



Kunnskap for en bedre verden

Fuktvariasjoners innflytelse på lufttettheten til klemte skjøter i dampsperran

-og effekten av teip

Øyvind Norvik

Master i Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Stig Geving, IBM

Medveileder: Lars Gullbrekken, SINTEF Byggforsk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Institutt for bygg- og miljøteknikk

FORORD

Denne rapporten er skrevet som avsluttende masteroppgave for et 2-årig masterstudium i bygg- og materialteknikk ved NTNU, med studieretning bygg og anlegg og bygnings- og materialteknikk som hovedprofil. Oppgaven er skrevet i samarbeid med SINTEF Byggforsk, og bygger videre på tidligere prosjektoppgave, samt tidligere forskning som er gjort på det aktuelle området.

Oppgaven ser på hvorvidt, og i hvilken grad gjentatte fuktskykluser innvirker på lekkasjeutviklingen av klemte omleggsskjøter, og hvilken gevinst teiping vil gi på sikt, sett fra et energiperspektiv. Arbeidet har i hovedsak bestått av et laboratorieforsøk, hvor forsøksprøver er trykktestet etter gjentatte fuktforandinger. Dette for å avdekke sammenhenger mellom senteravstander og festemidler.

Selv om laboratoriearbeidet til tider har ført til store mengder frustrasjon, vil de utallige timene som har blitt tilbrakt på SINTEF-laben bli sett tilbake på som en, morsom, spennende og ikke minst lærerik avslutning på utdannelsen.

Jeg ønsker å takke hovedveileder Stig Geving og medveileder Lars Gullbrekken for deres bistand med veiledning og fremskaffelse av nødvendig materiale for utførelse av oppgaven.

Jeg vil til slutt ønske å dedisere denne oppgaven til min mor, Karen Ida Siksjø Norvik (1964-2004)

Trondheim, 11.06.2018

Øyvind Siksjø Norvik

SAMMENDRAG

I denne oppgaven er det undersøkt hvorvidt, og i hvilken grad gjentatte fuktsykluser innvirker på lekkasjeutviklingen av klemte omleggsskjøter. I den forbindelse er det gjennomført et laboratorieforsøk hvor i alt 126 trykktester er utført fordelt på 18 forsøksprøver, bestående av omleggsskjøter av 0,15 mm PE-folie klemte mellom stender og påforing. Hver prøve er trykktestet syv ganger etter gjentagende uttørking og oppfuktinger hvor fuktighetsverdiene ved delsyklusene ble valgt i den hensikt å kunne representere årsvariasjonene til et typisk norsk innlandsklima.

Forsøksprøvene er montert med ulike parametere for type festemiddel (maskinspiker – 3,1x90 varmforsinket, kammet 17° og treskruer – 6x120, 5 mm glatt hals) og senteravstand (150 mm, 300 mm 450 mm). Omleggsskjøtene ble også avslutningsvis i forsøket teipet for å avdekke i hvilken grad dette, over et lengre tidsperspektiv, vil være gunstig, sett fra et energiperspektiv.

For oppfukting og trykktesting av prøvene, er det designet og konstruert en innretning som ved siden av å fungere som en damptett boks, for å skynde frem oppfuktingene av prøvene, også har kunnet kobles til SINTEF Byggforsks luftmålingsrigg for testing av prøvenes lekkasjeverdier.

Etter endt endte tester ble lekkasjetallene ved de forskjellige delsyklusene sammenlignet for å avdekke sammenhenger mellom lekkasjeforløpene og sluttlekkasjene, og de forskjellige prøveparameterne for senteravstand og festemiddel.

Resultatene viste at første fuktsyklus medførte merkbare lekkasjeøkninger for alle prøvevariantene. Gjennom fuktsyklusene sås en videre sterk lekkasjeutvikling for SP450 (spiker, 450 mm) som var mindre for SP300, og ikkeeksisterende for SP150. For omleggsskjøtene klemte med skruer kunne det ikke ses noen merkbare videre lekkasjeutvikling for noen av senteravstandene.

