

Ingrid Krokann Storrø

# Lufttetthet i klemte vindsperreskjøter og effekten av teip

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk

Veileder: Stig Geving, IBM

Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Community

Juni 2021



Ingrid Krokann Storrø

# **Lufttetthet i klemte vindsperreskjøter og effekten av teip**

Masteroppgave i bygg- og miljøteknikk  
Veileder: Stig Geving, IBM  
Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Community  
Juni 2021

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



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

Luftlekkasjer i bygninger fører til økt energibehov, et dårligere termisk inneklima og større risiko for fuktskader i konstruksjonen. I tillegg vil isolasjonen i bygningskroppen svekkes ved infiltrasjon av kald uteluft. For å unngå dette skal det være to lufttette sjikt på hver side av isolasjonen, der vindsperra utgjør det utvendige sjiktet. Skjøtene i vindsperra er svake punkter som er spesielt utsatt for luftlekkasjer, og derfor er utførelsen av skjøtene viktig. Den tradisjonelle måten å sikre god lufttetthet på har vært å klemme vindsperr-skjøter mellom en stender og en lekt. Nye og strengere krav til lufttetthet har gjort at det blir stadig mer utbredt med bruk av teip over skjøtene. Vindsperrsjiktet utsettes for store variasjoner i fuktighet og temperatur i løpet av ett år. Dette gjør at det oppstår fuktbevegelser i stenderne og lektene, som videre fører til endringer i skjøtenes lufttetthet. Variasjonene i fuktighet og temperatur vil også medføre slitasje i teipen. For å utvikle løsninger som er lufttette over tid, er det nødvendig med mer kunnskap om teipens funksjon og holdbarhet, samt innvirkningen fukt- og temperaturvariasjonene har på luftlekkasjene gjennom skjøtene.

I denne masteroppgaven er det gjennomført et laboratorieforsøk der det er gjort målinger av lufttettheten til prøver bestående av klemte vindsperrskjøter. Prøvene er utsatt for fuktsykluser for å undersøke hvordan luftlekkasjene påvirkes av gjentatte uttørkinger og oppfuktinger. I fuktsyklusene ble prøvene tørket og fuktet mellom fuktnivåer som opptrer i et virkelig vindsperrsjikt i et norsk klima. I tillegg er det undersøkt hvilken påvirkning senteravstanden mellom festemidlene i klemlekten har for lekkasjene, samt effekten av bruk av teip over skjøtene. Dette er gjort ved å gjøre seks luftlekkasjemålinger av totalt 36 prøver som er utformet etter seks ulike parameterkombinasjoner. Senteravstandene som ble brukt i forsøksprøvene var 150, 300 og 450 mm, og halvparten av prøvene var utstyrt med teip mellom skjøten og lekten.

Resultatene i forsøket viser at fuktsykluser har stor innvirkning på lufttettheten i klemte vindsperrskjøter. Forsøksprøvene uten teip hadde en stigende lekkasjeutvikling gjennom fuktsyklusene, der luftlekkasjene var størst etter uttørking og minst etter oppfukting. Prøvene med teip hadde størst lekkasjer etter oppfukting. For teipprøvene var lekkasjeutviklingen etter første oppfukting flat der festemidlenes senteravstand var 450 mm, og synkende for 150 og 300 mm senteravstand. Senteravstanden mellom festemidlene henger direkte sammen med antall perforeringer i lektene og teipen, som utgjør lekkasjepunkter i skjøtene. Samtidig er lektenes klemmeffekt viktig for lufttettheten, også for teipede skjøter. Forsøksresultatene viser at redusert klemmeffekt som følge av deformasjoner i lektene har større innvirkning på lufttettheten på sikt enn det liten senteravstand og mange perforeringer har. Løsningen som gir best lufttetthet er en senteravstand som er liten nok til å sikre god klemmeffekt, og samtidig stor nok til å begrense antallet perforeringer. I tillegg vil bruk av teip gi en betydelig reduksjon av luftlekkasjer. Forsøksresultatene viser god effekt av teip for alle senteravstandene som ble testet. I gjennomsnitt ble luftlekkasjene redusert med 55 % ved å bruke teip over skjøtene. Teipen må ha god holdbarhet, og tåle fukt- og temperaturvariasjonene den utsettes for, dersom skjøtene skal være lufttette over tid. Selv om funksjonen til teipen ble opprettholdt gjennom fuktsyklusene i forsøket, er det vanskelig å forutsi hvordan teipen vil fungere i et større tidsperspektiv.



# Abstract

Air leakages in buildings cause increased energy needs, a poor thermal indoor climate and a greater risk of moisture damages in the structure. Also, the insulation in the building envelope will be impaired by infiltration of cold outdoor air. To avoid this, the insulation should have two airtight layers on each side, where the wind barrier constitutes the exterior layer. The joints in the wind barrier are weak points that are more exposed to air leakages, which makes the execution of the joints particularly important. The traditional way to ensure airtight joints has been to clamp the joints between a stud and a batten. Solutions such as use of adhesive tape over the joints have become more common due to new and stricter requirements for airtightness. The wind barrier layer is exposed to large variations in humidity and temperature within a year. This causes moisture-related movements in the studs and battens, that leads to changes in the airtightness of the joints. The variations in humidity and temperature will also reduce the performance of the adhesive tape. More knowledge about the long term performance of the tape, as well as the impact of the humidity and temperature variations, is necessary to develop solutions that are airtight over time.

In this thesis, it has been conducted a laboratory test with repeated measurements of the airtightness of test samples consisting of clamped wind barrier joints. The test samples were exposed to moisture cycles to investigate how the air leakages are affected by repeated drying and humidification. During the moisture cycles, the test samples were dried and humidified between moisture levels that are representative for a Norwegian climate. Additionally, the impact of center spacing between the fasteners and use of adhesive tape over the joints has been investigated. This is conducted through six air leakage measurements of a total of 36 test samples designed for six different combinations of parameters. The center spacings used in the test samples were 150, 300 and 450 mm, and half of the samples were equipped with tape between the joint and the batten.

Results from the laboratory test show that moisture cycles have a significant effect on the airtightness of clamped wind barrier joints. The test samples without tape had a rising leakage development throughout the moisture cycles, where the largest leakages occurred after drying, and the smallest leakages occurred after humidification. For the test samples with tape, humidification led to the largest leakages. After the first humidification, the leakage development for test samples with tape was flat where the center spacing was 450 mm, and declining where the center spacing was 150 and 300 mm. The center spacing between the fasteners is directly related to the number of perforations in the clamped joint. In addition, the clamp effect of the battens is crucial for ensuring the airtightness, also with the use of tape. Results from the test show that reduced clamp effect caused by deformations in the battens has a larger impact on the long term airtightness than small center spacing and a high number of perforations. The most airtight solution is a center spacing that is small enough to ensure a sufficient clamp effect, and large enough to limit the number of perforations. In addition, the use of tape will provide a considerable reduction of air leakages. Results from the laboratory test show that the effect of tape is significant for all the different center spacings that were tested. In average, use of tape reduced the air leakages by 55 %. To maintain airtight joints over time, the durability of the tape has to be sufficient to withstand the variations in humidity and temperature. Even though the function of the tape was maintained during the moisture cycles in the laboratory test, it is difficult to predict how the function is maintained in a larger time perspective.





# Forord

Denne oppgaven er en avsluttende masteroppgave skrevet våren 2021 ved det 2-årige masterstudiet i bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Masteroppgaven inngår i hovedprofilen bygnings- og materialteknikk innenfor studieretningen bygg og anlegg. I tillegg er oppgaven skrevet som en del av forskningsprosjektet TightEN ved SINTEF Community.

Oppgaven handler om luftlekkasjer i klemte skjøter i vindsperresjiktet, og hvordan luftlekkasjene påvirkes av festemidlenes senteravstand og bruk av teip. I tillegg er det sett på hvordan fuktvariasjoner påvirker lekkasjene gjennom vindsperreskjøtene. Dette ble undersøkt gjennom et laboratorieforsøk der det ble gjort luftlekkasjemålinger av prøver som bestod av klemte vindsperreskjøter. Prøvene ble utsatt for gjentatte uttørking og oppfuktinger, og var utformet etter seks ulike parameterkombinasjoner for å gjøre sammenligninger av luftlekkasjene ut ifra senteravstand og bruk av teip over skjøtene.

Jeg ønsker å takke hovedveileder Stig Geving og medveileder Lars Gullbrekken for deres veiledning underveis i prosessen. En stor takk rettes også til Ole Aunrønning for svært god hjelp med arbeidet på laboratoriet.

Trondheim,  
10. juni 2021

  
Ingrid Krokann Storrø



# Innhold

1	Innledning .....	13
1.1	Bakgrunn .....	13
1.2	Formål.....	13
1.3	Oppbygning av oppgaven.....	14
1.4	Begrensninger .....	14
2	Litteratur.....	15
2.1	Teori .....	15
2.1.1	Yttervegger av bindingsverk.....	15
2.1.2	Lufttetthet i bygninger .....	16
2.1.3	Vindsperre .....	18
2.1.4	Klemte skjøter .....	19
2.1.5	Teip .....	20
2.1.6	Tre og fuktighet .....	21
2.2	Tidligere forskning .....	24
2.2.1	Sagen (2003) .....	24
2.2.2	Bergby (2011) .....	25
2.2.3	Selmer (2013) .....	28
2.2.4	Norvik (2018).....	29
2.2.5	Engen (2020) .....	30
3	Metode.....	33
3.1	Litteraturstudie .....	33
3.2	Laboratorieforsøk .....	33
4	Laboratorieforsøk.....	35
4.1	Parametere .....	35
4.1.1	Parameterstudie.....	35
4.1.2	Parametere i forsøket.....	36
4.2	Utstyr.....	38
4.2.1	Prøver .....	38
4.2.2	Test- og oppfuktingsboks.....	40
4.2.3	Luftmålingsrigg .....	41
4.2.4	Utstyr for fuktmåling.....	42
4.3	Forsøksprosedyre .....	43
4.3.1	Egenlekkasje .....	43
4.3.2	Måling av luftlekkasjer .....	44
4.3.3	Fuktskykluser.....	45

4.3.4	Beregning av eksakt fuktinnhold .....	47
5	Resultat .....	49
5.1	Initielle lekkasjer.....	49
5.2	Lekkasjer gjennom fuktskyklusene .....	49
5.3	Lekkasjer med og uten teip .....	52
5.4	Fuktinnhold .....	54
6	Diskusjon .....	57
6.1	Feilkilder .....	57
6.2	Fuktskyklusenes påvirkning .....	58
6.3	Festemidlenes senteravstand .....	60
6.4	Effekten av teip.....	61
7	Konklusjon.....	63
8	Videre arbeid .....	65
	Referanser .....	67
	Vedlegg .....	71

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Bygningsforskriftene stiller stadig strengere krav til bygningers lufttetthet. Luftlekkasjer i bygningskroppen fører til et større energibehov for oppvarming, og et dårligere termisk inneklima. I tillegg vil luftlekkasjer føre til at varmeisolasjonen svekkes, i tillegg til at det er større fare for fuktskader i konstruksjonen. For at bygninger skal fungere optimalt i hele sin levetid er det viktig at dampsperre- og vindsperrsjiktet, som er plassert på henholdsvis innsiden og utsiden av isolasjonen, er tilstrekkelig lufttett. Vindsperra skal sørge for at det ikke oppstår luftlekkasjer, samt beskytte isolasjonen innenfor mot infiltrasjon av uteluft. Skjøtene i vindsperra er svake punkter som er spesielt utsatt for luftlekkasjer, og derfor er utførelsen av skjøtene viktig. Den tradisjonelle måten å sikre god lufttetthet på har vært å klemme vindsperreskjøten mellom en stender og en lekt. På grunn av nye og strengere krav til lufttetthet blir det stadig mer utbredt med bruk av teip over skjøtene. Vindsperrsjiktet utsettes for store variasjoner i fuktighet og temperatur i løpet av året, og dette kan føre til endringer i skjøtens lufttetthet på grunn av fuktbevegelser i stendere og lekter. I tillegg vil fukt- og temperaturvariasjonene føre til slitasje i teipen, og økte luftlekkasjer. Derfor er mer kunnskap om teipens funksjon og holdbarhet nødvendig, slik at det kan utvikles løsninger som sikrer god lufttetthet i hele bygningens levetid.

Denne oppgaven er en del av prosjektet TightEN ved SINTEF Community, som har som mål å utvikle test- og evalueringemetoder for teip og lignende produkter. Dette innebærer blant annet undersøkelser av hvordan teipens funksjon endres når den utsettes for fukt- og temperaturvariasjoner over tid.

## 1.2 Formål

I denne masteroppgaven er det gjennomført et laboratorieforsøk der det er gjort målinger av lufttettheten til prøver bestående av klemte vindsperreskjøter. Oppgaven er en fortsettelse av arbeidet til Engen (2020), som ikke fikk gjennomført det planlagte forsøket på grunn av koronapandemien. Hensikten med forsøket var å undersøke hvordan ulike parametere påvirket lufttettheten i klemte vindsperreskjøter. Prøvene ble utformet med ulike senteravstander mellom festemidlene, og det ble brukt teip over skjøtene i halvparten av prøvene. I tillegg ble prøvene utsatt for fuktskykluser for å undersøke hvordan lekkasjene ble påvirket av gjentatte uttørkinger og oppfuktinger. Følgende forskningsspørsmål blir besvart i oppgaven:

- Hvordan påvirkes lufttettheten i klemte vindsperreskjøter av fuktskykluser?
- Hvilken betydning har festemidlenes senteravstand for lufttettheten i klemte vindsperreskjøter?
- Hvilken betydning har bruk av teip for lufttettheten i klemte vindsperreskjøter?

### 1.3 Oppbygning av oppgaven

Oppgaven er delt inn i tre hoveddeler. I den første delen av oppgaven blir det presentert teori som er relevant for oppgavens forskningsspørsmål og laboratorieforsøket som er gjennomført. I tillegg presenteres tidligere forskning som er gjort innenfor samme tema. Den andre delen omhandler hvilken metode som er brukt i oppgaven, og inneholder en beskrivelse av laboratorieforsøkets oppsett og prosedyre. I oppgavens tredje del blir resultatene fra forsøket presentert og diskutert. Videre følger en konklusjon, der det også gis anbefalinger knyttet til forsøksresultatene. Til slutt blir det gitt forslag til videre arbeid innenfor oppgavens tema.

### 1.4 Begrensninger

Tidsperioden som masteroppgaven gjennomføres innenfor har satt noen begrensninger for laboratorieforsøket. Dette gjelder blant annet antallet fuktskykluser som prøvene ble utsatt for. Uttørking og oppfukting er tidkrevende, derfor er fuktskyklusene begrenset til tre uttørkinger og to oppfuktinger. Gjennomføring av flere sykluser hadde gjort det mulig å undersøke hvordan lekkasjeutviklingen vil være over en lengre tidsperiode. Sammenlignet med fuktvariasjonene som en virkelig yttervegg utsettes for er det som gjøres på laboratoriet akselererte fuktskykluser. Prøvene utsettes for høyere temperatur og relativ fuktighet enn under virkelige forhold, og dette kan ha innvirkning på resultatene fra luftlekkasjemålingene.

Forsøksoppsettet og metoden satte også begrensninger for utforming og antall av prøvene som ble testet i laboratoriet. Prøveantallet ble bestemt på bakgrunn av plassbegrensninger i utstyret som ble benyttet. Luftlekkasjemålingene var også relativt tidkrevende totalt sett. Et større antall prøver ville ha gitt et bedre resultatgrunnlag, men det ville samtidig ha tatt betydelig mer tid å gjennomføre målingene.

Det er ikke gjort noen fuktsimuleringer i denne oppgaven. Tidsbegrensninger er noe av årsaken til dette, men det ble i tillegg vurdert som unødvendig. Denne oppgaven bygger på arbeidet til Engen (2020) som gjorde fuktsimuleringer for å bruke resultatene i forsøket. Med tanke på at laboratorieforsøket i denne oppgaven hadde samme oppsett og forsøksprosedyre, ble det vurdert som unødvendig å gjøre nye simuleringer med de samme parameterne. Derfor ble resultatene fra fuktsimuleringene brukt som grunnlag for fuktskyklusene i forsøket.

## 2 Litteratur

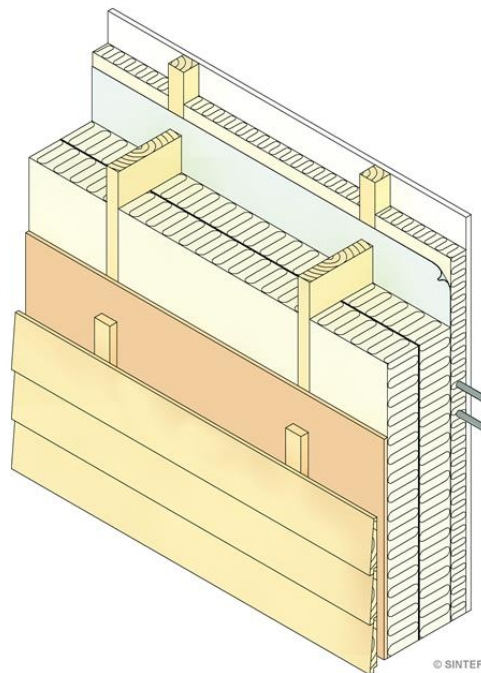
I dette kapitlet presenteres teori som er relevant for oppgavens forskningsspørsmål og laboratorieforsøket som er gjennomført. I tillegg inneholder kapitlet en oppsummering av tidligere forskning som er gjort innenfor dette temaet. Den tidligere forskningen består av prosjektoppgaver og masteroppgaver ved NTNU.

### 2.1 Teori

#### 2.1.1 Yttervegger av bindingsverk

Sammen med tak og gulv utgjør ytterveggene klimaskallet til en bygning. Ytterveggene skal blant annet fungere som beskyttelse mot vær og vind, samt være med på å sikre et godt termisk inneklima. Derfor stilles det krav til blant annet varmesisolering, lufttetthet og fuktsikkerhet (SINTEF, 2008). For å oppnå kravene er det viktig å fokusere på disse faktorene både i prosjektering og utførelse. Faktorene har stor betydning for bygningens energiforbruk, brukernes komfort og konstruksjonens bestandighet.

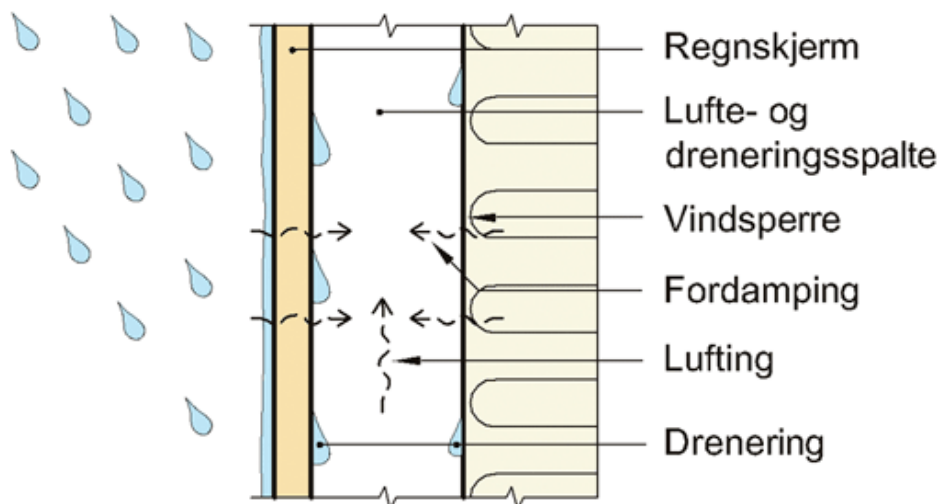
Yttervegger kan bygges opp på mange måter, og den vanligste måten som benyttes i Norge er yttervegger av bindingsverk (Edwardsen og Ramstad, 2014). Et bindingsverk består av stendere som vanligvis plasseres med avstand c/c 600 mm og sviller som holder sammen stenderne i topp og bunn. Mellom stenderne plasseres varmesisolasjon. Det er vanlig å supplere med påforinger i tilfeller der det for eksempel er ønskelig med større veggtykkelser og ekstra varmesisolasjon. Figur 1 viser et eksempel på oppbygning av en yttervegg av bindingsverk med innvendig påforing.



**Figur 1: Eksempel på oppbygning av en yttervegg av bindingsverk (SINTEF, 2020)**

I småhus er bindingsverket som regel hovedbæresystemet, der stenderne tar opp de vertikale lastene (Edvardsen og Ramstad, 2014). Valg av stendertype og dimensjoner avhenger i større grad av behov for varmeisolasjon enn av bindingsverkets nødvendige bæreevne. Stendere av konstruksjonsvirke er mest brukt, men det er også mulig å bruke stendere av sammensatte profiler, for eksempel limtre og I-profiler (SINTEF, 2014). De sammensatte profilene er spesielt egnet dersom det er krav til høy varmeisolasjon i ytterveggen. I tillegg er de mer dimensjonsnøyaktige og har vanligvis lavere fuktinnhold ved levering enn stendere av konstruksjonsvirke.

Bindingsverksvegger skal ha en lufttet utvendig kledning for å sørge for at slagregn som trenger gjennom kledningen, og byggfukt fra innsiden, har mulighet til å tørke ut (Edvardsen og Ramstad, 2014). Derfor skal kledningen utlektes slik at det er et kontinuerlig luftesjikt på baksiden som er både drenert og ventilert. Dette prinsippet kalles tottrinnetting, og er vist i Figur 2 (SINTEF, 2013a). Kledningen vil dermed fungere som regnskjerm, og vindsperra utgjør lufttetningen. Dimensjonene og utformingen av den utlektede kledningen må blant annet tilpasses etter klimaet på stedet, type kledning og den aktuelle bygningen.



**Figur 2: Prinsipp for tottrinnetting av fasade (SINTEF, 2013a)**

For å hindre luftlekkasjer inn i og gjennom veggen, skal det være to lufttette sjikt på hver side av isolasjonen (Edvardsen og Ramstad, 2014). Luftlekkasjer svekker isolasjonsevnen og kan forårsake blant annet vanddampkondens og ubehagelig trekk. Det innvendige lufttette sjiktet består av en dampsperra. Hensikten med dampsperra er å hindre vandamp fra innelufta i å kondensere inne i konstruksjonen, og derfor er det viktig at den er tilstrekkelig damp tett. Vindsperra utgjør det utvendige lufttette sjiktet, og den skal være tilstrekkelig dampåpen slik at byggfukt i konstruksjonen slipper ut. Den må også tåle fuktpåvirkninger fra utsiden. Kapittel 2.1.3 inneholder en nærmere beskrivelse av vindsperras funksjoner og egenskaper.

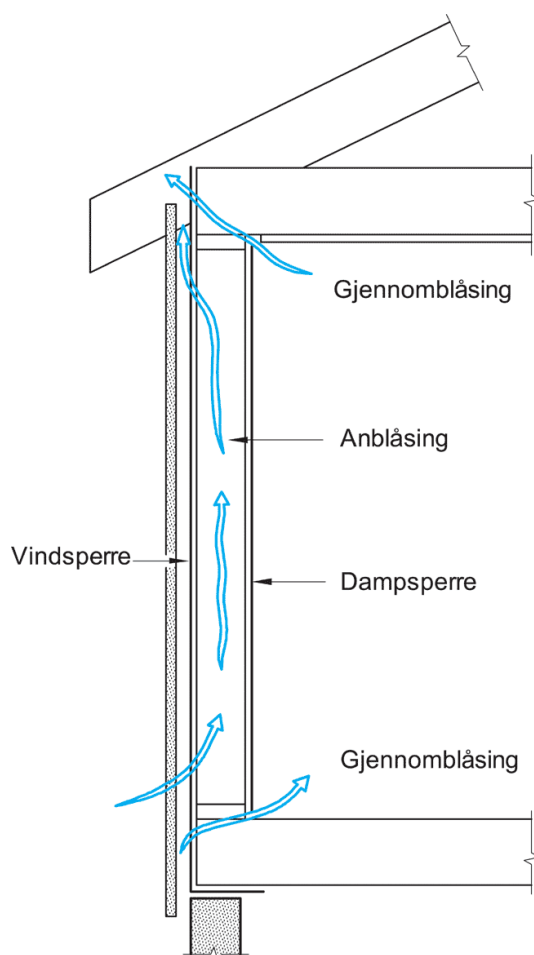
### 2.1.2 Lufttetthet i bygninger

Lufttetthet spiller en viktig rolle for bygningers totale energibruk. Lekkasjetall er et mål som brukes på en bygning resulterende lufttetthet, og det defineres som antall luftvekslinger per time ved 50 Pa trykkforskjell (Thue, 2016). TEK17 stiller minimumskrav om lekkasjetall  $\leq 1,5 \text{ h}^{-1}$  for alle bygninger unntatt boligbygninger og fritidsboliger med laftede yttervegger (DiBK, 2021). Ifølge SINTEF (2013b) kan en reduksjon av lekkasjetallet ha stor innvirkning på en bygning varmetap. Å redusere en bygning lekkasjetall fra  $1,5 \text{ h}^{-1}$  til  $0,6 \text{ h}^{-1}$  kan føre til en 5 % reduksjon av beregnet netto energibehov. En økning i



isolasjonstykkelsen fra 250 mm til 350 mm vil til sammenligning gi en reduksjon på kun 3 %. Luftlekkasjer gir en ukontrollert tilførsel av kald uteluft som svekker isolasjonsevnen til bygningskroppen og øker energibehovet. Dette fører også til at ventilasjonsanlegg med eventuelle varmegjenvinnere vil bruke mer energi på oppvarming eller nedkjøling av luftmengdene som strømmer gjennom utettheter i konstruksjonen.

Drivkraften til strømming av luft er lufttrykkforskjeller som kan oppstå på grunn av vind, temperaturforskjeller eller ventilasjonsvifter (Thue, 2016). Trykkforskjellene som oppstår på grunn av temperaturforskjeller kalles skorsteinseffekten. Mens trykkforskjeller på grunn av ventilasjonsvifter er relativt konstante, vil vindpåkjenninger og temperaturforskjeller variere over tid. Til sammen gir vind, temperaturforskjeller og ventilasjon en resulterende trykkforskjell som fører til luftstrømninger. Luftlekkasjer i en bygning skjer hovedsakelig gjennom utettheter som sprekker, hull og gjennomføringer. Utetthetene er typisk i skjøter og fuger i tilslutningene mellom bygningsdeler, samt i sprekker og spalter på grunn av skader og deformasjoner. Det er summen av alle utetthetene som bestemmer bygningens totale lufttetthet.



