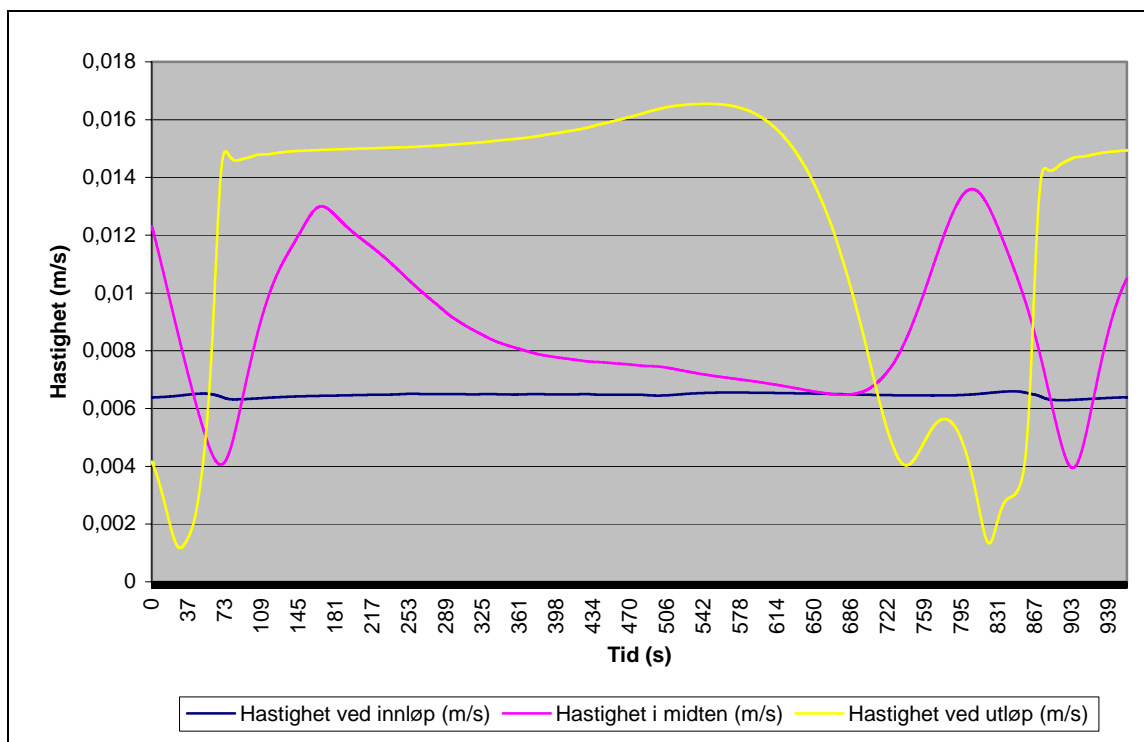
5.8.1 Transiente resultat

Temperaturen ble registrert i kun to punkt i kanalen, resultat for punktet i utløpet ble ikke registrert. Temperaturen i punktet ved innløpet ligger stabil i overkant av utetemperaturen. For punktet midt i kanalen varierer temperaturen fra en topp verdi på 273,80 K til en bunn verdi på 273,42 K. Svingningene varierer med lange perioder, Figur 5-32 viser resultat over ei tids periode på 16 minutter. Figuren dekker like vell ikke en hel periode, men det ser ut som svingningene gjentar seg.



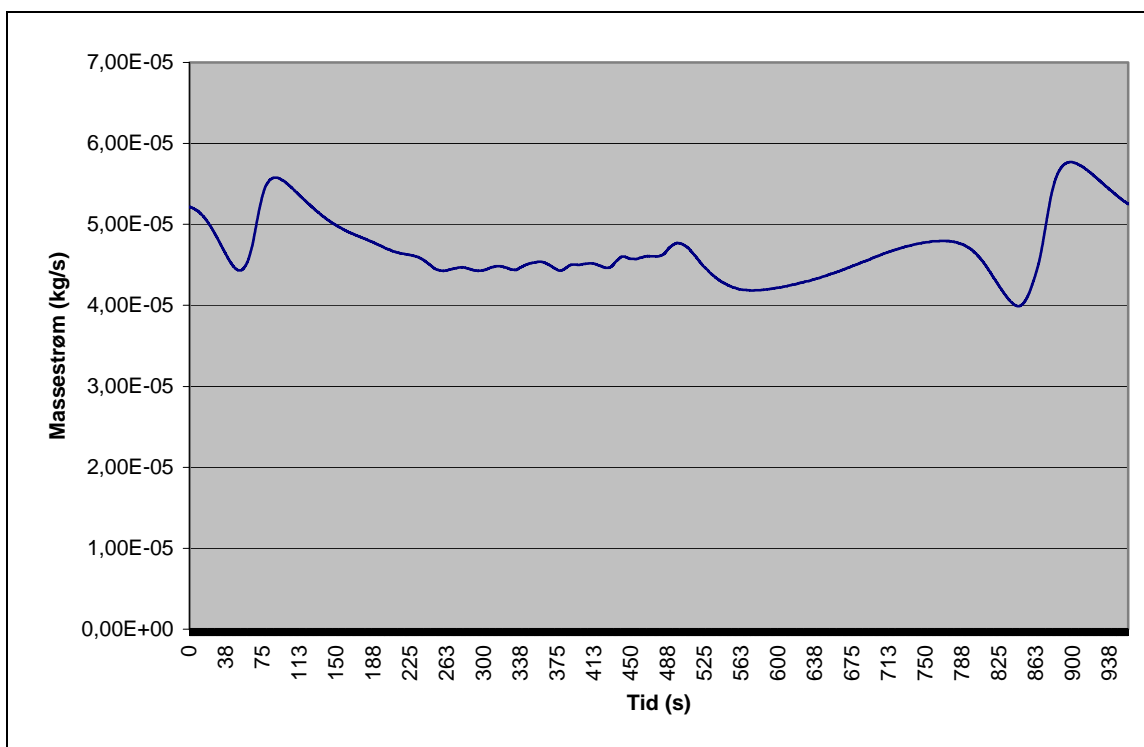
Figur 5-32: Temperaturfordeling over tid for tak 6.1

Figur 5-33 viser hastighetsfordelingen for de tre punktene i kanalen, hastigheten ved innløp er stabil og lav. Dette går også igjen i andre tak som er studert. Hastigheten i midten og hastigheten ved utløpet varierer. Særlig hastigheten ved utløpet varierer mye, hastigheten varierer mellom 0,0015 m/s og 0,0167 m/s. Svingningene varierer med lange perioder på rundt 13 minutt. En kunne med fordel ha gjennomført beregninger over en lengre tidsperiode for å tydeligere å kunne se om svingningene gjentar seg.



Figur 5-33: Hastighetsfordeling over tid for tak 6.1

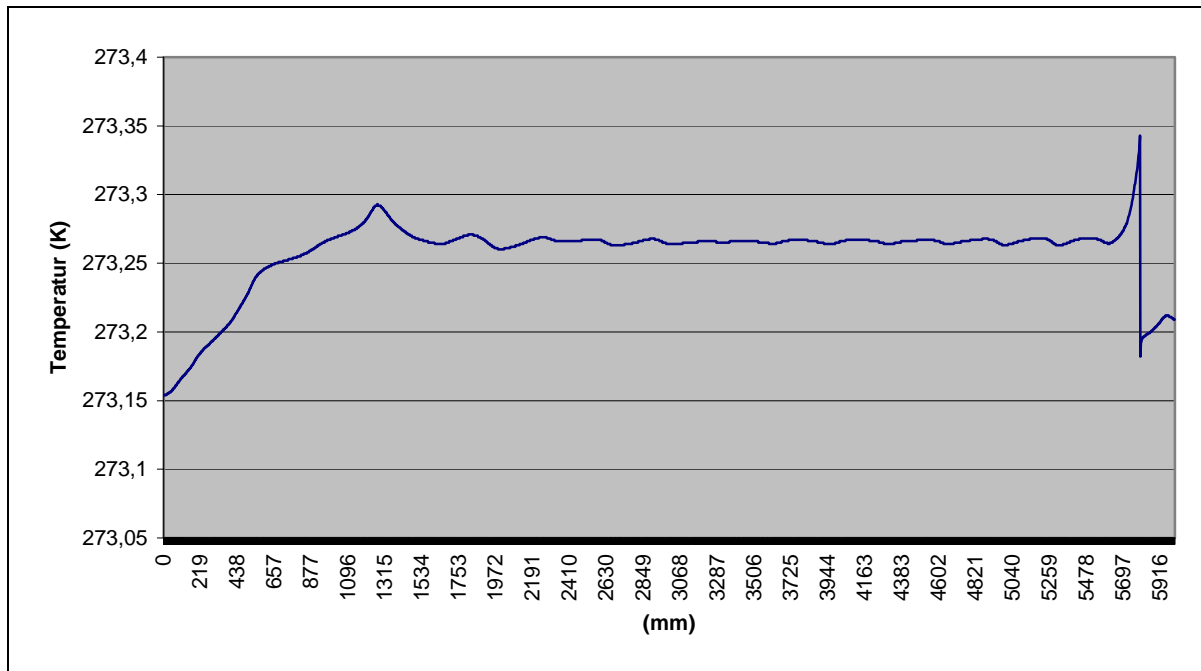
Massestrømmen gjennom tak 6.1 er overraskende lav, siden alle lektene er fjernet skulle en tro at strømningsmotstanden ble redusert og dermed få en økning i luftstrømningen. Dette er ikke tilfelle for tak 6.1, middelerdien av luft gjennomstrømningen er $4,61 \cdot 10^{-5}$. Dette er på nivå t med ak 1.3 og tak 2.3, og er mindre enn for tak 1,2, 3.3 og 5.1.



Figur 5-34: Massestrøm gjennom tak 6.1

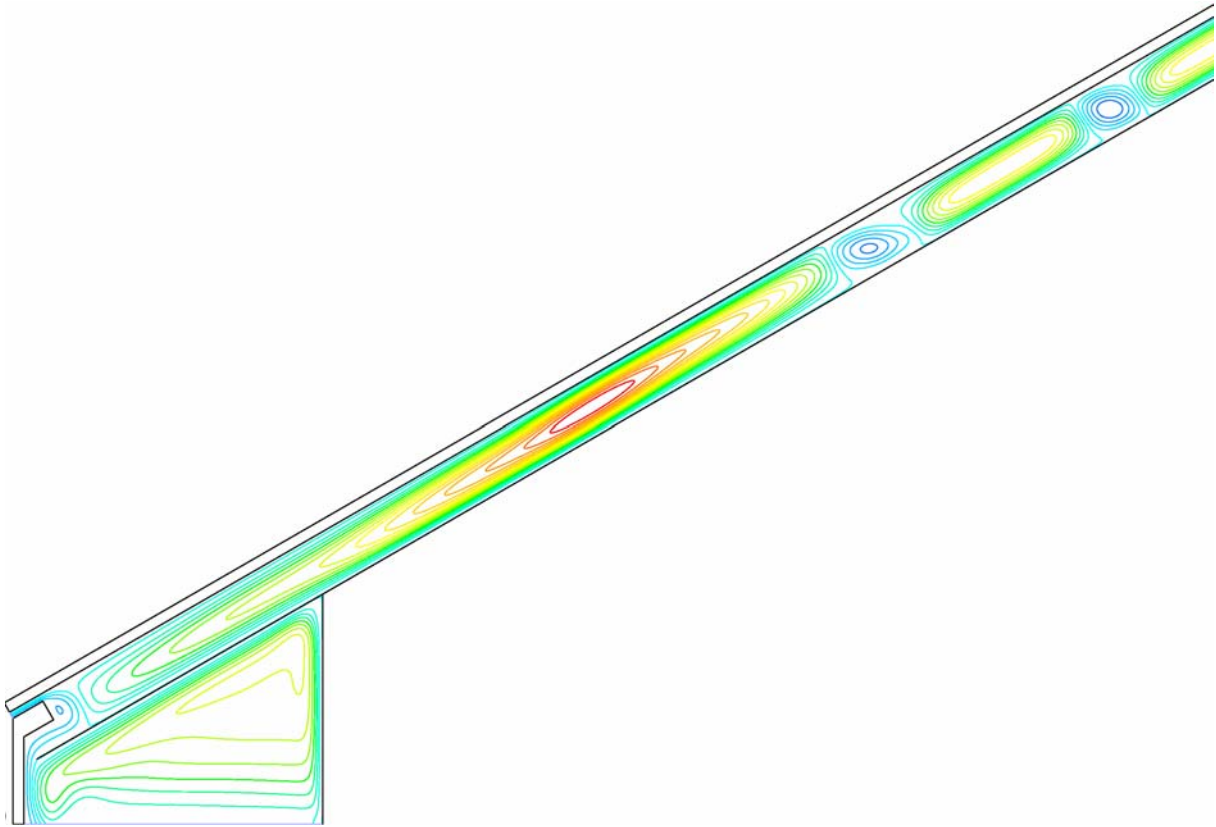
5.8.2 Øyeblikksresultat

Temperaturen på taksteinen for tak 6.1 ligger omtrent på samme verdi som for resten av takene, men variasjonene en så for de andre takene er borte. For de andre takene varierte verdien med en periode som var lik lekteavstanden. I dette tilfelle er lektene borte og det er også temperatursvingningene på taksteinen mellom lektene.



Figur 5-35: Temperatur på takstein til tak 6.1

Strømningslinjene i innløpet viser at det meste av strømmingen inn innløpet mellom nederste lekt og taksteinen går inn rundt lekten og ut igjen. Det er svært lite luft som går opp gjennom luftekanalen. I tidligere tak så vi at det dannet seg luftsirkulasjoner mellomlektene, siden det ikke er lekter i tak 6.1 skjer det ikke. For tak 6.1 danner det seg først en stor sirkulasjon. Den store sirkulasjonen stopper i en liten sirkulasjon. Deretter kommer en litt større sirkulasjon, dette gjentar seg langs hele luftekanalen. Hastigheten i kanalen er størst i over og underkant av sirkulasjonene, Figur 5-37 viser dette.

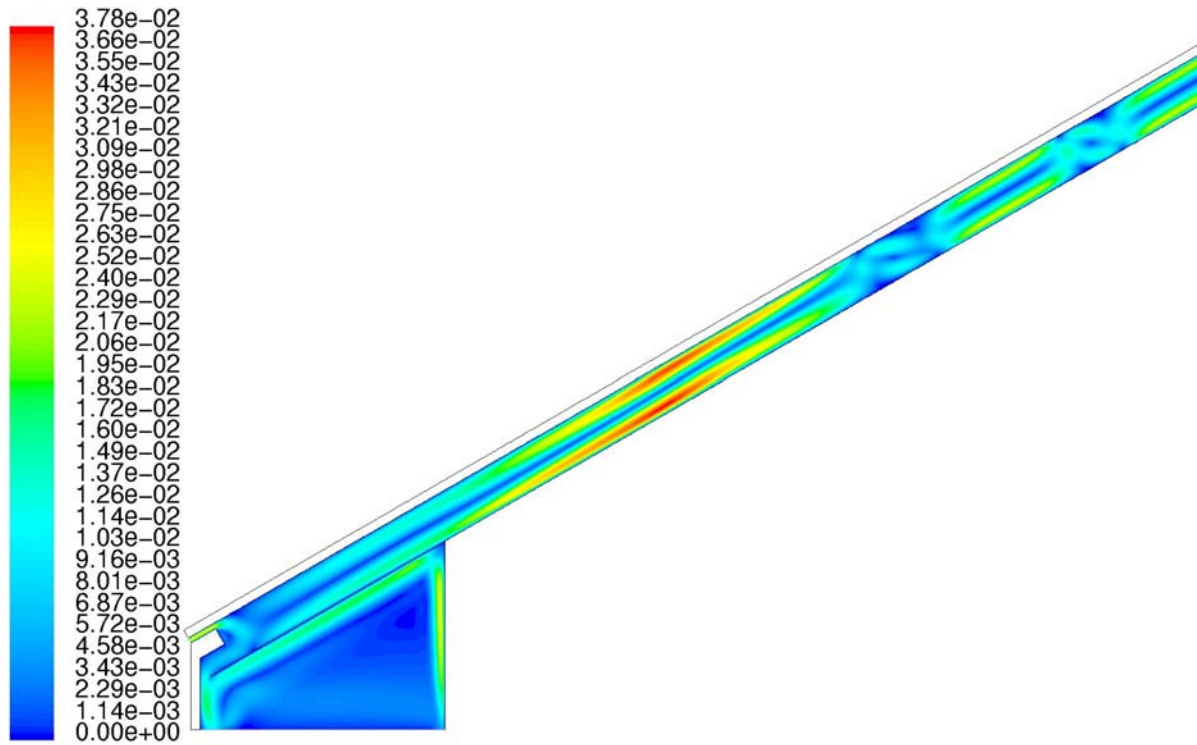


Figur 5-36: Strømningslinjer i raft og nedre del av luftekanalen til tak 6.1

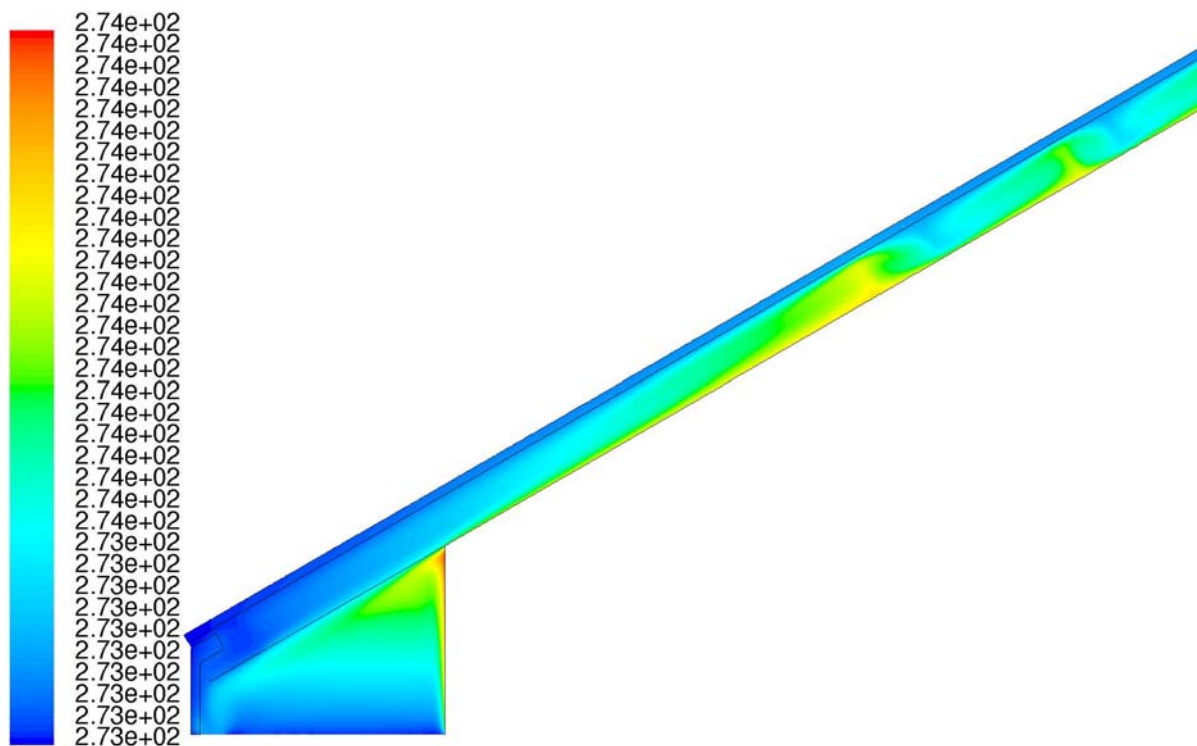
Temperaturfordelingen i luftekanalen er vist i Figur 5-38. Temperaturen er størst i øverste del av sirkulasjonene, der blir det et felt som er varmere enn resten av kanalen.