Etter de gjentatte syklusene anslås det, på bakgrunn av testresultatene, at skruer festet med en senteravstand på om lag 400 mm vil gi like lekkasjeverdier som maskinspikere festet med en senteravstand nært 190 mm. En senteravstand mindre enn 300 mm viser seg videre å ikke gi noen gevinst ved klemming med skruer.

Gevinsten av teiping vil i stor grad være avhengig av perforeringsgraden som følger av anvendt festemiddel og senteravstand. Teiping av omleggsskjøtene medfører størst reduksjon i lekkasjetall for omleggsskjøtene festet med spiker og hvor senteravstanden er høy. Omvendt gir teiping den minste lekkasjereduksjonen for omleggsskjøter festet med skruer og en lav senteravstand.

Sammenligning av praktisk og teoretisk sprekk etter siste uttørking viste at festemiddelets fastpunkt i påforingen, hos spikeren lå veldig nært toppen av påforingstverrsnittet, lengst fra klemflaten ($r_1 \approx 1$), mens det hos skruen er plassert 63 % av påforingstykkelsen fra klemflaten ($r_1 = 0,63$).

Beregninger gjort av kontorbygget Lysgården og eneboligen Dråpen viser at omleggsskjøtene for begge byggene representerer en liten del av de tillatte lekkasjene, selv ved krav om innfrielse av passivhuskrav på $0,6 \text{ h}^{-1}$.

ABSTRACT

In this thesis, it has been investigated whether and to what extent, repeated moisture cycles affect the leakage of clamped reversal joints. In this way a laboratory test has been carried out, with a total of 126 pressure tests, being carried out in 18 test samples, consisting of repositioning joints of 0.15 mm PE film clamped between posts and lining. Each sample was tested seven times after repeated drying and humidification, where the moisture values of the sub-cycles were chosen for the purpose of representing the annual variations of a typical Norwegian inland climate.

The laboratory test materials are mounted with different parameters for the type of fastener (machine nail - 3.1x90 heat retarded, 17° and wood screws - 6x120, 52mm smooth throat) and center spacing (150mm, 300mm 450mm). The overlap joints were in the end of the trial sealed with adhesive tape, revealing to what extent this, over a longer period of time, will be beneficial, viewed from an energy perspective.

For humidification and pressure testing of the samples, a device has been designed and constructed. In addition to act as a steam proof box, accelerate the humidification of the samples, it also, connected to SINTEF Building Research's air measurement rig, worked as an air pressure box for testing the leakage values of the samples.

In the end of the tests, the leakage numbers of the different sub-cycles were compared to reveal the relationships between the leakage process and the final leakage result, compared with the different test parameters for center distance and fastener.

The results showed that the first moisture cycle resulted in noticeable leakage increases for all sample variants. Throughout the moisture cycles, a further strong leakage development for SP450 (nail 450 mm) was observed, which was less for SP300, and non-existent for SP150. For the joints clamped with screws, no noticeable further leakage development could be observed, for any of the center distances.

After the repeated cycles, based on the test results, it is estimated that screws attached with a center spacing of about 400 mm will provide equal leakage values as machine nails, attached with a center spacing close to 190 mm. A center distance less than 300 mm is also shown to give no gain when attaching with screws.

The gain of using structural adhesive tape, will largely depend on the level of perforation, resulting from the applied fastener and center distance. Adhesive tape on the reversal joints results in the greatest reduction in leakage numbers for the clamped joints, attached with nails and where the center distance is high. Conversely, using tape gives the smallest leakage reduction for clamped joints attached with screws and a low center distance.

Comparison of practical and theoretical crack, after the last drying process, showed that the fastening point of the fastener in the liner, with the nail, lay very close to the top of the lining cross section, far from the clamping surface ($r_l \approx 1$), while the screw is located 63% of the lining thickness, from the clamping surface ($r_l = 0,63$).

Calculations made by the office building Lyngården and the private residence Dråpen, shows that the conversion joints for both buildings represent a small part of the permissible leakages, even in the case of a requirement for the completion of passive housing requirements of 0.6 h^{-1} .