**Figur 3: Anblåsing og gjennomblåsing (SINTEF, 2003)**

Luftlekkasjer kommer i to ulike former: anblåsing og gjennomblåsing (SINTEF, 2003). Anblåsing skjer når luft strømmer gjennom en åpning i vindsperra, inn i isolasjonslaget, og ut gjennom en annen åpning i vindsperra. Grunnen til at dette skjer er varierende vindtrykk langs vindsperra, og det fører til luftbevegelser i form av konveksjon i isolasjonen. Dette resulterer i avkjøling av isolasjonen og økt varmetap. Dersom luftstrømmen går gjennom både dampsperra og vindsperra, kalles det gjennomblåsing. Dette fører til varmetap gjennom utilsiktet ventilasjon av innelufta. For å unngå slike luftlekkasjer er det viktig

å sørge for god og tett montering av dampsperra og vindsperra. Anblåsing og gjennomblåsing er illustrert i Figur 3. Forskning har vist at luftlekkasjer som følge av utettheter i vindsperrersjiktet har stor innvirkning på isolasjonsevnen til en yttervegg. Uvsløkk (1996) fant ut at varmetapet på grunn av konveksjon i isolasjonen kan være fra tre til ti ganger så stor som ved en tett konstruksjon. Kosiński, Wójcik og Semen (2019) undersøkte samme tema, og fant ut at luftlekkasjer i vindsperrersjiktet kan føre til en 85 % reduksjon av ytterveggenes isolasjonsevne. Målinger viste også at isolasjon med lav densitet vil synke sammen over tid, noe som fører til åpninger i isolasjonslaget og økt varmetap som følge av konveksjon.

I tillegg til økt energibehov kan luftlekkasjer føre til problemer med fukt, luftkvalitet og komfort (SINTEF, 2013b). Som tidligere nevnt skal sperrersjiktene hindre luftlekkasjer inn i og gjennom veggen. Lekkasjer i dampsperra kan føre til at varm, fuktig inneluft trekker utover i konstruksjonen og kondenserer, og en utett vindsperre kan føre til at regnvann lekker inn i konstruksjonen. Dette kan føre til problemer med råte og muggvekst. Lufttilførselen som skjer via ventilasjonsanlegget vil være kontrollert og filtrert, men den ukontrollerte lufttilførselen som skjer gjennom utettheter i bygningskroppen er ufiltrert og kan føre til redusert luftkvalitet. Eventuelle utettheter mot grunnen vil gi større risiko for tilførsel av radon. Ukontrollert tilførsel av luft vil i tillegg gi redusert komfort som følge av trekk og lave overflatetemperaturer.

For å oppnå et lavt lekkasjetall bør tiltakshaveren i prosjektet utnevne ansvarlige for oppfølging av lufttetthet både for prosjekteringen og utførelsen (SINTEF, 2013b). Under prosjekteringen er det viktig at klimaskjermen utformes med kontinuerlige sperrersjikt. Der sperrersjiktene brytes må det lages detaljerte tegninger som viser hvordan lufttettheten skal ivaretas. I tillegg må produkter som brukes til lufttetting ha dokumenterte egenskaper i form av for eksempel tekniske godkjenninger. Før utførelsen starter, bør de prosjekterte løsningene gjennomgås i fellesskap av prosjekterende og entreprenør. Videre bør det lages en plan for håndtering og kontroll av lufttetthet, og denne planen bør kommuniseres slik at alle fagområder er informert. For store bygninger er det vanlig å gjøre lufttetthetsmålinger av representative arealer i tidligfasen i tillegg til målingen som gjøres når bygningen er ferdigstilt. Det er også vanlig å gjennomføre kontrollmålinger når vindsperrersjiktet er ferdig montert, og vinduer og dører er satt inn. På dette tidspunktet er ikke isolasjon og dampsperre ennå montert, og dermed er det relativt enkelt å avdekke og utbedre eventuelle feil og skader.

### 2.1.3 Vindsperre

Vindsperrersjiktet har flere funksjoner som skal oppfylles. Det skal være lufttett for å unngå at isolasjonen svekkes ved infiltrasjon av uteluft, samt supplere dampsperrersjiktet ved å sørge for at det ikke oppstår luftlekkasjer gjennom ytterveggen (Edwardsen og Ramstad, 2014). Det vil være mulighet for at vann trenger inn bak kledningen, og derfor må vindsperra også være vannavvisende. I byggefasen vil den dessuten fungere som midlertidig kledning før den permanente kledningen monteres, og dermed er det viktig at den er regntett. Eventuell byggfukt i konstruksjonen må ha mulighet til å tørke ut, og derfor bør vindsperra ha en så lav vanddampmotstand som mulig. Den ekvivalente luftlagtykkelsen,  $s_d$ -verdien, for vindsperrer bør ikke overstige 0,5 m. Denne verdien angir hvor tykt et stillestående luftlag må være for å ha samme diffusjonsmotstand som det aktuelle materialsjiktet (SINTEF, 2003). Vanddampmotstanden til vindsperrer bør ikke overstige  $2,5 * 10^9$  m<sup>2</sup>sPa/kg, som tilsvarer en  $s_d$ -verdi lik 0,5 m.

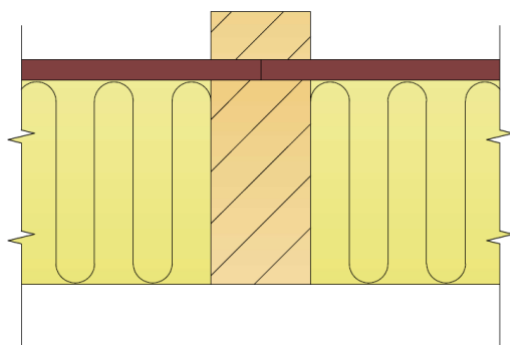
Vindsperrer kan deles inn i rullprodukter og plateprodukter. Rullprodukter er mindre robuste enn plateprodukter, men leveres i større formater (Edwardsen og Ramstad, 2014). Plateprodukter vil i tillegg til å oppfylle vindsperrfunksjonene også fungere som horisontal vindavstivning. Vindsperrer av rullprodukt gir derimot ikke tilfredsstillende vindavstivning, og dette må derfor gjøres ved bruk av skrånstag. SINTEF (2003) angir følgende typer vindsperrer:

- Forhudningspapp
- Trefiberplater
- Kartongplater
- Gipsplater
- Plastfiberduk

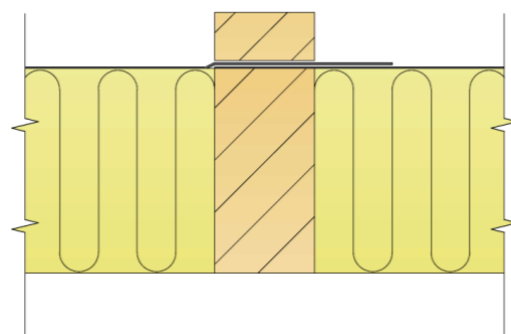
Plateproduktene leveres vanligvis i bredder på 1,2 m, og festes kant i kant på utsiden av stenderne (SINTEF, 2003). Rullproduktene leveres med lengder på opp til 100 m, og kan monteres med færrest mulig skjøter. Dette er en stor fordel med tanke på å oppnå god vindtetting, og vil være spesielt hensiktsmessig dersom det er strenge krav til lufttetthet. I SINTEFs Byggforsklblad 573.121 *Materialer til luft- og damptetting* er det angitt verdier for materialers luftgjennomgang med og uten skjøter. Verdiene viser at for selve materialet uten skjøter har plateproduktene generelt lavere luftgjennomgang enn rullproduktene. Det som er mest relevant for lufttettheten er derimot luftgjennomgangen til det ferdig monterte materialet med et normalt antall skjøter. Disse verdiene viser at rullprodukter totalt sett har generelt lavere luftgjennomgang enn plateprodukter. I praksis er det dermed skjøtene som er avgjørende for lufttettheten i vindsperrsjiktet.

#### 2.1.4 Klemte skjøter

Ifølge Edwardsen og Ramstad (2014) skal skjøter og avslutninger i sperresjiktene normalt klemmes kontinuerlig mellom klemler og stendere. Dette gjelder både for rullprodukter og plateprodukter, men oppbyggingen av skjøten vil være ulik for de to typene. Figur 4 og 5 viser denne oppbyggingen. For rullprodukter klemmes skjøtene med omlegg for å sikre god tetthet (SINTEF, 2020). Plateprodukter monteres kant i kant, og skjøten klemmes med klemler. En annen mulighet er å bruke teip som et alternativ til klemming, forutsatt at teipen har god heft til underlaget og dokumentert varig bestandighet. Teip kan også brukes i tillegg til klemming for å gjøre skjøten mer lufttett.



**Figur 4: Horisontalsnitt av en klemt skjøt med plateprodukt**



**Figur 5: Horisontalsnitt av en klemt skjøt med rullprodukt**

Klemte skjøter består av flere deler, og oppbygningen kan gjøres på mange ulike måter. I vindsperrsjiktet er følgende parametere er relevante for klemte skjøter:

- Vindsperre: Typer og tykkelser
- Festemidler: Typer, dimensjoner og senteravstand
- Lekter: Dimensjoner og materialer
- Stendere: Dimensjoner og materialer
- Bruk av teip

Det finnes relativt få konkrete anbefalinger om utforming av klemte skjøter. Ifølge SINTEF (2008) bør klemler ha tykkelse 11–36 mm for å gi god klem. Lektene festes med spiker eller skruer med en senteravstand på 200–300 mm avhengig av lektas stivhet. Plateskjøter uten klemler gir vanligvis for dårlig lufttetthet. Anbefalingene til ulike produsenter av vindsperreprodukter er i samsvar med SINTEFs anbefalinger, mens enkelte produsenter har ingen anbefalinger knyttet til klemte skjøter eller teipbruk. Generelt gis det flere anbefalinger knyttet til lektenes dimensjoner enn til senteravstanden mellom festemidlene. I kapittel 4.1.1 er det gitt en oversikt over anbefalingene til ulike vindsperreprodusenter.

Klemte skjøter i både vindsperre- og dampsperrsjiktet blir utsatt for variasjoner i fuktighet i den omkringliggende luften. Dette fører til krymping og svelling i trevirket når det henholdsvis avgir og tar opp fukt. Kapittel 2.1.6 inneholder en nærmere beskrivelse av dette. Bevegelsene gjør at det oppstår sprekker i den klemte skjøten, som videre kan føre til større luftlekkasjer. Trevirkets krymping og svelling vil også føre til bevegelser i festemidlene. I den tidligere forskningen presentert i kapittel 2.2 er det gjort flere laboratorieforsøk der dette er undersøkt.

### 2.1.5 Teip

Tetting av skjøter i sperresjikt, overganger og gjennomføringer kan gjøres ved bruk av klebeprodukter som teip og mansjetter. Hensikten er å sikre tetthet både på innsiden og utsiden av bygningskroppen (SINTEF, 2020). Stadig strengere krav til lufttetthet gjør at forbruket av teip i byggebransjen øker (Fufa *et al.*, 2018). Påføring av teip er enklere og raskere enn for eksempel bruk av fugemasse, men teipens holdbarhet er også en viktig faktor. Teipen er skjult inne i bygningskroppen og lite tilgjengelig for vedlikehold, dermed bør den beholde funksjonen i hele byggets levetid.

Teip til bygningsformål finnes i mange ulike materialer, lengder og bredder. Egenskapene til teipen avhenger av hvor den skal brukes, og det finnes teip til både innendørs og utendørs bruk. Hovedforskjellene mellom disse typene er dampåpenhet, temperaturbestandighet og klebeevne til ulike overflater. For eksempel må teip som brukes i vindsperrsjiktet være tilstrekkelig dampåpen, tåle lave temperaturer og ha god heft til materialet som vindsperra består av.

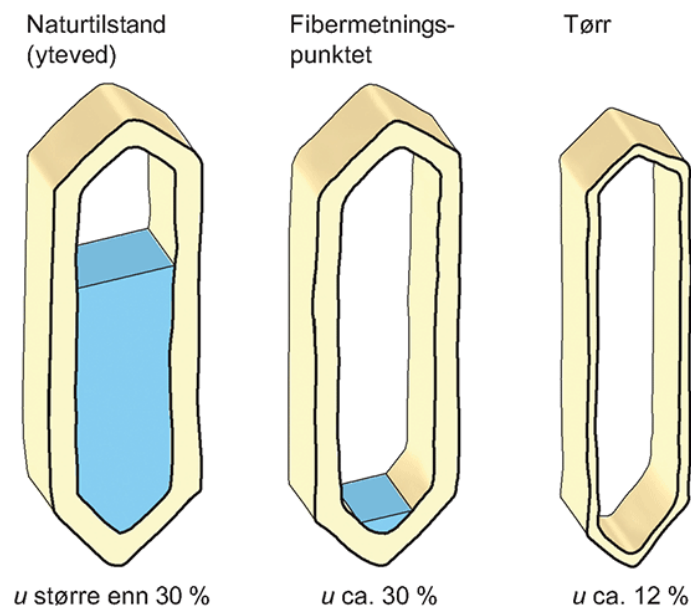
Forskningsprosjektet TightEN ved SINTEF Community har som mål å utvikle pålitelige test- og evalueringmetoder for selvklebende produkter som teip (SINTEF, 2019). Bakgrunnen for prosjektet er at det per dags dato er lite kunnskap om holdbarheten til klebeløsningene, spesielt i et nordisk klima. Teip må ha tilstrekkelig god heft på ulike typer underlag over lang tid for at lufttettheten skal opprettholdes. Derfor er det viktig å forstå hvilke klimatiske forhold teipen utsettes for, hvordan klebingen fungerer, og hvordan funksjonen svekkes over tid. Ifølge Fufa *et al.* (2018) er det mangel på gode testmetoder for teip, og de eksisterende testmetodene som blant annet NS-EN 1296 (Standard Norge, 2001) er for generelle. Ytelsen til teipen avhenger av hvor på bygningskroppen den er brukt, og dermed hvilke klimapåkjenninger den skal tåle. På bakgrunn av dette er det foreslått å skille

mellom teip til utendørs og innendørs bruk i ulike testmetoder, blant annet ved bruk av kunstig aldring der teipen utsettes for fukt- og varmekjøkninger.

Kalamees, Alev og Pärnalaas (2017) har undersøkt luftlekkasjenivåene til åtte ulike overganger i bygningskroppen, med ulike løsninger for tetting av skjøtene, inkludert bruk av teip. Resultatene viste at lekkasjene i de teipede skjøtene var betydelig lavere enn hos skjøtene uten teip. Konklusjonen var at bruk av teip er den mest lovende løsningen med tanke på å sikre god lufttetthet i trehus. Dette krever at det utvikles en felles standard med funksjonskrav til teip som brukes til lufttetting. Det er nødvendig med en større database med ulike kombinasjoner av skjøter, materialer og utførelser for å kunne estimere bygningers lufttetthet i prosjekteringsfasen.

### 2.1.6 Tre og fuktighet

Trevirkets egenskaper avhenger i stor grad av fuktinnholdet (Tronstad, 2002). Tre er et hygroskopisk materiale som tilpasser fuktigheten til lufttemperaturen og den relative fuktigheten (RF). Etter hvert vil trevirket innstille seg på en bestemt trefuktighet som kalles likevektsfuktighet. Likevektsfuktigheten avhenger av den omgivende lufttemperaturen og relative fuktigheten ved det bestemte klimaet, og trefuktigheten vil variere i takt med denne. Middelerdien av variasjonene regnes som den ideelle trefuktigheten, fordi den gir minst volumendringer i trevirket etter montering. Trevirkets fuktinnhold,  $u$ , er forholdet mellom vekten av vannet i trevirket og vekten av trevirket i absolutt tørt tilstand.



**Figur 6: Fuktinnhold i trevirke (SINTEF, 2015)**

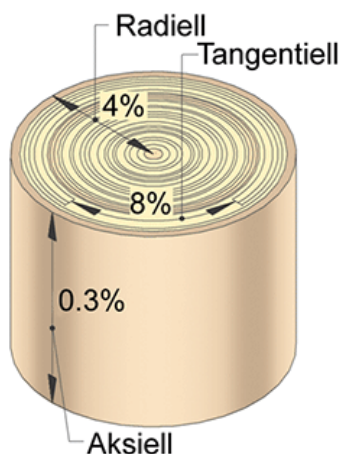
Trevirke er bygd opp av langstrakte celler som hovedsakelig går i treets lengderetning (Edwardsen og Ramstad, 2014). Mellom cellene er det ventiler eller porer som muliggjør væsketransport. Det er to former for vann i trevirke: fritt og bundet vann (SINTEF, 2015). Fritt vann finnes i cellenes hulrom, og bundet vann er i celleveggene. Ved tørking av trevirke fordampes først det frie vannet. Når omtrent alt det frie vannet har fordampet, når trevirket det som kalles fibermetningspunktet som er vist i Figur 6. For gran og furu tilsvarer dette et fuktinnhold på rundt 30 %. Videre uttørking vil føre til at vannet i celleveggene fordampes, og celleveggene og trevirket begynner å krympe. Når alt fritt og bundet vann har fordampet, er trevirket i absolutt tørt tilstand. Endringer i celleveggenes fuktinnhold vil også føre til volumendringer i trevirket ved fuktnivåer som er lavere enn

fibermetningspunktet. Trevirket sveller når det blir fuktig, og krymper når det tørker. Ved fuktnivåer over fibermetningspunktet er celleveggene mettet med vann, og celleveggenes volum vil være konstante.

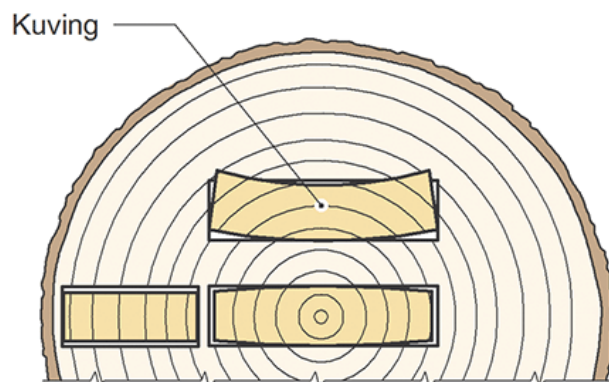
Fuktbevegelsene varierer i de ulike retningene i trevirket (SINTEF, 2015). De største bevegelsene oppstår tangentielt med årringene, og på tvers av årringene er de omtrent halvparten så store. I lengderetningen, den aksielle retningen, er fuktbevegelsene vesentlig mindre. Edvardsen og Ramstad (2014) angir følgende gjennomsnittsverdier for krymping per prosent reduksjon i fuktigheten:

- Tangentielt: 0,25 %
- Radielt: 0,15 %
- Aksielt: 0,01 %

Maksimal krymping fra vått trevirke med 30 % fuktinnhold til tørt trevirke med 0 % fuktinnhold vil dermed gi verdier som gitt i Figur 7. Forskjellene i krymping i tangentiell og radiell retning fører til deformasjoner i trevirket, som for eksempel kuling (Edvardsen og Ramstad, 2014). Trevirkets tykkelse og bredde er også avgjørende for hvor stor kuling som kan oppstå. Små tykkelser gir større kuling enn store tykkelser, og bredt trevirke gir større kuling enn smalt trevirke. Det er til en viss grad mulig å unngå kuling ved å skjære ut trelast med «stående» årringer som vist i Figur 8.



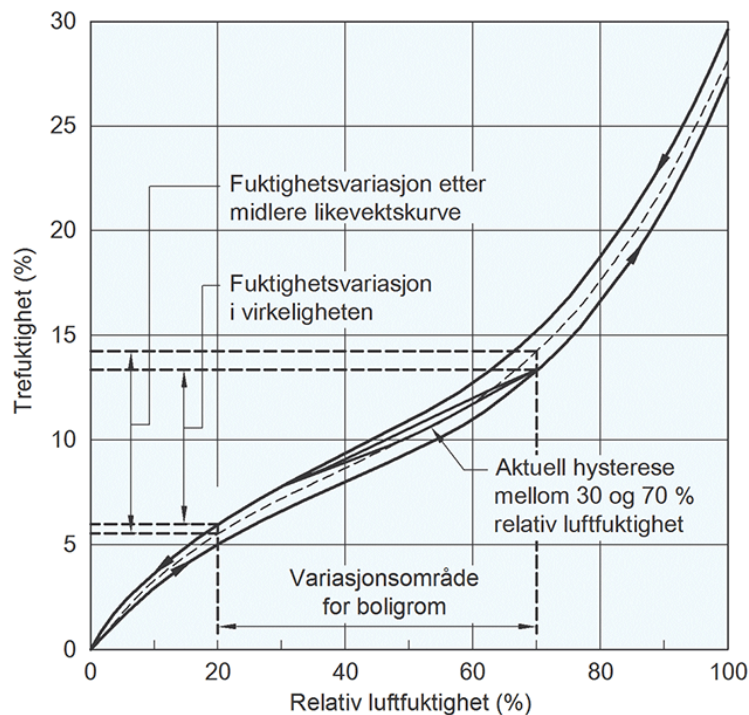
**Figur 7: Krymperetninger i trevirke (SINTEF, 2015)**



**Figur 8: Deformasjoner på grunn av ulik krymping (SINTEF, 2015)**

Det finnes flere metoder for måling av fuktighet i trevirke. Den mest nøyaktige er tørke/veie-metoden, som blir brukt som referanse i sammenligning med andre måle-metoder (Tronstad, 2002). Tørke/veie-metoden går ut på å først veie trevirket i rå tilstand, før det tørkes og veies på nytt. Vektdifferansen er dermed vanninnholdet, og fuktinnholdet finnes ved å finne prosentandelen dette utgjør av trevirkets tørrvekt. Tørkingen av trevirket gjøres i et varmeskap med temperatur  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tørrvekten antas å være nådd når vekten ikke endres med mer enn 0,1 % ved to målinger med to timers mellomrom. Selv om denne metoden er den mest nøyaktige, krever den mye tid og arbeid. En raskere og enklere måte å måle trevirkets fuktighet på er elektrisk motstandsmåling. Denne metoden utnytter at trevirkets elektriske motstand påvirkes av fuktinnholdet. Sammenhengen mellom motstand og fuktinnhold varierer med treslag og temperatur, og derfor må måle-instrumentene kalibreres etter dette. Slike målinger gjøres ved at to elektroder slås inn i trevirket, og fuktigheten registreres lokalt mellom elektrodospissene. Elektrodene kobles til en måler der fuktinnholdet leses av.

Likevektsfuktigheten er som nevnt tidligere det fuktnivået som trevirket innstiller seg på ved en gitt lufttemperatur og relativ fuktighet. Dette skjer ved at trevirket tar opp eller avgir fukt avhengig av om fuktinnholdet er henholdsvis lavere eller høyere enn likevektsfuktigheten (Thue, 2016). Trevirkets fuktinnhold vil være noe høyere når det avgir fukt enn når det tar opp fukt ved samme relative fuktighet. Dette kalles hysteresese, og et eksempel på hysteresekurver for furu er vist i Figur 9. Den stiplede linja representerer likevektsfuktigheten. Fuktinnholdet er dermed avhengig av både den opprinnelige fukttilstanden og hvilken retning fuktprosessen går. I beregning av fuktvariasjoner er det vanlig å se bort fra dette og i stedet bruke middelkurven av absorpsjon og desorpsjon.



**Figur 9: Hysteresekurver for furu (SINTEF, 2015)**

Det er store variasjoner i den relative fuktigheten i uteluften (Tronstad, 2002). I tillegg til geografiske variasjoner kan det være store variasjoner både gjennom året og gjennom døgnet. Kystklima har mer stabil relativ fuktighet enn innlandsklima der det kan være store forskjeller mellom sommer- og vintermånedene. Den relative fuktigheten er som regel høyere om vinteren enn om sommeren. I løpet av døgnet er det typisk høy relativ fuktighet tidlig på morgenen og lav relativ fuktighet på ettermiddagen. Variasjonene i relativ fuktighet vil også sørge for variasjoner i trevirkets fuktnivå. Trevirkets tykkelse avgjør hvor mye trefuktigheten vil tilpasse seg til den relative fuktigheten. Tynne lekter vil tilpasse seg relativt raskt, og følger dermed likevektsfuktigheten gjennom døgnet i stor grad. I tykkere trevirke vil kun trefuktigheten i overflaten påvirkes slik at det kun oppstår små døgnvariasjoner i tverrsnittets fuktnivå.

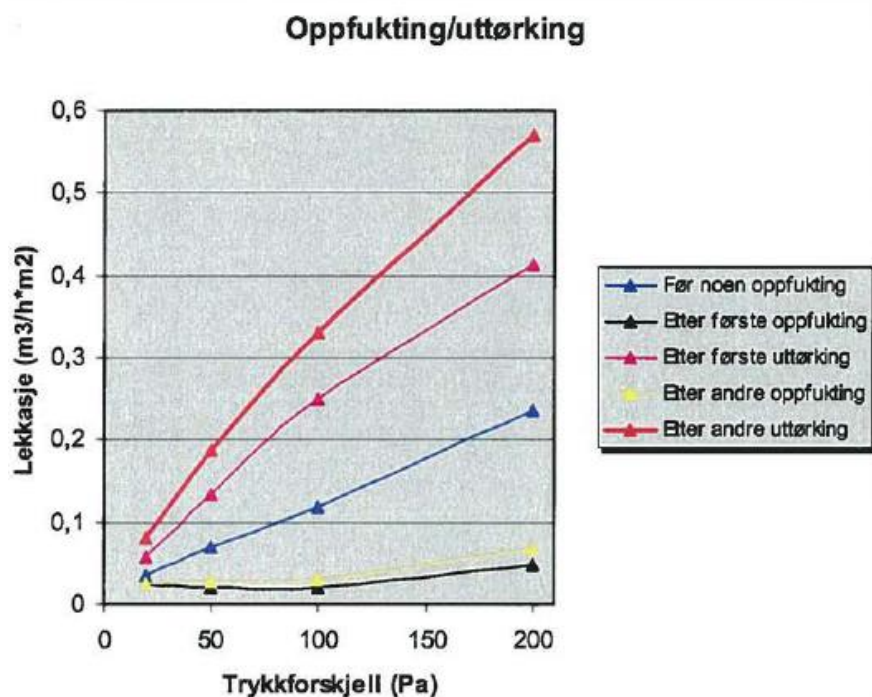
Som nevnt tidligere har fuktigheten stor innvirkning på trevirkets egenskaper, og stort sett er trevirke med lavt fuktinnhold det mest gunstige. Selv om trevirket har lavt fuktinnhold ved levering, vil fuktinnholdet i en bygning vanligvis stige i byggeperioden og synke igjen når bygget varmes opp og tas i bruk (Edvardsen og Ramstad, 2014). Derfor er det viktig at trevirket både leveres og holdes tørt. Tørt trevirke har bedre egenskaper enn rått trevirke. For eksempel vil bøyestyrken og trykkfastheten mer enn fordobles ved å redusere fuktinnholdet fra 30 % til 10 % (Tronstad, 2002). Varmeledningsevnen til tørt trevirke er rundt 35 % lavere enn rått trevirke, og i tillegg er det mindre utsatt for sopp og råte.