Sirkulasjonsmønsteret vi så fra raften fortsetter i Figur 5-39 fra mønet. Vi ser at i utløpet strømmer det svært lite luft. Dette så vi også fra Figur 5-34 som viser massestrømmen gjennom taket. Dette er litt rart siden lektene er fjernet i tak 6.1 og det minsker strømningsmotstanden i kanalen. En skulle tru at luftgjennomstrømningen derfor skulle øke.

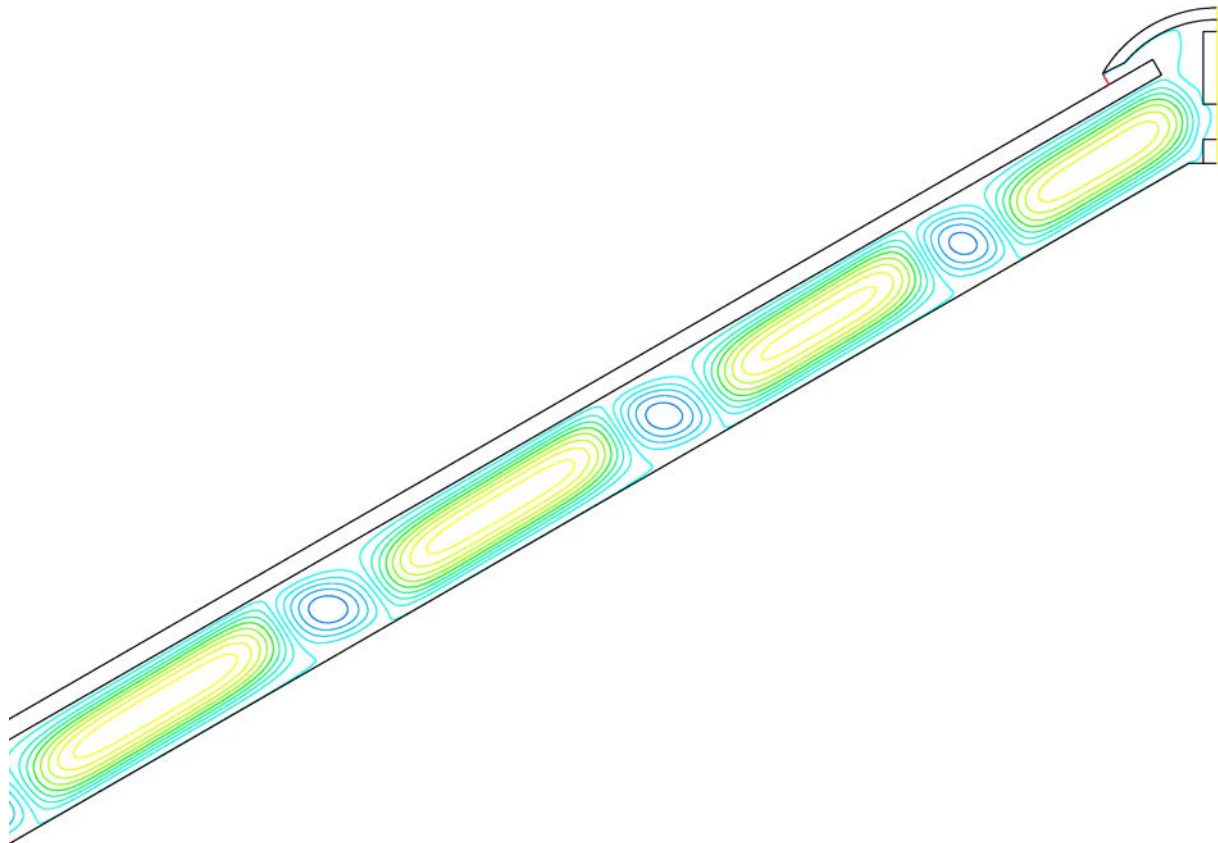
Temperatur og hastighet i øverste del av kanalen er lik det vi så i nederste del av kanalen. Hastigheten er størst øverst og nederst i sirkulasjonene, og temperaturen for en økning i øverste ende av sirkulasjonene (se Figur 5-40 og Figur 5-41).



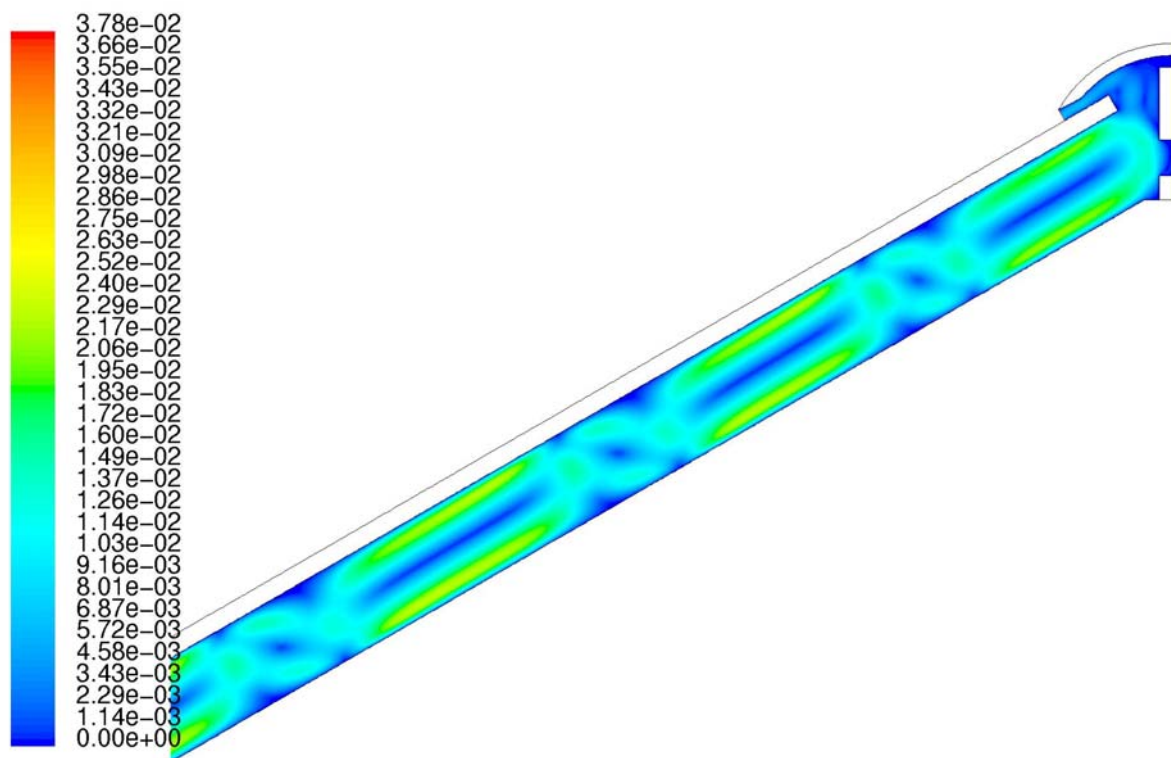
Figur 5-37: Hastighetsfordeling i raft og nedre del av luftkanalen til tak 6.1 (m/s)



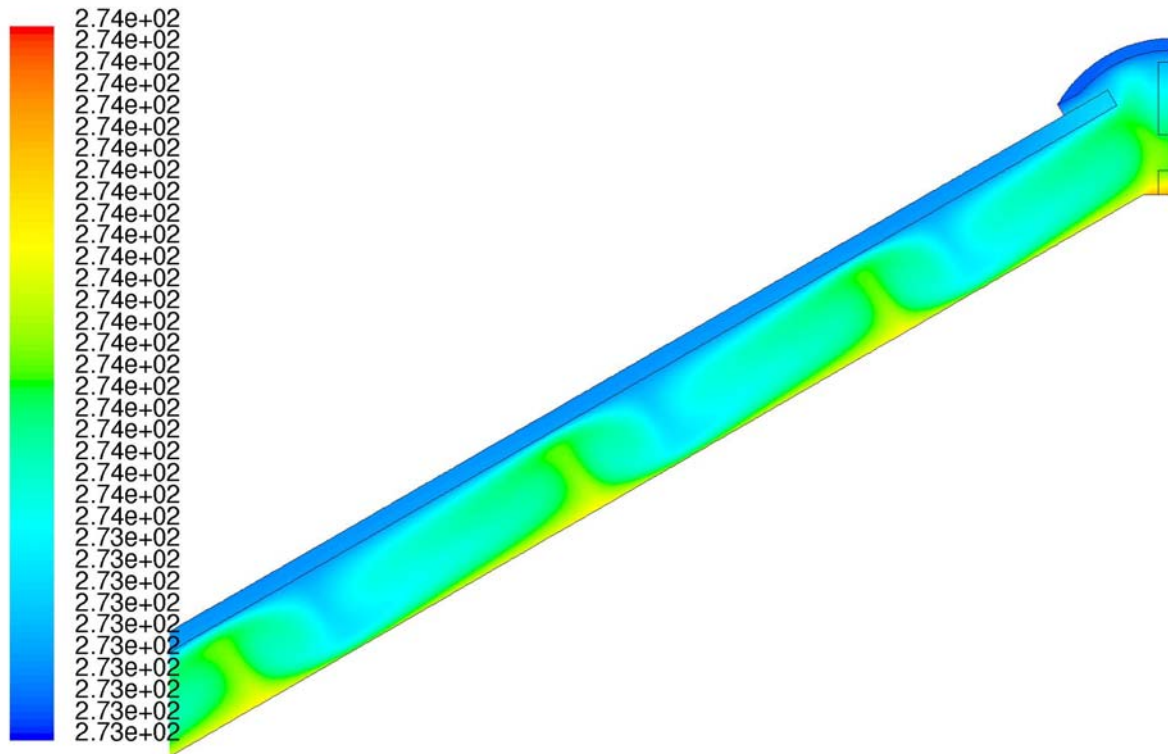
Figur 5-38: Temperaturfordelingen i raft og nedre del av luftkanalen til tak 6.1 (K)



Figur 5-39: Strømningslinjer i øverste del av luftkanalen og mønet til tak 6.1



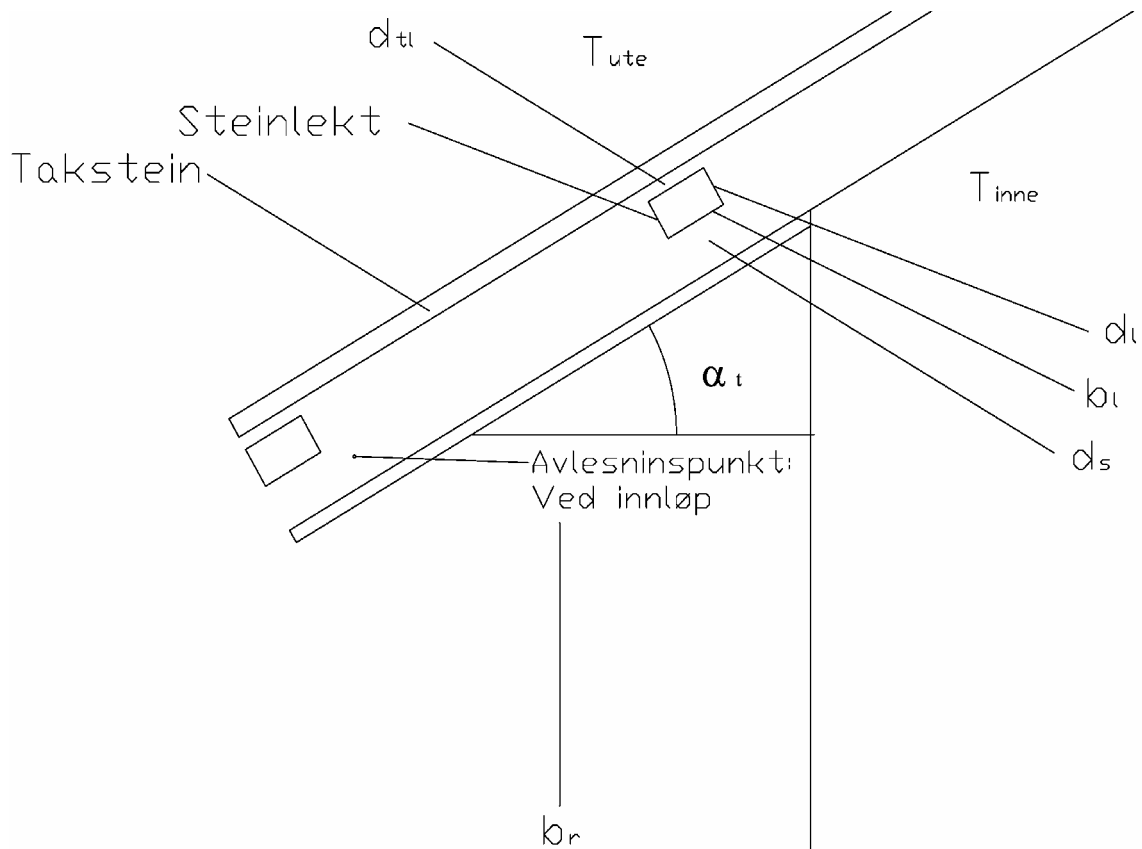
Figur 5-40: Hastighetsfordeling i øverste del av kanalen og mønet for tak 6.1 (m/s)



Figur 5-41: Temperaturfordeling i øverste del av luftkanalen og møne for tak 6.1 (K)

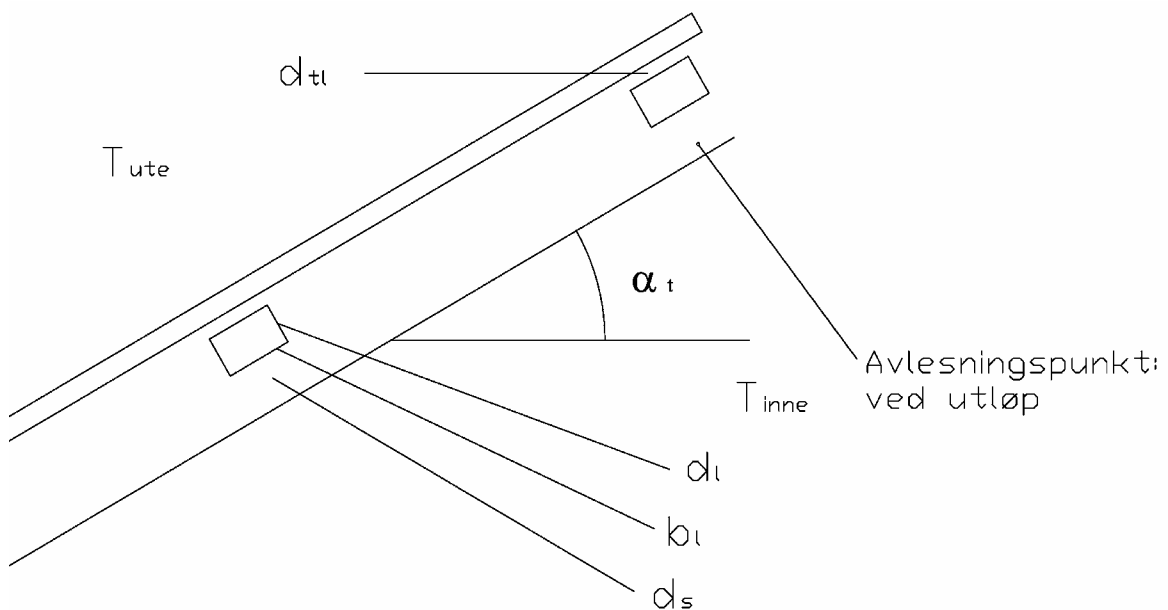
5.9 Resultater fra tak 6.2

For tak 6.2 er raft- og mønekonstruksjonen fjernet i forhold til tak 1.2. Dette er gjort for å se hvilke innvirkninger raft- og mønekonstruksjonen har på strømmingen gjennom konstruksjonen. Strømningen viste seg å være transiente, derfor blir løsningene presentert som tidsavhengige resultat og noen resultat er øyeblikksbilder av strømmingen. Figur 5-42 viser mønekonstruksjonen uten raftbord.