INNHALDSFORTEGNELSE

FORORD.....	I
SAMMENDRAG	II
ABSTRACT	III
FIGURER.....	VI
1. INNLEDNING	1
1.1. FORMÅL.....	1
1.2. OPPBYGNING	1
1.3. BEGRENSNINGER.....	1
2. LITTERATUR	2
2.1. YTTERVEGGER - KRAV OG ANBEFALINGER.....	2
2.2. TRE OG FUKTIGHET	3
2.2.1. FUKTBEVEGELSER.....	5
2.3. KLEMTEORI.....	6
2.4. TIDLIGERE FORSKNING	7
2.4.2. BERGBY (2011).....	7
2.4.3. SELMER (2013)	8
3. ESTIMERTE FUKTVARIASJONER.....	9
4. LABORATORIEFORSØK.....	12
4.1.1. TEST- OG OPPFUKTINGSBOKS	12
4.1.2. PRØVER.....	15
4.1.3. LUFTMÅLINGSRIGG.....	19
4.1.4. FORSØKSPROSEDYRE.....	20
4.1.5. RESULTAT	24
4.1.6. BETYDNINGEN FOR LEKKASJETALL I BYGNINGER.....	31
5. DISKUSJON	35
5.1. FEILKILDER	35
5.1.7. ANALYSE AV TRYKKTESTINGSRESULTATER	36
5.2. FESTEMIDLER OG SENTERAVSTAND	37
5.2.1. ... ETTER ENDTE FUKTSYKLUSER	37
5.2.2. ... GJENNOM FUKTSYKLUSENE	38
5.3. EFFEKTEN AV TEIPING.....	39
5.4. TEORETISK OG MÅLT SPREKK, OG r_l	41

5.5. LEKKASJENES PAKTISKE KONSEKVENNS	42
6. SVAKHETER VED OPPGAVEN.....	43
7. KONKLUSJON	44
8. VIDERE ARBEID	45
REFERANSER	A
VEDLEGG	C

FIGURER

Figur 1 Oppbygning av vegg og definert geometri i Wufi-2D.....	Error! Bookmark not defined.
Figur 2 MDRY-verdier for Gardemoen (Geving & Torgersen, 1997).....	10
Figur 3 Foreslått innvendig fukttilskuddskurve, basert på 10 % år (Geving & Holme, 2012).....	10
Figur 4 Simulert fuktinnhold i stender og påføring.....	11
Figur 5 Oppbygning av skrog.....	13
Figur 6 Oppbygning av oppfuktingsboks.....	14
Figur 7 Oppbygning av testboks.....	14
Figur 8 Montering av forsøksprøver. 1 og 2: montering av PE-folie. 3: Klemming av omlegg mellom stender og lekt.....	16
Figur 9 Festemidler og prøve med teipede omleggsskjøter.....	17
Figur 10 Fastmonterte elektroder for fuktmåling.....	18
Figur 11 Tilkoblingsledninger for avlesning av prøver (1 og 2) og avlesning med protimeter (3).....	18
Figur 12 Prinsippskisse for luftmålingsrigg.....	19
Figur 13 Plassering av termoelement før laminærstrømsselement (1) og innsiden av testboks (2), og tilkobling av lufttilførsel og mikromanometer (3).....	19
Figur 14 Tetting av passasje mellom overlapp av PE-folie under teip.....	20
Figur 15 Prinsipp for montering av prøve i testboks.....	21
Figur 16 Egenlekkasjer ved trykktesting.....	22
Figur 17 Trykktesting av prøve (1) og trykktesting av boksens egenlekkasje (2).....	22
Figur 18 Fuktskyklusforløp av prøver.....	23
Figur 19 Faktiske verdier for fuktinnhold i vekt-% - skrueprøver.....	24
Figur 20 Faktiske verdier for fuktinnhold i vekt-% - spikerprøver.....	24
Figur 21 Lekkasje etter initiell trykktest sortert etter størrelse, 50 Pa overtrykk.....	25
Figur 22 Formatert Excel-ark for analyse av lekkasjevariasjoner.....	26
Figur 23 Skrueprøver med senteravstand 450 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik....	28
Figur 24 Skrueprøver med senteravstand 300 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik....	28
Figur 25 Skrueprøver med senteravstand 150 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik....	28
Figur 26 Spikerprøver med senteravstand 450 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik...	29
Figur 27 Spikerprøver med senteravstand 300 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik...	29
Figur 28 Spikerprøver med senteravstand 150 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik...	29
Figur 29 Prøvetypenes lekkasjer før, og etter endt fuktskykluser med differanseverdier, sortert etter størrelse.....	30
Figur 30 Prøvetypenes lekkasjer før og etter teiping med differanseverdier, sortert etter størrelse.....	30
Figur 31 Hustypen <i>Dråpen</i> fra husprodusenten Norgeshus (Norgeshus, 2018).....	31
Figur 32 Lysgården, fasade mot sør (venstre) og vest (høyre) (HUS arkitekter, 2018).....	32