## 2.2 Tidligere forskning

### 2.2.1 Sagen (2003)

Lufttetthet i vindsperrsjiktet ble undersøkt i Sagens prosjektoppgave (Sagen, 2003). Det ble gjennomført to laboratorieforsøk der det ble gjort målinger av luftlekkasjer gjennom prøvevegger. Prøveveggene bestod av vindsperrer med vertikale skjøter med 600 mm mellomrom, og klemler festet utenpå skjøtene. Det første forsøket omhandlet hvordan lufttettheten i vindsperra påvirkes av oppfukting og uttørking. I det andre forsøket ble det undersøkt hvilken innvirkning ulike metoder for festing av klemler har for lufttettheten.

I det første forsøket ble en prøvevegg med et kartongmateriale som vindsperre utsatt for gjentatte oppfuktinger og uttørking, med målinger av luftlekkasjer imellom. Oppfuktingen ble gjort ved bruk av et slagregnskap, der hver oppfukting varte i 16 timer. Etter en time avrenning ble det gjort luftlekkasjemålinger før vegg ble tørket og det ble gjort nye målinger. Det ble gjort to oppfuktinger og tre uttørkinger i forsøket. Den første uttørkingen varte i seks døgn, mens den andre og tredje varte i tre døgn.

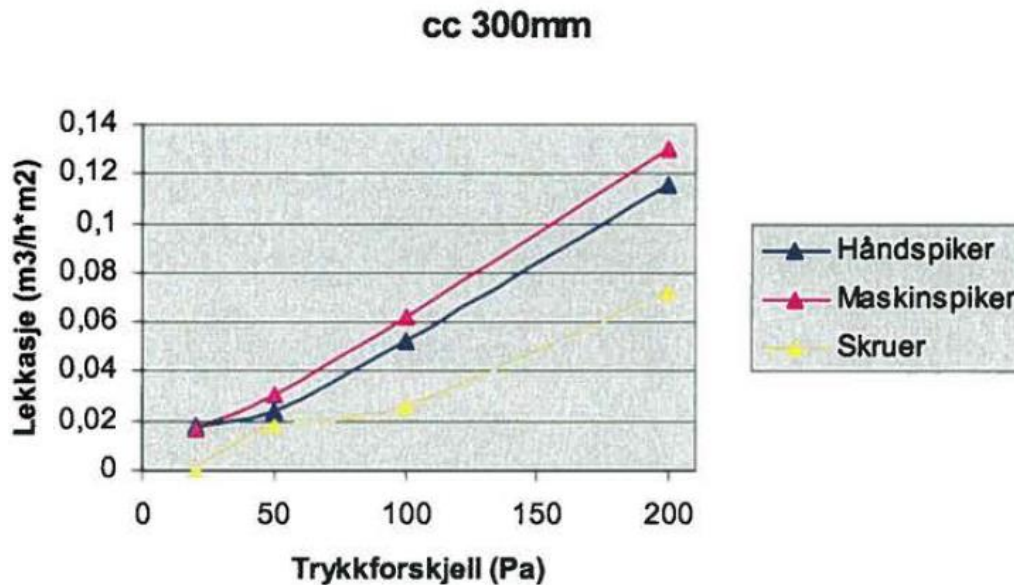


**Figur 10: Lekkasjer etter oppfukting og uttørking (Sagen, 2003)**

Resultatene fra forsøket viste at fuktinnholdet har en stor betydning for lufttettheten. Etter oppfukting minket luftlekkasjene, før de økte igjen etter uttørking. Resultatene viste også at lekkasjene steg for hver fuktsyklus. Dette er vist i Figur 10. Det ble konkludert med at svelling og krymping i klemler er årsaken til variasjonen i lufttetthet, i tillegg til at gjentatte fuktsykluser fører til at vindsperra blir stadig mindre lufttett.

En ny type prøvevegg ble bygd i det andre forsøket, med en annen type vindsperre enn i det første forsøket. Tre ulike festemidler og senteravstander ble brukt for å sammenligne de målte luftlekkasjene, og finne den mest lufttette metoden for festing av klemler. Maskinspiker, håndspiker og skruer ble brukt i forsøket, og det ble variert mellom senteravstandene 150, 300 og 600 mm.





**Figur 11: Lekkasjer fordelt på festemidler med senteravstand 300 mm (Sagen, 2003)**

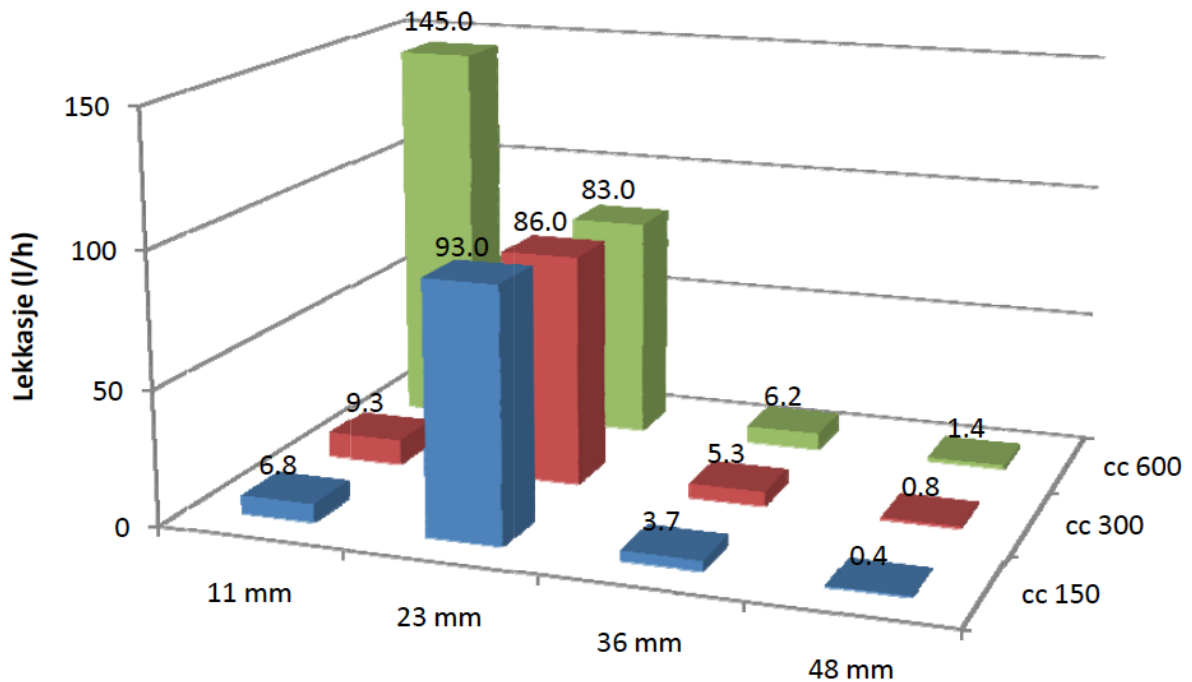
Resultatene viste at skruer ga mindre luftlekkasjer enn både håndspiker og maskinspiker. Figur 11 viser en sammenligning av lekkasjene til de ulike festemidlene ved bruk av 300 mm senteravstand. Maskinspiker ga de største luftlekkasjene ved bruk av 150 og 300 mm senteravstand, men for 600 mm senteravstand ga håndspiker de klart største lekkasjene. Av de ulike senteravstandene som ble testet var det 150 mm som ga minst lekkasjer, men differansen mellom 150 og 300 mm var relativt liten. Sagen konkluderte med at 150 mm senteravstand er uaktuelt å bruke i praksis, og at lekkasjetallene i reelle bygninger trolig vil ligge mellom verdiene for 300 og 600 mm senteravstand.

### 2.2.2 Bergby (2011)

I Bergbys prosjektoppgave (Bergby, 2011a) og masteroppgave (Bergby, 2011b) ble det undersøkt hvilke faktorer som påvirker luftlekkasjen i klemte skjøter og hva som kan gjøres for å redusere luftlekkasjene. Arbeidet bestod av flere laboratorieforsøk der det ble variert mellom ulike parametere i klemte omleggsskjøter av dampsperre.

I prosjektoppgaven ble det gjort luftlekkasjemålinger av dampsperrerskjøter der det ble variert mellom parameterne lektetykkelse og senteravstand mellom festemidler. I forsøket ble det brukt lekter med tykkelse 11, 23, 36 og 48 mm. Senteravstandene varierte mellom 150, 300 og 600 mm, og skruer ble brukt som festemiddel. Prøvene ble testet rett etter montering uten uttørking av byggfukt.

Resultatene fra prosjektoppgaven viste at lav senteravstand og stor lektetykkelse gir de laveste luftlekkasjene og den mest lufttette skjøten. Figur 12 viser resultatene fra forsøket. De høye lekkasjene som er målt for prøvene med lektetykkelse 23 mm skyldes at prøvene ble utsatt for tørking i ett døgn mellom montering og måling.

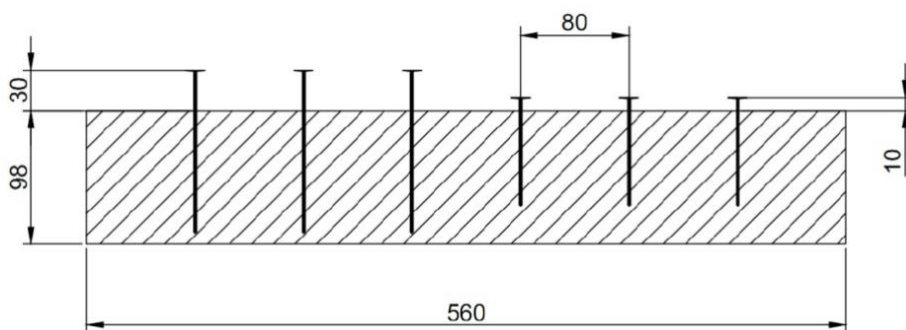


**Figur 12: Resultater fra forsøket i prosjektoppgaven (Bergby, 2011)**

I masteroppgaven ble det gjennomført to laboratorieforsøk. Det første forsøket bestod av luftlekkasjemålinger tilsvarende forsøket i prosjektoppgaven, men her ble også ulike typer festemiddel brukt som parameter. Festemidlene som ble brukt var spiker og skruer. Lektetykkelsene ble variert mellom 18, 30 og 48 mm, og senteravstanden var fortsatt 150, 300 og 600 mm. Det ble til sammen gjort luftlekkasjemålinger av 63 prøver, og denne gangen ble det gjort målinger både før og etter uttørking av prøvene.

Resultatene fra det første forsøket viste en tydelig økning i luftlekkasjer etter uttørking. Lekkasjene ved bruk av skruer var vesentlig lavere enn der spiker ble benyttet. Senteravstand 600 mm ga høyere lekkasjer enn 150 og 300 mm, og det var ingen tydelige forskjeller mellom lekkasjene for de to minste senteravstandene. I dette forsøket var det høyere lekkasjer for lekter med tykkelse 48 mm enn for de mindre dimensjonene, noe som strider mot resultatene fra prosjektoppgaven.

Det andre laboratorieforsøket bestod av undersøkelser av festemidlers bevegelser i trevirket under uttørking. To ulike kombinasjoner av festemidler ble testet, og det ble variert mellom ulike utstikk fra trevirket. Totalt ble det testet 13 prøver med seks festemidler i hver prøve. Figur 13 viser et eksempel på et prøveoppsett.



**Figur 13: Prøveoppsett for test av festemidlers bevegelse (Bergby, 2011)**

Resultatene fra det andre forsøket viste at potensialet for bevegelser er størst der senter av festemidlenes gjengede parti ligger dypt i stenderen. Det ble konkludert med at hovedfaktorene som påvirker mulig oppsprekking og luftlekkasjer i skjøten er:

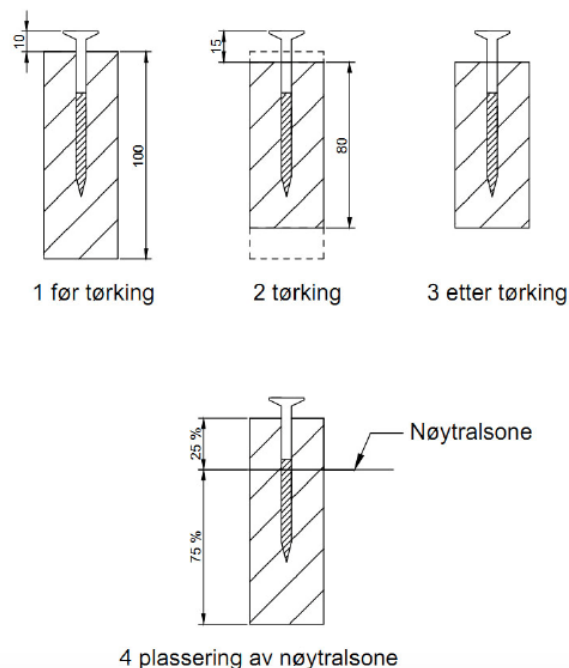
- Avstanden mellom toppen av skruen og senter av skruens gjengede parti. Kortere skruer vil bevege seg mindre og dermed gi lavere lekkasjer enn lengre skruer. Bruk av kortere skruer forutsetter også at det benyttes tynnere klemlekter.
- Differansen mellom høyeste og laveste fuktnivå i materialene. Større differanse vil gi øke potensialet for oppsprekking mellom stender og lekt, dermed er en lavere differanse gunstig. Dette kan oppnås ved delvis uttørking av materialer før montering.

Det ble ikke sett på minimumsverdier for lektetykkelse og skruedimensjon i oppgaven. Bergby konkluderte med at lektetykkelse 11 mm, senteravstand 150 mm og skruetype 4x50 mm trolig vil være over minimumsverdiene, og kan dermed brukes som en generell anbefaling.

Begrepet «nøytralzone» ble definert i oppgaven, og det ble brukt for å illustrere fuktbevegelser rundt festemidler. Nøytralsonen er et snitt som ikke vil bevege seg ved uttørking, og som resten av tverrsnittet dermed vil tørke innover mot. Følgende formel ble brukt til å definere nøytralsonen:

$$\text{Nøytralzone} = \frac{\Delta \text{innstikk i stender}}{\Delta \text{stenderhøyde}}$$

Stenderhøyde og innstikk i stender måles før og etter tørking, og deretter finnes nøytralsonen. Prosedyren for å finne nøytralsonen er vist gjennom et eksempel i Figur 14. En nøytralzone som ligger nært toppen av stenderen vil føre til mindre oppsprekking mellom bygningsdelene som skrues sammen. Bergby fant ut at nøytralsonen for skruer ligger omtrent i senter av skruens gjengede parti. For spikere ble det antatt at nøytralsonen ligger i senter av spikerens innstikk i stenderen.



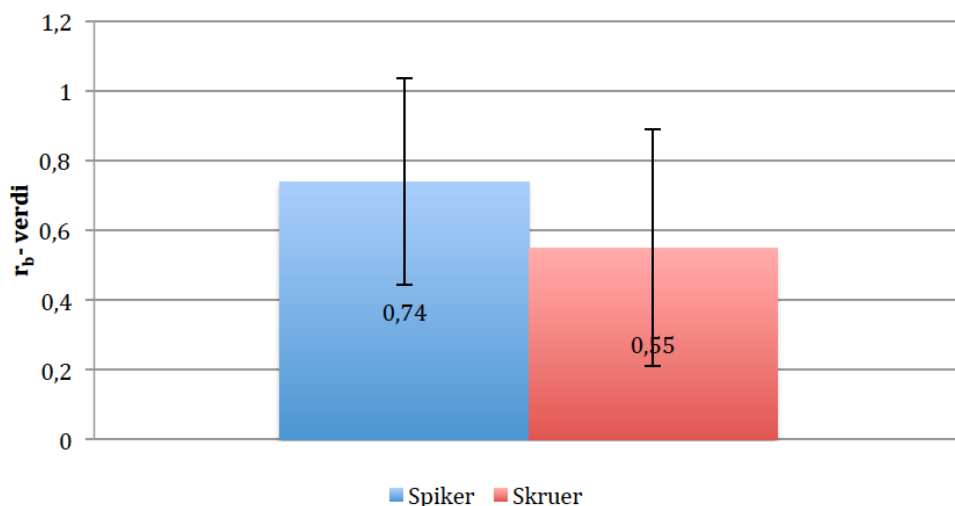
**Figur 14: Nøytralzone (Bergby, 2011)**

### 2.2.3 Selmer (2013)

I Selmers masteroppgave (Selmer, 2013) ble arbeidet til Bergby videreført. Det ble gjennomført to laboratorieforsøk der festemidler i forbindelse med klemming av dampspærre ble undersøkt. Det ble lagt vekt på å undersøke maskinspiker med bakgrunn i at det hovedsakelig er maskinspiker som brukes til dette formålet i praksis. Skruer er kun tatt med som en referanse.

Det første laboratorieforsøket bestod av målinger av festemidlers bevegelse i trevirket under gjentatte fuktsykluser. Spikre og skruer ble festet i stenderprøver, og etter hver oppfukning og uttørking ble det gjort målinger av stenderprøvens høyde og vekt, samt festemidlenes innstikk. Totalt ble 15 stenderprøver med tre ulike prøveoppsett testet.

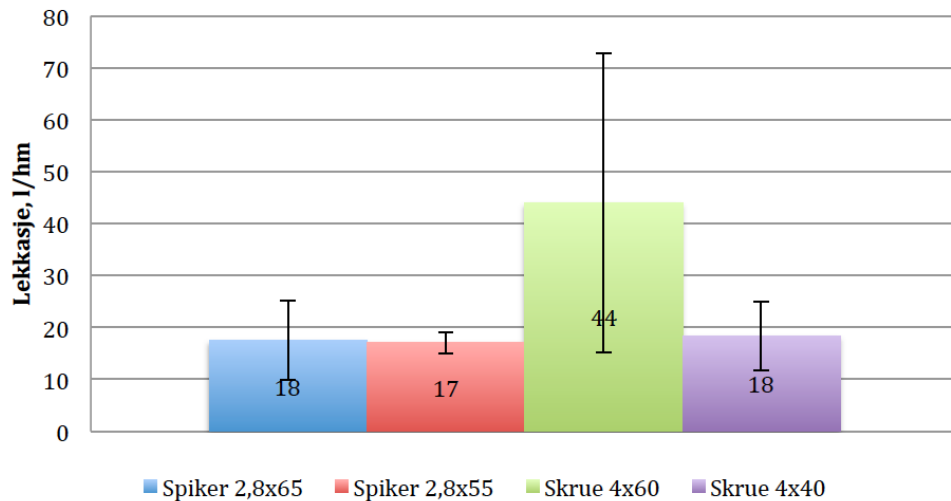
Resultatene fra dette forsøket ble brukt til å finne  $r_b$ -verdier for alle prøvene.  $r_b$  er definert som den relative avstanden fra festemiddelets fastpunkt i stenderen til stenderens klemflate. Denne verdien beskriver friksjonen mellom spikeren og trevirket. Lave  $r_b$ -verdier betyr liten differanse mellom lekt og stender, noe som er gunstig med tanke på å unngå sprekkdannelser og luftlekkasjer. Utledningen som brukes for å finne endringen i festemidlers innstikk er en videreføring og mer detaljert utledning enn det Bergby skrev om nøytralzone. Den innebærer å bruke en kjent  $r_b$ -verdi for et gitt festemiddel til å forutse festemiddelets bevegelse. Figur 15 viser  $r_b$ -verdiene som ble funnet i forsøket.



**Figur 15:  $r_b$  -verdier for spiker og skruer (Selmer, 2013)**

I det andre laboratorieforsøket ble luftlekkasjen i klemte omleggsskjøter av dampspærre testet. Luftlekkasjen ble målt to ganger, én gang etter montering og én gang etter uttørking. Det ble brukt fire ulike festemidler i forsøket, derav to skruer og to spikre. Lekte-tykkelsen og senteravstanden var konstant. Det ble laget fem identiske prøver med hvert festemiddel slik at det totalt ble 20 prøver.

Resultatene viste økte lekkasjer i samtlige prøver etter uttørking, noe som stemmer overens med resultatene til Bergby. Videre viste resultatene lavere lekkasjer for prøver med spiker enn for prøver med skruer, både før og etter uttørking. Dette strider imot Bergbys resultater der skruerprøver ble målt til å være mer lufttette enn spikerprøver. Figur 16 viser resultatene fra luftlekkasjemålingene etter uttørking.



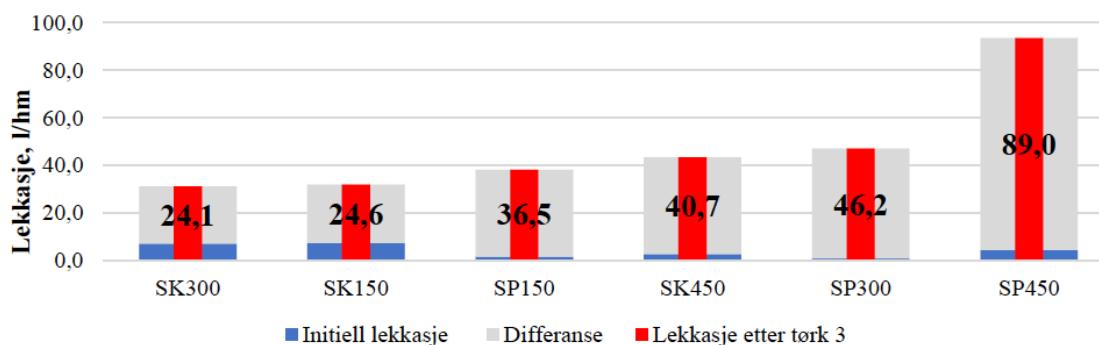
**Figur 16: Luftlekkasjer etter uttørking (Selmer, 2013)**

#### 2.2.4 Norvik (2018)

Klemte omleggsskjøter i dampsperresjiktet ble undersøkt videre i Norviks masteroppgave (Norvik, 2018). I motsetning til tidligere oppgaver der det kun ble gjort én uttørking, så Norvik på hvordan gjentatte fuktsykluser påvirket luftlekkasjen i klemte skjøter. Arbeidet bestod av et laboratorieforsøk med syv luftlekkasjemålinger etter gjentakende uttørking og oppfukning av prøvene. I tillegg ble effekten av å bruke teip i omleggsskjøtene undersøkt. Videre ble resultatene fra forsøket brukt til å beregne lekkasjetallene til to eksempelbygninger: en enebolig og et kontorbygg. Arbeidet gjort av Norvik ble senere brukt i to forskningsartikler (Gullbrekken *et al.*, 2019; Geving, Norvik og Gullbrekken, 2019).

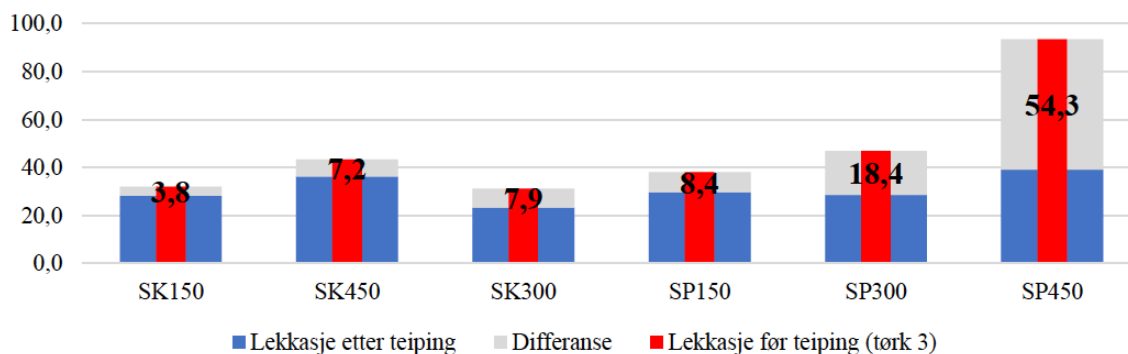
I laboratorieforsøket ble 18 forsøksprøver med ulike parametere for festemidler og senteravstand trykktestet. Festemidlene som ble brukt var spiker og skruer, og senteravstandene ble variert mellom 150, 300 og 450 mm. Etter siste uttørking og trykktesting ble omleggsskjøtene teipet og trykktestet på nytt. For å simulere fuktsykluser som dampsperresjiktet utsettes for, ble det laget en damptett boks som kunne brukes som en kombinert test- og oppfuktingsboks.

Resultatene viste at den første fuktsyklusen ga en tydelig lekkasjeøkning for alle forsøksprøvene. Videre økte lekkasjene for hver syklus, og mest for prøvene med senteravstand 450 mm. For senteravstand 300 mm var lekkasjeøkningen mindre, og lekkasjene for senteravstand 150 mm var relativt konstant gjennom delsyklusene. Spikerprøvene hadde generelt større lekkasjeøkning enn skrueprøvene før og etter fuktsyklusene, som vist i Figur 17. Norvik konkluderte med at en reduksjon av senteravstand fra 300 mm til 150 mm ved bruk av skruer ikke gir noen gevinst med tanke på lavere luftlekkasjer. Det ble også anslått at skruer med en senteravstand på rundt 400 mm vil gi samme luftlekkasjer som spiker med omtrent 190 mm senteravstand.



**Figur 17: Differanse mellom luftlekkasjer før og etter fuktskyklusene (Norvik, 2018)**

Teiping av skjøtene ga større reduksjon i luftlekkasje for spikerprøver enn for skrueprøver. Reduksjonen var også større for prøvene med stor senteravstand. Spikerprøven med senteravstand 450 mm hadde størst luftlekkasje også etter teiping, men samtidig var reduksjonen i luftlekkasje størst her. Antall perforeringer henger direkte sammen med senteravstand, som viste seg å spille en stor rolle for lufttettheten til teipede skjøter. Figur 18 viser resultatene fra lekkasjemålingene før og etter teiping.