Figur 5-42: Mønekonstruksjon for tak 6.2

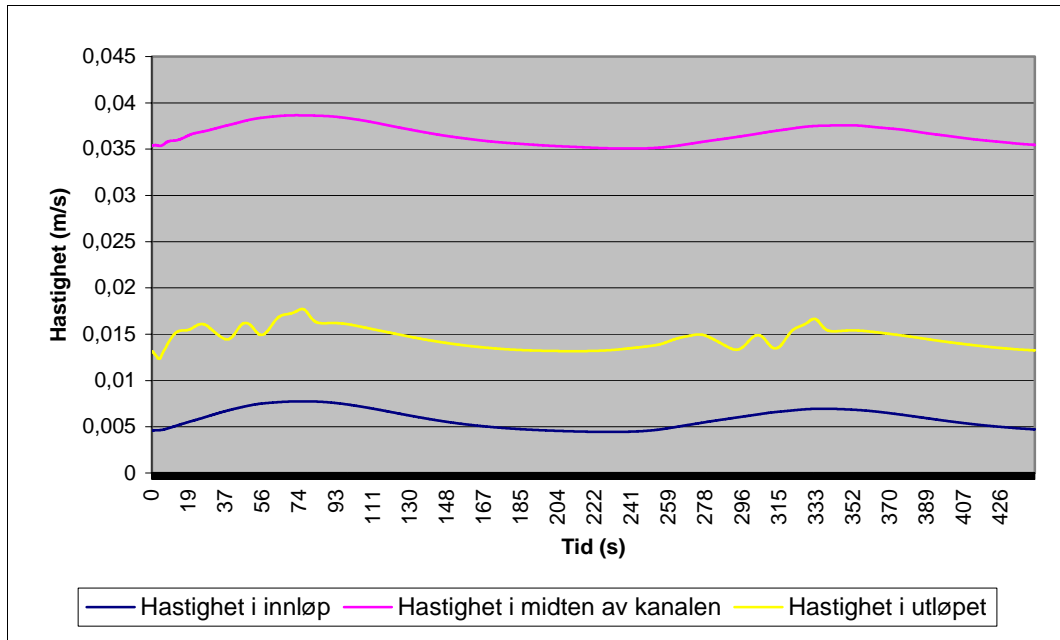
Det ble også for tak 6.2 lagt inn tre punkt i kanalen som ble brukt til å registrere resultat. Punktene ble plassert i samme posisjon som for tak 1.2. Punktene ble brukt til å registrere temperatur og hastighet. Utløpet ble brukt til å registrere middelhastigheten, som ble brukt til beregne massestrømmen gjennom konstruksjonen. For mønet ble mønepannen, mønebordet og klelekten fjernet, Figur 5-43 viser hvordan mønet som ble beregnet ser ut.



Figur 5-43: Mønekonstruksjon for tak 6.2

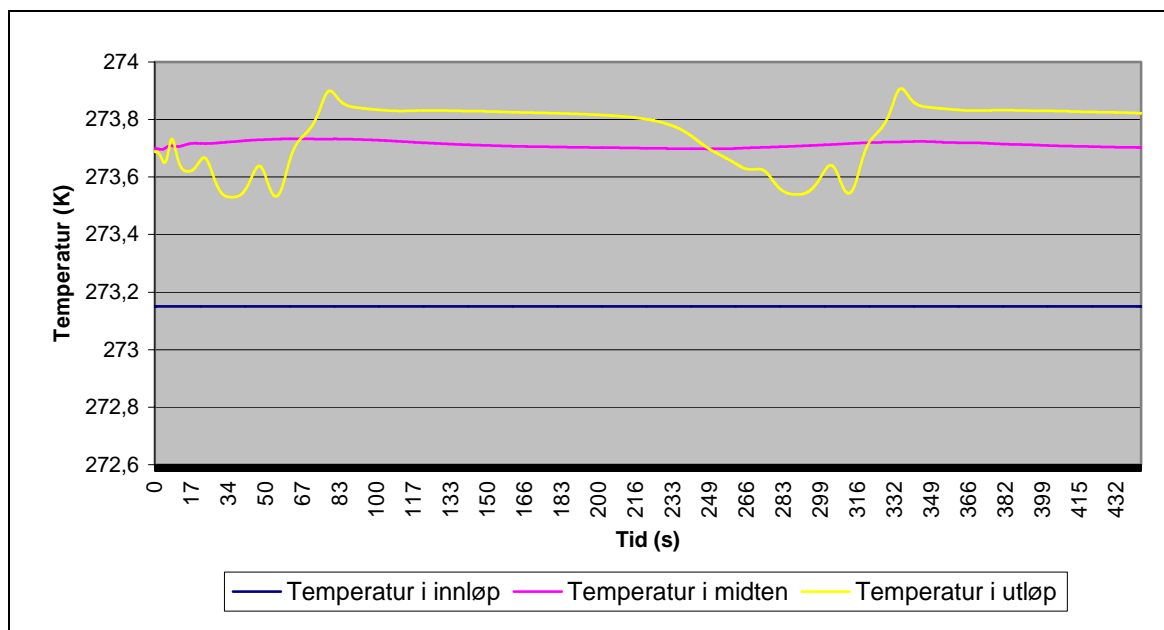
5.9.1 Transiente resultat

Figur 5-44 viser hastighetsfordelingen over tid for taket, en ser at variasjonene er mye mindre enn mange av takene med raft- og mønekonstruksjoner. Hastigheten er mye mer stabil, men en kan se at det er perioder som gjentar seg selv. Perioden er på omtrent fire og et halvt minutt.



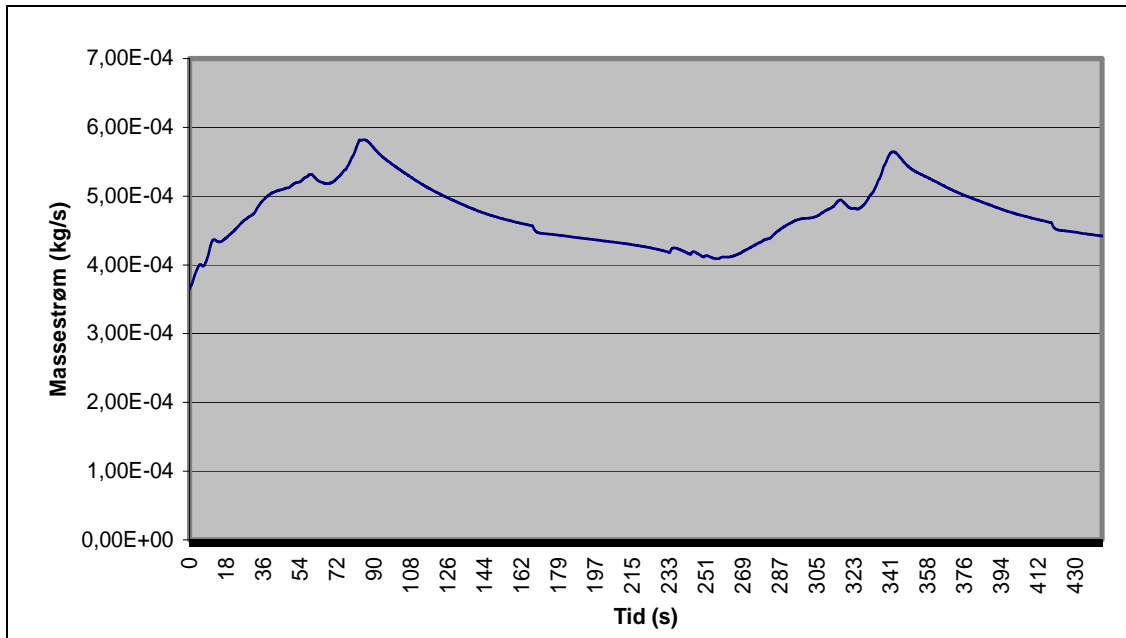
Figur 5-44: Hastighetsfordeling over tid for tak 6.2

Temperaturfordelingen for innløpet og mellom lekt 13 og 14 er stabil over tid, mens temperaturen for utløpet varierer med en fastperiode. Perioden er den samme som for hastighetsfordelingen, omtrent fire og et halvt minutt.



Figur 5-45: Temperaturfordeling over tid i tak 6.2

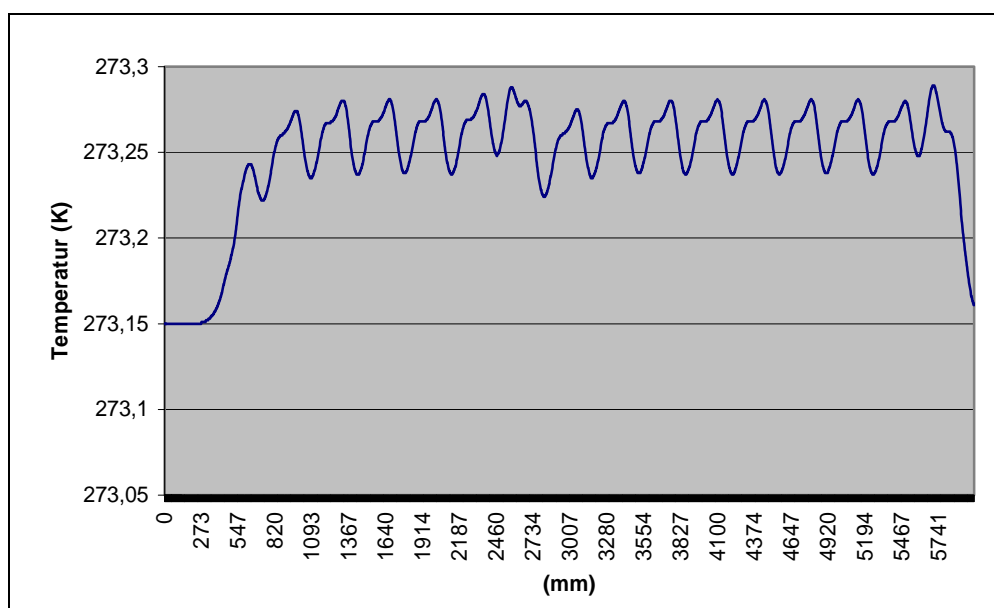
Figur 5-46 viser massestrømmen over tid. Strømmen under lekten ved utløpet er rettet ut av kanalen, mens over siste lekten ved utløpet er luftstrømmen rett inn i kanalen. Total massestrøm gjennom kanalen er da differansen mellom disse luftstrømningene. Perioden for svingningene av massestrøm varierer med en periode på omtrent fire og et halvt minutt, som er det samme som temperatur- og hastighetssvingningene.



Figur 5-46: Total massestrøm over tid i tak 6.2

5.9.2 Øyeblikksresultat

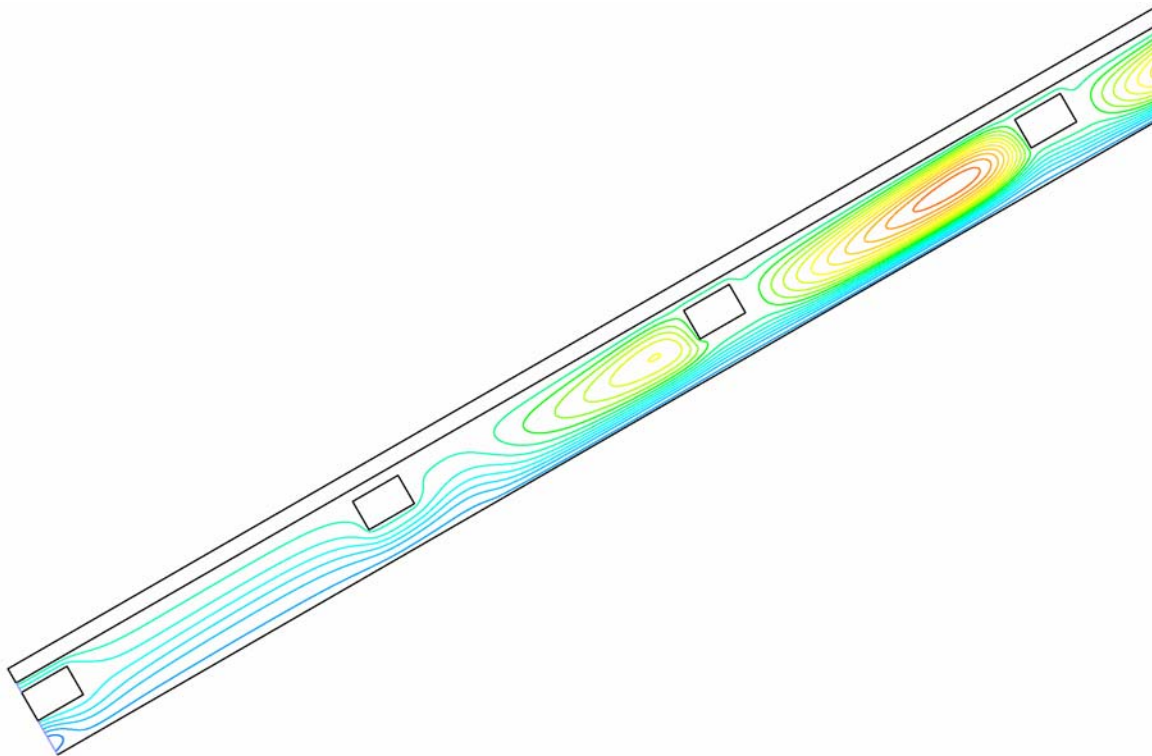
Temperaturen på taktekkingen varierer på samme måte som for takene med raft og mønekonstruksjon. Gjennomsnittstemperaturen er også lik de andre takene.



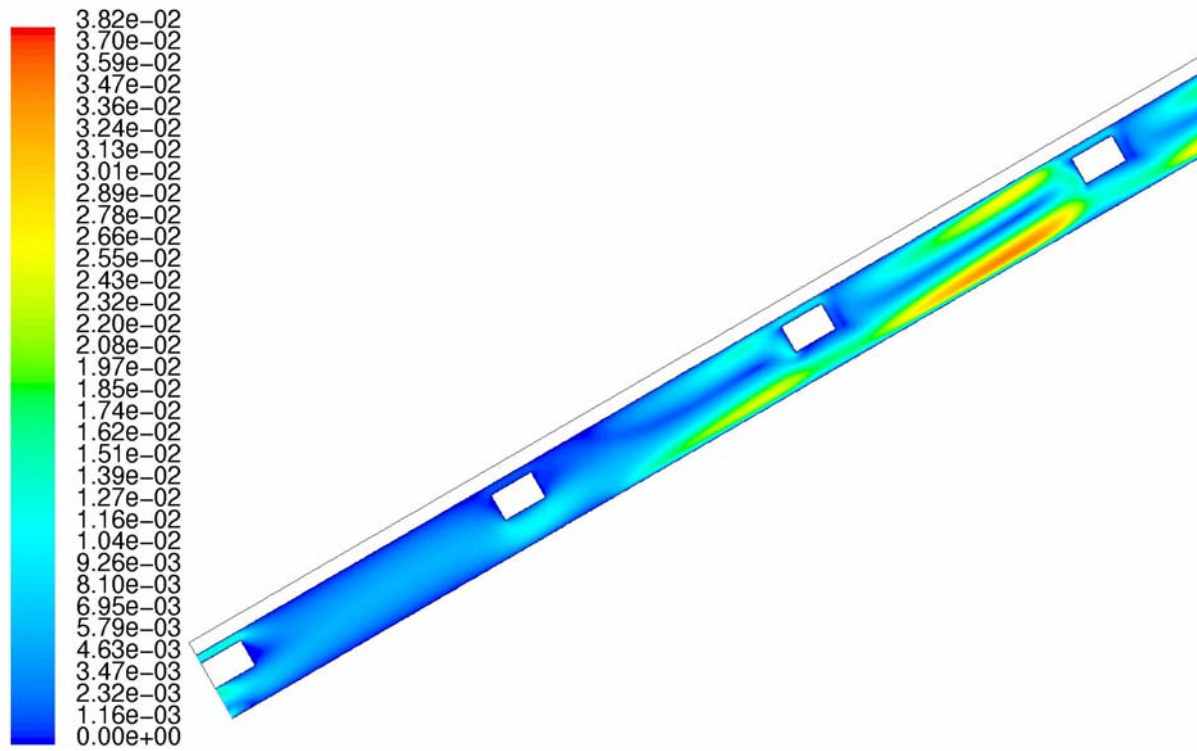
Figur 5-47: Temperatur på takstein til tak 6.2

Figur 5-48 beskriver strømmingen i innløpet og førstedel av tak 6.2. I innløpet strømmer det luft inn i kanalen, både fra åpningen over lekten og under lekten. For takene med mønebord var det svært lite luft som strømte inn gjennom nederste innløpsåpning, og enkelte tilfeller strømte det luft ut av nederste åpning. Dette er forhindret ved å fjerne mønebordet. Det oppstår også for tak 6.2 sirkulasjonsdannelse mellom lektene, dette kommet tydelig frem mellom lekt 4 og 5. Denne sirkulasjonen forsetter langs hele kanallengden, i Figur 5-51 ser en at dette fortsetter helt opp til utløpet. Utløpsarealet er for tak 6.2 er mye større enn for tak med møne konstruksjon det blir da mindre strømningsmotstand i utløpet. Utløpet består av to områder hvor luften kan strømme gjennom, det er over og under lekten. Strømmen under lekten er rettet ut av kanalen, mens strømmen over lekten er rettet inn i kanalen. En får der tilbakestrøm av kald uteluft. Strømmen som går inn i kanalen er forholdsvis, mye mindre enn strømmen som går ut /Vedlegg 52/.