Figur 33 Enebolig (Dråpen) – Dampsperreskjøtenes prosentvise lekkasje av passivhuskrav (0,6 oms/h)	33
Figur 34 Enebolig (Dråpen) – Dampsperreskjøtenes prosentvise lekkasje av minimumskrav (1,5 oms/h)	33
Figur 35 Kontorbygg (Lysgården) – Dampsperreskjøtenes prosentvise lekkasje av passivhuskrav (0,6 oms/h)	34
Figur 36 Kontorbygg (Lysgården) – Dampsperreskjøtenes prosentvise lekkasje av minimumskrav (1,5 oms/h)	34

1. INNLEDNING

Som følge av innskjerpede energikrav etter ikrafttredelse av byggt teknisk forskrift (TEK 17) fra 1. januar 2017, er i dag kravene for bygningers lufttetthet strengere enn noen gang. For bygg prosjektert etter energitiltaksmetoden er kravet for lufttetthet like strenge som i passivhusstandarden. Et lufttett dampsperrsjikt er som kjent viktig for å hindre fukt å sive inn i ytterkonstruksjonene, men som en høyst medvirkende faktor for det å sikre klimaskallets lufttetthet, vil det med strengere tetthetskrav også være viktigere enn før å oppnå et tett dampsperrsjikt sett fra et energiperspektiv.

Utførelsen av skjøtene i dampsperran vil være viktig for å oppnå nettopp dette. I denne oppgaven er det derfor undersøkt hvilke faktorer som påvirker tettheten til omleggsskjøter hos en inntrukket dampsperre, klemmt med påforingen. For å undersøke tettheten til skjøtene på lang sikt, er faktorene testet for gjentakende sykluser. Gjennom prosjektoppgaven, skrevet høsten 2017 kom det fram at det i byggebransjen stadig anses som vanligere å teipe omleggsskjøtene i dampsperrsjiktet. Det er derfor valgt å se på langtidsvirkningen av klemte omleggsskjøter som i tillegg er teipet.

1.1. FORMÅL

Formålet har her vært å avdekke hvilken utførelse som på sikt gir de beste tetthetsegenskapene for omleggsskjøtene, og hvorvidt, og i hvilken grad teiping forbedrer tettheten etter eksponering for gjentakende fuktvariasjoner. Å avdekke hvilken betydning tettheten til omleggsskjøtene har for lekkasjetallet hos bygninger har også vært et viktig formål.

1.2. OPPBYGNING

Oppgaven er delt opp i tre deler, hvor den første delen tar for seg relevant teori som omhandler problemstillingen. Her blir også simuleringer gjennomført i Wufi-2D for å avdekke et relevant fuktvariasjonsbilde i en typisk yttervegg beskrevet.

Del to tar for seg laboratorieforsøket som er utført. Her blir forsøkets art først beskrevet, før resultatene framlegges. Her beskrives også metoden for beregningene som er gjort for å avdekke lekkasjenes praktiske betydning, før resultatet av beregningene presenteres.