**Figur 18: Differanse mellom luftlekkasjer før og etter teiping (Norvik, 2018)**

Det ble gjort beregninger av lekkasjetallet for to eksempelbygninger for å vise den praktiske betydningen av lekkasjetallene i klemte dampsperreskjøter. Bygningene som er brukt i beregningene er en enebolig og et kontorbygg. Både eneboligen og kontorbygget hadde lave lekkasjeandeler vurdert opp mot minstekrav og passivhuskrav for luftlekkasjer. Ved å beregne lekkasjetallet til eneboligen ut ifra resultatene til prøven med størst luftlekkasjer utgjør lekkasjene gjennom skjøtene 14,9 % av passivhuskravet på  $0,6 \text{ h}^{-1}$ . For kontorbygget utgjør lekkasjene gjennom skjøtene 1,7 % av passivhuskravet. Forskjellene mellom luftlekkasjeandelen i eneboligen og kontorbygget skyldes volumforskjellene, nærmere bestemt forskjellene i klimaskallets flate per enhet oppvarmet volum.

### 2.2.5 Engen (2020)

Lufttettheten i klemte skjøter ble undersøkt videre både i Engens prosjektoppgave (Engen, 2019) og masteroppgave (Engen, 2020). Tidligere masteroppgaver innenfor dette temaet har hovedsakelig omhandlet dampsperrsjiktet, men i denne oppgaven ble det fokusert på vindsperresjiktet. Arbeidet bestod av en litteraturstudie og en parameterstudie, samt fukt-simuleringer og planlegging av et laboratorieforsøk.

Parameterstudien ble utført for å finne ut hvilke parametere i klemte skjøter som var mest hensiktsmessige å studere nærmere i laboratorieforsøket. Det ble undersøkt hvilke anbefalinger som gis av SINTEF og ulike vindsperreprodusenter. For å finne ut hvilke parametere som benyttes i praksis, ble det også gjennomført et besøk på byggeplassen til et kontorprosjekt i Trondheim. Med bakgrunn i parameterstudien, valgte Engen ut hvilke parametere som var aktuelle å studere nærmere i laboratorieforsøket. Parameterne som ble valgt var ulike senteravstander mellom festemidler og bruk av teip. Senteravstandene det skulle varieres mellom var 150, 300 og 450 mm.

Klemte skjøter i vindsperreskjiktet utsettes for fuktvariasjoner i løpet av et år. Fukt-simuleringer ble gjennomført for å finne ut hvilke fuktnivåer det er realistisk at stenderen og lekten i en vindsperreskjøt utsettes for. Dette ble gjort ved bruk av simulering-programmet WUFI-2D der det ble bygd opp en ytterveggkonstruksjon som simuleringene ble utført på. Flere simuleringer med ulike parametere ble utført for å skaffe et godt grunnlag for valg av fuktintervall i laboratorieforsøket. Følgende parametere ble endret på i de ulike simuleringene:

- Veggens orientering
- Farge på kledningen
- Mengden slagregn som trenger inn gjennom kledningen
- Klimasted

Simuleringene ga ulike minimums- og maksimumsverdier for stenderens og lektens fuktinnhold som er basert på variasjoner i fuktighet og temperatur i løpet av ett år. For hver simulering ble det beregnet et gjennomsnitt av stenderens og lektens fuktinnhold. Intervallet mellom minimums- og maksimumsverdien for fuktinnhold som ble valgt for laboratorieforsøket skulle gjenspeile resultatene fra simuleringene. Det gjennomsnittlige fuktintervallet i simuleringene var 4,88 vekt-%, men for å få mer tydelige resultater ble det valgt et fuktintervall på 6 vekt-%. Variasjonen i fuktinnhold ble satt til å være mellom 9 og 15 vekt-%. Selv om verdiene for fuktinnhold er noe høyere enn resultatene fra simuleringene, ble de valgt på bakgrunn av at målingene blir mer usikre jo lavere fuktinnholdet er.

Engen planla et laboratorieforsøk der lufttettheten til klemte vindsperreskjøter skulle testes etter gjentatte fuktskykluser. På grunn av nedstengingen som følge av koronapandemien, var det ikke tid til å gjennomføre forsøket da laboratoriene åpnet igjen. Dette førte til at det ikke ble kommet frem til noen resultater, men Engen kom fram til følgende hypoteser for forsøket:

- Det er rimelig å anta at sammenhengen mellom lekkasjene etter oppfukning og uttørking er tilnærmet lineær. Ved gjennomføring av enda flere sykluser kan det være sannsynlig at lekkasjene kommer nærmere en eksponentiell utvikling.
- Prøvene med teip er mer lufttette enn prøvene uten teip. Ved lave senteravstander er det derimot ikke sikkert at forskjellene er så store på grunn av mange perforeringer i teipen. Derfor er det sannsynlig at prøver med teip og større senteravstand er mer lufttette.
- Et mulig resultat fra forsøket er at prøvene uten teip og senteravstand 150 mm er omtrent like lufttette som prøvene med teip og senteravstand 450 mm. Dette vil bety at bruk av teip gir muligheter for å øke senteravstanden og samtidig ha god lufttetthet. Dersom det ikke brukes teip, vil det være mulig å oppnå like god lufttetthet ved å redusere senteravstanden.





## 3 Metode

Dette kapitlet handler om hvilke metoder som er brukt for å finne svar på forskningsspørsmålene som er definert. Oppgaven er todelt, og den første delen bestod av en litteraturstudie der hensikten var å finne informasjon som var relevant for oppgavens tema. Den andre delen var et laboratorieforsøk som bestod av luftlekkasjemålinger av klemte vindspærreskjøter.

### 3.1 Litteraturstudie

Det ble gjennomført en litteraturstudie for å finne relevant informasjon for oppgavens tema og forskningsspørsmål. En stor del av litteraturstudien har gått ut på å finne aktuelle henvisninger i Byggforskserien, samt annen relevant litteratur innen bygningsteknikk og bygningsfysikk. Tidligere forskning innenfor dette temaet er hovedsakelig funnet gjennom søkemotoren Oria og omfatter prosjektoppgaver og masteroppgaver, i tillegg til noen forskningsartikler som nevnes i kapittel 2.1. Det ble også gjennomført en parameterstudie som et grunnlag for laboratorieforsøket. Parameterstudien gikk ut på å undersøke hvilke anbefalinger SINTEF og ulike vindspærreprodusenter gir for utformingen av klemte skjøter. Dette ble undersøkt ved å finne monteringsanvisninger og generelle anbefalinger på produsentenes nettsider i tillegg til anbefalinger i Byggforskserien. I kapittel 4.1.1 blir resultatene fra parameterstudien presentert.

### 3.2 Laboratorieforsøk

Opgavens andre del bestod av et laboratorieforsøk. Hensikten med forsøket var å måle luftlekkasjer i klemte skjøter av vindspærreplater, og undersøke hvordan luftlekkasjene endret seg når skjøtene ble utsatt for fuktforandringer. I tillegg ble det undersøkt hvilken innvirkning festemidlers senteravstand og bruk av teip hadde for luftlekkasjene. Laboratorieforsøket ble gjennomført i laboratoriene til SINTEF Community i Høgskoleringen 7B. Totalt tok det fire måneder å gjennomføre forsøket, fra kapping av prøvedeler til demontering av prøver. Målingene av luftlekkasjer ble gjort ved bruk av SINTEFs luftmålingsrigg, og til uttørring og oppfukning av prøver ble det benyttet varmeskap. Kapittel 4 inneholder en detaljert beskrivelse av forsøkets oppsett, utstyr og prosedyre.



## 4 Laboratorieforsøk

Dette kapitlet omhandler laboratorieforsøket som ble gjennomført i forbindelse med masteroppgaven. Hensikten med forsøket var å undersøke luftlekkasjen i klemte skjøter i vindspærresjiktet. Det ble undersøkt hvordan luftlekkasjen påvirkes av festemidlenes senteravstand og bruk av teip, samt hvordan gjentatte fuktsykluser påvirker luftlekkasjeutviklingen. Grunnlaget for valget av parametere i forsøket er en parameterstudie som blir beskrevet i dette kapitlet. I tillegg er utstyret som ble brukt i forsøket og selve forsøksprosedyren beskrevet.

### 4.1 Parametere

#### 4.1.1 Parameterstudie

Det ble gjennomført en parameterstudie for å undersøke de aktuelle parametere i klemte vindspærreskjøter. Studien er basert på parameterstudien som ble gjennomført av Engen (2020), og gikk ut på å undersøke hvilke anbefalinger som gis for klemte skjøter av SINTEF og ulike vindspærreprodusenter. Anbefalingene ble brukt som grunnlag for forsøksoppsettet i laboratoriet. I tillegg er det sett på tidligere forskning innenfor dette temaet, blant annet for å sørge for at det som undersøkes i laboratorieforsøket ikke er undersøkt tidligere.

SINTEF (2008) anbefaler som nevnt tidligere at klemlekter har tykkelse 11–36 mm for å gi god klem. Spiker eller skruer med senteravstand 200–300 mm brukes for å feste lektene. Plateskjøter uten klemlekt gir vanligvis for dårlig lufttetthet. I en nyere anvisning fra SINTEF (2020) gis det ingen konkrete krav til lektedimensjoner eller festemidlers senteravstand. Tabell 1 inneholder anbefalinger fra ulike vindspærreprodusenter. Enkelte produsenter har konkrete anbefalinger til blant annet lektedimensjoner og festemidlers senteravstand, mens andre har ingen anbefalinger. Noen av produsentene anbefaler også bruk av teip for å tette skjøtene. Generelt stemmer produsentenes anbefalinger overens med anbefalingene fra SINTEF.

Tidligere forskning som omhandler klemte skjøter handler i all hovedsak om dampspærresjiktet, og bare Sagen (2003) og Engen (2020) har undersøkt vindspærresjiktet. Det er variasjon i hvilke parametere som er inkludert i forskningen, og de to parametere som er undersøkt flest ganger er festemidler og senteravstand. Bergby (2011) er den eneste som har brukt ulike lektedimensjoner i forsøkene, og kun Bergby og Selmer (2013) har brukt festemidler med ulike dimensjoner. Fuktsyklusers påvirkning er undersøkt i deler av den tidligere forskningen, mens i andre deler er det kun gjort én uttørking. Norvik (2018) og Engen (2020) er de eneste som har sett på bruk av teip. På grunn av at laboratorieforsøket til Engen ikke kunne gjennomføres, er det ingen tidligere forsøk der teipen også blir utsatt for fuktsykluser.

**Tabell 1: Anbefalinger fra ulike produsenter**

Produsent	Type vindsperre	Anbefaling til klemte skjøter og bruk av teip
BMI Group	BMI Windbreak, vindsperrerull av polypropylen	Klemlister med anbefalt tykkelse 23 mm monteres utenpå hver stender. Universaltape kan brukes til blant annet forsegling av omlegg. (BMI, 2020)
Gyproc	Gyproc GUB 9 Bris, vindsperreplate av gips med overflate av kartong	Plateskjøtene kan teipes eller klemmes med 23x48 mm klemlister avhengig av ønsket lufttetthet for konstruksjonen. (Gyproc, 2016)
Hunton	Hunton Vindtett, vindsperreplate av asfaltimpregnert trefiber	Anbefaler å bruke minimum 23x36 mm lektre og minimum 20 mm utlekting. Dersom det benyttes stående ytterkledning kan 11x36 mm lektre brukes, gitt at det monteres horisontale lektre utenpå. Anbefaler å bruke Huntons teip- og primerløsning for å tette plateskjøtene. (Hunton, 2018)
Isola	Isola Soft Xtra, vindsperrerull av polypropylen	Vindsperrere monteres med 50 mm klemte omlegg i vertikale skjøter og 100 mm i horisontale skjøter. Lektene festes med maksimalt 150 mm stifteavstand. Dersom det er ekstra strenge krav til tetthet, kan omleggene i tillegg teipes. (Isola, 2016)
Norgips	Norgips GU-X, vindsperreplate av gips med overflate av kartong	Anbefaler å bruke profiler eller skjøtebånd fra Norgips i horisontale og vertikale skjøter. Alle skjøter med skjøtebånd skal teipes med minimum 15 mm og maksimalt 25 mm overlapp. (Norgips, 2020)
SIGA	SIGA Majvest, vindsperrerull av polypropylen og polyolefin	Ingen anbefalinger knyttet til skjøten eller bruk av teip. (SIGA, 2020)

#### 4.1.2 Parametere i forsøket

Basert på resultatene fra parameterstudien, ble det valgt ut et sett med parametere som er undersøkt i forsøket. Parameterne er grunnlaget for utformingen av prøvene. Faktorer som forsøksoppsett og tilgjengelig tid la begrensninger på hva som kunne testes, og derfor ble det valgt ut noen konstante og variable parametere. Tabell 2 inneholder en oversikt over parameterne.

**Tabell 2: Parametere i forsøket**

Konstante parametere		Variable parametere	
Stender	48x98 mm gran C24	Senteravstand	150, 300 og 450 mm
Lekt	23x48 mm gran C24		
Vindsperre	Norgips gipsplate 9,5 mm	Teip	Med/uten Tyvek vindsperreteip
Festemidler	Varmforsinkede spikre, 3,1x90 mm		

I forsøket ble det benyttet stendere av konstruksjonsvirke av gran C24 med dimensjon 48x98 mm. Dette er mindre enn typiske stenderdimensjoner, men hensikten med å bruke denne dimensjonen var å sørge for at fuktskyklusene ble mindre tidkrevende. I tillegg var plassbegrensninger en avgjørende faktor fordi det ikke hadde vært mulig med et like stort antall prøver dersom stenderne var tykkere. Norvik (2018) antok at stendertykkelser utover festemidlenes penetreringsdybde ikke påvirker festemidlenes bevegelser. Denne antakelsen ble lagt til grunn også i dette forsøket. Lektene var i likhet med stenderne av konstruksjonsvirke av gran C24 og hadde dimensjon 23x48 mm. Dette er i tråd med SINTEFs anbefalinger for klemlekter samt anbefalingene fra de ulike produsentene i Tabell 1. Årsaken til at det ikke ble valgt tykkere lekter var at fuktskyklusene skulle ta så kort tid som mulig samtidig som anbefalingene skulle følges.

Vindsperre av et plateprodukt ble valgt blant annet fordi bruk av vindsperreplater medfører et større antall skjøter enn bruk av rullprodukter. Platenes dimensjoner gjør at det vil være en skjøt hver 1,2 meter, sammenlignet med rullprodukter som er 50–100 meter lange. Mange skjøter gir mange potensielle luftlekkasjer, og derfor er det spesielt relevant å se på hvor lufttett vindsperreskjøten er. I forsøket ble det valgt å bruke vindsperre av gipsplater som ikke påvirkes av fuktskyklusene i like stor grad som for eksempel tre-fiberplater. Dermed ville fuktbevegelser i prøvene kun oppstå i trevirket og festemidlene.

Festemidlene som ble brukt i forsøket var varmforsinkede spikre. I tidligere forsøk er både spikre og skruer benyttet, og det er vist at skruer gir mindre endringer i luftlekkasje enn spiker. Friksjonen på grunn av skruens gjenger gjør at bevegelsene på grunn av fuktbevegelser i trevirket blir mindre. Spikre er dermed valgt for å få tydelige endringer i luftlekkasjer. I tillegg er det mer vanlig å bruke spikre enn skruer på byggeplass. For å feste vindsperren til stenderne ble det benyttet gipsskruer.

Senteravstand er en av to variable parametere som ble undersøkt i forsøket. Det ble variert mellom de tre ulike senteravstandene 150, 300 og 450 mm, med hensikt om å få tydelige forskjeller i luftlekkasjer for de ulike avstandene. SINTEF gir anbefalinger om senteravstand 200–300 mm avhengig av klemlektens stivhet. Fuktbevegelser i trevirket kan føre til store lekkasjer dersom senteravstanden mellom festemidlene er for høy. Ved bruk av teip mellom vindsperreskjøten og klemlekten vil teipen perforeres av festemidlene, og da vil en lav senteravstand gi et større antall perforeringer enn en høy senteravstand.

Effekten av teip i vindsperreskjøten ble undersøkt ved å bruke teip i halvparten av prøvene. På denne måten var det mulig å sammenligne luftlekkasjene til prøver med og uten teip, i tillegg til å finne en sammenheng mellom senteravstand og luftlekkasjer for prøvene med teip. Som tidligere nevnt er denne masteroppgaven en del av forskningsprosjektet TightEN som handler om hvordan teip kan påvirke energiforbruk i bygninger. Teip kan sørge for mer lufttette bygninger og dermed et lavere energiforbruk. Bestandigheten til teip er også et fokusområde i forskningsprosjektet, og dette laboratorieforsøket ga et innblikk i hvordan teipens funksjon påvirkes av gjentatte fuktskykluser.

## 4.2 Utstyr

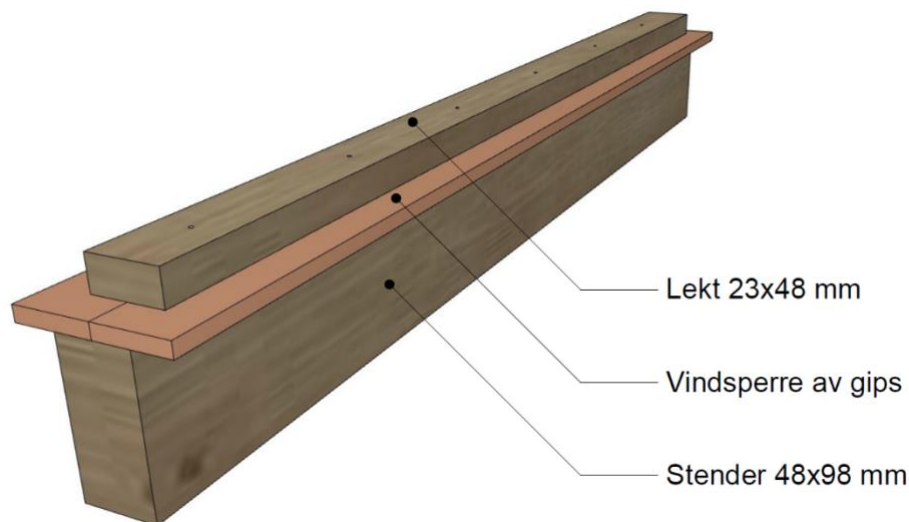
### 4.2.1 Prøver

Prøvene er delt opp i to prøvesett, der prøvene i det ene settet er uten teip, og prøvene i det andre er med teip. Hvert prøvesett består av tre ulike kombinasjoner av parametere. Testriggeren er laget for parvis testing av prøver, og for å skaffe et godt grunnlag for luftlekkasjemålingene ble det bestemt å lage tre par for hver parameterkombinasjon. Dette tilsvarer seks prøver per kombinasjon og 18 prøver per prøvesett. Totalt er det 36 prøver i forsøket, og Tabell 3 gir en oversikt over alle prøver og parameterkombinasjoner. Størrelsen på varmeskapene er en av begrensningene for antall og utforming av prøvene i forsøket. Skapene har innvendige mål på 600x680x1170 mm, og det ble derfor bestemt å lage prøver med 900 mm lange skjøter. Fordi prøvene testes parvis, består hvert prøvepar av totalt 1,8 meter vindspærreskjøt.

**Tabell 3: Prøver i forsøket**

Parametere		Prøvenavn	
Uten teip	Senteravstand 150 mm	U150-1-1	U150-1-2
		U150-2-1	U150-2-2
		U150-3-1	U150-3-2
	Senteravstand 300 mm	U300-1-1	U300-1-2
		U300-2-1	U300-2-2
		U300-3-1	U300-3-2
	Senteravstand 450 mm	U450-1-1	U450-1-2
		U450-2-1	U450-2-2
		U450-3-1	U450-3-2
Med teip	Senteravstand 150 mm	M150-1-1	M150-1-2
		M150-2-1	M150-2-2
		M150-3-1	M150-3-2
	Senteravstand 300 mm	M300-1-1	M300-1-2
		M300-2-1	M300-2-2
		M300-3-1	M300-3-2
	Senteravstand 450 mm	M450-1-1	M450-1-2
		M450-2-1	M450-2-2
		M450-3-1	M450-3-2

Prøvene består av 48x98 mm stendere, 23x48 mm lekter og vindspærre av gips. I tillegg er det brukt vindspærreteip over skjøtene i halvparten av prøvene. Oppbygningen av prøvene er vist i Figur 19. Stenderne ble kappet i lengder på 950 mm, og for å kunne teipe i overgangen mellom prøver og testboks er lektene kappet 50 mm kortere. Før kappingen ble det gjort fuktmålinger av trevirket ved bruk av en piggmåler og et protimeter som er vist i Figur 34 i kapittel 4.2.4. Resultatene av målingene ble brukt til å beregne mengden vann som var nødvendig å tilsette for å fukte opp prøvene til et bestemt fuktnivå. Videre ble ferdig kappede stendere og lekter veid og merket med navn. Formålet med dette var å senere kunne beregne trevirkets fuktinnhold samt å holde oversikt over hvilke stendere og lekter som hørte sammen. Stenderne og lektene ble deretter pakket inn i PE-folie for å holde fuktinnholdet konstant og unngå uttørking. Dette ble gjort mellom hvert steg i prosedyren med å lage prøvene.



**Figur 19: Oppbygning av prøvene**

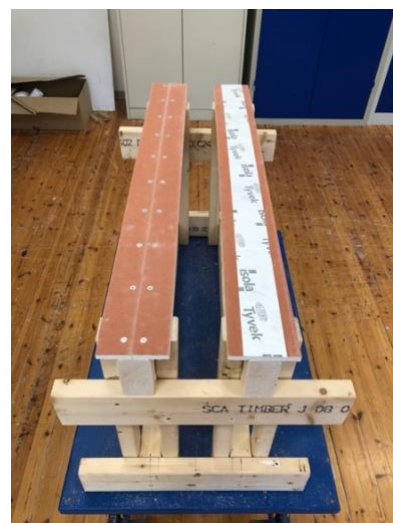
Videre ble vindsperreplater kappet i biter med bredde 50 mm og lengde 950 mm som vist i Figur 20. Før vindsperrebitene ble skrudd fast i stenderne, ble plasseringen av skruene markert med 100 mm senteravstand. To slike biter ble lagt kant i kant på midten av hver stender, og skrudd fast ved bruk av gipsskruer. Dette dannet vindsperreskjøten. En bukk ble brukt som understøttelse under monteringen, og dette er samme bukk som ble brukt i målingene. For halvparten av prøvene ble skjøten teipet ved bruk av vindsperreteip. Figur 21 og 22 viser henholdsvis montering av vindsperrebitene og teiping av vindsperreskjøten.



**Figur 20: Vindsperrebitene**



**Figur 21: Montering av vindsperre**



**Figur 22: Teiping av vindsperreskjøt**

Spikerplasseringen for de ulike senteravstandene som ble benyttet ble markert på lektene slik at monteringen kunne skje effektivt. Lektene ble festet til prøvene ved bruk av spikerpistol, og monteringen av lektene er vist i Figur 23. Deretter ble kantene til prøvene teipet med teipen «Nashua 357». Hensikten med dette var å unngå slitasje på vindsperren da overgangen mellom prøvene og boksens lokk ble teipet i hver lekkasjemåling. For å sørge for at luften ikke skulle slippe ut i endene av lektene, ble toppen og bunnen av lektene også teipet. Et utvalg av ferdige prøvestykker med teip rundt kantene er vist i Figur 24.



**Figur 23: Montering av leker**



**Figur 24: Ferdige prøver med teip rundt kantene**

#### 4.2.2 Test- og oppfuktingsboks

Til luftlekkasjemålinger og oppfukning av prøver ble det brukt en boks av 1,5 mm kaldvalset stål som ble laget i forbindelse med Norviks masteroppgave (Norvik, 2018). Dimensjonene er tilpasset SINTEFs varmeskap, og boksens utvendige mål er 580x500x1150 mm. Boksen er vist i Figur 25. Skroget ble laget med tanke på å begrense antallet sveisede skjøter, og derfor er flatene som utgjør bunnen og sideveggene med flenser knekt til av én plate. Platene på kortsidene av boksen er knekt til med tilsvarende flenser og sveiset fast til resten av skroget. Flensene har gjengehull som ble brukt til å skru fast et lokk under oppfukning. I et av boksens hjørner ble det boret hull og montert koblinger for lufttilførsel og mikromanometer som vist i Figur 27.

Et lokk med åpninger tilpasset prøvenes størrelse ble laget i forbindelse med Engens masteroppgave (Engen, 2020). Dette ble brukt til luftlekkasjemålinger av prøvene i forsøket og er vist i Figur 26. Lokket ble laget med gjengehull tilsvarende som i boksen. Engen kom senere frem til at teiping av overgangen mellom boksen og lokket ville bli en mer lufttett løsning, og derfor ble gjengehullene i boksen teipet igjen.