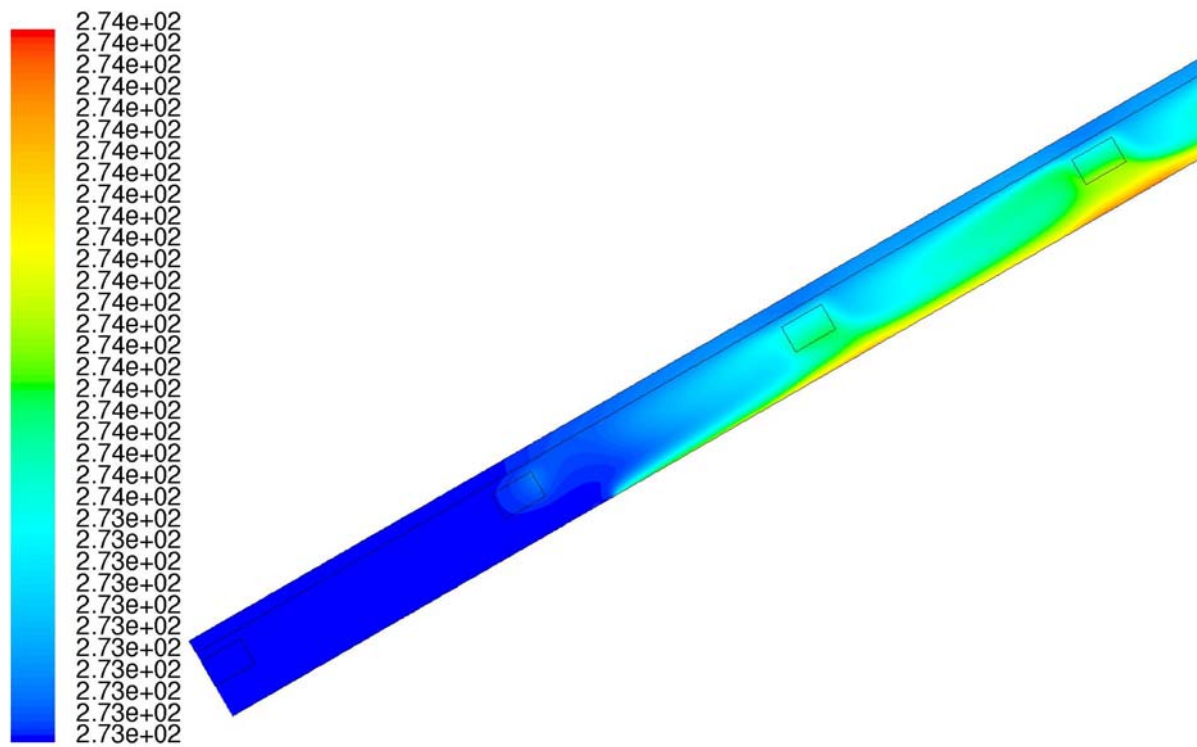
Hastighetsfordelingen i taket er svært lik de andre takene som er simulert. Hastigheten mellom lekt 1 og 2, hvor det ikke går noen luftsirkulasjon, er en del mindre enn hastigheten i luftsirkulasjonen i de andre mellomrommene. Temperaturfordelingen i tak 6.2 er veldig lik de andre takene som er simulert. En ser at temperaturen rett under lektene er noe høyere enn mellom lektene. Årsaken til dette er at lektene stråler mer tilbake til flaten under enn den kalde takflaten gjør.



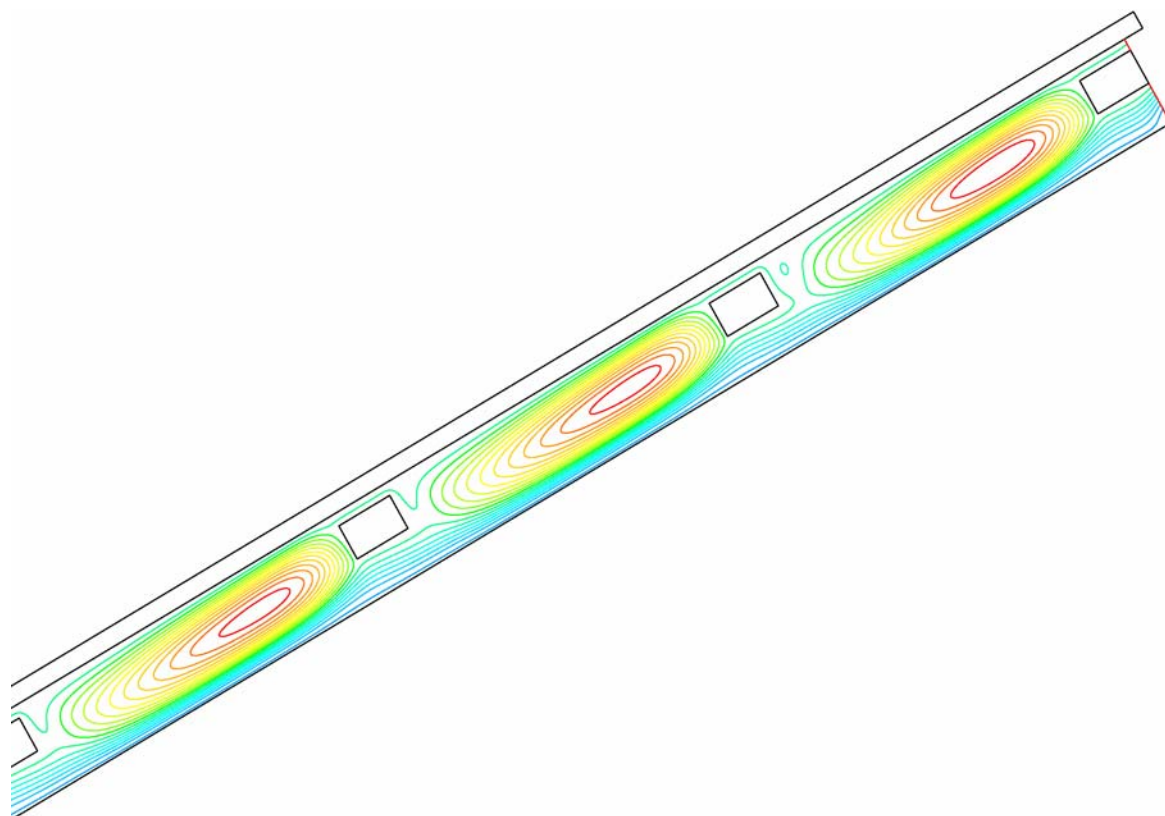
Figur 5-48: Strømningslinjer raftkonstruksjonen til tak 6.2



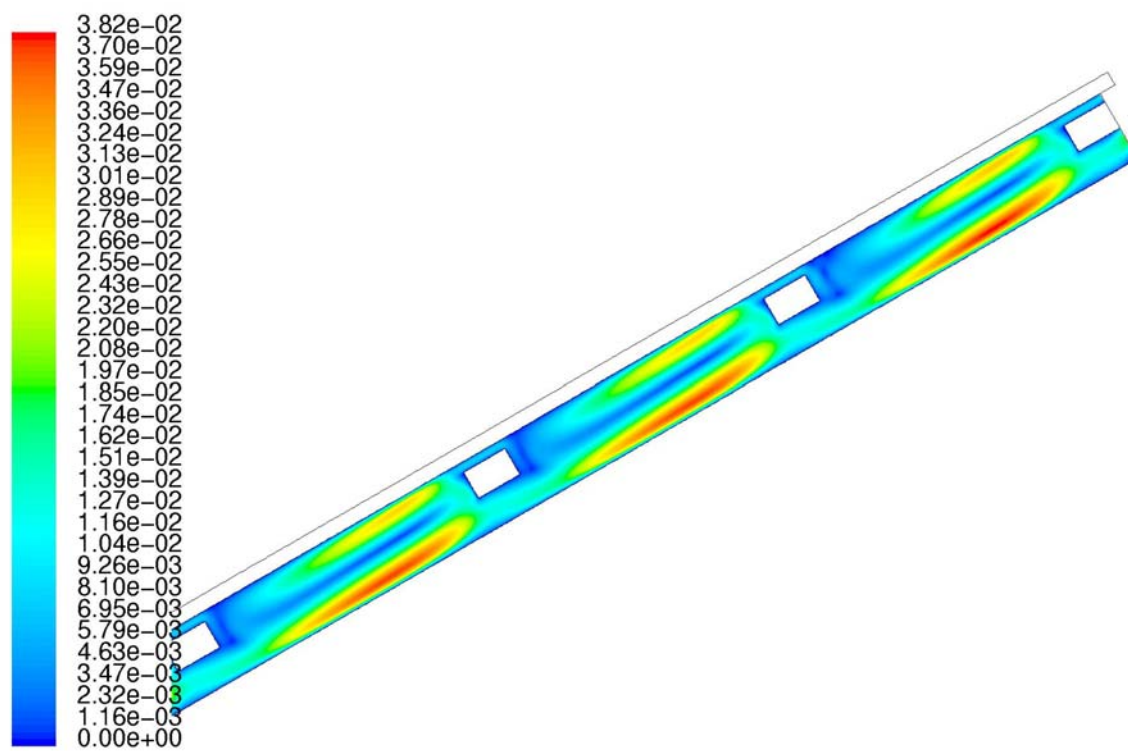
Figur 5-49: Hastighetsfordeling i raftekonstruksjonen til tak 6.2 (m/s)



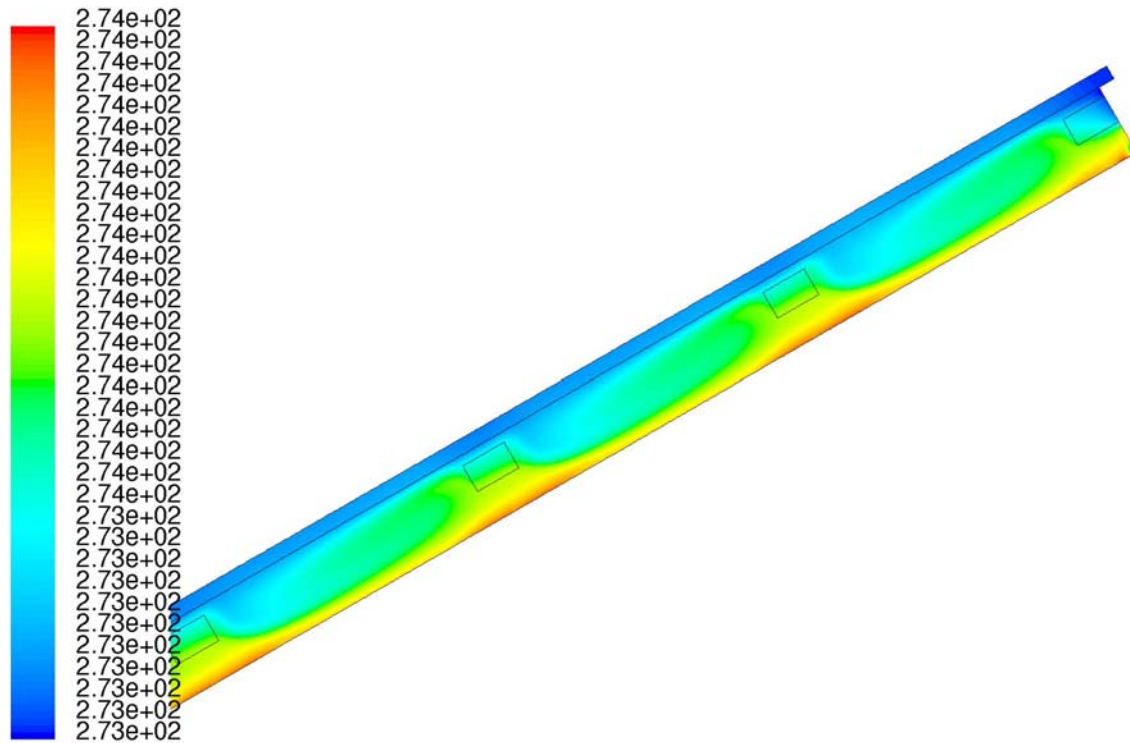
Figur 5-50: Temperaturfordeling i raft til tak 6.2 (K)



Figur 5-51: Strømningslinjer i mønekonstruksjonen til tak 6.2



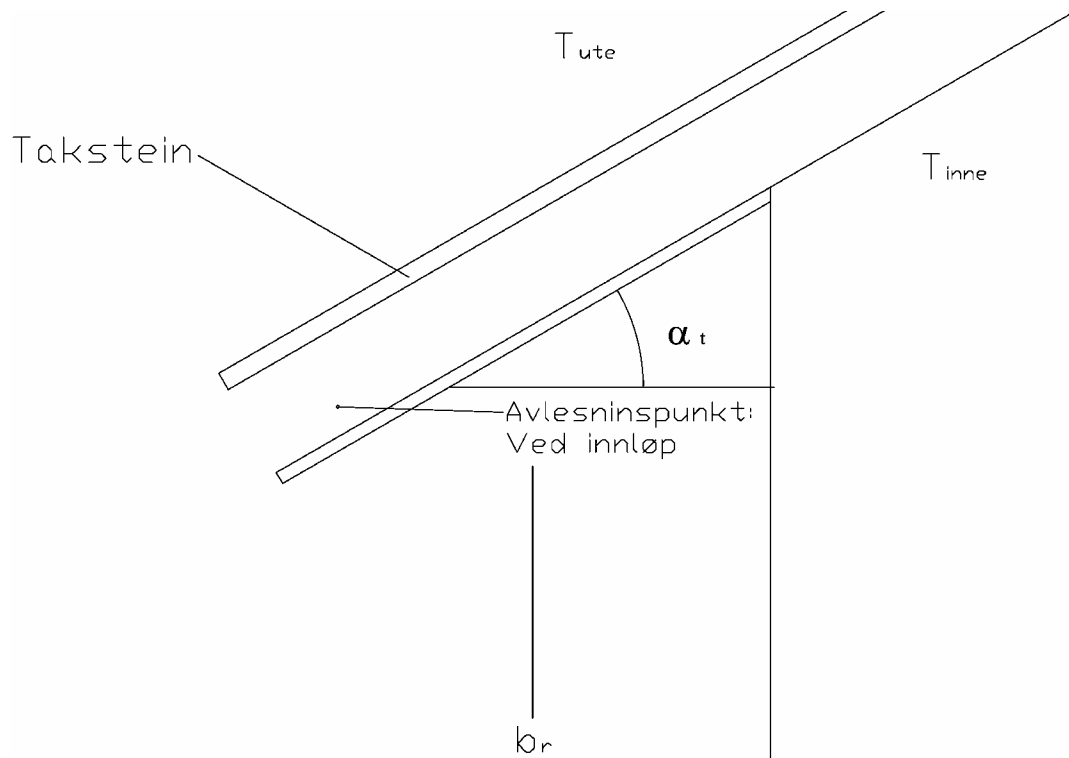
Figur 5-52: Hastighetsfordeling i mønekonstruksjonen for tak 6.2 (m/s)



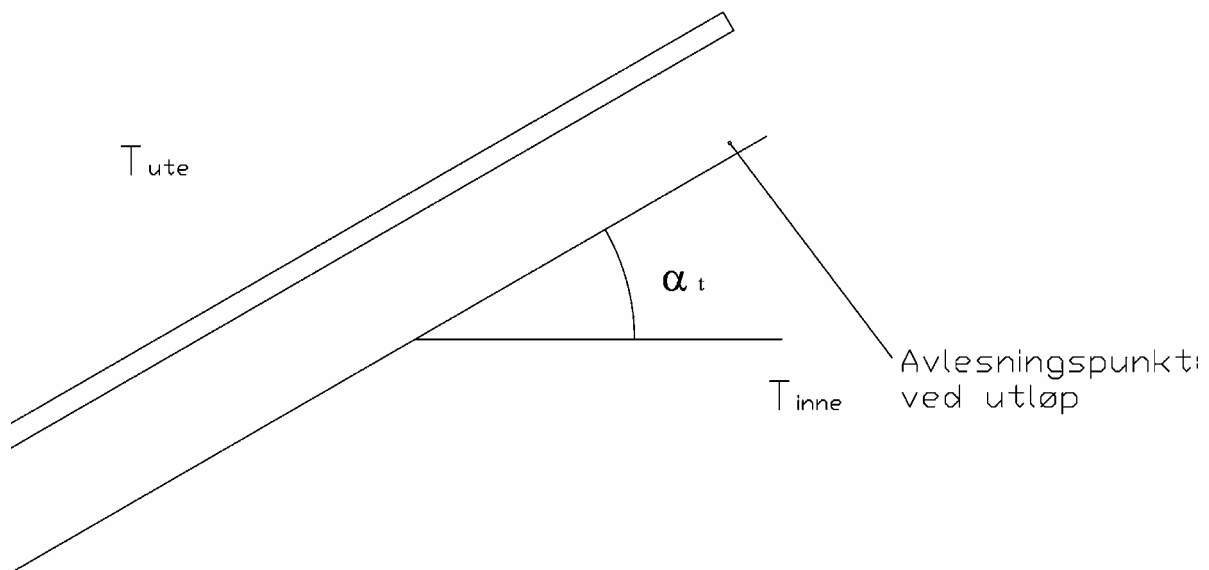
Figur 5-53: Temperaturfordeling i mønekonstruksjon for tak 6.2 (K)

5.10 Resultater fra tak 6.3

Tak 6.3 er en takkonstruksjon med verken raft, møne eller lektene, ellers er taket likt tak 1.2. Denne konstruksjonen er tatt med for å undersøke hvordan lektene, raft og mønekonstruksjonen påvirker strømmingen, og for å undersøke hvordan strømmen går i en kanal uten hindringer. Strømningene for tak 6.3 viste seg å være tidsavhengige, derfor er resultatene som blir presentert transiente eller øyeblikksbilder av luftstrømmen. De transiente resultatene er registrert i tre punkt i kanalen i tillegg til utløpet. Punktene i innløpet og utløpet ligger på samme plass som ved tak 1.2 og som er vist i Figur 5-54. Det er også lagt inn et punkt midt i kanalen, punktet ligger i samme høyde i kanalen som punktene i inn- og utløpet. Figuren viser hvordan innløpet og første del av tak 6.2 er utformet. Figur 5-55 viser hvordan utløpet og siste del av taket er utformet.