I del to diskuteres resultatene fra laboratorieforsøket. Her diskuteres først mulige feilkilder, før forskjellige sammenhenger og tendenser som blir gjort synlige etter testresultatene drøftes. I tillegg blir omleggsskjøtenes betydning for en bygnings lekkasjetall diskutert.

1.3. BEGRENSNINGER

Det faktum at oppfukning og uttørking av tremateriale kan være en tidkrevende prosess, har gjort at tidsbegrensningene har satt ramme for hvor mange sykluser som har kunnet gjennomføres. Valgt metode for oppfukning har videre satt plassbegrensninger for prøveantallet som er testet.

2. LITTERATUR

2.1. YTTERVEGGER - KRAV OG ANBEFALINGER

En bindingsverksvegg er tradisjonelt oppbygd av lastbærende stendere med en senteravstand på 600 mm, plassert mellom en toppsvill og en bunnsvill. Mellom stenderne er det plassert isolasjon, som mellom vindspærre og dampspærre befinner seg mellom to lufttette sjikt. For å unngå at dampspærren gjennomhulles av føringsrør ved skjult elektrisk anlegg kan dampspærren føres inn i konstruksjonen ved at den monteres bak innvendig påføring. Her anbefaler SINTEF Byggforsk generelt at varmemotstanden til isolasjonssjiktet på varm side ikke utgjør mer enn $\frac{1}{4}$ -part av den totale varmemotstanden i veggen (Blom & Uvsløkk, 2012).

De fleste aktuelle dampspærrematerialer som benyttes i dag har gode lufttettingsegenskaper. I praksis er det derfor tettarbeidet i forbindelse med skjøter, gjennomføringer og overganger til andre materialer som avgjør hvorvidt dampspærresjiktet er tilstrekkelig lufttett (Blom & Uvsløkk, 2012).

Per i dag finnes ingen spesifikke krav for montering av dampspærren. SINTEF Byggforsk kommer imidlertid med en rekke anbefalinger. I byggdetaljblad 474.511 listes en rekke kontrollpunkter med fokus på fuktsikring i prosjektering og utførelsen av bygninger. Blant stikkordene under «generelt» listes en rekke kontrollpunkter under «dampspærre» og «lufttetthet» opp. Det anbefales det blant annet at dampspærrens plassering planlegges med mest mulig plane flater så vanskelige skjøter og sprang unngås. Det understrekes også det bør sørges for god klemming med plater eller egne klemlister som spikres med tett senteravstand, og at det der hvor det er vanskelig å oppnå god klemming, i tillegg bør benyttes fugemasse eller teip. Det understrekes at det særlig bør tenkes på god oppnåelse av lufttetthet ved tak og øvre del av vegg, hvor overtrykket er størst (SINTEF Byggforsk, 1998). Kontrollpunktene henviser videre til andre byggdetaljblad som kommer med anbefalinger som beskriver løsninger som innfrir disse generelle anbefalingene. Her finnes flere konkrete anbefalinger som omhandler klemming av dampspærre.

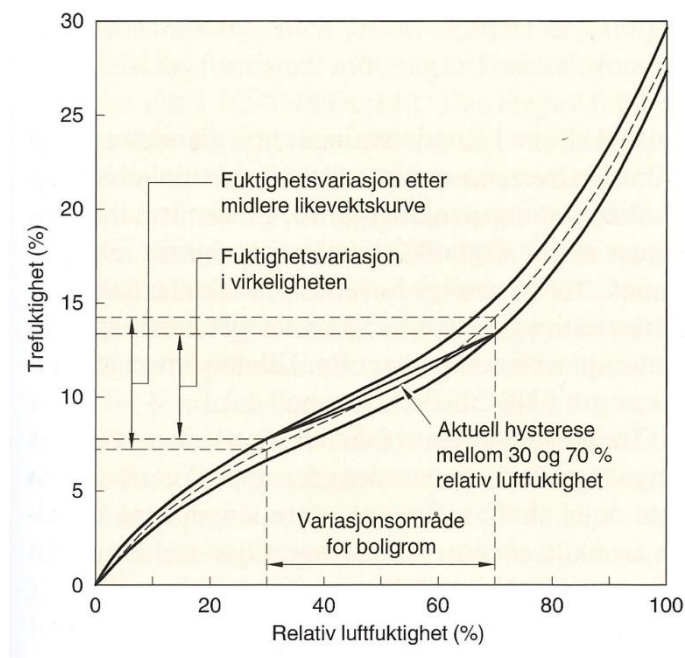
Dersom vinduslistning brukes som klemming av dampspærre, bør det spikres med en senteravstand på maks 200 mm (SINTEF Byggforsk, 2007). PE-folien skal benyttes med bredde som dekker hele vegg høyden slik at folien kan monteres uten tverrskjøter. Skjøtene i dampspærren må klemmes godt, og eventuelt varmluftssveises. For å gi god klem anbefales en lektetykkelse mellom 11-36 mm, og at de spikres eller skrues med en avstand på maks 150 mm (SINTEF byggforsk, 2008).