**Figur 25: Boksen som benyttes til luftlekkasjemålinger og oppfukning**



**Figur 26: Lokk med åpninger for prøver**



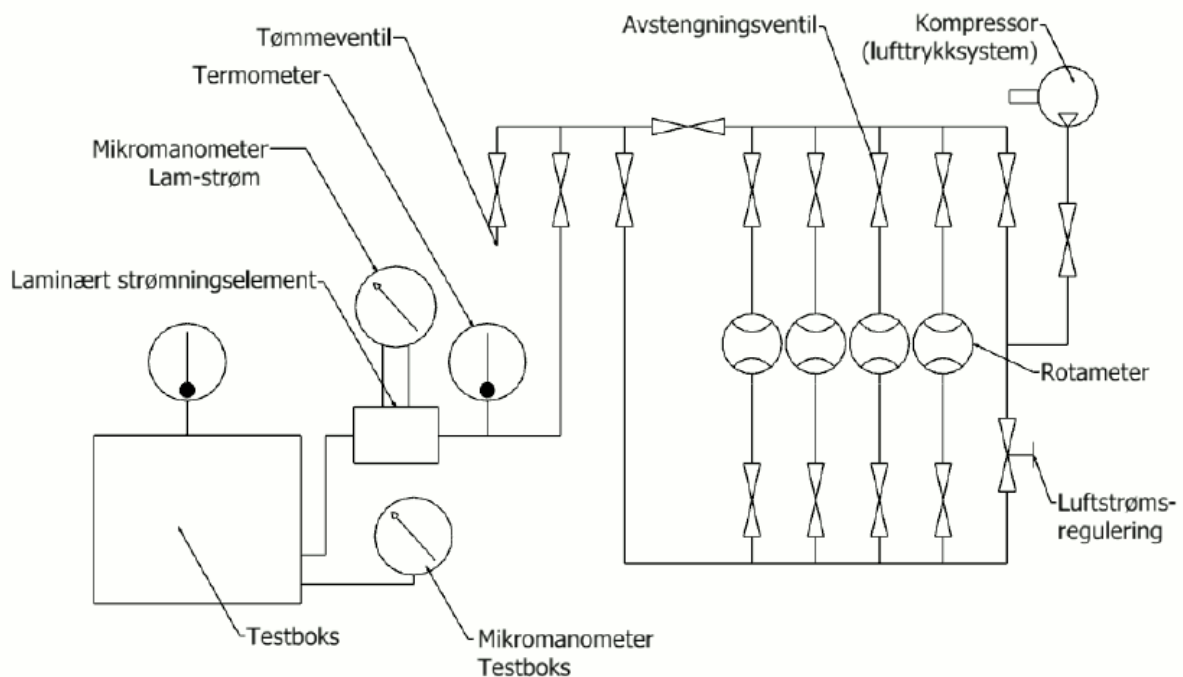
**Figur 27: Tilkobling for lufttilførsel og mikromanometer**



For å sikre at boksen var tilstrekkelig lufttett, ble det teipet over alle skjøter, hull og overganger. Før målingene av luftlekkasje og egenlekkasje ble lokket lagt på boksen, og det ble teipet i overgangen mellom boks og lokk. Da boksen skulle brukes til oppfukning av prøvene, ble den flyttet fra luftmålingsriggen og inn i et varmeskap. Under boksen var det plassert et par lekter som sørget for klaring mellom boksen og varmeskapet, i tillegg til at det var et par centimeter klaring på sidene og toppen. Dermed kunne luften i varmeskapet strømme fritt og sørge for minimale temperaturforskjeller på innsiden av boksen.

#### 4.2.3 Luftmålingsrigg

Målingene av luftlekkasjer ble gjort ved å benytte SINTEFs luftmålingsrigg. Den er koblet til det sentrale lufttrykkssystemet på laboratoriet som kan tilføre luft med trykk på opptil åtte bar. En prinsippskisse av luftmålingsriggen er vist i Figur 28. Når lufttilførselen slås på, går det en luftstrøm gjennom systemet og inn i testboksen der det skapes et overtrykk. Trykkforskjellen mellom luften i boksen og luften i rommet måles ved bruk av et mikromanometer som er koblet til boksen, og dette er vist i Figur 29. Riggen har ventiler som kan dirigere luftstrømmen gjennom fire ulike rotameter der det er mulig med en analog avlesning av mengden luft i l/h som passerer gjennom.



**Figur 28: Skisse av luftmålingsriggen (Norvik, 2018)**

En mer nøyaktig avlesning av tilført luftmengde kan gjøres ved å koble et laminærstrøms-element mellom boksen og luftmålingsriggen. Luftmengden som passerer gjennom elementet leses av på et mikromanometer som er koblet til elementet. Dette er vist i Figur 30 og 31. Den tilførte luftmengden som er nødvendig for å holde et bestemt nivå av overtrykk utgjør luftlekkasjen. Sammenhengen mellom trykkforskjellen og luftstrømmen gjennom elementet er lineær, og en trykkforskjell på 96,88 Pa tilsvarer en luftstrøm på 6 l/min. Dermed kan de målte luftlekkasjene enkelt regnes om fra Pa til l/h per meter skjot.



**Figur 29: Mikromanometer som måler differensialtrykk**



**Figur 30: Laminærstrøms-element**

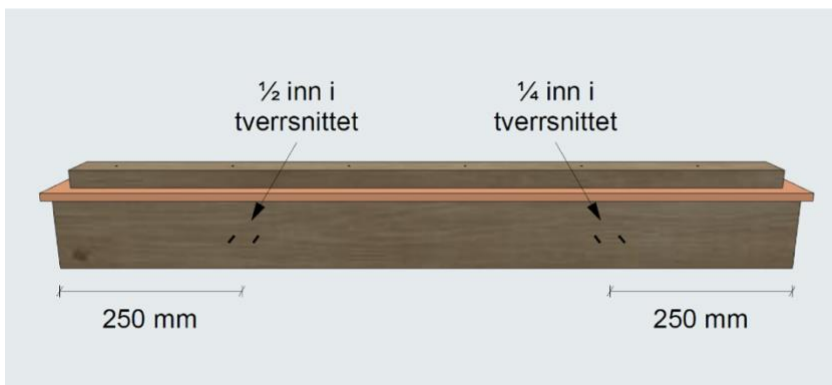


**Figur 31: Mikromanometer som måler lufttrykk**

#### 4.2.4 Utstyr for fuktmåling

I fuktskyklusene som prøvene ble utsatt for, ble prøvene tørket og fuktet opp for å gjøre sammenligninger av luftlekkasjene gjennom tørre og fuktige prøver. Verdier for prøvenes fuktinnhold ble valgt på bakgrunn av fuktsimuleringer gjort av Engen (2020) der det ble beregnet gjennomsnittsverdier for fuktinnholdet i stenderen og lekten i en klemt vindspærreskjøt. I laboratorieforsøket ble det gjort en forenkling ved å kun gjøre målinger av stendernes fuktinnhold som skulle variere mellom 9 og 15 %.

For å kunne gjøre fuktmålinger underveis i fuktskyklusene ble det montert to par elektroder i stenderne til to av prøvene, én av prøvene uten teip og én med teip. Elektrodene ble laget av en kobber-tinn-legert sveisestav som ble kappet til og isolert med krympestrømper. Videre ble det loddet ledninger på elektrodene før de ble festet i forborede hull. Dette er vist i Figur 33. Det ene elektrodeparet ble boret inn til midten av stenderens tverrsnitt, og det andre er boret en fjerdedel inn i tverrsnittet, henholdsvis 24 og 12 mm. Dette gjorde det mulig å overvåke stendernes fuktinnhold i ulike deler av tverrsnittet. Elektrodeparene ble plassert 250 mm fra hver ende av stenderne med en innbyrdes senteravstand på 30 mm. Plasseringen av elektrodene i prøvene er vist i Figur 32.



**Figur 32: Plassering av elektroder i prøve**



**Figur 33: Elektroder med loddede ledninger**

Fuktmålingene av prøvene under uttørking og oppfukting ble gjort ved bruk av protimeter. Ledningene som var koblet til elektrodene stakk ut gjennom åpningen i varmeskapet der prøvene var plassert. Dermed var det mulig å koble ledningene til protimeteret og lese av fuktinnholdet i prøvene uten at skapet måtte åpnes. Det ble lagt til grunn at alle prøvene hadde tilnærmet likt fuktinnhold, selv om kun én prøve per prøvesett var utstyrt med elektroder. Protimeteret, som er vist i Figur 34, måler fuktinnhold ut ifra valgte forhåndsinnstillinger for materiale og aktuell temperatur. Ved bruk av et termoelement ble temperaturen i lufta rundt prøvene målt. Dette ble gjort for å sikre at denne temperaturen var tilnærmet lik temperaturen som varmeskapet var stilt inn på. I tillegg var det nyttig for å kunne stille inn protimeteret på riktig temperatur slik at fuktmålingene ble så nøyaktige som mulig. Termoelementet og temperaturmåleren er vist i Figur 35. Under oppfuktingen er høy relativ fuktighet en forutsetning for at trevirket skal fuktes opp. Sensoren og måleren i Figur 36 ble brukt til å følge med på den relative fuktigheten i lufta rundt prøvene. Dersom den relative fuktigheten sank, var dette en indikasjon på at det hadde oppstått lekkasjer som dermed ville ha sinket oppfuktingen.



**Figur 34: Protimeter og piggmåler**



**Figur 35: Temperaturmåler og termoelement**



**Figur 36: Sensor og måleutstyr for relativ fuktighet**

## 4.3 Forsøksprosedyre

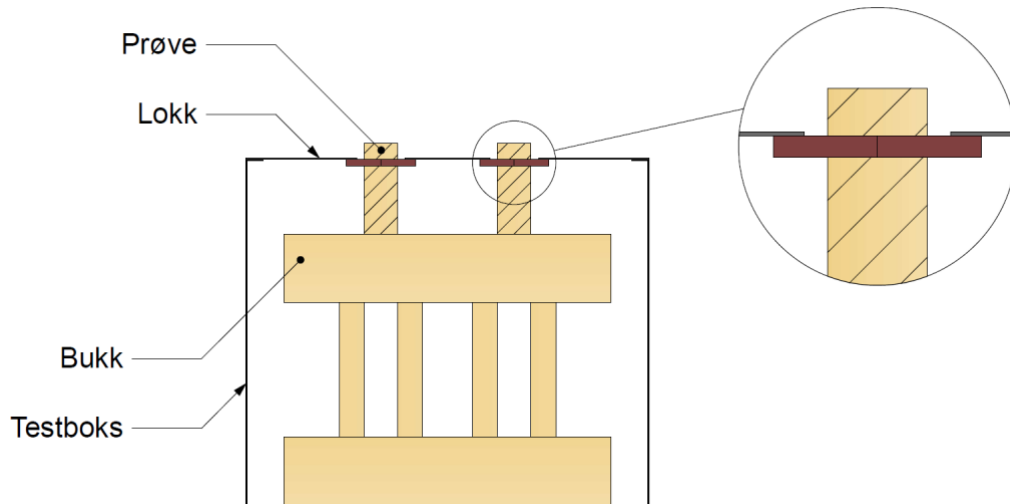
### 4.3.1 Egenlekkasje

Før hver testrunde ble det gjort målinger av boksens egenlekkasje. Selv om boksen var tilnærmet lufttett, ville det uansett være noen utettheter i gjennomføringer og overganger. Det ble forsøkt å gjøre egenlekkasjen så lav som mulig ved å teipe skjøter, hull og overganger. Årsaken til at det ble gjort flere egenlekkasjemålinger er at gjentatt teiping av overgangen mellom boks og lokk kunne føre til slitasje på teipen i skjøtene. I tillegg kunne boksen bli påvirket av fukt og temperatur under oppfukting, og det kunne oppstå skader når den ble flyttet frem og tilbake mellom varmeskap og luftmålingsrigg. Dette kunne medføre endringer i egenlekkasjen, og for at resultatene fra luftlekkasjemålingene skulle være nøyaktige, var det viktig å måle denne i hver testrunde. Egenlekkasjen ble trukket fra luftlekkasjemålingene slik at det kun er luftlekkasjene gjennom vindspærreskjøten som utgjør resultatene.

Målingene av egenlekkasje ble gjort ved å bruke det samme lokket som under luftlekkasjemålingene, og åpningene i lokket ble teipet igjen. Overgangen mellom boksen og lokket ble teipet på samme måte som ved måling av luftlekkasjer. Egenlekkasjen ble målt og registrert for 30, 50 og 70 Pa overtrykk.

### 4.3.2 Måling av luftlekkasjer

Det ble gjort seks luftlekkasjemålinger av hvert prøvepar i forsøket. Etter montering av prøvene ble det gjort en initiell måling, og deretter er det gjort målinger mellom fukt-syklusene som bestod av tre uttørkinger og to oppfuktinger. Før hver måling ble prøvene veid for å senere kunne fastslå prøvenes fuktinnhold i hver testrunde.



**Figur 37: Snittegning av testboks og prøver under luftlekkasjemåling**

Den samme bukken som ble brukt til montering av prøvene, ble også brukt under luftlekkasjemålingene. Bukken ble plassert i boksen, og prøvene ble lagt i bukken og dekket over av lokket med åpninger for prøvene. Prøveoppsettet er vist i Figur 37. Høyden til bukken måtte justeres slik at vindsperra var plassert i lik høyde som lokkets underkant. Underveis i forsøket ble den justert ytterligere på grunn av at deformasjoner i stenderne, som følge av uttørkingen, førte til at prøvene ikke lenger passet i bukken. Delene av bukken som ble brukt til å holde prøvene på plass ble derfor kappet bort, og bukken ble sendt ut som i Figur 37. Da lokket var lagt på, ble overgangen mellom boksen og lokket teipet med teip av typen «Nashua 357». I tillegg ble det teipet i overgangen mellom lokk og prøver, som vist i Figur 39. På denne måten var vindsperreskjøten den eneste utettheten i boksen.



**Figur 38: Luftmålingsrigg**



**Figur 39: Teip i overganger mellom lokk og prøver**

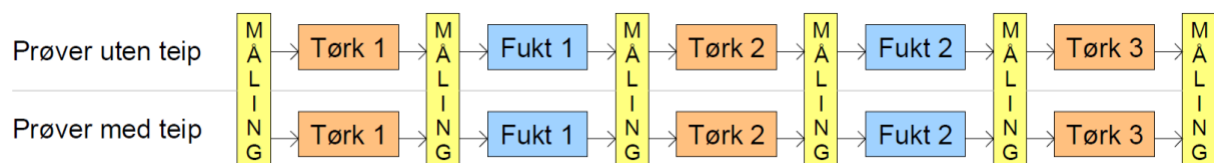
Etter at boksen og prøvene var klargjort, ble lufttilførselen skrudd på og justert til differensialtrykket mellom luften i boksen og romluften var 30, 50 og 70 Pa. Lufttrykket som skulle til for å holde de ulike nivåene av overtrykk ble avlest på mikromanometeret da differensialtrykket lå stabilt på 30, 50 og 70 Pa. Dette tilsvarer luftlekkasjene i vindsperrer-skjøten. Figur 38 viser luftmålingsriggen under måling av luftlekkasjer.

Egenlekkasjer, luftlekkasjer og prøvenes vekt ble registrert fortløpende i Excel-ark, og tabeller fra Excel-arkene er vedlagt i Vedlegg 1. Det ble laget en tabell for hver testrunde med hvert prøvesett. Luftlekkasjene ved 30, 50 og 70 Pa overtrykk ble automatisk regnet om til l/h per meter skjørt ved å bruke sammenhengen mellom trykkforskjell og luftstrøm gjennom laminærstrøms-elementet. Videre ble verdiene brukt i en lineær trendfunksjon for å finne lekkasjetallet ved 50 Pa overtrykk.

Resultatene fra luftlekkasjemålingene kunne bli påvirket av forskjeller i temperatur mellom lufta som tilføres boksen og romlufta. Norvik (2018) undersøkte dette ved å plassere termometere i boksen og i lufttrykkslangen rett før laminærstrøms-elementet i tillegg til et termometer i rommet. Den høyeste målte temperaturdifferansen var 0,8 °C, og det ble antatt at trykkforskjellene dette ville medføre var ubetydelige. Med bakgrunn i dette er det valgt å se bort ifra påvirkningen av temperaturforskjeller også i dette forsøket.

### 4.3.3 Fuktskykluser

Prøvene ble utsatt for fuktskykluser for å undersøke hvordan lufttettheten påvirkes av gjentatte uttørkinger og oppfuktinger. Ved bruk av høy temperatur og høy relativ fuktighet ble uttørkingen og oppfuktingen akselerert sammenlignet med det som skjer under virkelige forhold. Fuktskyklusene i forsøket skulle tilsvare fuktvariasjonene som vindsperr-sjiktet utsettes for i løpet av ett år. Det ble gjort tre uttørkinger og to oppfuktinger der prøvene skulle tørkes og fuktes til henholdsvis 9 og 15 %. Fuktsimuleringer gjort av Engen (2020) er bakgrunnen for valget av dette intervallet for fuktinnhold. Flytskjemaet i Figur 40 viser prosedyren med fuktskykluser og luftlekkasjemålinger for prøvesettene med og uten teip. Uttørking og oppfukting av det ene prøvesettet ble gjort samtidig som det andre prøvesettet. Underveis i uttørkingen og oppfuktingen ble det gjort målinger av prøvenes fuktinnhold samt temperaturen og den relative fuktigheten i luften rundt prøvene. Da prøvene nådde riktig fuktinnhold, ble de tatt ut av varmeskapet før luftlekkasjemålinger stod for tur. Prøvene ble pakket inn i PE-folie for å holde fuktinnholdet konstant i periodene mellom uttørking, oppfukting og luftlekkasjemålinger.

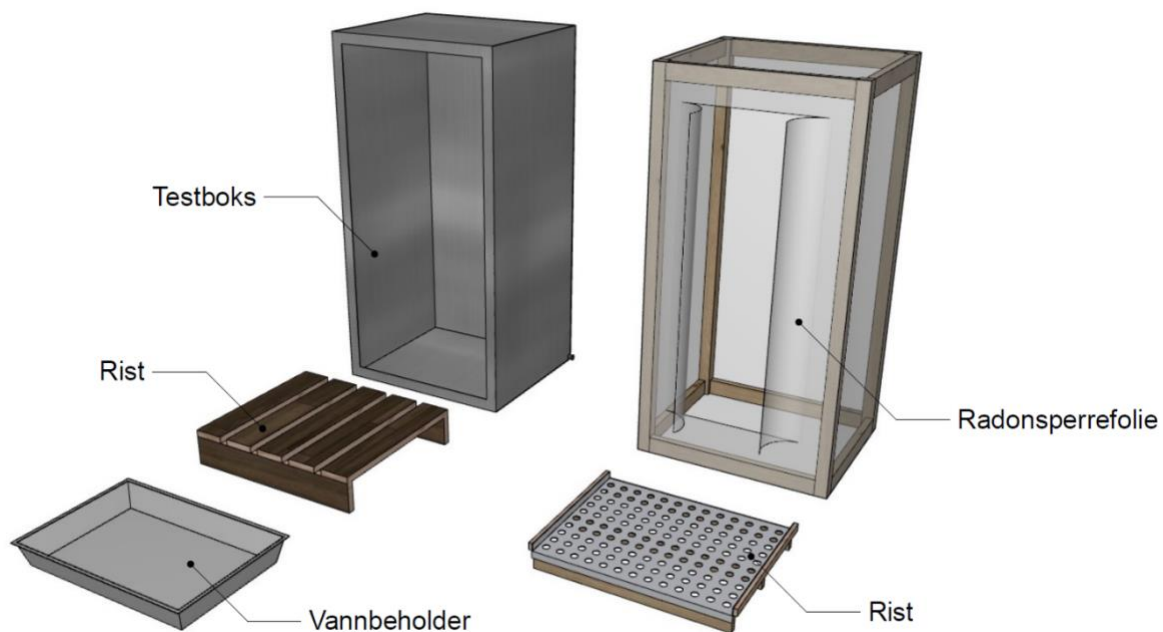


**Figur 40: Flytskjema for prosedyren med fuktskykluser og luftlekkasjemålinger**

Uttørkingen og oppfuktingen av prøver ble gjennomført ved bruk av varmeskap. Prøvene stod fritt i skapet under uttørkingen, og temperaturen var stilt inn på 70 °C. I gjennomsnitt tok uttørkingen 83 timer. Oppfuktingen av prøvene bydde på en del problemer. Opprinnelig var planen å bruke testboksen til kun luftlekkasjemålinger slik at målinger og oppfukting kunne skje parallelt. Det ble derfor laget et telt av dampsperrfolie som skulle fungere som oppfuktingstelt. Teltet ble flyttet inn i et varmeskap, og i bunnen av teltet ble det lagt en rist som prøvene ble plassert på. Videre ble det fylt på vann før teltet ble teipet igjen, og temperaturen i varmeskapet ble satt til 50 °C slik at vannet ville fordampe og trekke inn i

trevirket. Etter noen dager ble det oppdaget lekkasjer fra teltet, og derfor ble det lagt enda et lag dampsperrfolie i toppen og bunnen, samt at alle skjøter ble teipet ytterligere. En uke senere ble det gjort nye målinger av prøvenes fuktinnhold og relativ fuktighet som tilsa at det fortsatt var lekkasjer fra teltet. Det ble forsøkt å senke temperaturen for å redusere damptrykket og dermed unngå lekkasjer, men dette løste ikke problemet. Lekkasjene gjorde at det ble nødvendig å stadig fylle på mer vann for at prøvene skulle fuktes opp. Til tross for lav relativ fuktighet i teltet steg fuktinnholdet i prøvene. Problemet var at oppfuktingen tok lang tid, og den stagnerte da fuktinnholdet lå på omkring 11 %.

Stagning i oppfuktingen gjorde at det ble besluttet å lage et nytt oppfukningstelt av radonsperrefolie som ble stiftet og teipet fast til en ramme av lekter. Teltet er vist i Figur 41. Radonsperrefolie har betydelig lavere dampgjennomgang enn dampsperrfolie, og ved å bruke en ramme var det enklere å lage et telt med færrest mulig skjøter og eventuelle lekkasjepunkter. Prøvene ble plassert på samme rist inne i teltet før det ble fylt på vann og teltet ble teipet igjen. Åpningen og skjøtene i teltet ble teipet igjen ved bruk av en vindsperreteip bestående av en kompositt av filt og plastfilm. Denne teiptypen hadde god klebeevne selv ved høye temperaturer. For å være sikker på at damptrykket ikke ble for høyt, samtidig som at oppfuktingen ikke skulle ta for lang tid, ble temperaturen i varmeskapet satt til 58 °C. Den nye løsningen førte til høyere relativ fuktighet i teltet og en vellykket oppfukning av prøver. Målinger viste at den relative fuktigheten lå i området 60-80 %, og oppfuktingen tok i gjennomsnitt 14 døgn ved bruk av denne løsningen.



**Figur 41: Utstyr til oppfukning av prøver**

Den opprinnelige planen var som tidligere nevnt å bruke testboksen til kun luftlekkasjemålinger. De mislykkede forsøkene på oppfukning førte til forsinkelser, og dermed ble boksen tatt i bruk for å ta igjen noe av den tapte tiden. Dermed var det mulig med oppfukning av begge prøvesettene samtidig. Boksen ble flyttet fra luftmålingsriggen og inn i varmeskapet, der det ble plassert en beholder i bunnen som ble tilsatt vann. Over beholderen ble det lagt en rist av filmbelagt kryssfiner som prøvene ble plassert på. Dette er vist i Figur 41. Ledningene til elektrodene og RF-sensoren ble ført gjennom åpningene for lufttilførsel og mikromanometer og ut gjennom åpningen i varmeskapet. Videre ble

boksens åpning dekket med radonsperrefolie som ble festet med samme type teip som ble brukt i teltet. Temperaturen i varmeskapet ble satt til 70 °C på grunn av en antakelse om at testboksen ville tåle det høye damptrykket bedre enn radonsperreteltet. Den relative fuktigheten inne i boksen lå i området 70-90 %, og i gjennomsnitt tok oppfuktingen syv døgn. Årsaken til at oppfuktingen tok lenger tid i radonsperreteltet enn i boksen er trolig at teltet ikke var like damp tett, til tross for nøye overlapping og teiping av skjøter. Boksen tålte også et høyere damptrykk enn teltet, og dette ble gjenspeilet av RF-målinger underveis. En annen medvirkende årsak er at rammen til teltet bestod av ubehandlede lekter av tre som tok opp fuktighet i likhet med trevirket i prøvene.

#### 4.3.4 Beregning av eksakt fuktinnhold

For å fastsette prøvenes fuktinnhold ved hver luftlekkasjemåling ble tørke/veie-metoden benyttet. Etter siste måling ble prøvene demontert, og alt unntatt trevirket ble veid. Trevirket ble deretter plassert i varmeskap og tørket ved 105 °C, og tørrvekten ble funnet når vektendringen ikke var mer enn 0,1 % ved to målinger med to timers mellomrom. Vekten av vindsperre, teip, festemidler og elektroder ble trukket fra vekten til prøvene, og deretter ble trevirkets fuktinnhold beregnet. Fuktmålingene som ble gjort underveis ved bruk av elektroder og protimeter ble antatt å være like for alle prøvene selv om kun én prøve per prøvesett var utstyrt med elektroder. Ved å finne tørrvekten til hver stender og lekt var det mulig å finne fuktinnholdet til trevirket i hver enkelt prøve ved hver luftlekkasjemåling, og dermed gjøre en sammenligning av det eksakte fuktinnholdet og det planlagte fuktinnholdet.



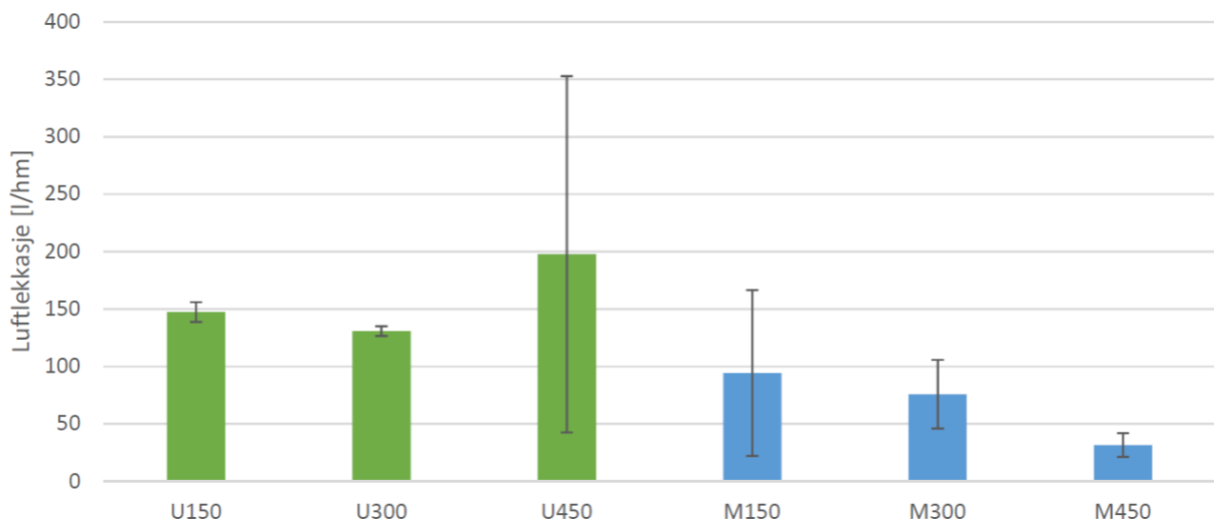


## 5 Resultat

I dette kapitlet presenteres resultater fra laboratorieforsøket som er beskrevet i forrige kapittel. Resultatene omfatter verdier fra luftlekkasjemålingene samt prøvenes fuktinnhold etter hver uttørking og oppfukning. Diagrammene viser gjennomsnittlige luftlekkasjer gitt i l/h per meter skjøt ved 50 Pa overtrykk, og variasjonene innenfor hver parameterkombinasjon er illustrert med standardavvik. Vedlegg 1 inneholder tabeller med alle målte lekkasjeverdier i laboratorieforsøket.