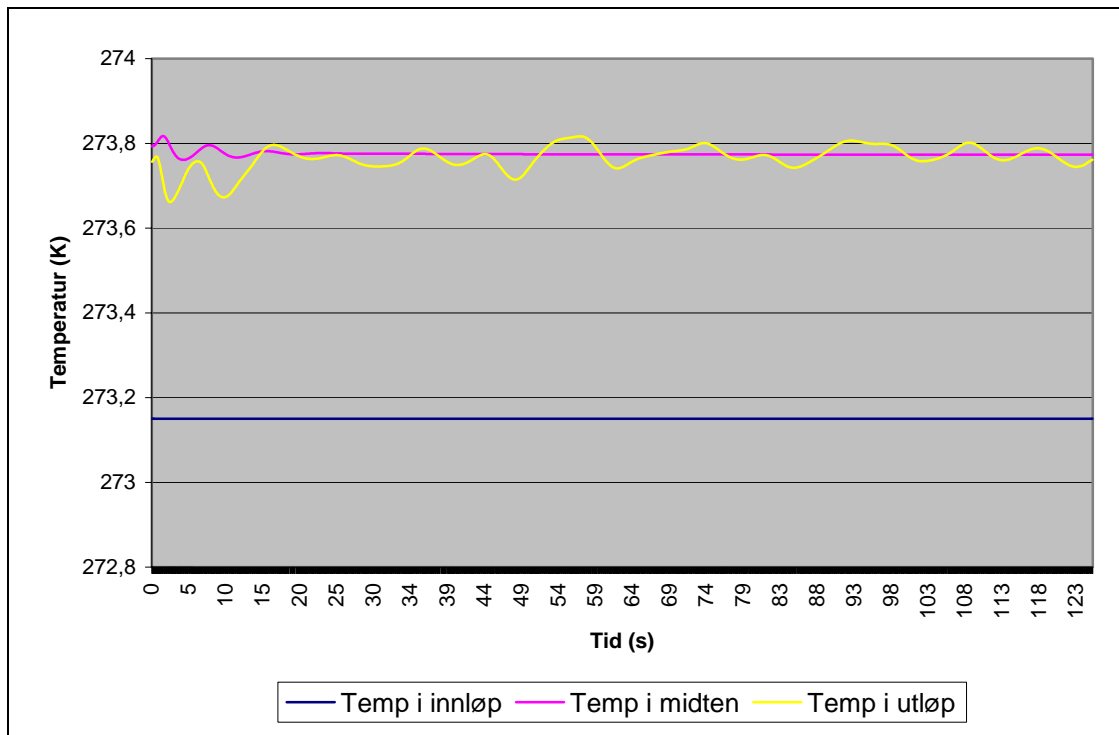
Figur 5-54: Raftkonstruksjonen for tak 6.3



Figur 5-55: Mønekonstruksjonen for tak 6.3

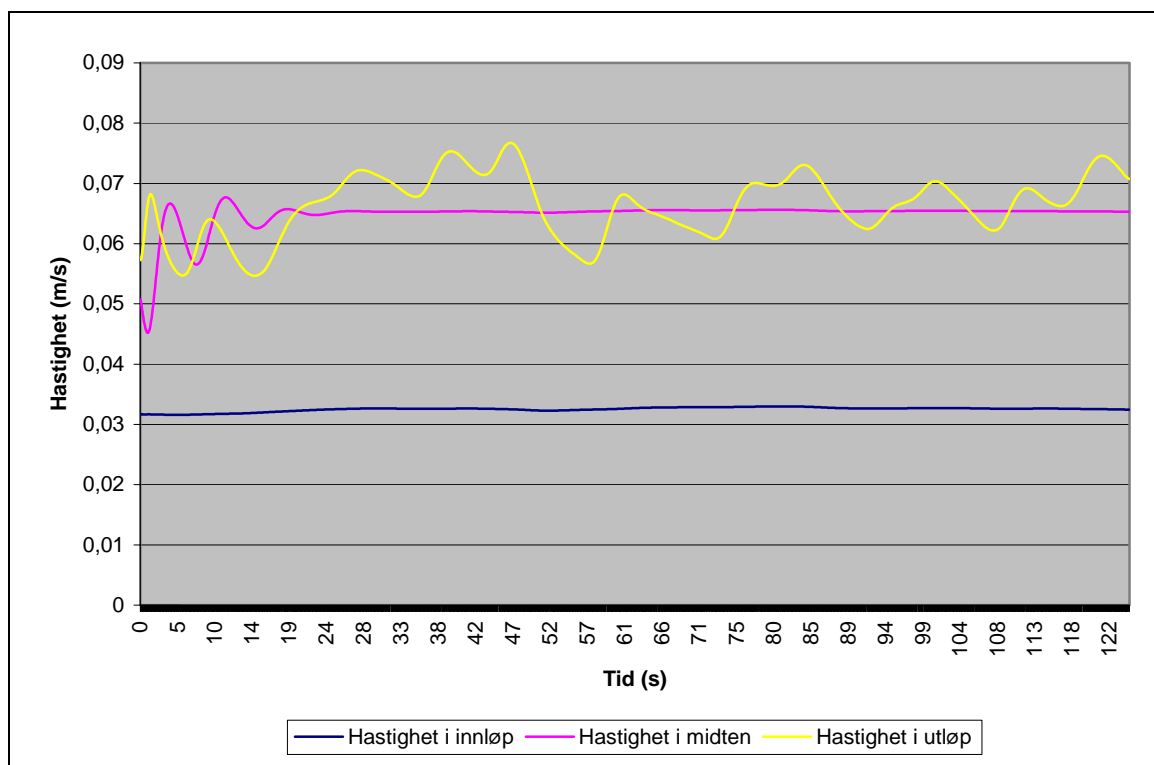
5.10.1 Transiente resultat

Temperaturen i innløpet og midt i kanalen for tak 6.3 ligger stabilt på en fast verdi på henholdsvis 273,18 K og 273,78 K, mens temperaturen ved utløpet varierer. Temperaturen i utløpet varierer uten noe fast og bestemt mønster. Variasjonene er mye hurtigere for dette taket enn for andre tak med raft, møne og lekter, svingeperioden ligger godt under ett halvt sekund.



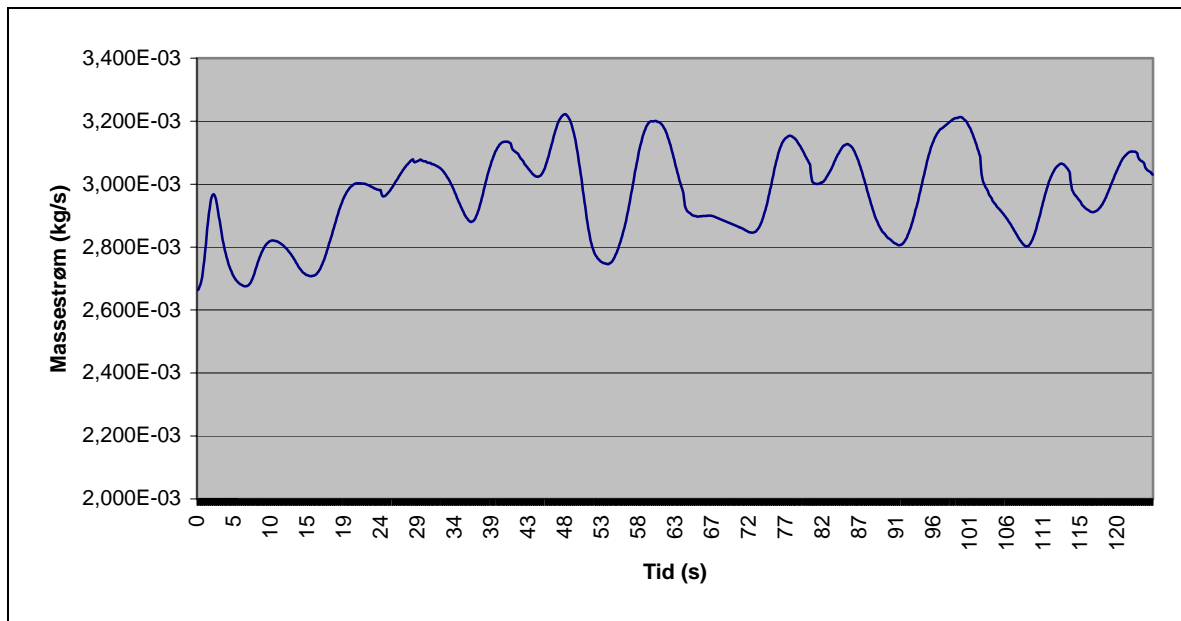
Figur 5-56: Temperaturfordeling over tid i kanal 6.3

Hastighetsfordelingen, som er vist i Figur 5-57, varierer på samme måte som for temperaturen. Hastigheten i innløpet og i midten av kanalen er stabil på en fast verdi. Mens hastigheten i utløpet varierer, med samme små perioder som for temperaturen i Figur 5-56.



Figur 5-57: Hastighetsfordeling over tid for tak 6.3

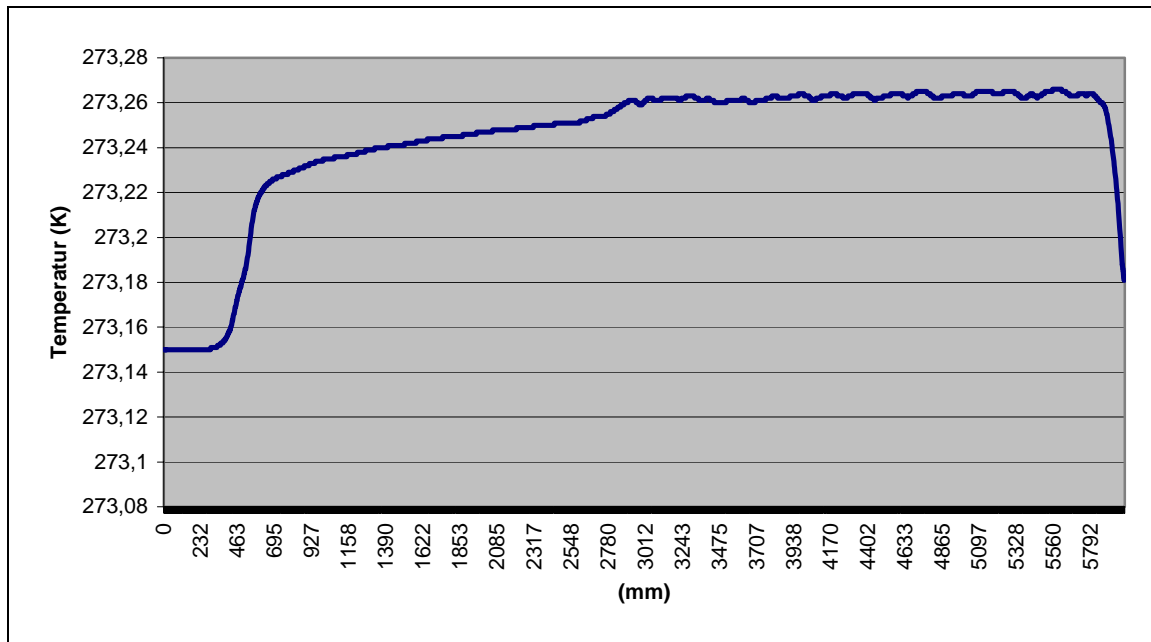
Massestrømmen ut gjennom utløpet er betydelig større enn massestrømmen for takkonstruksjoner med raft, møne og lekter. Massestrømmen varierer med korte usystematiske svingninger. Tiden fra topp til topp i svingningene ligger i underkant av et halvt sekund, dette er det samme som for svingningene for temperaturene og hastighetene. Dette er betydelig hurtigere enn for eksempel tak 1.2 hvor tiden mellom hver svingning lå i overkant av to minutt. Gjennomsnittlig masse strøm gjennom luftkanalen er $2,97 \times 10^{-3}$ kg/s, som er klart mest av alle takene som er testet /Vedlegg 56/.



Figur 5-58: Massestrøm gjennom luftkanalen til tak 6.3

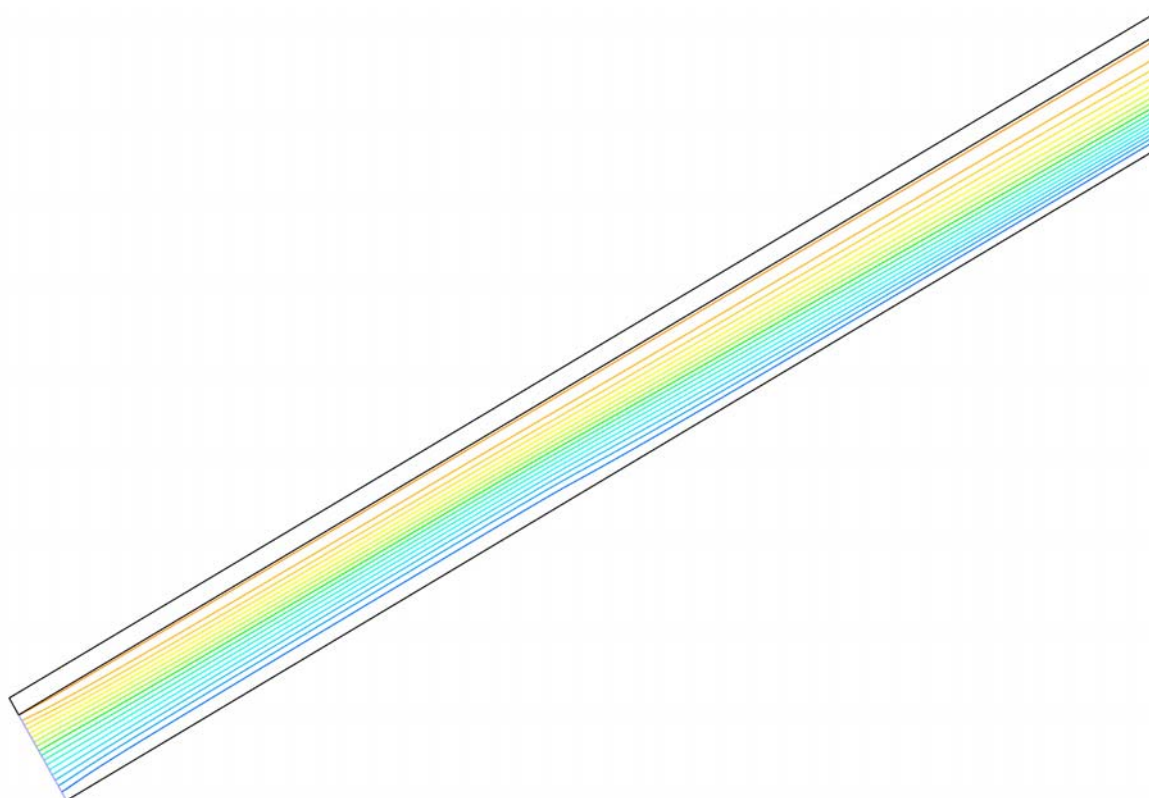
5.10.2 Øyeblikksresultat

Temperaturen på taksteinen er uten svingninger, som vi har sett på andre tak. Temperaturen stiger fort opp fra utetemperatur der hvor taket går over oppvarmet område, og stig deretter sakte langs halve taket. Den stabiliserer seg på en temperatur på 273,26 K.