Lovbestemte krav til bygningers tetthet er fastsatt etter byggt teknisk forskrift (Lovdata, 2017). Etter forskriftsendringen i 2017, ble minimumskravet for lekkasjetall innskjerpet til en verdi $\leq 1,5$ luftvekslinger per time. Ved bruk av energitiltaksmetoden lufttetthetskravet i dag $\leq 0,61/h$ (Lovdata, 2017).

NS 3700 (Standard Norge, 2013) og NS 3701 (Standard Norge, 2012) er to standarder som beskriver gjeldende kriterier for passivhus og lavenergibygninger for henholdsvis bolig- og yrkesbygninger. For begge standardene er minstekravet for lekkasjetall for passivhus $\leq 0,6 h^{-1}$, hvilket i dag er det samme som kravet ved energitiltaket i TEK 17

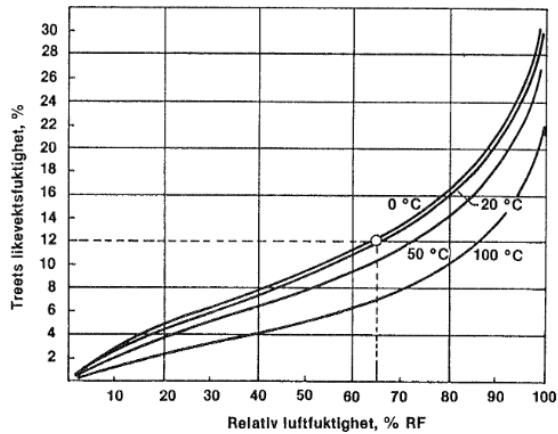
2.2. TRE OG FUKTIGHET

Treet er et hygroskopisk materiale, hvilket vil si at det vil oppta og avgi fuktighet etter fuktighetsendringer i lufta omkring. Fuktinnholdet oppgis vanligvis i prosent for vekten av vannet andel av treets vekt i absolutt tørr tilstand (Tronstad, 2002). Ved konstant temperatur og relativ fuktighet vil materialet med tiden innstille seg på en på en fuktighet hvor den er i likevekt med omgivelsene (Geving & Thue, 2002). Hysteresekurver benyttes for å beskrive endringen av treets likevektsfuktighet ved ulike omgivende relative fuktighetsverdier. Dersom man undersøker trevirkets likevektsfuktighet som funksjon av den relative fuktigheten, finn man at likevektsfukten vil innstille seg med litt ulike verdier, avhengig av om fuktigheten er på vei opp (adsorpsjon) eller ned (desorpsjon). Ved samme omgivende relative fuktighet vil uttørking (desorpsjon) fra et høyere fuktnivå innstille seg på en likevektsfuktighet som er litt høyere enn hva som vil være tilfelle ved oppfukting (adsorpsjon) fra et lavere nivå. Dette fenomenet, kalt hystereseeffekten, ses det ofte bort ifra ved beregning av fuktighet, hvor en midlere likevektsskurve forenklet benyttes (Edvardsen & Ramstad, 2010). Figuren vist nedenfor viser hysteresekurver for furu ved en temperatur på 20 °C. Med et variasjonsområdet for den relative fuktigheten for et boligrom på mellom 30 og 70%, viser figuren hvordan beregnet trefuktighet vil kunne variere etter hvorvidt man tar høyde for hystereseffekten, eller forenklet velger å bruke en midlere likevektsskurve.