### 5.1 Initielle lekkasjer

Lekkasjemålingene som ble gjort rett etter montering av prøvene ga gjennomsnittlige luftlekkasjer og tilhørende standardavvik som vist i Figur 42. Prøvene uten teip hadde høyere lekkasjetall enn prøvene med teip for både 150, 300 og 450 mm senteravstand. Parameterkombinasjonene U150 og U300 hadde lekkasjetall med liten variasjon, mens de målte lekkasjene for U450 varierte i større grad, noe som ga et stort standardavvik. U450 hadde de høyeste målte luftlekkasjen med en gjennomsnittlig lekkasje på 197,6 l/hm. De gjennomsnittlige lekkasjene til U150 og U300 var henholdsvis 147,3 og 130,8 l/hm.

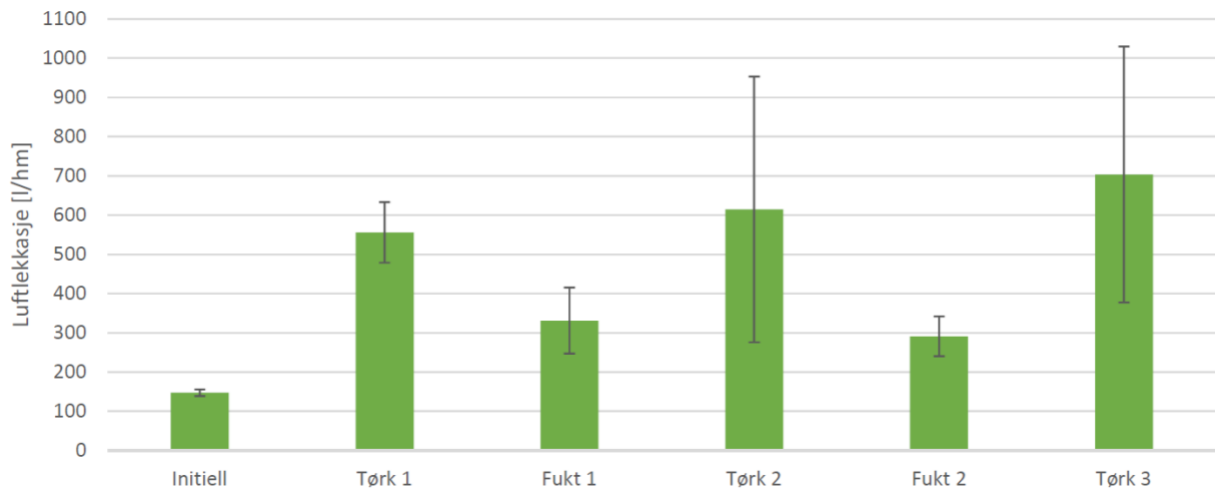


**Figur 42: Initielle luftlekkasjer**

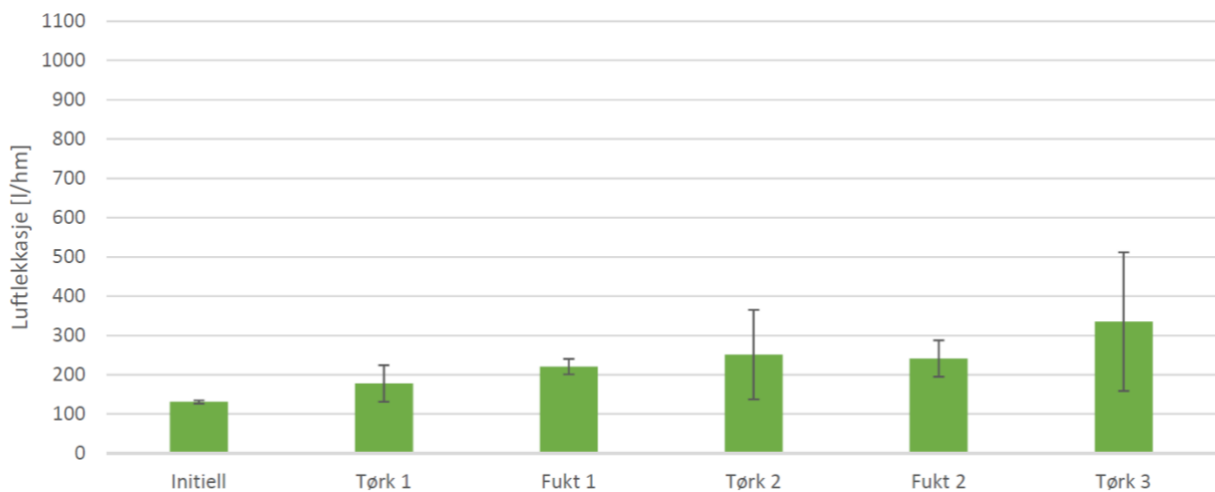
Av prøvene med teip var det parameterkombinasjonen M450 som hadde de laveste målte luftlekkasjene. M150 og M300 hadde både høyere lekkasjer og større variasjon enn M450 i målingene. Den gjennomsnittlige luftlekkasjen til M450 var 31,6 l/hm, mens M150 og M300 hadde gjennomsnittlige lekkasjer på henholdsvis 94,2 og 75,7 l/hm.

### 5.2 Lekkasjer gjennom fuktskyklusene

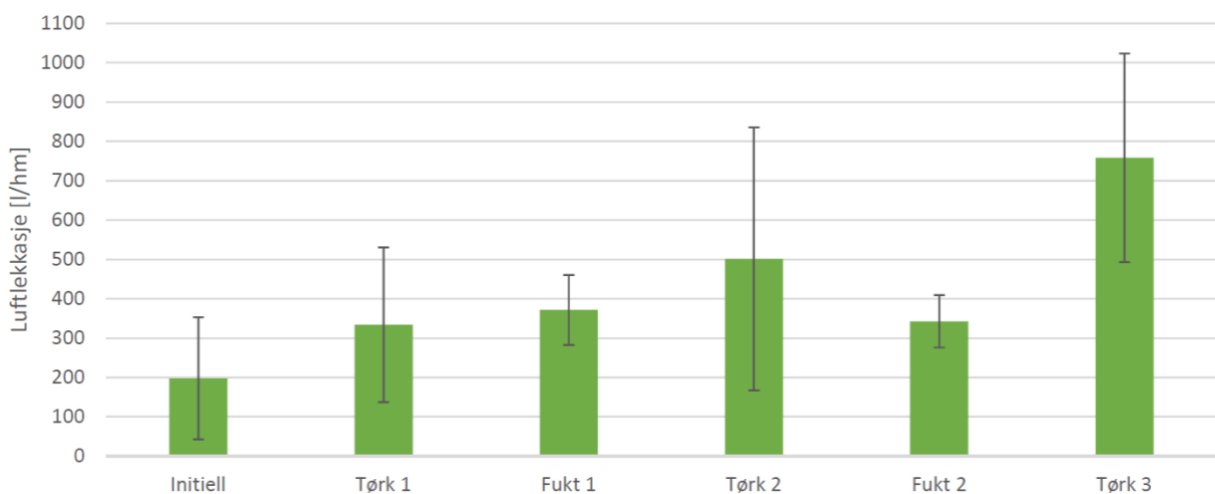
Diagrammene på de to neste sidene viser lekkasjeutviklingen gjennom fuktskyklusene for hver parameterkombinasjon. Samtlige prøver har en økning i luftlekkasjer fra den initiale målingen til målingen etter første uttørking. Prøvene uten teip har en stigende lekkasjeutvikling gjennom fuktskyklusene, mens utviklingen for prøvene med teip er synkende eller flat etter første oppfukning. En annen tydelig forskjell mellom prøvesettene er at prøvene uten teip har størst lekkasjer etter uttørking, mens prøvene med teip har de største lekkasjene etter oppfukning.



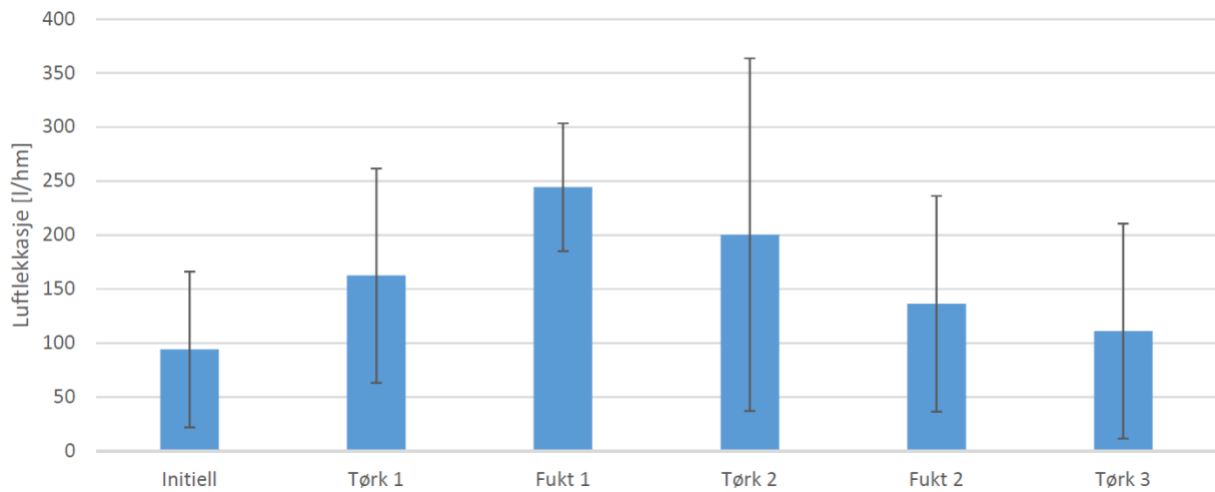
**Figur 43: Luftlekkasjeutvikling for prøver uten teip og senteravstand 150 mm**



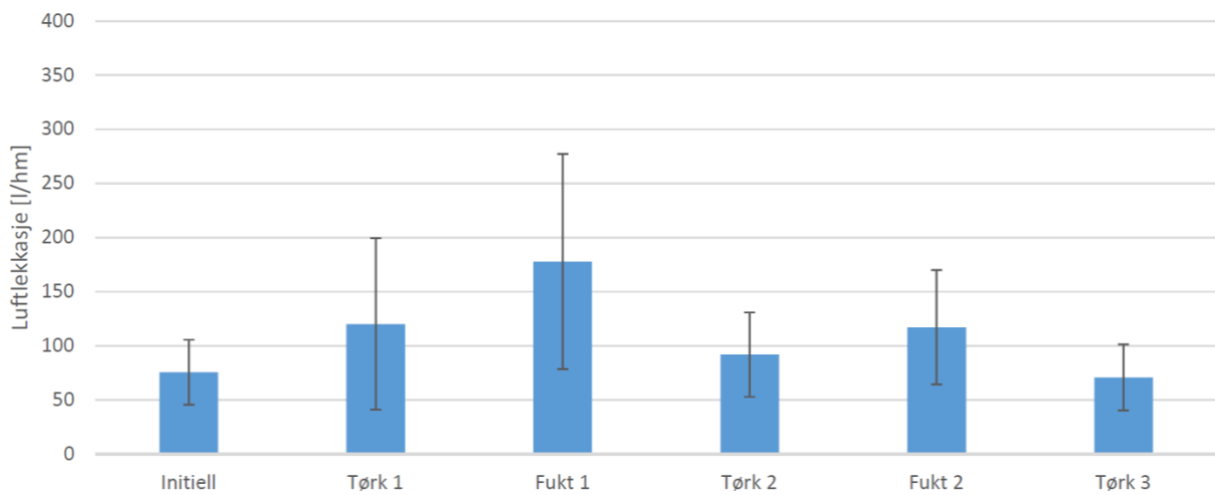
**Figur 44: Luftlekkasjeutvikling for prøver uten teip og senteravstand 300 mm**



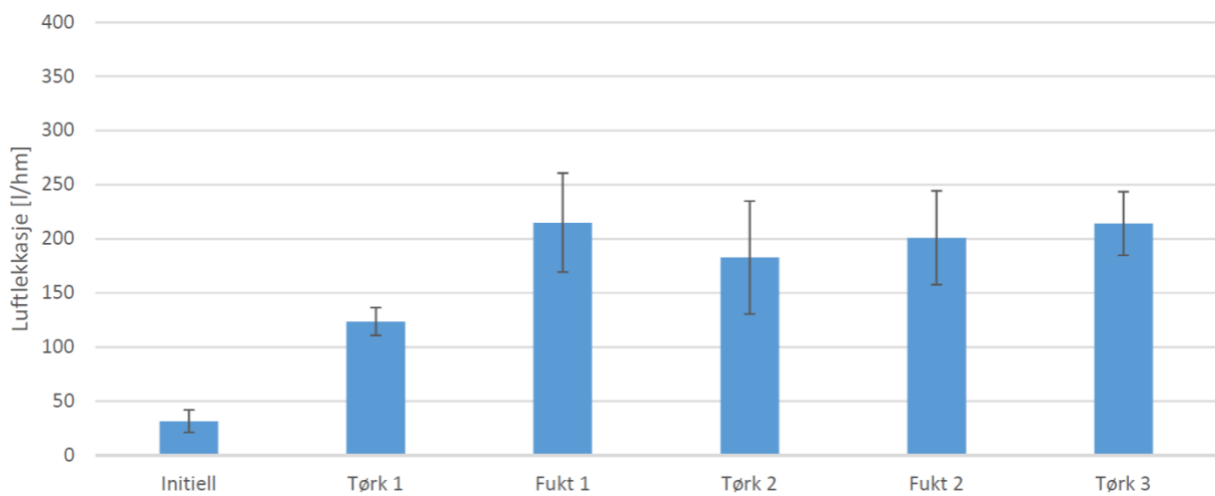
**Figur 45: Luftlekkasjeutvikling for prøver uten teip og senteravstand 450 mm**



**Figur 46: Luftlekkasjeutvikling for prøver med teip og senteravstand 150 mm**



**Figur 47: Luftlekkasjeutvikling for prøver med teip og senteravstand 300 mm**



**Figur 48: Luftlekkasjeutvikling for prøver med teip og senteravstand 450 mm**

I luftlekkasjemålingene er det prøvene med senteravstand 300 mm som har de minste lekkasjene både for prøvene med og uten teip. Gjennom fuktskyklusene var lekkasjene i U300 i gjennomsnitt 92 % lavere enn i U150, og 79 % lavere enn i U450. Etter siste uttørking hadde U300 en gjennomsnittlig luftlekkasje på 335,2 l/hm. U150 og U450 hadde lekkasjer på henholdsvis 703,6 l/hm og 758,1 l/hm i samme testrunde. Differansene mellom parameterkombinasjonene var ikke like store for prøvene med teip, der lekkasjene i M300 i gjennomsnitt var 48 % lavere enn M150 og 56 % lavere enn M450. I siste måling var den gjennomsnittlige lekkasjen 111,2 l/hm for M150 og 214,1 l/hm for M450, mens lekkasjen for M300 i gjennomsnitt var 70,9 l/hm.

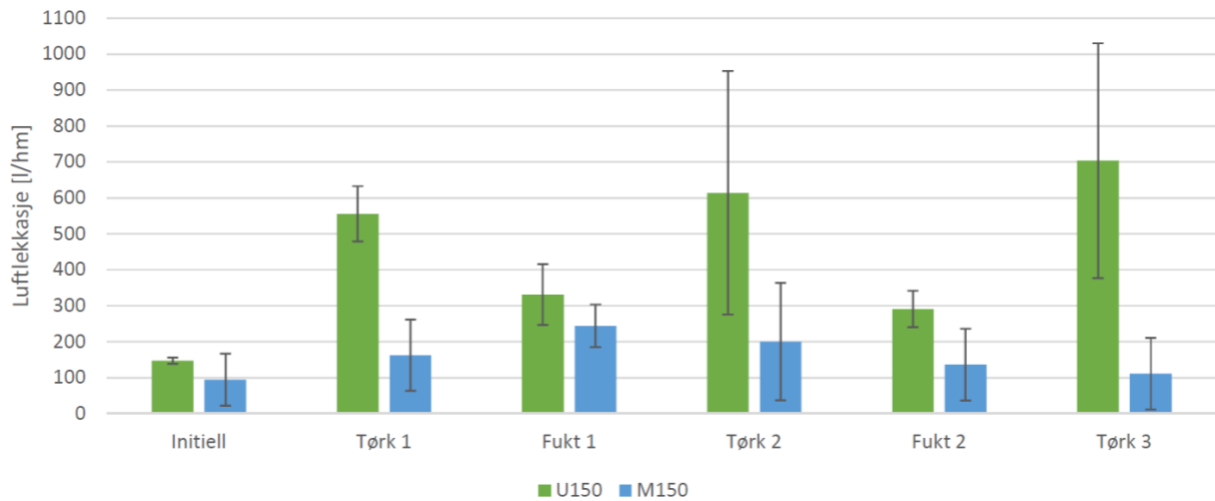
Lekkasjeutviklingen for prøvene uten teip varierer med senteravstanden mellom festemidlene. Utviklingstrenden for U150 er stigende etter uttørking og synkende etter oppfukting. I tillegg skjer det en stigning fra uttørking til uttørking. Den samme trenden kan også observeres for U450 fra og med andre uttørking. Frem til andre uttørking er trenden til U450 jevnt stigende. Lekkasjeutviklingen til U300 er jevnt stigende gjennom alle fuktskyklusene, og lekkasjen går ikke opp og ned fra uttørking til oppfukting på samme måte som for U150. Trenden til teipprøvene er ulik prøvene uten teip. Både M150 og M300 har den største lekkasjen etter første oppfukting, og lekkasjeutviklingen videre er synkende. I motsetning til prøvene uten teip, som har størst lekkasjer etter uttørking, har prøvene med teip størst lekkasjer etter oppfukting. M450 har en flat utviklingstrend etter første oppfukting der lekkasjen er konstant i resten av fuktskyklusene.

Det er store variasjoner i standardavvik for de ulike parameterkombinasjonene. En trend som kan observeres for prøvene uten teip er at standardavvikene øker når luftlekkasjene øker, noe som gir størst standardavvik for målinger gjort etter uttørking. For prøvene med teip er ikke sammenhengen mellom standardavvik og lekkasjer like tydelig. M150 har relativt store standardavvik etter både uttørking og oppfukting, og lekkasjene varierer mye gjennom alle fuktskyklusene. Det er heller ingen tydelig sammenheng mellom standardavvik, uttørking og oppfukting for M300 og M450, men disse parameterkombinasjonene har generelt mindre standardavvik enn M150. Den flate utviklingstrenden som kan observeres for lekkasjene i M450 er også gjeldende for standardavviket som er tilnærmet konstant etter første oppfukting.

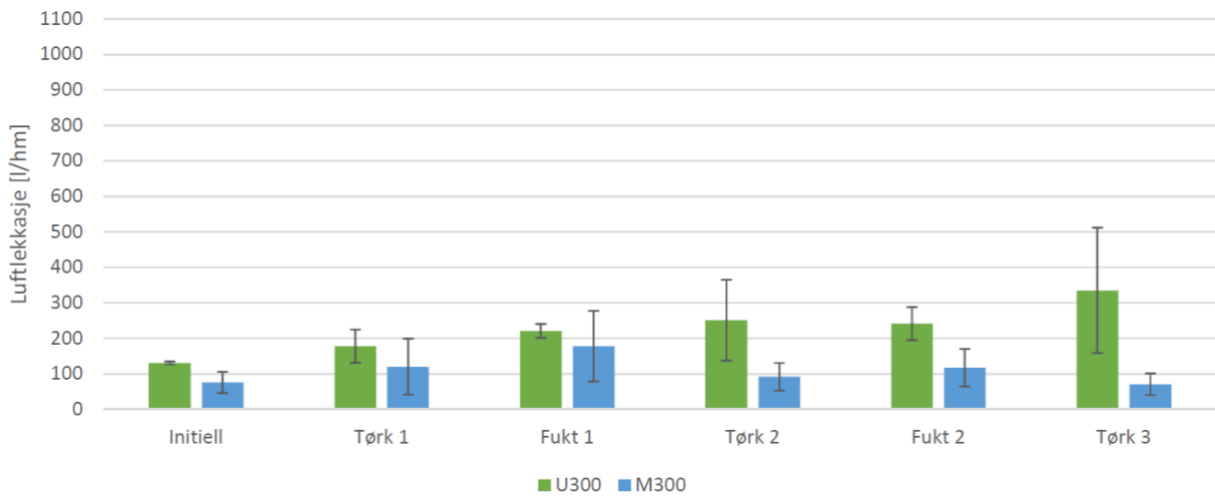
### 5.3 Lekkasjer med og uten teip

Forskjellen mellom lekkasjene til prøvene med og uten teip er vist i diagrammene på neste side. Det er observert betydelige forskjeller for alle senteravstander, og totalt sett har teipprøvene i gjennomsnitt 55 % mindre luftlekkasjer enn prøvene med teip. Forskjellene er størst etter uttørkingene, der en generell trend var at lekkasjene for prøvene uten teip steg og lekkasjene for prøvene med teip sank.

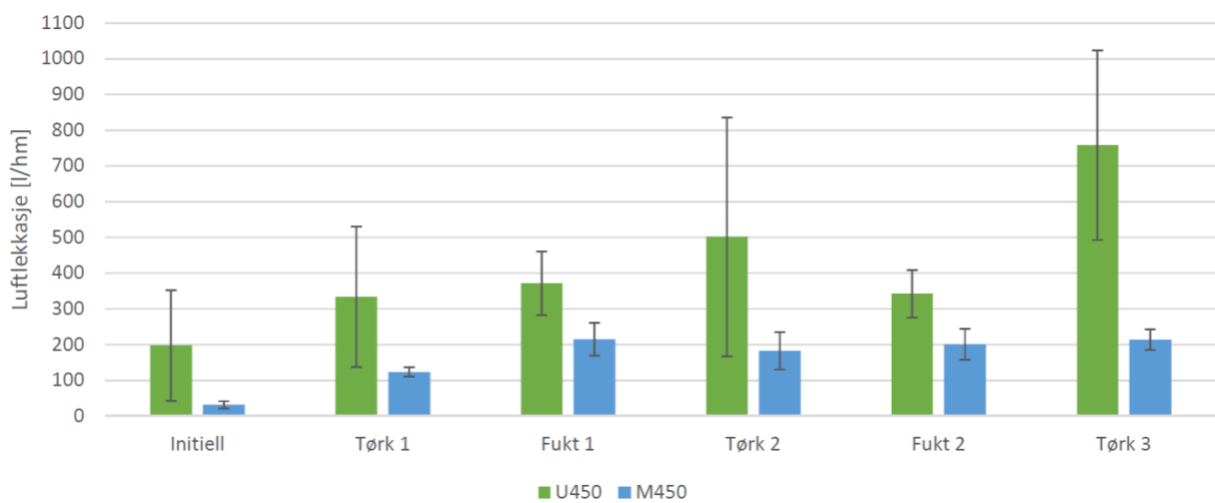
I den initielle luftlekkasjemålingen var lekkasjene i M150 36 % mindre enn i U150, og M300 hadde 42 % mindre lekkasjer enn U300. Den største forskjellen i den initielle målingen ble observert for prøvene med senteravstand 450 mm der lekkasjene i M450 var 84 % mindre enn i U450. Videre i fuktskyklusene økte forskjellene fra uttørking til uttørking, og ved siste uttørking var luftlekkasjene for prøver med teip i gjennomsnitt 78 % mindre enn for prøver uten teip. Totalt sett var de gjennomsnittlige lekkasjene gjennom alle fuktskyklusene 56 % lavere i M150 enn i U150, og 61 % lavere i M450 enn i U450. For prøvene med senteravstand 300 mm var lekkasjene for prøvene med teip i gjennomsnitt 48 % mindre enn for prøvene uten teip.



**Figur 49: Luftlekkasjer for prøver med senteravstand 150 mm**



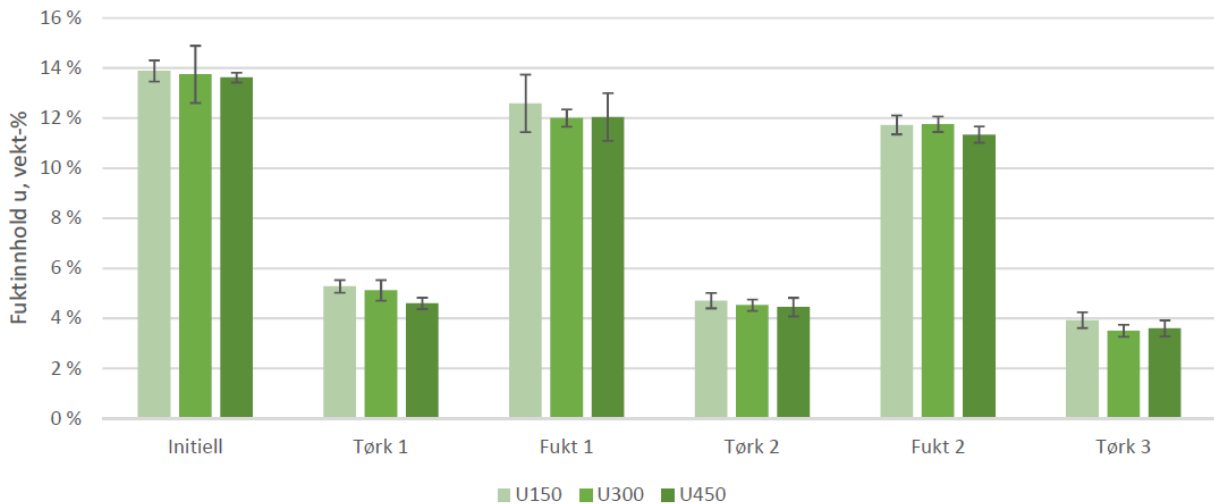
**Figur 50: Luftlekkasjer for prøver med senteravstand 300 mm**



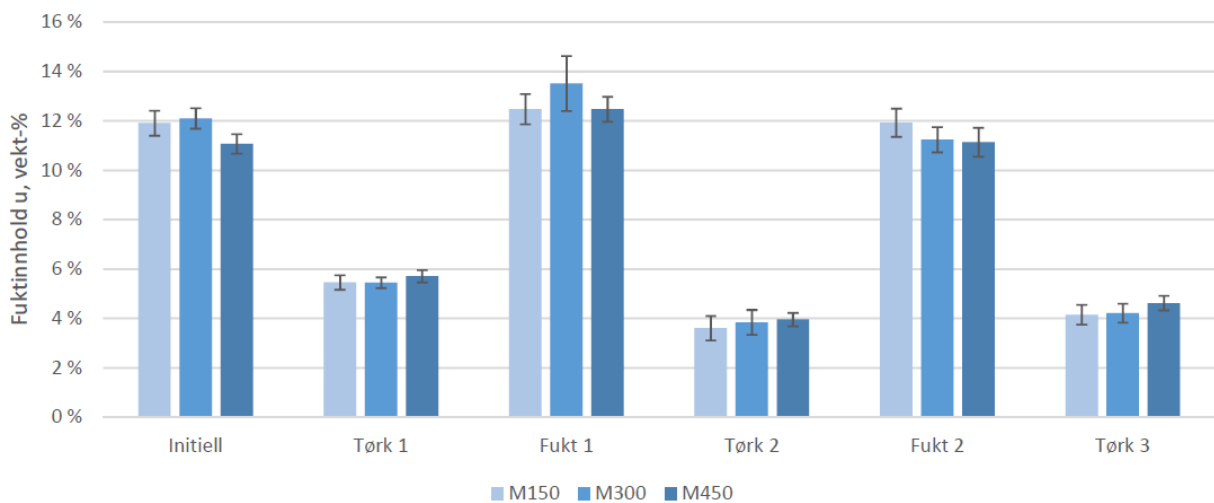
**Figur 51: Luftlekkasjer for prøver med senteravstand 450 mm**

## 5.4 Fuktinnhold

Ved bruk av tørke/veie-metoden etter siste luftlekkasjemåling, er fuktinnholdet i trevirket i hver prøve beregnet for alle fuktskyklusene. Dette var mulig på grunn av at alle prøvene ble veid før hver luftlekkasjemåling, og alt trevirket ble tørket og veid etter demontering av prøvene. Diagrammene i Figur 52 og 53 viser det gjennomsnittlige fuktinnholdet med tilhørende standardavvik for alle prøvekombinasjonene i forsøket.