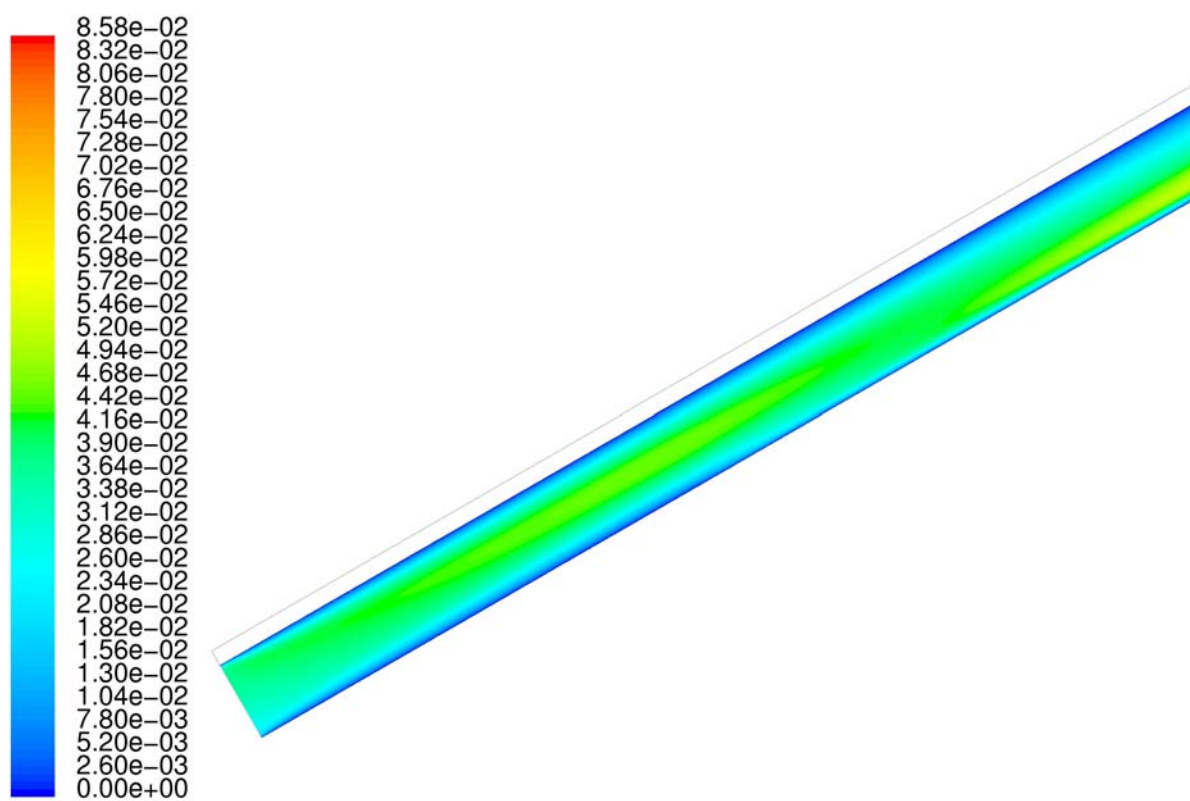


Figur 5-59: Temperatur på takstein

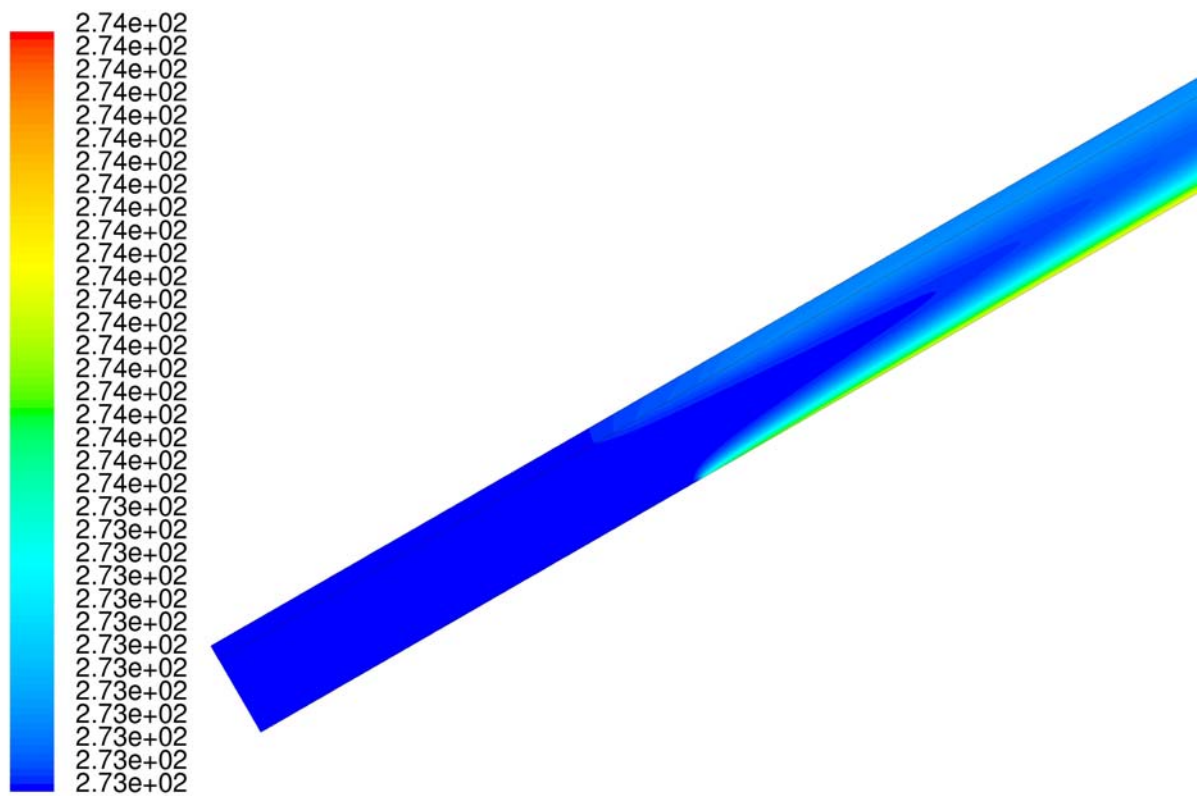
Strømningen i innløpet og i starten av kanalen går i rette og parallelle linjer langs kanalen, med jamn fordeling av strømmen over hele tverrsnittet. Figuren over hastigheten i innløpet, Figur 5-61, viser også at strømmen går ensrettet langs kanalen. Underveis i kanalen øker hastigheten langs bunnen av kanalen. Figur 5-64 viser at ved utløpet er det den nederste halvdel av kanalen som har høyest hastighet, mens luften i øverste halvdel nesten ikke beveger seg. Dette ser en også i Figur 5-63, hvor strømningen i hovedsak går langs bunnen av kanalen. Luftsirkulasjonen som en opplevde i takene med lekter oppstår ikke. Det er noen små tendenser til sirkulasjoner i øverste delen av kanalen ved utløpet. Luftspalten har et sjikt med varmere luft som går langs undersiden av kanalen (Figur 5-65). Dette er hvor lufthastigheten er størst. Over dette sjiktet er temperaturen noe lavere.



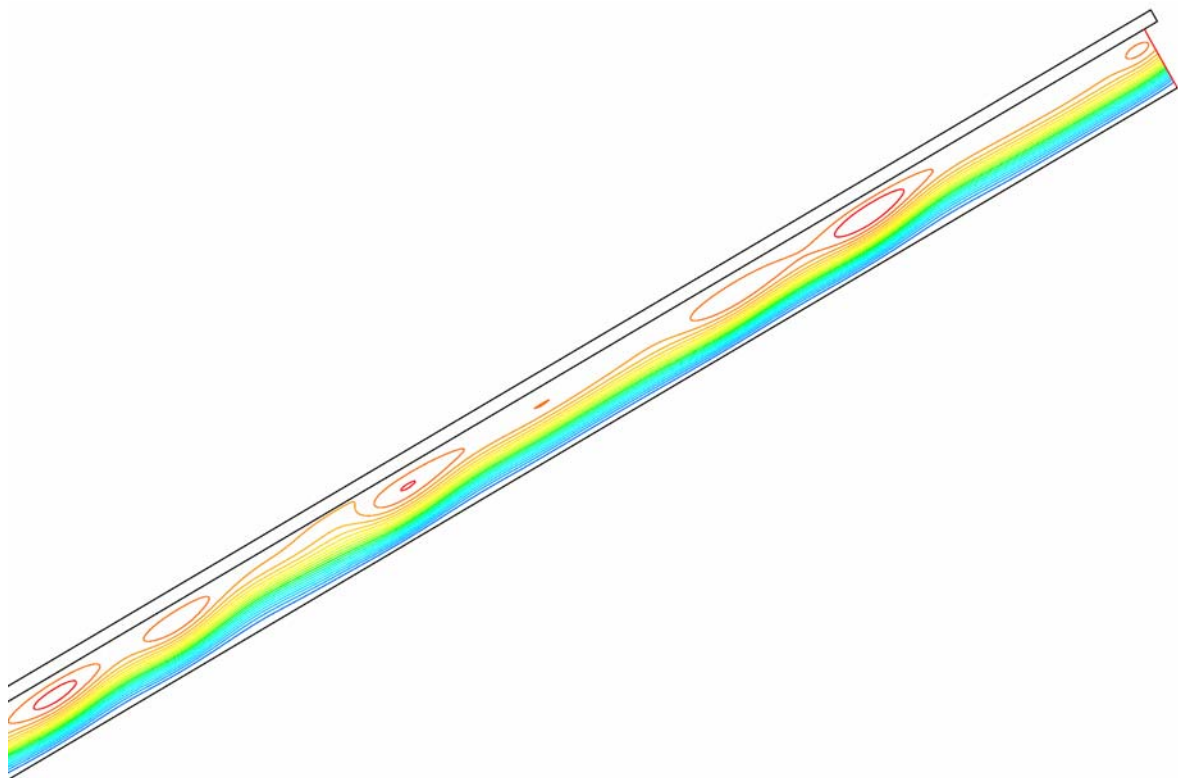
Figur 5-60: Strømningslinjer i mønekonstruksjonen for tak 6.3



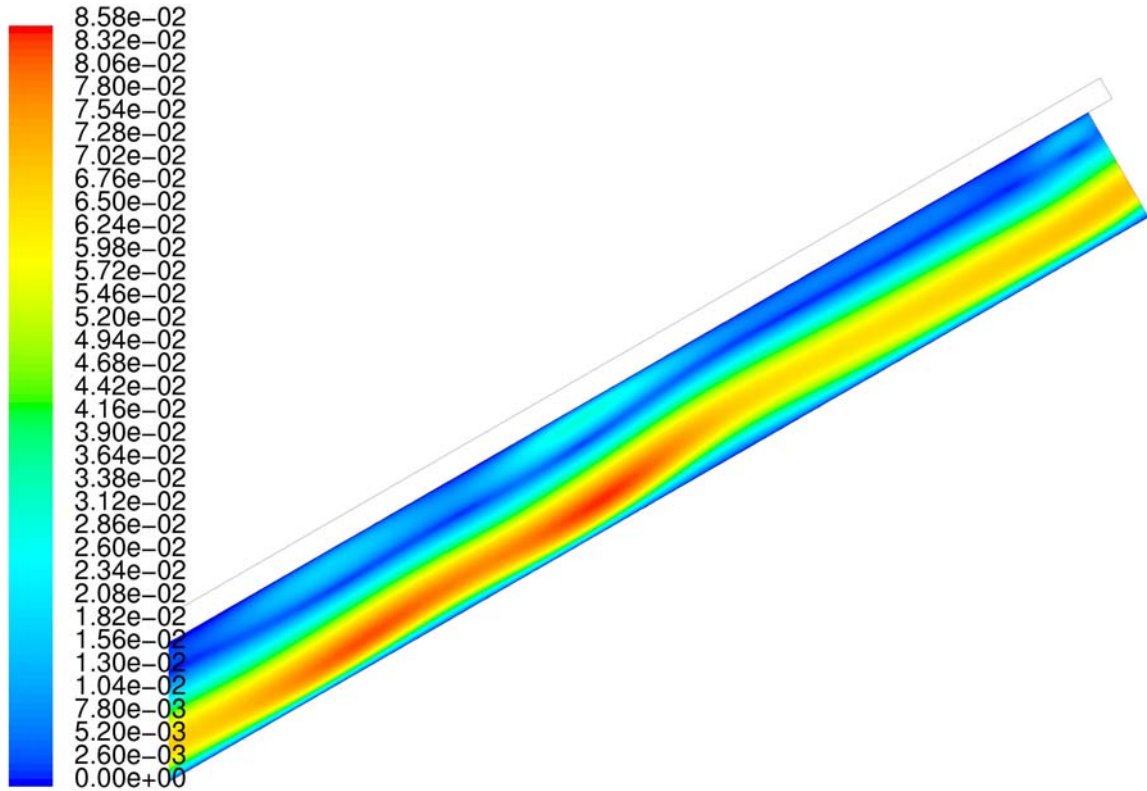
Figur 5-61: Hastighetsfordeling i raften til tak 6.3 (m/s)



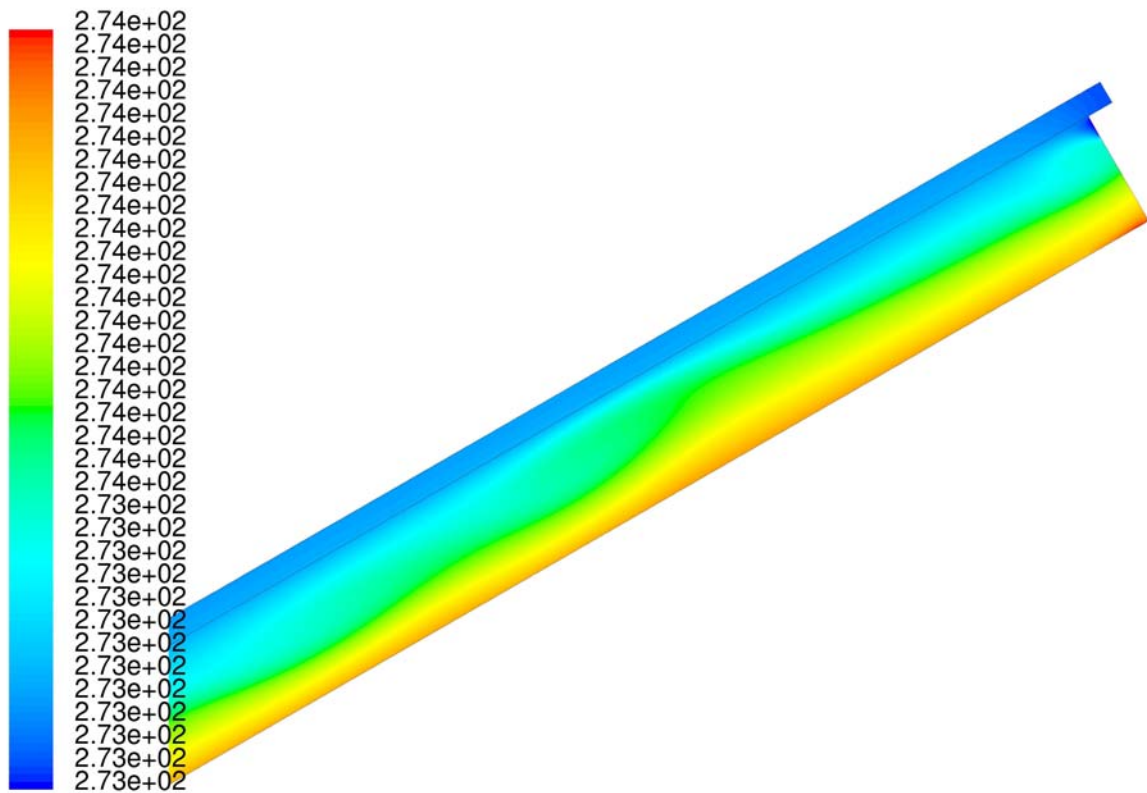
Figur 5-62: Temperaturfordeling i raft til tak 6.3 (K)



Figur 5-63: Strømningslinjer for mønekonstruksjonen til tak 6.3



Figur 5-64: Hastighetsfordeling i møne tak 6.3 (m/s)



Figur 5-65: Temperaturfordeling i mønet til tak 6.3 (K)

5.11 Resultater fra regneark

I regnearket må en angi en del beregningsparametere, det vil si geometridata, vinddata, temperaturer ved inn og utløp og en må iterere seg frem til en lufthastighet for kanalen. For tak 1.2 ble følgende data angitt i regnearket.

G8	Fast singulærtapskoeffisient ved raft	--	
G9	Midlere lufthastighet mellom steinlektene	0,0222	m/s
G26	Vindhastighet mot raft	0	m/s
G27	Lufttemperatur ved innløp raft	0	°C
G28	Lufttemperatur ved utløp møne	0,75	°C
G29	Luftespalte høyde (sløyfe + lekt)	0,076	m
G30	Trangeste tverrsnittsareal ved innløp raft	0,01	m ²
G31	Trangeste tverrsnittsareal ved utløp møne	0,01	m ²
G32	Sløyfehøyde	0,036	m ²
G34	Vindtrykkkoeffisient ved innløp raft, lo side	--	
G35	Vindtrykkkoeffisient ved utløp møne	--	
G36	Strømningslengde	6,0	m
G37	Takvinkel	30	°
G38	Sløyfebredde	0,048	m
G39	Lektebredde	0,048	m
G40	Senteravstand mellom steinlektene	0,35	m

Temperaturen ved innløp ble satt til utetemperaturen, mens utløpstemperaturen på 0,75 °C er hentet fra beregningene i FLUENT. Ved å prøve seg frem med forskjellige hastigheter for luftstrømmen slik at trykktapet ble lik drivtrykket, ble midlere lufthastighet mellomlektene bestemt til å være 0,022 m/s. Resultatene kan da hentes ut fra regnearket.