Figur 1 Hysteresekurve og midlere likevektsskurve ved 20 °C (Edvardsen & Ramstad, 2010)

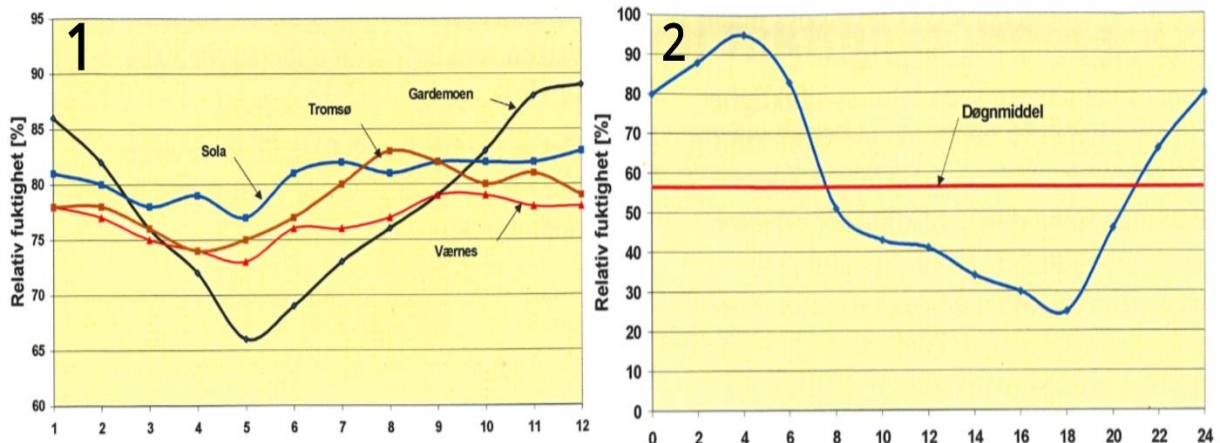
De vanligste likevektsskurvene for beregning av trevirkets fuktinnhold er oppgitt ved normale innnetemperaturer (20-25°C). Ved en gitt relativ fuktighet vil treet imidlertid kunne inneholde mere fuktighet ved lavere temperaturer (Geving & Thue, 2002). I den forbindelse er det også utarbeidet justerte likevektsskurver som gjør det mulig å fastsette fuktendringer ved andre temperaturer. Et eksempel på en slik kurve vises i figuren nedenfor.



Figur 2 Likevektsfuktigheten for tre som funksjon av relativ fuktighet og temperatur (Jørgensen, et al., 1995)

I permanente konstruksjoner regnes et fuktinnhold på 20% som en kritisk grense. (Edvardsen & Ramstad, 2010). Ved fuktinnhold høyere enn dette vil mugg og råte-sopper kunne utvikle seg, og etter hvert bryte ned materialet.

Uteklimate er den viktigste påvirkningsfaktoren for fuktforholdene i en ytterveggskonstruksjon (Geving & Thue, 2002), og den relative fuktigheten den utsettes for vil kunne variere voldsomt etter hvor ytterveggen befinner seg geografisk. For et bestemt sted vil også RF kunne variere voldsomt, ikke bare på årsbasis, men også på døgnbasis (Tronstad, 2002). Figuren nedenfor viser eksempler midlere variasjoner av RF ved ulike geografiske plasseringer over et døgn og et år.