**Figur 52: Fuktinnhold i prøver uten teip**



**Figur 53: Fuktinnhold i prøver med teip**

Resultatene viser at prøvene uten teip hadde et noe høyere fuktinnhold enn prøvene med teip ved den initielle luftlekkasjemålingen. I gjennomsnitt var fuktinnholdet 13,7 % i prøvene uten teip, og 11,7 % i prøvene med teip. Videre i fuktskyklusene varierte fuktinnholdet mellom 3,0 og 6,2 % etter uttørking, og mellom 10,4 og 15,2 % etter oppfukting. Fuktsimuleringene som ble gjort av Engen (2020) var grunnlaget for valget om at fuktinnholdet i prøvene skulle variere mellom 9 og 15 %. Beregningene viser at det virkelige fuktinnholdet i gjennomsnitt var 4,5 % etter uttørking og 12,0 % etter oppfukting.

Trolig skyldes feilen i fuktinnhold at protimeteret ikke var riktig kalibrert i fuktmålingene som ble gjort underveis i forsøket. Det er noen usikkerheter knyttet til temperaturen protimeteret var stilt inn på ved målingene, som har direkte innvirkning på det målte fuktinnholdet. Det er derimot mindre usikkerhet knyttet til målingene som ble gjort med piggmåler før prøvemonteringen. Under disse målingene var protimeteret stilt inn på rom-

temperatur, som var den temperaturen trevirket ble lagret under. Beregningene viser at fuktinnholdet i trevirket var omtrent 2 % lavere enn det som ble målt med protimeteret. Det er dermed grunnlag for å hevde at noe av feilen i prøvenes fuktinnhold skyldes feilkalibrering av protimeteret. Til tross for at prøvenes fuktinnhold var lavere enn det som var bestemt for forsøket, var selve fuktintervallet tilnærmet det samme. Hensikten var å undersøke hvilken innvirkning vekslinger mellom tørt og rått trevirke hadde for luftlekkasjene, og dette ble oppnådd selv om det virkelige fuktinnholdet i prøvene var lavere enn planlagt. I tillegg ble det med hensikt valgt verdier som var noe høyere enn resultatene fra simuleringene, fordi målingene blir mer usikre jo lavere fuktinnholdet er. Dermed er det sannsynlig at differansen mellom fuktinnholdet i prøvene og det virkelige fuktinnholdet i en virkelig vindspærreskjøt er mindre enn det resultatene skulle tilsi.





## 6 Diskusjon

Dette kapitlet inneholder en analyse av resultatene fra laboratorieforsøket. Først nevnes mulige feilkilder og hvilken innvirkning disse har for resultatene. Videre diskuteres trender og sammenhenger mellom resultater og parametere med fokus på forskningsspørsmålene som er definert i oppgaven.

### 6.1 Feilkilder

Det er noen forhold i forsøket som kan ha gitt resultater som ikke stemmer helt overens med luftlekkasjene som oppstår i virkeligheten. Det var individuelle forskjeller mellom prøvene som kan ha påvirket resultatene. Blant annet var det flere kvister i lektene til enkelte av prøvene, mens andre hadde ingen kvister. I tillegg hadde noen lekter en ruere overflate enn andre, og det kan ha vært små forskjeller i hvor tett selve plateskjøten ble montert. Det er naturlig at det oppstår større luftlekkasjer gjennom lekter med kvister, og denne sammenhengen kunne også observeres i resultatene underveis. Derfor er det knyttet noen usikkerheter til om forskjellene i luftlekkasjer skyldes parameterne eller ulikheter blant prøvene, spesielt med tanke på at det var relativt få prøver i forsøket. Forskjellene er illustrert med standardavvik som gjør det enklere å være kritisk til resultater der det er store forskjeller i en og samme parameterkombinasjon.

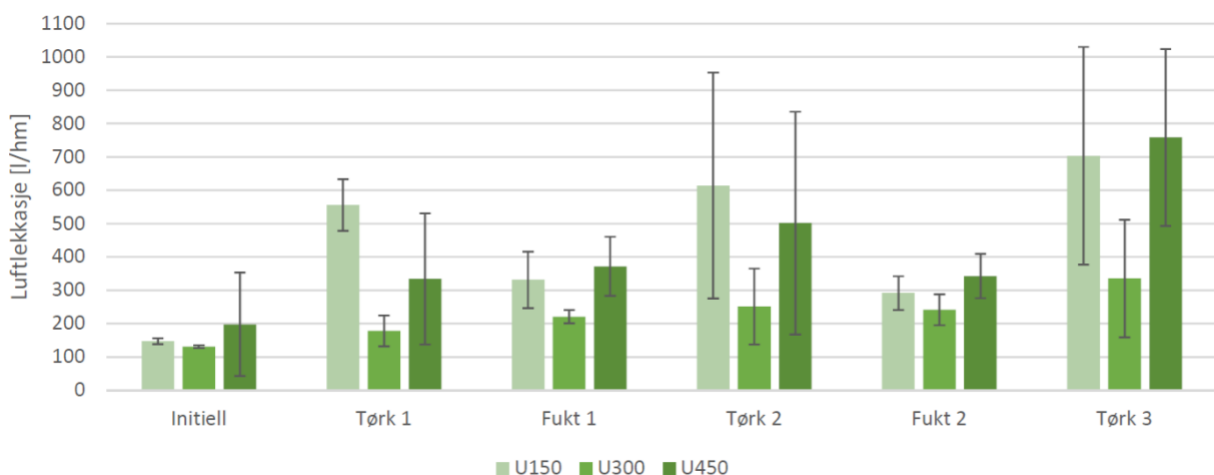
Prøvene i forsøket ble brukt som en tilnærming til vindspærreskjøter, men det er noen forskjeller mellom prøvene og virkelige skjøter. Da prøvene ble laget ble det kuttet opp biter av vindspærreplater som førte til at det var eksponert gips i selve skjøten. Vanligvis er det plassert to vindspærreplater kant i kant med et lag med papp i skjøten. Dette kan ha påvirket luftgjennomgangen i skjøten, samt at den eksponerte gipsen kan ha tatt opp fuktighet under oppfuktingen av prøvene. En annen forskjell er at vindsperra vanligvis monteres utenpå et bindingsverk som har avstivning for å unngå bevegelser. Dette vil begrense deformasjoner i trevirket som følge av fuktforandringer til en viss grad, i motsetning til i prøvene i forsøket som stod fritt under uttørking og oppfukning. Fuktbevegelser i stendere og lekter kan dermed ha gitt urealistisk store luftlekkasjer i forsøket. Eksempler på slike deformasjoner er vist i Figur 56 og 57 i kapittel 6.2.

Egenlekkasjen til testboksen ble målt før hver runde med luftlekkasjemålinger slik at målingene ble så nøyaktige som mulige. Til tross for at overgangene mellom boks, lokk og prøver ble forsøkt teipet likt hver gang, har det trolig vært små variasjoner i egenlekkasjen innenfor samme testrunde. Dette medfører en usikkerhet i resultatene fra lekkasjemålingene, men antakeligvis er forskjellene så små at de kan regnes som ubetydelige. Trykkforholdene som er brukt i målingene av luftlekkasjer representerer også en feilkilde i forsøket. Lekkasjemålingene er gjort med et innvendig overtrykk selv om det er mer sannsynlig at det oppstår et undertrykk i vindspærreskjøten. Årsaken til dette er at det vanligvis vil være et lufttett dampspærresjikt på innsiden av veggkonstruksjonen. I tillegg vil det i virkeligheten være store variasjoner i trykkforskjell avhengig av forskjeller i vind, temperatur og ventilasjon. Forenklingen med å bruke overtrykk i stedet for undertrykk ble gjort for å få konservative resultater med tydeligere forskjeller i luftlekkasjer og et bedre sammenligningsgrunnlag.

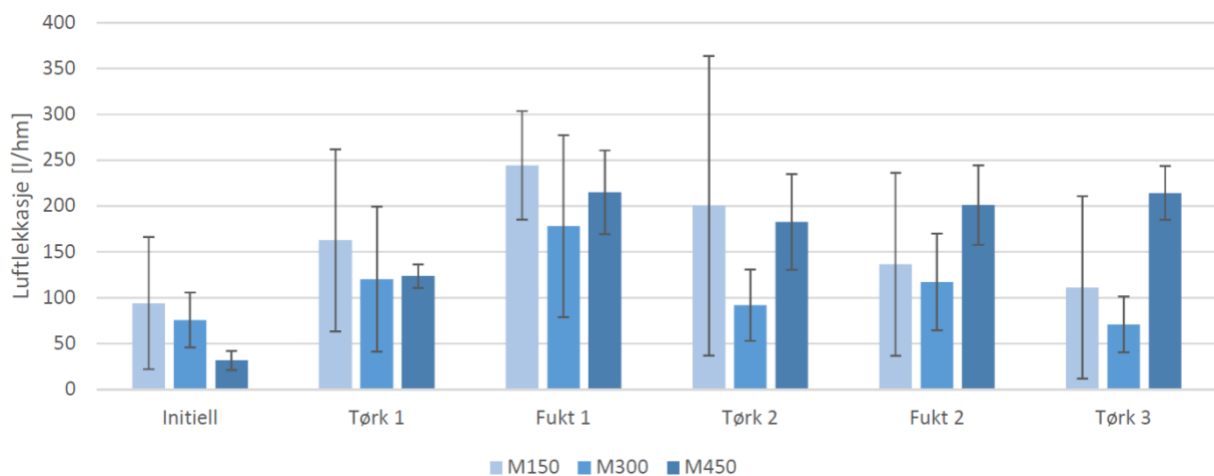
Prøvene ble gjennom fuktskyklusene i forsøket utsatt for høye temperaturer og høy relativ fuktighet i varmeskap. Hensikten med dette var å akselerere uttørking og oppfuktinger for å endre fuktinnholdet i trevirket innenfor et gitt intervall. På denne måten ble prøvene utsatt for en kunstig aldring. Dette kan ha ført til at prøvene har blitt mer påvirket enn ved normale temperaturer, noe som kan ha gitt andre lekkasjeverdier enn det som er realistisk. Dersom man skal gjennomføre en slik aldringsprosess for teipprodukter er varigheten normalt 24 uker. I dette forsøket var ikke prøvene plassert i varmeskap i lenger enn maksimalt to uker, og dette betyr at den kunstige aldringen ikke kan regnes som gyldig i henhold til testmetoden for teip. Dette legger noen begrensninger for hvordan teipens holdbarhet kan vurderes ut ifra forsøksresultatene. Likevel er det mulig å si noe om hvordan teipen ser ut til å tåle fukt- og varmekjøringene i dette forsøket, til tross for at det ikke er gjennomført noen egen kunstig aldring av selve teipen.

## 6.2 Fuktskyklusenes påvirkning

Resultatene viser at lekkasjene i alle prøvene påvirkes av fuktskyklusene. Diagrammene i Figur 54 og 55 viser lekkasjeutviklingen for prøver med og uten teip. For prøvene uten teip ga uttørking størst luftlekkasjer, sannsynligvis på grunn av fuktbevegelser i trevirket som følge av krymp. Luftlekkasjene i prøvene med teip var størst etter oppfukting, noe som tyder på at teipens lufttetthet minker når den utsettes for fukt.



**Figur 54: Luftlekkasjeutvikling for prøver uten teip**



**Figur 55: Luftlekkasjeutvikling for prøver med teip**

Den generelle lekkasjeutviklingen til prøvene uten teip er stigende, men det er noen tydelige forskjeller mellom trendene til de ulike parameterkombinasjonene. Av prøvene uten teip er det U300 som er minst påvirket av fuktsyklusene. Lekkasjeutviklingen til U300 er jevnt stigende, mens lekkasjene til U150 og U450 varierer i større grad gjennom fuktsyklusene. Lekkasjene steg etter uttørking og sank igjen etter oppfukning. Denne trenden ble observert for U150 gjennom alle fuktsyklusene. Trenden til U450 stiger på samme måte som U300 frem til andre uttørking, men i siste oppfukning og uttørking har U450 samme trend som U150. En annen observasjon er at U150 har større lekkasjer enn U450 etter uttørking, og lavere eller tilnærmet like lekkasjer som U450 etter oppfukning. Differansen mellom U150 og U450 blir stadig mindre utover i fuktsyklusene, og i den siste uttørkingen er det U450 som har størst lekkasjer. Trolig har dette en sammenheng med at mindre senteravstand medfører flere perforeringer i lektene, men at større senteravstand fører til større fuktbevegelser i trevirket. Dette diskuteres videre i kapittel 6.3.

En annen lekkasjeutvikling ble observert for prøvene med teip. Mens prøvene uten teip hadde en stigende lekkasjeutvikling gjennom fuktsyklusene, var de høyeste lekkasjene for teipprøvene målt etter første oppfukning. Deretter var trenden for M150 og M300 synkende, mens M450 hadde en flat utviklingstrend. I motsetning til prøvene uten teip, hadde prøvene med teip de største lekkasjene etter oppfukning og de minste lekkasjene etter uttørking. Dette tyder på at teipen har større luftgjennomgang når den er fuktig. I tillegg er det sannsynlig at utvidelser i teipen som følge av oppfukningen har ført til at perforeringshullene fra festemidlene også er blitt utvidet. Videre kan uttørkingen ha ført til at de utvidede hullene ble tettet igjen da teipen tørket og trakk seg sammen.

Fuktsyklusene som prøvene ble utsatt for førte til krymp og svelling i trevirket, som videre førte til deformasjoner. Eksempler på slike deformasjoner er vist i Figur 56 og 57. Det ble observert en sammenheng mellom deformasjoner og luftlekkasjer i forsøket der betydelige deformasjoner ga en økning i prøvenes lekkasjer. Årsaken til dette er trolig at kontaktflaten mellom vindspærreskjøt, lekt og stender reduseres. Lektens klemeffekt blir dermed dårligere, og sprekke som dannes fører til større luftlekkasjer. Trevirkets reduksjon og økning i volum som følge av henholdsvis krymp og svelling henger sammen med luftlekkasjene som ble målt i forsøket, og resultatene tilsier at tørt trevirke har større luftgjennomgang enn rått trevirke. For prøvene uten teip var ikke bare luftlekkasjene størst etter uttørking, også standardavvikene var størst i disse målingene. Trolig skyldes denne variasjonen blant annet forskjeller blant prøvene i hvor store deformasjoner uttørkingen førte til, og dette ble også observert underveis i forsøket.



**Figur 56: Bøying i lekt**



**Figur 57: Vindskjevhet i stender**

### 6.3 Festemidlenes senteravstand

I forsøket ble det observert at senteravstanden mellom festemidlene i lektene i en klemt skjøt spiller en stor rolle for luftlekkasjen gjennom skjøten. Det er en direkte sammenheng mellom festemidlenes senteravstand og lektens klemeffekt samt antall perforeringer i lekten. Liten senteravstand gir god klemeffekt, men samtidig mange perforeringer og mulige lekkasjepunkter. For teipede klemte skjøter vil liten senteravstand mellom festemidlene i tillegg medføre mange perforeringer i teipen. Større senteravstand gir færre perforeringer, men fører også til dårligere klemeffekt.

Gjennom alle fuktsyklusene i forsøket ble de minste lekkasjene målt for prøver der senteravstanden mellom festemidlene var 300 mm. Dette gjaldt både for prøver med og uten teip, med ett unntak. I den initielle luftlekkasjemålingen hadde M450 mindre lekkasjer enn M300, og årsaken til dette er trolig at M450 hadde færre perforeringer i teipen enn M300. Denne målingen ble gjort rett etter monteringen av prøvene og før uttørkingen og oppfuktingen begynte. På dette tidspunktet hadde det ikke oppstått noen fuktbevegelser i trevirket og klemeffekten til lektene var tilnærmet like for alle prøver. Dermed var de initielle lekkasjene i all hovedsak avhengig av antall perforeringer i lektene og teipen. Et måleresultat som strider mot denne konklusjonen er den initielle luftlekkasjen til U450, men som vist i Figur 42 er standardavviket for denne målingen relativt stort. Med kun tre måleresultater per parameterkombinasjon for hver testrunde, er den gjennomsnittlige luftlekkasjen sårbar for verdier som er urealistisk høye eller lave. Dersom prøveutvalget hadde vært større, hadde den gjennomsnittlige, initielle luftlekkasjen til U450 med all sannsynlighet vært lavere enn lekkasjene i U150 og U300. Nøyaktigheten til måleresultatene utover i fuktsyklusene er noe vanskeligere å vurdere på grunn av at luftlekkasjen vil avhenge av flere faktorer som blant annet deformasjoner.

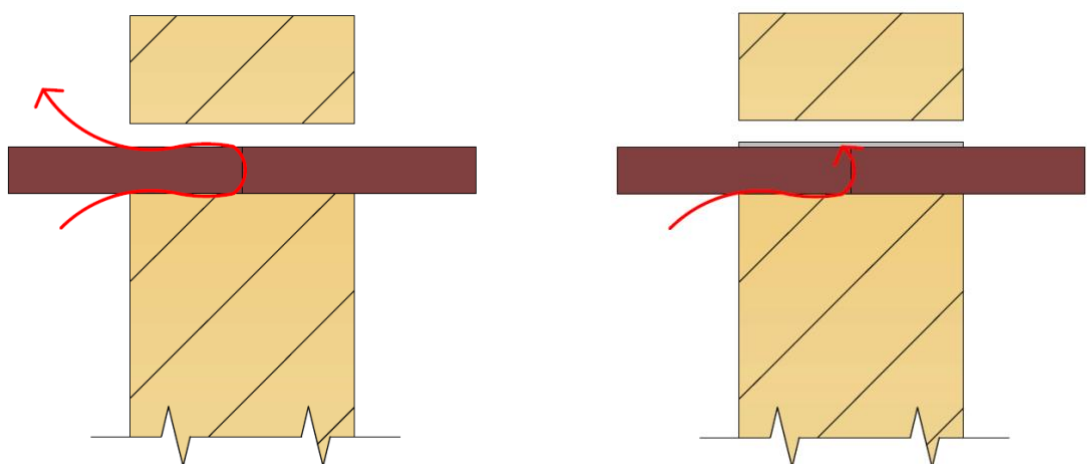
Som tidligere nevnt fører uttørking og oppfukting til deformasjoner i trevirket, og dette kan ha innvirkning på lektens klemeffekt. Figur 56 viser et eksempel på redusert klemeffekt på grunn av bøyning i lekten. Sprekken som dannes mellom vindspærreskjøten og lekten sørger for større luftlekkasjer gjennom skjøten. Senteravstanden mellom festemidlene i prøven i Figur 56 er 450 mm, og med en mindre senteravstand ville klemeffekten vært større slik at det ikke ville oppstått en like stor sprekke. Resultatene fra målingene og observasjoner som ble gjort underveis i forsøket tilsier at lektenes klemeffekt betyr mye for luftlekkasjene både for prøver med og uten teip. Dersom luftlekkasjen i prøvene med teip kun var avhengig av antall perforeringer i teipen, ville lekkasjene i M450 vært lavere enn i M300 gjennom fuktsyklusene. Lekkasjene i M450 er i gjennomsnitt 56 % høyere enn i M300, som betyr at reduksjonen i klemeffekt som følge av deformasjoner var større for M450 på grunn av færre festemidler. Resultatene viser at lekkasjene i M150 er større enn i M450 frem til andre uttørking, deretter synker luftlekkasjen i M150 mens M450 har en flat lekkasjeutvikling. Dette tyder på at en reduksjon i lektens klemeffekt har større innvirkning på luftlekkasjene enn et høyt antall perforeringer i lekten og teipen i et større tidsperspektiv. En lignende trend kan observeres også for prøvene uten teip. U150 har større luftlekkasjer enn U450 til og med andre uttørking, og deretter er lekkasjene i U150 og U450 tilnærmet like. Det er uvisst hvordan lekkasjeutviklingen videre ville ha sett ut, men det er svært sannsynlig at den stigende lekkasjetrenden ville fortsatt for både U150 og U450, og at økningen i U450 ville vært større enn i U150.

## 6.4 Effekten av teip

Resultatene viser at teiping av skjøter har god effekt for alle prøvene, uavhengig av om festemidlenes senteravstand er 150, 300 eller 450 mm. Diagrammene i kapittel 5.3 viser forskjellen mellom luftlekkasjene til prøvene med og uten teip gjennom fuktskyklusene. Gevinsten av teip ser ut til å være størst etter uttørking, og noe mindre etter oppfukting. Dette stemmer godt med tanke på at lekkasjene til prøvene uten teip var størst etter uttørking, mens prøvene med teip hadde de største lekkasjene etter oppfukting.

Luftlekkasjene i prøvene med teip ser ut til å påvirkes av fuktskyklusene i mindre grad enn prøvene uten teip. En forklaring på dette kan være at prøvene uten teip er mer avhengige av klemeffekten fra lektene for å opprettholde lufttettheten. Fuktbevegelser kan føre til deformasjoner i lekten som gjør at det oppstår en åpning mellom lekten og vindsperra. Dermed kan luft enklere strømme gjennom skjøten, og dette er illustrert i Figur 58. Dersom det er brukt teip over skjøten vil ikke deformasjoner i lekten ha like stor innvirkning på lufttettheten, fordi teipen vil fungere som en ekstra sikkerhet mot luftlekkasjer. Den reduserte klemeffekten som kommer av deformasjoner vil uansett føre til en økning i luftlekkasjen, men sammenlignet med økningen som oppstår for vindsperrskjøter uten teip vil den være relativt liten. Bruk av teip over skjøtene gjør dermed at deformasjoner i lektene ikke er like kritisk for lufttettheten.

I tillegg til å undersøke hvilken effekt teipen hadde for luftlekkasjen var et interessant aspekt ved forsøket å se på hvordan teipen ble påvirket av fuktforandringene. Dersom det skal være hensiktsmessig å bruke tid og arbeidskraft på å teipe alle vindsperrskjøter, må teipen beholde funksjonen over tid slik at lufttettheten opprettholdes. Resultatene viser at differansen mellom lekkasjene for prøvene med og uten teip øker utover i fuktskyklusene, og dette tyder på at teipen har beholdt funksjonen. Dersom differansen hadde blitt gradvis mindre ville det vært en indikasjon på at teipen ikke hadde tålt fuktforandringene. Det er verdt å nevne at det ble gjennomført kun tre fuktskykluser i laboratorieforsøket, og sett i et større tidsperspektiv er dette for lite til å kunne si noe om teipens holdbarhet over lengre tid. Resultatene viser en synkende eller flat lekkasjeutvikling for prøvene med teip, men det er uvisst hvordan utviklingen ville ha sett ut med enda flere sykluser. Det er nok lite sannsynlig at den synkende trenden ville fortsatt, men en flat lekkasjeutvikling kan være realistisk. Trolig vil lufttettheten være direkte avhengig av teipen etter at lektens klemeffekt er redusert på grunn av deformasjoner. Dermed vil luftlekkasjen sannsynligvis holdes konstant så lenge teipens funksjon opprettholdes.



**Figur 58: Luftgjennomgang ved deformasjoner i klemler for vindsperrskjøter uten teip (venstre) og med teip (høyre)**



## 7 Konklusjon

Resultatene i forsøket viser at fuktskykluser har stor innvirkning på lufttettheten i klemte vindspærreskjøter. For klemte skjøter uten teip var luftlekkasjene størst etter uttørring og minst etter oppfukning, med en stigende lekkasjetrend fra syklus til syklus. Teipede skjøter hadde størst lekkasjer etter oppfukning. Lekkasjetrenden til skjøter med teip var avhengig av senteravstanden mellom festemidlene i lekten, og skjøter der senteravstanden var 150 og 300 mm hadde en synkende trend etter første oppfukning. Lekkasjetrenden var flat for teipede skjøter med 450 mm senteravstand. Generelt ble lufttettheten i skjøter uten teip mer påvirket av fuktskykluser enn i teipede skjøter.

Festemidlenes senteravstand er direkte knyttet til antall perforeringer i lektene samt antall perforeringer i teipen for teipede skjøter. I tillegg avhenger lektenes klemmeffekt av senteravstanden mellom festemidlene. En stor senteravstand gir få perforeringer og lekkasjepunkter samtidig som det er større risiko for at klemmeeffekten reduseres på grunn av deformasjoner i lektene. Forsøksresultatene viser at redusert klemmeffekt som følge av deformasjoner har større innvirkning på lufttettheten på sikt enn det liten senteravstand og mange perforeringer har. Totalt sett vil dermed skjøter der festemidlenes senteravstand er 450 mm føre til større luftlekkasjer sammenlignet med skjøter med 150 mm senteravstand mellom festemidlene.