Tabell 5-3: Resultater fra regneark

Luftstrøm	0,0016	m ³ /s
Reynolds tall	253	
Singulærtapskoeffisient raft	1,19	
Singulærtapskoeffisient møne	3,40	
Singulærtapskoeffisient steinlekter 17 stk	8,88	
Singulærtapskoeffisient for en lekt	0,52	
Friksjonskoeffisient	0,253	
Trykktap pga. friksjon	0,0073	Pa
Trykktap pga. singulærtap	0,097	Pa

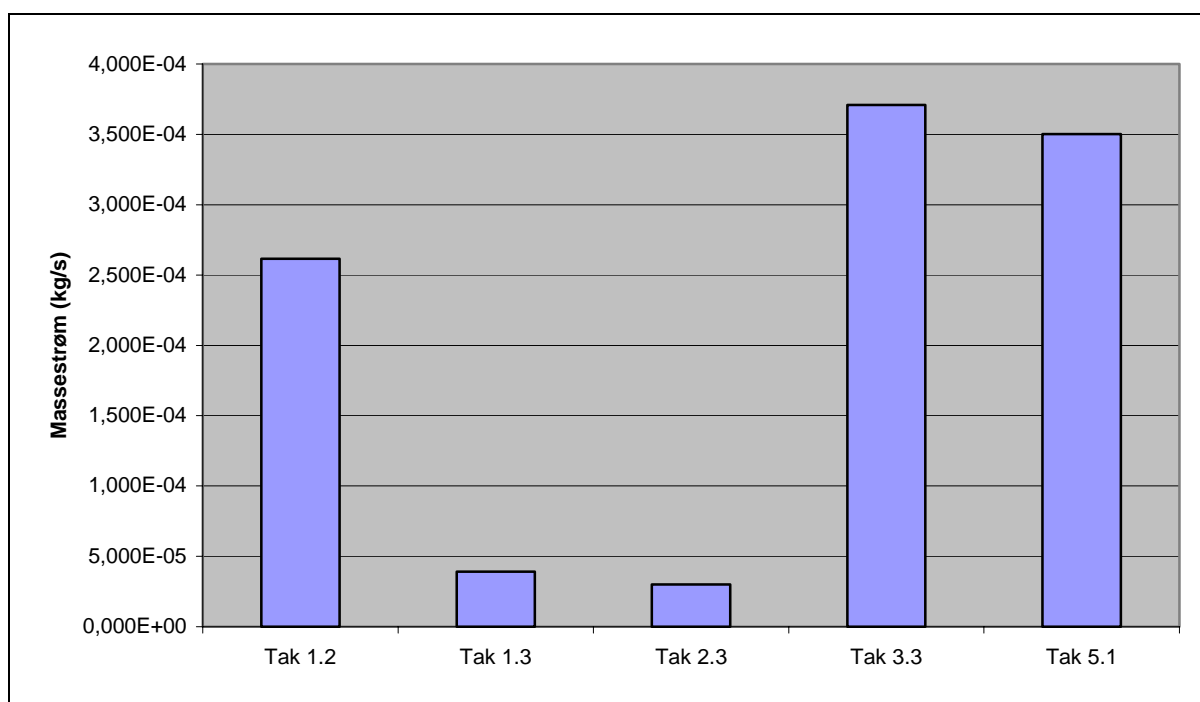
Sammenligner en resultatene fra regnearket med resultatene fra FLUENT stemmer de ikke overens. Luftstrømmen gjennom luftekanalen til tak 1.2 beregnet fra regnearket blir 0,0016 m³/s, men fra FLUENT blir luftstrømmen 0,000203 m³/s. Det er omtrent en tierpotens i forskjell, det samme ser en for lufthastigheten gjennom kanalen. Regnearket gir en verdi på 0,022 m/s, og fra FLUENT blir hastigheten 0,00316 m/s. Fordi det er så store avvik mellom FLUENT og regneark verdiene blir ikke flere tak sammenlignet /Vedlegg 1 og 2/.

6 Diskusjon

6.1 Massestrøm

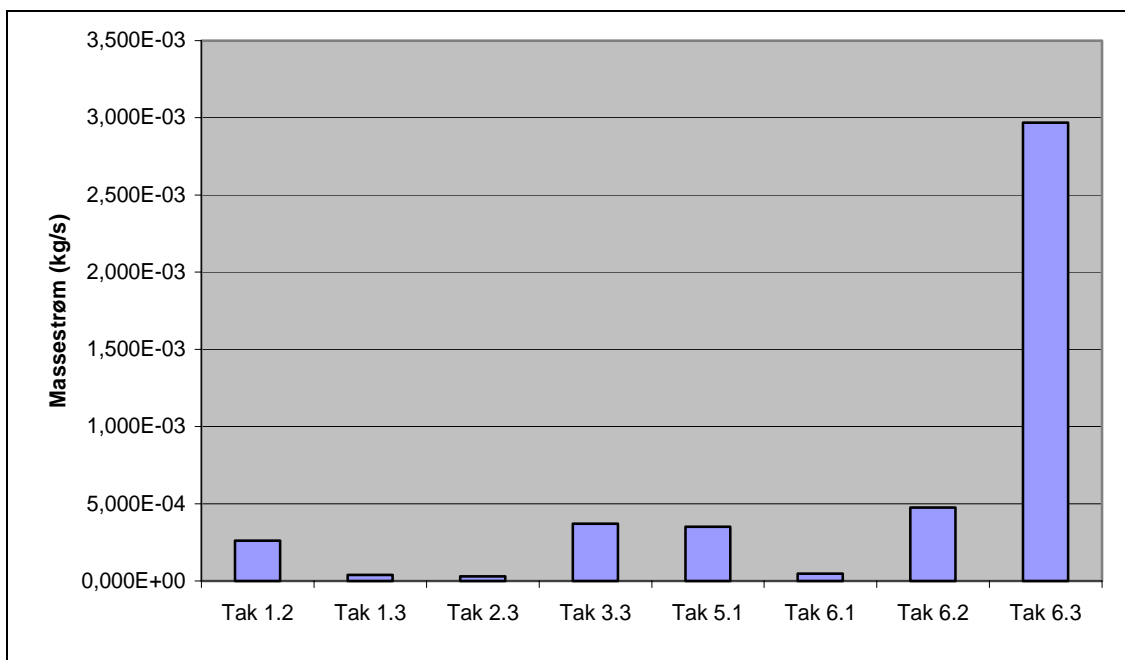
I fordypningsprosjektet ble fem vanlige taktyper undersøkt, tillegg ble tre tilfeller til undersøkt hvor en fjernet deler av konstruksjonen. Tak 1.2 ble brukt som utgangspunkt for alle takene og en og en forandring ble gjort fra tak til tak. To av forandringene skulle i utgangspunktet gi større strømningsmotstand. Dette var tak 1.3 og tak 2.3. Tak 1.3 ble forlenget i forhold til tak 1.2, strømningslengden ble nesten fordoblet. For tak 2.3 ble takvinkelen endret fra 30 til 20 grader, oppdriftskreftene blir da redusert. De to siste forandringene skulle gi mindre strømningsmotstand og dermed større luft gjennomstrømning. Dette var tak 3.3 og tak 5.1. Sløyfehøyden for tak 3.3 ble endret fra 36 mm til 48 mm. Strømningskanalen ble da større og skulle ha mulighet til at mer luft strømte gjennom. For tak 5.1 ble steinklekt høyden økt fra 30 mm til 36 mm, dette fører også til at luftespalten blir høyere.

Figur 6-1 oppsummerer verdiene for massestrømmen gjennom takene. Verdiene er gjennomsnittresultater midlet over tid. En ser klart at tak 1.3 og tak 2.3 har en mye mindre luftgjennomstrømning enn de andre takene. Verdiene for tak 1.3 og 2.3 er nesten lik, en ser at endring av takvinkel og endring av taklengde har stor innvirkning på luftgjennomstrømningen i taket. For tak 3.3 og tak 5.1 er det en klar økning av massestrømmen i forhold til tak 1.2. Det viser at økt spaltehøyde gir økt luftgjennomstrømning. Når det gjelder hva som er mest gunstig for å øke luftgjennomstrømningen, å øke steinklekt høyden eller sløyfehøyden, kommer det ikke klart frem fra resultatene, selv om tak 3.3 har størst luftgjennomstrømning. For tak 3.3 ble sløyfehøyden økt med 12 mm mens for tak 5.1 ble steinklekthøyden økt med 6 mm. Altså økte luftespaltehøyden dobbelt så mye for tak 3.3 som for tak 5.1.



Figur 6-1: Middelerdi av massestrømmen gjennom luftekanalene til takene.

I tillegg til de fem takene ble tre tilfeller til undersøkt. Det var tak 6.1 hvor lektene ble fjernet, tak 6.2 hvor raft og møne ble fjernet og det var tak 6.3 hvor raft, møne og lekter ble fjernet. Utgangspunktet var at alle disse takene ville få en økt luftgjennomstrømning fordi elementer som skapte strømningsmotstand ble fjernet. Disse takene ble undersøkt for å se hvordan hver enkel del av taket hadde innvirkning på luftgjennomstrømningen. Resultatene er presentert i Figur 6-2.



Figur 6-2: Middelerdi av massestrøm gjennom luftkanalen til takene

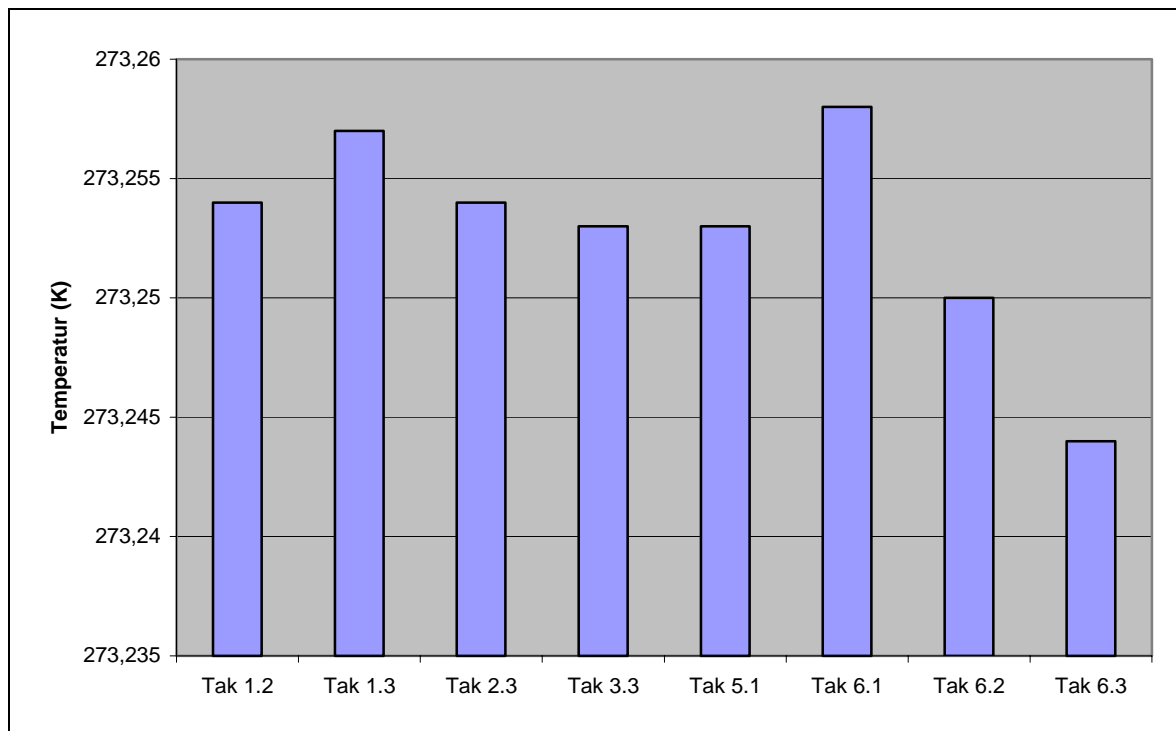
Lektene ble fjernet for tak 6.1. Dette skulle en tro gjorde at luftstrømmen skulle gå lettere gjennom kanalen og dermed få økt luftmengde i forhold til tak 1.2. Dette skjedde ikke luftstrømmen ble kraftig redusert, den ligger på samme nivå som for tak 1.3 og tak 2.3. Dette er overraskende siden en på forhånd hadde trodd at fjerning av lektene skulle øke luftgjennomstrømningen. En grunn kan være at strømningsstapet for møne er det dominerende, og at strømningsstapet fra lektene derfor ikke har så stor innvirkning. Dette forklarer ikke hvorfor strømmingen skulle bli redusert. Dette kan komme av når lektene er borte vil det dannes mer komplette sirkulasjoner, hvor nesten all luften sirkulerer.

For tak 6.2 ble lektene beholdt mens raft og møne ble fjernet. Dette førte til at luftstrømmen ble doblet i forhold til tak 1.2. Både raft, møne og lekter ble fjernet for tak 6.3, det ble en rett kanal uten noen hindringer for luftstrømmen. Nå ble luftgjennomstrømningen mangedoblet. Tak 6.3 er det eneste taket som er undersøkt som ikke fikk sirkulasjonsdannelse av luften i kanalen, strømmingen gikk fra innløp til utløp i rett parallelle strømningslinjer.

Luftgjennomstrømningen er generelt svært lav for alle taktilfellene. Drivkreftene fra naturlig oppdrift blir små når taket er så godt isolert som i tilfellene som er simulert i prosjektet. Drivtrykk fra vindpåkjenning blir fort den dominerende drivkraften ved økning i vindhastigheten.

6.2 Temperatur på takstein

En av hovedgrunnene til en lufter tak er å unngå snøsmelting, temperaturen på overflaten av taksteinen er derfor viktig. Figur 6-3 viser middelverdien av temperaturen på overflaten av takesteinen. Sammenligner en Figur 6-3 med Figur 6-2, ser en at det er samsvar mellom luftgjennomstrømming i kanalen og temperaturen på taksteinen. For eksempel tak 6.3 som har størst luftgjennomstrømming har lavest temperatur på taksteinen. Dette viser at lufting av taket er gunstig for å redusere temperaturen på taksteinen.



Figur 6-3: Middeltemperatur på taksteinen til takene

Temperaturøkningen på taket er generelt svært liten, tak 6.1 som har høyest temperatur økning har en økning på 0,108 K i forhold til uteluften. Variasjonene mellom takene er heller ikke så store fra laveste til høyeste temperatur skiller det kun 0,014 K. Dette kommer av at taket er velisolert med en U-verdi på 0,15 W/m²K. Det går forholdsvis lite varme gjennom disse takene, hvis en sammenligner med eldre tak med mindre isolasjon. Selv om økningen og variasjonene er små viser resultatene en tendens, tak med økt luftgjennomstrømming gir lavere temperatur på taktekkingen

6.3 Singulærtap

Utgangspunktet for oppgaven var å finne singulærtapskoeffisienter for forskjellige deler av taket. Under prosjektets gang fann vi ut at strømmingen i taket er mer komplisert enn hva vi først trodde. Vi trodde at strømmingen gjennom luftekanalen gikk i rette parallelle strømningslinjer fra raft til møne. Dette var ikke tilfelle, strømmingen sirkulerte mellom lektene og kun en liten del av luftstrømmingene strømte fra raft til møne. Dette gjorde at det ble vanskeligere å bestemme hastigheten i kanalen, og derfor ble det vanskelig å bestemme singulærtapskoeffisienter for takkonstruksjonen.

Ved å bruke massestrømmen gjennom utløpet ble en ekvivalent hastighet for kanalen bestemt. Denne hastigheten og trykkverdier fra FLUENT ble brukt til å regne ut singularøstapskoeffisienter for lektene. Resultatene stemte ikke overens med resultatene fra regnearket hvor en bruker formelverk for å bestemme singularøstapskoeffisientene. Ved bruk av den ekvivalente hastigheten for luftstrømmen gjennom kanalen ble singularøstapskoeffisienten for en lekt 33,5, mens fra regnearket ble singularøstapskoeffisienten 0,5. Det viser at det er store uoverensstemmelser mellom resultatene fra regnearket og resultatene fra FLUENT.

Grunnen til at singularøstapskoeffisientene har så stor forskjell kan være forskjellen i lufthastighet i regnearket og i FLUENT. I FLUENT blir det en mye mindre hastighet på luftstrømmen og dermed også mye mindre luftgjennomstrømning gjennom kanalen. Det er omtrent en tier potens i forskjell på massestrømmen gjennom kanalen. En så at det oppstod sirkulasjoner av luften mellom lektene ved simuleringer i FLUENT, dette tar ikke regnearket hensyn til. Formelverket i regnearket tar utgangspunkt i at luftstrømmen går i rette parallelle linjer fra raft til møne, med kontraksjoner ved lekte passeringen. Dette så vi skjedde i tak 6.3 hvor det ikke var noen hindringer for luftstrømmen. Når det er hindringer i kanalen som fører til trykktap blir disse trykktapene store. Vi så at lufttemperaturen økte kun omtrent 1 grad fra raft til møne. Dette skaper svært små densitetsforskjeller som utgjør drivkraften. Strømningen gjennom kanalen hadde muligens sett annerledes ut ved større temperaturredifferanser mellom innløp og utløp. Det hadde da kanskje vært store nok drivkrefter til å skape en strøm som hadde gått forbi lektene, og ikke snudd og strømmet ned til neste lekt igjen.

6.4 Vurdering av resultatene

FLUENT er et avansert program til å simulere strømninger i fluid, det er et anerkjent program som beskriver den virkelige verden så godt som det lar seg gjøre. Programmet er avhengig av at inngangsverdiene programmet får er korrekte, for å gi så korrekte resultat som mulig. Skal en stille spørsmål ved resultatene fra FLUENT så er det disse en må se på. De modeller som er brukt for å simulere strømningen i takene er anbefalt enten fra håndboken til FLUENT eller fra suport avdelingen til FLUENT. Så modellene som er brukt er nok korrekte for denne type strømning.

Det er gjort en del forenklinger for å kunne simulere takene i FLUENT. Takkonstruksjonen er bygd opp i to dimensjoner, en ser da på en kanal som uendelig dyp. En får ikke tatt hensyn til krysslufthing på tvers av taket. Raft og møne geometrien er litt forenklet for å kunne tegne den opp i GAMBIT. Møne band og folie som er vanlig å bruke i møne konstruksjoner er ikke med, isteden er spalten mellom mønepannen og taksteinen redusert med 10 mm. Ved bruk av Boussinesq modellen må en angi middeltemperaturen på luften i kanalen. Denne verdien har en ikke før en har gjort beregningen. Derfor må en beregne en stund så forandre temperaturen, beregne på nytt helt til at temperaturen ikke forandrer seg under beregningene. Er en ikke nøyaktig med å lese av og forandre operativ temperatur mange nok ganger vil programmet bruke feil temperatur i beregningene og med avvik som resultat. I tillegg kan det være feilkilder i selve beregningene. Er rutenettet for findelt kan en få avrundingsfeil og er rutenettet for grovdelt blir beregningene unøyaktige. Beregningsmodellene trenger heller ikke å stemme helt overens med virkeligheten. Dette gjør at det er mulig å få store avvik fra hva som skjer i virkeligheten.

Selv om det finnes mange muligheter til å få feil kilder vil jeg tro at resultatene som er presentert samsvarer i med hva som skjer i kanalen i virkeligheten. Siden beregningsmodellene som brukes i FLUENT er anbefalt, enten gjennom manualer eller fra suport avdelingen til FLUENT, vil de stemme godt overens med virkeligheten. De forenklingene som er gjort vil heller ikke ha stor betydning for resultatet. En ser fra resultatene at strømmingen sirkulerer i alle tak med lekter. Det er nok også grunn til å anta at dette stemmer med hva som skjer i virkeligheten.

6.5 Videre arbeid

Ett av hovedmålene med prosjektet i starten var å bestemme singulærtapskoeffisienter for raft, møne og steinlekter. Dette er ikke gjort. Derfor er det naturlig å prøve å finne andre måter å bestemme disse på. Det er vanskelig å bestemme singulærtapskoeffisienter ved den type strømming som vi opplevde i takkonstruksjonene. En mulighet for å oppnå større strømningshastighet og en mer ensretter strøm, er å øke temperatur forskjellen mellom inne og ute eller å redusere isolasjonsverdien på taket. En vil da få større temperaturredifferanse og dermed større densitet forskjell, dette vil føre til større drivkrefter. Ved større drivkrefter vil mer luft strømme gjennom kanalen, og muligheten for å bestemme singulærtapskoeffisienter for taket er kanskje større.

7 Konklusjon

Resultatene fra simuleringene viser at det er klar sammenheng mellom utformingen av luftekanalen og luftgjennomstrømningen. For tak 1.3 og 2.3 så en at ved å redusere takvinkelen eller ved å øke strømningslengden ble luftgjennomstrømningen redusert. Tak 3.3 og 5.1 viser at ved å øke kanalhøyden øker også luftgjennomstrømningen. Hva som lønner seg mest av å øke sløyfehøyden eller steinlekhøyden kommer ikke klart frem i resultatene, men at økning av høyden fører til større luftgjennomstrømning er helt klart. Dette er kanskje ikke overraskende resultat, det er heller konstatering av hva en trodde. En så av tak 6.2 og 6.3 at ved å fjerne deler av konstruksjonen økte luftgjennomstrømningen. Spesielt når en fjerner både lekt, raft og møne økte gjennomstrømningen mye. Når kun lektene ble fjernet i tak 6.1 fikk vi en reduksjon av gjennomstrømningen. En skulle tro at med å fjerne elementer som skaper trykktap skulle strømmingen øke dette, skjedde ikke. Det oppstod sirkulasjonsstrømninger selv om lektene ikke var der. Ser en på tak 6.3 øker gjennomstrømningen radikalt for dette taket sammenlignet med de andre. Det er det eneste taket uten luftsirkulasjoner, dette er nok noe av grunnen til at strømmingen blir så stor. Blir drivtrykket så stort at sirkulasjoner unngås, vil nok luftgjennomstrømningen for de andre takene også øke kraftig.

Sammenligner en temperaturen på taktekkingen med luftgjennomstrømningen for takene ser man en klar sammenheng. De takene med størst luftgjennomstrømning har lavest temperatur på taktekkingen og omvendt. Dette viser at lufting av tak hjelper for å unngå oppvarming av takflaten og dermed snøsmelting. Samtidig er det totalt sett små forskjeller mellom middeltemperaturen på takene.

Ved hjelp av en ekvivalent hastighet i luftekanalen ble en singulærtapskoeffisient bestemt fra resultatene i FLUENT. Den ekvivalente hastigheten i kanalen ble bestemt ut i fra massestrømmen og tverrsnittsarealet i kanalen. Verdien på singulærtapskoeffisienten ble unaturlig høy den ble mange ganger høyere enn hva en får fra formelverk. Derfor er det naturlig å anta at det ikke er korrekt å bruke den ekvivalente hastigheten som inngangsverdi i beregningene av singulærtapskoeffisienter.

Det er grunn til å anta at resultatene fra simuleringene i FLUENT er i overensstemmelse med den virkelige situasjonen. FLUENT er et avansert og pålitelig program, hvis det er feil i simuleringene så må disse komme fra inngangsverdiene eller feil bruk av beregningsmodellene. I prosjektet er det lagt stor vekt på å sikre validiteten til resultatene, ved å forsikre seg om at inngangsverdiene og modellene som er brukt er korrekt. Derfor er det stor grunn til å anta at resultatene som er presentert, er så korrekt bestemt som det lar seg gjøre

8 Referanser

8.1 Kilder

- [1] Edvardsen, Knut Ivar og Torjussen, Liv, 1997
Håndbok 45 – trehus, Norges byggforskningsinstitutt, PDC Grafisk Produksjon AS, Oslo
- [2] Byggforsk detaljblad nr 525.002, Norges byggforskningsinstitutt, 1996
- [3] Byggforsk detaljblad nr 525.101, Norges byggforskningsinstitutt, 1996
- [4] Byggforsk detaljblad nr 525.102, Norges byggforskningsinstitutt, 1999
- [5] Gjeving, Stig og Thue, Jan Vincent, 2002
Håndbok 50 – Fukt i bygninger, Norges byggforskningsinstitutt, PDC Tangen AS, Oslo
- [6] Blom, Peter, 1990
Doktor ingeniør avhandling, Ventilasjon av isolerte skrå tak, Institutt for husbyggingsteknikk NTH, Trondheim
- [7] Johnson, Richard W, 2000
The Handbook of fluid dynamics, CRC Press LLC, USA
- [8] Hansen, H E, Kjerulf-Jensen, P, Stampe, Ole B
Varme og klimateknikk – Danvak, Danvak ApS, København
- [9] Munson, Bruce R, Young, Donald F og Okiishi, Theodore H, 1990
Fundamentals of fluid mechanics, John Wiley & Sons Inc, USA
- [10] FLUENT 5 User's Guide Volume 1, 1998, FLUENT Inc, England
- [11] Vollen, Øystein, 1996
Mekanikk for teknisk fagskole Hydalikk, NKI – Forlaget, Bekkestua
- [12] 5 User's Guide Volume 2, 1998, FLUENT Inc, England
- [13] Thue, Jan Vincent, 2002
Husbyggingsteknikk, Bygningsfysikk grunnlag, Kompendium i Bygningsfysikk grunnkurs, Institutt for bygg- og anleggsteknikk NTNU
- [14] Teknisk foreskrift til Plan og bygningsloven, 1997, Kommunal- og regionaldepartementet
- [15] Norsk Standard 3031, 1987, Norges Standardiseringsforbund, Oslo

8.2 Bibliografi

Lisø, Kim Robert og Stenstad, Vidar, 2000

Fuktsikre isolerte skrå tretak – Forstudie, Prosjektrapport 266 – 2000 fra Norges byggforskningsinstitutt, Oslo

Ensrud, Magnus, Gåsbak, Johan H, Isaksen, Trygve, Juul, Helge og Torsæter, Magne Olav 1982

Skrå tretak uten kaldt loft – Resultater og anbefalinger fra felt-, skade- og laboratorieundersøkelser, Rapport fra Norges byggforskningsinstitutt, Oslo

Douglas, J F, 1986

Solving problems in fluid mechanics volume 1, Longman Scientific & Technical, England

Olsson, Henny og Sørensen, Stefan, 2003

Forskningsprosessen – Kvalitative og kvantitative perspektiver, Gyldendal Norsk Forlag AS, Oslo

Dalland, Olav, 1997

Metode og oppgaveskriving for studenter, Universitetsforlaget, Oslo

Juul, Helge og Dalaker, Margret, 1993

Byggforsk detaljblad nr 725.116, Norges byggforskningsinstitutt

http://www.byggforsk.no/prosjekter/klima2000/program/06-4_p4.html, 27.11.2003

9 Vedlegg

Siden vedleggene utgjør et stort antall sider vil kun et fåtall vedlegg legges ved i papirformat. Resten av vedleggene blir lagt med på CD. Vedleggene som er lagt ved i papirformat nummereres med bokstaver og de andre nummereres med tall.

Vedlegg A	Beskrivelse av oppgaven
Vedlegg 1	Beregning av singulærtapskoeffisient for tak 1_2
Vedlegg 2	Beregning av strømmingstap ved hjelp av regneark for tak 1.2
Vedlegg 3	Temperaturfordeling over tid for tak 1_2
Vedlegg 4	Hastighetsfordeling over tid for tak 1_2
Vedlegg 5	Hastighet og massestrøm ut utløp i tak 1_2
Vedlegg 6	Temperatur på takstein for tak 1_2
Vedlegg 7	Temperaturfordeling over tid for tak 1_3
Vedlegg 8	Hastighetsfordeling over tid for tak 1_3
Vedlegg 9	Hastighet og massestrøm i utløpet til tak 1_3
Vedlegg 10	Temperatur på takstein til tak 1_3
Vedlegg 11	Temperatur raft tak 1_3
Vedlegg 12	Hastighet i raft for tak 1_3
Vedlegg 13	Strømning i raft for tak 1_3
Vedlegg 14	Temperatur i møne for tak 1_3
Vedlegg 15	Hastighet i møne for tak 1_3
Vedlegg 16	Strømning i møne for tak 1_3
Vedlegg 17	Temperaturfordeling over tid for tak 2.3
Vedlegg 18	Hastighetsfordeling over tid for tak 2.3
Vedlegg 19	Middelhastighet og massestrøm for tak 2_3
Vedlegg 20	Temperatur på takstein til tak 2_3
Vedlegg 21	Temperatur i raft for tak 2_3
Vedlegg 22	Hastighet i raft for tak 2_3
Vedlegg 23	Strømning i raft for tak 2_3
Vedlegg 24	Temperatur i møne for tak 2_3
Vedlegg 25	Hastighet i møne for tak 2_3
Vedlegg 26	Strømning i møne for tak 2_3
Vedlegg 27	Temperaturfordeling over tid for tak 3_3
Vedlegg 28	Hastighetsfordeling over tid for tak 3_3

Vedlegg 29	Middelhastighet og massestrøm for tak 3_3
Vedlegg 30	Temperatur på takstein til tak 3_3
Vedlegg 31	Temperatur i raft til tak 3_3
Vedlegg 32	Hastighet i raft for tak 3_3
Vedlegg 33	Strømning i raft for tak 3_3
Vedlegg 34	Temperatur i møne for tak 3_3
Vedlegg 35	Hastighet i møne for tak 3_3
Vedlegg 36	Strømning i møne for tak 3_3
Vedlegg 37	Temperatur fordeling over tid for tak 5_1
Vedlegg 38	Middelhastighet og massestrøm i utløpet til tak 5_1
Vedlegg 39	Temperatur på takstein for tak 5_1
Vedlegg 40	Temperatur i raft for tak 5_1
Vedlegg 41	Hastighet i raft for tak 5_1
Vedlegg 42	Hastighet i møne for tak 5_1
Vedlegg 43	Temperatur i møne for tak 5_1
Vedlegg 44	Hastighet i møne for tak 5_1
Vedlegg 45	Strømning i møne for tak 5_1
Vedlegg 46	Temperaturfordeling over tid for tak 6_1
Vedlegg 47	Hastighetsfordeling over tid for tak 6_1
Vedlegg 48	Middelhastighet og massestrøm i tak 6_1
Vedlegg 49	Temperatur på takstein til tak 6_1
Vedlegg 50	Hastighetsfordeling over tid for tak 6_2
Vedlegg 51	Temperaturfordeling over tid for tak 6_2
Vedlegg 52	Middelhastighet og massestrøm i utløpet til tak 6_2
Vedlegg 53	Temperatur på takstein for tak 6_2
Vedlegg 54	Temperaturfordeling over tid for tak 6_3
Vedlegg 55	Hastighetsfordeling over tid for tak 6_3
Vedlegg 56	Middelhastighet og massestrøm i utløp for tak 6.3
Vedlegg 57	Temperatur på takstein for tak 6_3

Vedlegg A

NTNU
Norges teknisk-naturvitenskapelige
universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap
og teknologi
Institutt for bygg, anlegg og transport



Faggruppe: Bygnings- og materialteknikk

Postadresse
Høgskoleringen 7A
7491 Trondheim
Telefon 73 59 46 40
Telefax 73 59 70 21

FORDYPNINGSPROSJEKTOPPGAVE

HØSTEN 2003

for

Stud techn. Vidar Hofseth

Lufting av tak

Bakgrunn

Hensikten med lufting av isolerte tak over oppvarmede rom er å ventilere bort byggfukt og eventuell senere fuktilførsel for eksempel på grunn av diffusjon eller lekkasjer fra mindre utettheter i konstruksjonen. Videre vil lufting av taket bidra til at tekkingen holdes kald slik at snøsmelting unngås. Snøsmelting kan medføre skadelig ising på takets kaldere deler, eksempelvis ved takutstikk og takrenner.

Prosjektet gjennomføres i samarbeid med Sivert Uvsløkk ved Norges byggforskningsinstitutt (NBI), og inngår som en del av delprosjekt 4 i forskningsprogrammet *Klima 2000*. Delprosjektet har navnet *Studie av kompakte og luftede isolerte skrå tak*.

Oppgave

I dette prosjektet skal beregningsprogrammet FLUENT benyttes til å studere luftstrømningen og varmetransporten i isolerte, luftede skrå tak, med sikte på å finne ut hvor store luftespalter og spalteåpninger må være for at smelting av snø på taket skal unngås. Dette skal gjennomføres både ved å studere hele tak og deler av tak. Sistnevnte studeres for å finne ut om forenklete ingeniørmessige metoder er nøyaktige nok.

To naturlige innledende deloppgaver i dette prosjektet er:

1. Litteraturstudium inklusiv studie av tilsvarende arbeider som denne oppgaven skisserer og grunnlaget for en praktisk tilnærming til temaet. Undersøkelser av om singulærtapsfaktorer (eng. "minor losses") som benyttes ved studier av ventilasjonskanaler (og som vanligvis gjelder turbulent strømning) kan benyttes for tak (der det ofte er laminær strømning), bør utføres.
 2. Gjøre seg kjent med beregningsprogrammet FLUENT.
- Videre vil innholdet i oppgaven være delvis bestemt ut fra hva man finner under punkt 1 over, men aktuelle problemstillinger er

- Undersøk ved hjelp av FLUENT om eksisterende singularertapsfaktorer kan benyttes for de geometriene som finnes i tak.
- Sammenlign forenklete beregninger med mer avanserte beregninger.
- Finne singularertapsfaktorer for typiske møne- og raftløsninger.
- Eksperimentell verifisering av FLUENT beregninger i laboratorium.

Hvis prosjektoppgaven videreføres i en hovedoppgave kan det være aktuelt å gjøre studier i vindtunnel ved NTNU eller i "The Jules Verne Climatic Wind Tunnel" ved CSTB i Frankrike. Hvis sistnevnte tunnel blir brukt kan det også være aktuelt og studere snøinndrift i luftede tak, både ved simuleringer og eksperimentelt. Dette vil i så fall skje i nært samarbeid med NBI. Hvis studenten ønsker å videreføre arbeidet i en hovedoppgave oppfordres han til å utarbeide en plan for hovedoppgaven og å inkludere denne i prosjektoppgaven.

Generelt

Ovenstående tekst er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil, om nødvendig, kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Evt. justeringer må skje i samråd med veileder og faglærer ved instituttet.

Normert arbeidsbelastning for prosjektoppgaven er 11,25 studiepoeng som tilsvarer 18 ukebelastingstimer, dvs tilsvarende ca. 288 arbeidstimer pr student. Ved bedømmelsen legges det vekt på grundigheten i bearbeidningen, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal ha sammendrag, innholdsfortegnelse (med fortegnelse over evt. vedlegg og bilag) og komplett paginering. Alt kildemateriale som ikke er av generell karakter, skal angis slik at man uten problemer kan finne tilbake til kilden. Dette gjelder også opplysninger og informasjon som er gitt muntlig.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og hovedoppgave ved Institutt for bygg- og anleggsteknikk». Dette er retningslinjer for det gamle BA-instituttet, men de gjelder også for Institutt for bygg, anlegg og transport.
(<http://www.ivt.ntnu.no/bat/undervisning/rapportveiledning.pdf>)

Instituttet vil ha full rett til å bruke resultatene av arbeidet, som om det var utført av en ansatt under den ordinære arbeidsbelastning. Bruk av resultatene til publisering etc. kan bare skje i samarbeid med og etter avtale med faglærer og student (og eventuelt ekstern samarbeidspartner).

Innleveringsfrist:

Oppgavebesvarelsen i original (uinnbundet) samt to kopier skal leveres innen
Fredag 19. desember 2003 kl 1500.

Veileder: Arild Gustavsen

Ekstern kontakt: Sivert Uvsløkk ved Norges byggforskningsinstitutt (NBI)

Institutt for bygg, anlegg og transport

Dato: 30. juni 2003

Arild Gustavsen

Faglærer