Bruk av teip i klemte vindspærreskjøter gir en betydelig reduksjon i luftlekkasjer. Forsøksresultatene viser god effekt av teip for alle senteravstandene som ble testet, og den største reduksjonen ble observert for skjøtene med 450 mm senteravstand mellom festemidlene. Effekten av teip avhenger i stor grad av antall perforeringer, og lave senteravstander gir mange perforeringer og større luftlekkasjer. Resultatene viser også at lektenes klemmeffekt er viktig for skjøtenes lufttetthet selv ved bruk av teip. For at skjøtene skal være lufttette over tid, er det viktig at teipen har god holdbarhet og tåler fuktforandringene den utsettes for. Funksjonen til teipen ble opprettholdt gjennom fuktskyklusene i forsøket, men det er vanskelig å forutsi hvordan teipen vil fungere i et lengre tidsperspektiv.

En generell anbefaling for utforming av vindspærreskjøter som gir best mulig lufttetthet over tid er 300 mm senteravstand mellom festemidlene og bruk av teip over skjøten. Denne løsningen gir god klemmeffekt som motvirker store deformasjoner i lekten samtidig som antallet perforeringer i lekten og teipen er tilstrekkelig lavt.





## 8 Videre arbeid

I en videreføring av arbeidet i denne masteroppgaven vil det være hensiktsmessig å gjennomføre enda flere fuktskykluser enn det som ble gjort i dette laboratorieforsøket. Selv om det er mulig å se en trend i lekkasjeutviklingen for dette forsøket, er det uvisst hvordan utviklingen vil fortsette videre. Spesielt vil det være nyttig å undersøke hvordan teipens funksjon er etter et større antall sykluser. Det kan også være relevant å gjennomføre fuktskykluser som er mer nært virkelige forhold enn ved bruk av akselererte fuktskykluser. På denne måten kan det undersøkes om akselererte uttørkinger og oppfuktinger fører til mer slitasje på vindspærreskjøten, og dermed større luftlekkasjer enn det naturlige fuktvariasjoner gjør. Sykluser som gjenspeiler virkelige forhold i større grad, vil samtidig føre til måleresultater som er nærmere virkeligheten.

Bruk av teip i vindspærreskjøter fører til mindre luftlekkasjer og et mindre energibehov, men det medfører også ekstra kostnader og arbeid. Som en videreføring av oppgaven vil det være interessant å gjøre en kost/nytte-evaluering av teip der gevinsten i form av redusert energibehov sammenlignes med de ekstra kostnadene og arbeidet bruk av teip innebærer. En slik evaluering vil gi svar på om det er verdt å bruke mer penger, tid og arbeidskraft på bruk av teip for å redusere lekkasjetallet til en bygning.

En annen evaluering som vil være interessant å gjennomføre er en sammenligning av energibesparelsen og teipens miljøbelastning. Teiping av vindspærreskjøter i en bygning krever store mengder teip, og spesielt ved bruk av vindspærreplater. Det er ikke bare teipens kostnader som er relevant i dette tilfellet, men også hvilken miljøpåvirkning den har knyttet til blant annet produksjon, distribusjon og avhending. Ved å se på EPD-er (Environmental Product Declaration) for aktuelle teipprodukter er det mulig å tallfeste miljøbelastningen teipen har ved bruk av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Videre kan dette sammenlignes med spart energi.



# Referanser

- Bergby, J. C. (2011a) *Lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampsperrsjikt*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Bergby, J. C. (2011b) *Lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampsperrsjikt*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- BMI (2020) *Windbreak*. Tilgjengelig fra: <https://www.maxbo.no/vindsperre-windbreak-1-30x50m-bmi-p826792/> (Hentet 19.01.21)
- DiBK (2021) *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/> (Hentet 25.01.21)
- Edwardsen, K. I. og Ramstad, T. Ø. (2014) *Trehus*. 10. utg. Oslo: SINTEF akademisk forlag.
- Engen, A. U. (2019) *Luftgjennomgang i vindsperrskjøten – Innledende rapport*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Engen, A. U. (2020) *Lufttetthet i klemte vindsperrskjøter og fuktteknisk analyse av trebjelkelagets kantbjelke*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Fufa, S. M. *et al.* (2018) Durability evaluation of adhesive tapes for building applications, *Construction and Building Materials*, 161, s. 528-538. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.056
- Geving, S., Norvik, Ø. og Gullbrekken, L. (2019) The Effect of Repeated Moisture Cycles on the Air Tightness of Traditional Clamped Vapour Barrier Joints, *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 24 (1), s. 44-51. doi: 0.5755/jj01.sace.24.1.22159
- Gullbrekken, L. *et al.* (2019) Durability of traditional clamped joints in the vapour barrier layer: experimental and numerical analysis, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46 (11), s. 996-1000. doi: 10.1139/cjce-2018-0593
- Gyproc (2016) *Gyproc GUB 9 Bris™ – Vindtettingsplate*. Tilgjengelig fra: <http://wpp.cobuilder.com/DocumentHandler?params=9FFBEEE4952C5E860BDA15ED05377C0584FB9C9BB220D99C80FB49F6FEB46D3D> (Hentet 19.01.21)
- Hunton (2018) *Monteringsanvisning Hunton Vindtett*. Tilgjengelig fra: [https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/04/hunton-vindtett\\_monteringsanvisning\\_web-1.pdf](https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/04/hunton-vindtett_monteringsanvisning_web-1.pdf) (Hentet 19.01.21)
- Isola (2016) *Isola vindsperrer*. Tilgjengelig fra: <https://media.bluestonepim.com/571075b9-1b51-47ff-b416-bc99a7eef69d/0f053018-2c5d-4185-b03d-89e3d350b9eb/sZ4LZZbUgxSFaq4IvmdBsOdoG/eq0jWFogctZzk0dZyWgN6VfcO.pdf> (Hentet 19.01.21)
- Kalamees, T., Üllar, A. og Pärnalaas, M. (2017) Air leakage levels in timber frame building envelope joints, *Building and Environment*, 116, s. 121-129. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.02.011

- Kosiński, P., Wójcik, R. og Semen, B. (2019) Experimental study on the deterioration of thermal insulation performance due to wind washing of the cavity insulation in leaky walls, *Science and Technology for the Built Environment*, 25(9), s. 1164-1177. doi: 10.1080/23744731.2019.1634420
- Norgips (2020) *Vindtetting*. Tilgjengelig fra: <https://export.byggjeneste.no/api/media/58b6f7b4-1448-49d9-8046-114cb2e61769?download=false> (Hentet 19.01.21)
- Norvik, Ø. (2018) *Fuktvariasjoners innflytelse på lufttettheten til klemte skjøter i dampsperran – og effekten av teip*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Sagen, V. (2003) *Vindsperrers lufttetthet avhengig av fuktighet og festemåte av klemløstene – Eksperimentelle undersøkelser*. Prosjektoppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Selmer, J. B. (2013) *Festemidlers innflytelse på lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampsperrsjikt*. Masteroppgave. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- SIGA (2020) *Montering av vindsperre*. Tilgjengelig fra: [https://www.siga.swiss/\\_Resources/Persistent/f/3/f/c/f3fc382da9a6eb8c83f0e3fff1ca2020cc6127f3/Montering-av-vindsperre\\_no.pdf](https://www.siga.swiss/_Resources/Persistent/f/3/f/c/f3fc382da9a6eb8c83f0e3fff1ca2020cc6127f3/Montering-av-vindsperre_no.pdf) (Hentet 19.01.21)
- SINTEF (2003) *573.121 Materialer til luft- og dampetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer\\_til\\_luft\\_og\\_dampetting](https://www.byggforsk.no/dokument/598/materialer_til_luft_og_dampetting) (Hentet 26.01.21)
- SINTEF (2008) *523.002 Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/348/yttervegger\\_over\\_terreng\\_egenskaper\\_og\\_konstruksjonsprinsipper\\_krav\\_og\\_anbefalinger](https://www.byggforsk.no/dokument/348/yttervegger_over_terreng_egenskaper_og_konstruksjonsprinsipper_krav_og_anbefalinger) (Hentet 29.01.21)
- SINTEF (2013a) *542.003 Totrinnstetning mot slagregn på fasader. Luftede kledninger og fuger*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/470/totrinnstetning\\_mot\\_slagregn\\_paa\\_fasader\\_luftede\\_kledninger\\_og\\_fuger](https://www.byggforsk.no/dokument/470/totrinnstetning_mot_slagregn_paa_fasader_luftede_kledninger_og_fuger) (Hentet 26.01.21)
- SINTEF (2013b) *520.401 Luftetting av bygninger. Framgangsmåte for å oppnå lavt lekkasjetall*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/4110/luftetting\\_av\\_bygninger\\_framgangsmate\\_for\\_aa\\_oppnaa\\_lavt\\_lekkasjetall](https://www.byggforsk.no/dokument/4110/luftetting_av_bygninger_framgangsmate_for_aa_oppnaa_lavt_lekkasjetall) (Hentet 26.01.21)
- SINTEF (2014) *523.251 Bindingsverk av tre i småhus. Dimensjonering og utførelse*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk\\_av\\_tre\\_i\\_smaahus\\_dimensjonering\\_og\\_utfoerelse](https://www.byggforsk.no/dokument/358/bindingsverk_av_tre_i_smaahus_dimensjonering_og_utfoerelse) (Hentet 26.01.21)
- SINTEF (2015) *571.523 Trevirke. Treslag og materialegenskaper*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke\\_treslag\\_og\\_materialegenskaper](https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialegenskaper) (Hentet 26.01.21)
- SINTEF (2019) *TightEN*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/prosjekter/2019/tighten/> (Hentet 06.04.21)

- SINTEF (2020) 523.255 *Yttervegger av bindingsverk. Varmeisolering og tetting*. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/361/yttervegger\\_av\\_bindingsverk\\_varmeisolering\\_og\\_tetting](https://www.byggforsk.no/dokument/361/yttervegger_av_bindingsverk_varmeisolering_og_tetting) (Hentet 26.01.21)
- Standard Norge (2001) *NS-EN 1296 Tetningsmaterialer på rull – Takbelegg av asfalt, plast eller gummi – Metode for langvarig kunstig aldring i varme*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=137580> (Hentet 27.01.21)
- Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk - grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Tronstad, S. (2002) *Tre og fuktighet – fra produsent til forbruker*. 1. utg. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Uvsløkk, S. (1996) The importance of wind barriers for insulated timber frame constructions, *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, 20(1), s. 40-62. doi: 10.1177/109719639602000105



# Vedlegg

## Vedlegg 1: Resultater fra luftlekkasjemålinger

Initiell, prøver uten teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644	Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]			
			30			50						70		
			30	50	70	30	50	70				30	50	70
Nr.	Prøve	Vekt [g]	Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]		
1	U150-1-1	3514,4	57,1	89,3	117,4	48,8	78,7	103	100,7427	162,4683	212,6332	158,6147		
2	U150-1-2	3534,9												
3	U150-2-1	3492,0	54,1	83,6	107,2	45,8	73,0	92,8	94,54952	150,7012	191,5763	145,6090		
4	U150-2-2	3286,4												
5	U150-3-1	3662,5	48,9	75,3	109,3	40,6	64,7	94,9	83,81464	133,5667	195,9116	137,7643		
6	U150-3-2	3561,0												
7	U300-1-1	3649,2	48,8	76,2	100,5	40,5	65,6	86,1	83,6082	135,4246	177,7448	132,2592		
8	U300-1-2	3500,6												
9	U300-2-1	3373,0	52,7	78,2	98,8	44,4	67,6	84,4	91,65936	139,5534	174,2354	135,1494		
10	U300-2-2	3352,2												
11	U300-3-1	3379,1	47,5	72,8	94,8	39,2	62,2	80,4	80,92448	128,4057	165,9778	125,1026		
12	U300-3-2	3438,4												
13	U450-1-1	3346,6	30,8	44,6	58,6	22,5	34,0	44,2	46,449	70,1896	91,24648	69,2950		
14	U450-1-2	3267,1												
15	U450-2-1	3330,3	147,5	212,9	277,1	139,2	202,3	262,7	287,3645	417,6281	542,3179	415,7702		
16	U450-2-2	3467,4												
17	U450-3-1	3230,8	43,8	64,0	82,3	35,5	53,4	67,9	73,2862	110,239	140,1728	107,8993		
18	U450-3-2	3257,3												

Initiell, prøver med teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644	Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]			
			30			50						70		
			30	50	70	30	50	70				30	50	70
Nr.	Prøve	Vekt [g]	Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]		
1	M150-1-1	3198,6	13,0	19,7	25,0	6,5	10,5	12,2	13,4186	21,6762	25,18568	20,0935		
2	M150-1-2	3318,5												
3	M150-2-1	3005,6	31,2	44,7	55,0	24,7	35,5	42,2	50,99068	73,2862	87,11768	70,4649		
4	M150-2-2	3010,6												
5	M150-3-1	3188,5	72,9	104,7	129,9	66,4	95,5	117,1	137,0762	197,1502	241,7412	191,9892		
6	M150-3-2	2971,7												
7	M300-1-1	2944,5	48,3	65,6	82,5	41,8	56,4	69,7	86,29192	116,4322	143,8887	115,5376		
8	M300-1-2	3106,9												
9	M300-2-1	3070,4	21,8	30,4	39,3	15,3	21,2	26,5	31,58532	43,76528	54,7066	43,3524		
10	M300-2-2	3176,1												
11	M300-3-1	3165,7	29,6	43,3	54,8	23,1	34,1	42,0	47,68764	70,39604	86,7048	68,2628		
12	M300-3-2	3139,5												
13	M450-1-1	3383,9	15,1	25,6	35,1	8,6	16,4	22,3	17,75384	33,85616	46,03612	32,5487		
14	M450-1-2	3171,2												
15	M450-2-1	3168,7	12,1	18,1	25,2	5,6	8,9	12,4	11,56064	18,37316	25,59856	18,5108		
16	M450-2-2	3175,4												
17	M450-3-1	3146,9	21,2	30,4	40,6	14,7	21,2	27,8	30,34668	43,76528	57,39032	43,8341		
18	M450-3-2	3219,5												









Fukt 2, prøver uten teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644				
			30			50						70		
			17,5	32,5	48,6									
Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]						Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]		
Nr.	Prøve	Vekt [g]	30	50	70	30	50	70	30	50	70			
1	U150-1-1	3476,7												
2	U150-1-2	3472,6	91,3	143,8	196,9	73,8	111,3	148,3	152,3527	229,7677	306,1505	229,4237		
3	U150-2-1	3422,9												
4	U150-2-2	3269,2	111,2	172,3	238,7	93,7	139,8	190,1	193,4343	288,6031	392,4424	291,4933		
5	U150-3-1	3588,0												
6	U150-3-2	3507,1	126,8	205,2	279,8	109,3	172,7	231,2	225,6389	356,5219	477,2893	353,1500		
7	U300-1-1	3588,2												
8	U300-1-2	3435,3	102,6	158,8	220,1	85,1	126,3	171,5	175,6804	260,7337	354,0446	263,4863		
9	U300-2-1	3307,1												
10	U300-2-2	3302,2	76,4	118,8	160,2	58,9	86,3	111,6	121,5932	178,1577	230,387	176,7126		
11	U300-3-1	3312,1												
12	U300-3-2	3465,3	107,4	169,3	234,8	89,9	136,8	186,2	185,5896	282,4099	384,3913	284,1303		
13	U450-1-1	3301,2												
14	U450-1-2	3210,5	96,3	152,6	211,4	78,8	120,1	162,8	162,6747	247,9344	336,0843	248,8978		
15	U450-2-1	3284,4												
16	U450-2-2	3405,8	141,2	222,7	310,7	123,7	190,2	262,1	255,3663	392,6489	541,0792	396,3648		
17	U450-3-1	3189,3												
18	U450-3-2	3199,4	136,6	214,3	303,2	119,1	181,8	254,6	245,870	375,3079	525,5962	382,2581		

Fukt 2, prøver med teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644				
			30			50						70		
			15,8	20,8	27,8									
Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]						Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]		
Nr.	Prøve	Vekt [g]	30	50	70	30	50	70	30	50	70			
1	M150-1-1	3209,7												
2	M150-1-2	3354,5	24,1	35,6	46,4	8,3	14,8	18,6	17,13452	30,55312	38,39784	28,6952		
3	M150-2-1	3012,4												
4	M150-2-2	2978,3	53,4	76,7	95,9	37,6	55,9	68,1	77,62144	115,400	140,5856	111,2023		
5	M150-3-1	3182,4												
6	M150-3-2	2962,7	105,5	152,5	197,9	89,7	131,7	170,1	185,1767	271,8815	351,1544	269,4042		
7	M300-1-1	2919,6												
8	M300-1-2	3116,0	60,4	87,9	111,6	44,6	67,1	83,8	92,07224	138,5212	172,9967	134,5301		
9	M300-2-1	3064,1												
10	M300-2-2	3167,2	32,5	42,7	55,3	16,7	21,9	27,5	34,47548	45,21036	56,771	45,4856		
11	M300-3-1	3122,6												
12	M300-3-2	3107,0	74,5	104,7	134,3	58,7	83,9	106,5	121,1803	173,2032	219,8586	171,4140		
13	M450-1-1	3372,4												
14	M450-1-2	3179,7	102,2	147,1	194,9	86,4	126,3	167,1	178,3642	260,7337	344,9612	261,3530		
15	M450-2-1	3169,3												
16	M450-2-2	3166,5	77,2	108,5	140,5	61,4	87,7	112,7	126,7542	181,0479	232,6579	180,1533		
17	M450-3-1	3143,9												
18	M450-3-2	3242,1	67,4	99,3	132,4	51,6	78,5	104,6	106,523	162,0554	215,9362	161,5049		

Tørk 3, prøver uten teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644				
			30			50						70		
			17,8	29,7	44,0									
Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]					
Nr.	Prøve	Vekt [g]	30	50	70	30	50	70	30	50	70			
1	U150-1-1	3292,7												
2	U150-1-2	3280,7	184,2	308,6	488,4	166,4	278,9	444,4	343,5162	575,7612	917,4194	612,2322		
3	U150-2-1	3252,9												
4	U150-2-2	3085,8	279,1	538,2	932,3	261,3	508,5	888,3	539,4277	1049,747	1833,807	1140,9939		
5	U150-3-1	3390,4												
6	U150-3-2	3309,6	132,4	203,3	275,5	114,6	173,6	231,5	236,5802	358,3798	477,9086	357,6229		
7	U300-1-1	3386,4												
8	U300-1-2	3236,4	103,1	155,8	213,1	85,3	126,1	169,1	176,0933	260,3208	349,090	261,8347		
9	U300-2-1	3124,6												
10	U300-2-2	3111,5	75,5	110,6	145,8	57,7	80,9	101,8	119,1159	167,010	210,1559	165,4273		
11	U300-3-1	3122,7												
12	U300-3-2	3262,1	183,2	299,5	449,1	165,4	269,8	405,1	341,4518	556,9751	836,2884	578,2384		
13	U450-1-1	3128,0												
14	U450-1-2	3047,3	164,9	254,4	357,6	147,1	224,7	313,6	303,6732	463,8707	647,3958	471,6466		
15	U450-2-1	3099,0												
16	U450-2-2	3221,3	285,1	530,2	890,7	267,3	500,5	846,7	551,8141	1033,232	1747,927	1110,9913		
17	U450-3-1	3018,7												
18	U450-3-2	3027,2	222,1	351,8	522,7	204,3	322,1	478,7	421,7569	664,9432	988,2283	691,6428		

Tørk 3, prøver med teip			Egenlekkasje [Pa]						Omregningsfaktor fra Pa til l/hm gitt 1,8 m skjøt	2,0644				
			30			50						70		
			11,5	21,6	36,4									
Luftlekkasje m/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje u/ egenlekkasje [Pa]			Luftlekkasje [l/hm]			Luftlekkasje ved 50 Pa [l/hm]					
Nr.	Prøve	Vekt [g]	30	50	70	30	50	70	30	50	70			
1	M150-1-1	3043,0												
2	M150-1-2	3175,8	21,6	36,2	48,5	10,1	14,6	12,1	20,85044	30,14024	24,97924	25,3233		
3	M150-2-1	2850,4												
4	M150-2-2	2830,7	33,9	51,8	67,6	22,4	30,2	31,2	46,24256	62,34488	64,40928	57,6656		
5	M150-3-1	3029,0												
6	M150-3-2	2811,7	105,1	144,5	184,2	93,6	122,9	147,8	193,2278	253,7148	305,1183	250,6870		
7	M300-1-1	2776,5												
8	M300-1-2	2968,8	52,9	75,9	96,1	41,4	54,3	59,7	85,46616	112,0969	123,2447	106,9359		
9	M300-2-1	2905,6												
10	M300-2-2	3020,9	24,1	38,7	53,7	12,6	17,1	17,3	26,01144	35,30124	35,71412	32,3423		
11	M300-3-1	2988,4												
12	M300-3-2	2967,6	39,4	59,4	77,3	27,9	37,8	40,9	57,59676	78,03432	84,43396	73,3550		
13	M450-1-1	3205,7												
14	M450-1-2	3039,4	86,2	125,1	160,7	74,7	103,5	124,3	154,2107	213,6654	256,6049	208,1603		
15	M450-2-1	3041,9												
16	M450-2-2	3030,9	91,3	140,9	204,5	79,8	119,3	168,1	164,7391	246,2829	347,0256	252,6826		
17	M450-3-1	3016,5												
18	M450-3-2	3082,7	75,4	111,4	146,5	63,9	89,8	110,1	131,9152	185,3831	227,2904	181,5296		

## Vedlegg 2: NTNU-innlegg i Byggeindustrien

Artikkelen publiseres i Byggeindustrien nr. 11/2021

### Lufttette bygninger med teip



*Skjøter i GU-vindsperreplater teipet før montering av lekter. Langvarig nedfuktig før montering av lektene kan gi redusert lufttetthet i skjøten. Foto: Tore Kvande.*

**Bruk av teip i skjøter og gjennomføringer er blitt mer vanlig på grunn av stadig strengere krav til lufttetthet i bygninger. I en masteroppgave ved NTNU er det undersøkt hvordan teip reduserer luftlekkasjer i skjøtene i vindsperra, og hvordan luftlekkasjene påvirkes av fuktforandringer. Forsøket indikerer at teip gir mer lufttette skjøter, også over tid.**

**Ingrid Krokann Storrø og Stig Geving**

Institutt for bygg- og miljøteknikk

**Lars Gullbrekken**

SINTEF Community

#### **Lufttette bygninger**

Bygningskroppen har to lufttette sjikt som skal hindre luft i å strømme gjennom eller inn i ytterkonstruksjonen. Det innvendige sjiktet består av dampsperra, og vindsperra utgjør det utvendige sjiktet. Skjøtene i begge sjiktene er svake punkter som er spesielt utsatte for luftlekkasjer, og utførelsen av skjøtene er dermed viktig for å begrense lekkasjene. Dersom skjøtene ikke er tilstrekkelig lufttette, vil det føre til et større energibehov samt økt risiko for fuktskader. I tillegg kan varmeisolasjonen få redusert isolasjonsevne på grunn av uteluft som strømmer inn gjennom lekkasjer i vindsperra.

## Målinger av luftlekkasjer

I en masteroppgave ved NTNU er det undersøkt i hvilken grad bruk av teip kan redusere luftlekkasjer i skjøtene i vindsperra, og hvordan fuktforandringer påvirker lekkasjene. Arbeidet er utført som en del av forskningsprosjektet TightEN. Det ble gjennomført et laboratorieforsøk der det ble gjort målinger av luftlekkasjer i prøver bestående av klemte vindsperreskjøter. Halvparten av prøvene var bygd opp som tradisjonelle klemte skjøter, med en plateskjøt klemt mellom en stender og en lekt. Den andre halvparten var i tillegg utstyrt med teip mellom skjøten og lekten. Prøvene ble utsatt for fuktskykluser for å undersøke hvordan uttørking og oppfukning mellom målingene påvirket luftlekkasjene. Fuktskyklusene bestod av tre uttørkinger og to oppfukninger. Endringer i prøvenes fuktinnhold førte til fuktbevegelser i stenderen og lekta, som gjorde at luftlekkasjen i skjøten endret seg med fuktvariasjonene. På bakgrunn av fuktsimuleringer ble det bestemt at fuktinnholdet i stenderen skulle variere mellom 9 og 15 %, som er fuktnivåer som oppstår i en virkelig yttervegg.

## Effekten av fuktvariasjoner og teip

Målingene viste at lekkasjene i skjøtene uten teip økte etter uttørking og sank etter oppfukning. De teipede skjøtene hadde størst lekkasjer etter oppfukning, som indikerer at teipen er mindre lufttett når den er fuktig. Lekkasjeutviklingen gjennom fuktskyklusene var stigende for skjøtene uten teip, mens prøvene med teip hadde en flat lekkasjeutvikling etter første oppfukning. Målingene viste også at teiping av skjøtene i snitt kan redusere luftlekkasjene med 55 % sammenlignet med tradisjonelle klemte skjøter. Størrelsen på lekkasjene avhenger av senteravstanden mellom festemidlene i lektene på utsiden av skjøten. Senteravstanden har direkte sammenheng med antall perforeringer i teipen, og lektens klemmeffekt. For best mulig lufttetthet bør senteravstanden være stor nok til at antallet perforeringer begrenses, men liten nok til å sikre god klemmeffekt.

## Teipens holdbarhet

Bygninger bygges normalt med en levetid på 50-60 år. Etter ferdigstilling er vedlikehold i vindsperrsjiktet vanskelig, og en utskiftning av teipen vil være lite aktuelt. Dermed må teipen tåle påkjenningene den utsettes for i hele bygningens levetid. Hvis ikke vil luftlekkasjene øke og sørge for økt energibehov over tid. Målingene som ble gjort i forsøket omfatter kun tre fuktskykluser, og det er dermed ikke nok grunnlag til å si noe om hvordan teipen vil fungere over mange tiår. Selv om teipen så ut til å tåle fuktvariasjonene i forsøket, kreves det enda mer forskning på holdbarheten til teipprodukter.



*Limt skjøt av UV-bestendig vindsperrereduk uten bruk av klemming i tillegg. Slike løsninger stiller strenge krav til utførelsen og limets bestandighet over tid for at skjøten skal bli varig tett. Foto: Tore Kvande.*