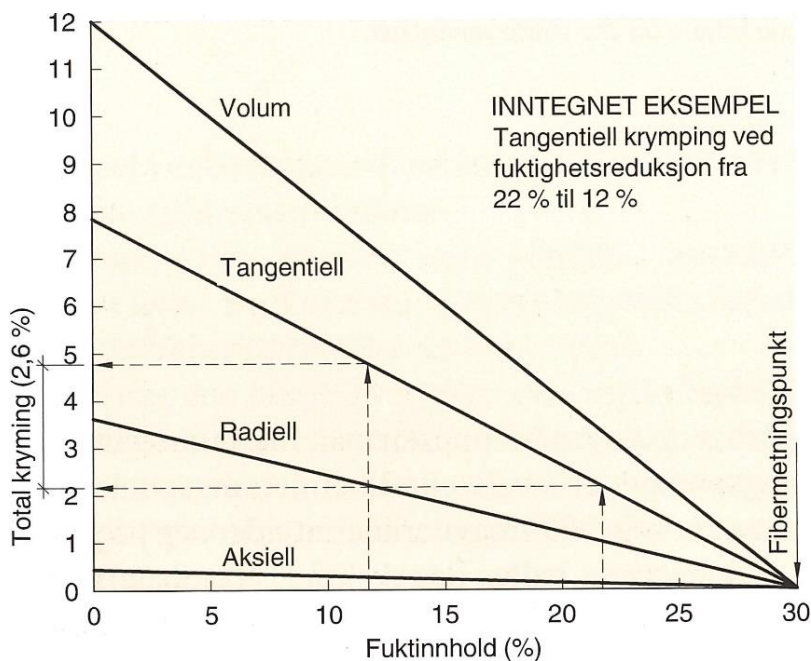


Figur 3 Midlere RF-verdier over et år (1) og et døgn(Blindern, Oslo) (2) (Tronstad, 2002)

Sammenlignet med uteklimate, vil RF inne forløpe seg omvendt ved at luft ved lavere temperaturer inneholder mindre vanndamp. Kald uteluft varmes opp til ønsket innetemperatur vil den bli tørrere (lavere RF). Om sommeren hvor temperaturen til uteluften ligger nærmere behagelig innetemperatur vil ikke oppvarmingsbehovet være særlig stort, og RF inne vil være likere RF ute (Tronstad, 2002). Hygroskopiske materialer som befinner seg innendørs vil kunne motvirke variasjonene mellom RF inne og ute, ved at de vil kunne ta opp, og frigi fuktighet etter RF inne, avhengig av om den er høy eller lav. Mennesker som oppholder seg innendørs vil kunne gi et fukttilskudd til inneluften gjennom svetting og utånding av vanndamp, samt ved aktiviteter som dusjing, tørking av klesvask, matlaging m.m. (Tronstad, 2002)

2.2.1. FUKTBEVEGELSER

Vannet i treet kan opptre i to former. Som fritt vann i cellehulrommene, eller som bundet vann i materialets cellevegger. Ved et vanninnhold over fibermetningspunktet, finnes vannet i treet i begge disse formene. Fibermetningstrykket ligger på om lag 30 % for furu og gran (Tronstad, 2002). Ved tørking ned til dette punktet er det det frie vannet som først fordampes mens celleveggene forblir mettet med vann. Det er først når fibermetningspunktet passerer og alt fritt vann er borte, at krymping av treet begynner. Det bundede vannet i celleveggene vil også da begynne å forsvinne, med det resultat at celleveggene og hulrommene mellom dem blir tynnere, og trevirket begynner å krympe. Svelling vil motsatt skje frem til det punkt hvor celleveggene igjen er mettet med vann (Tronstad, 2002). Krympingen og svellingen skjer tilnærmet lineært med fuktendringen fra fibermetningspunktet ned til absolutt tørr tilstand. Krympingen og svellingen vil imidlertid ikke være likt i alle retninger figuren nedenfor viser at størst dimensjonsendring som følge av fuktighetsvariasjon vil skje tangentielt (med årringene). Fuktendring fra 0 og 30 vekt-% vil gi en dimensjonsendring på 8 % i denne retningen. Radielt vil dimensjonsendringen ved samme fuktvariasjon gi en dimensjonsendring som er halvparten så stor, mens det med fiberretningen vil medføre en mye mindre dimensjonsendring, på 0,2-0,3 % (Tronstad, 2002).



Figur 4 krymping og svelling av tre (Edwardsen & Ramstad, 2010)

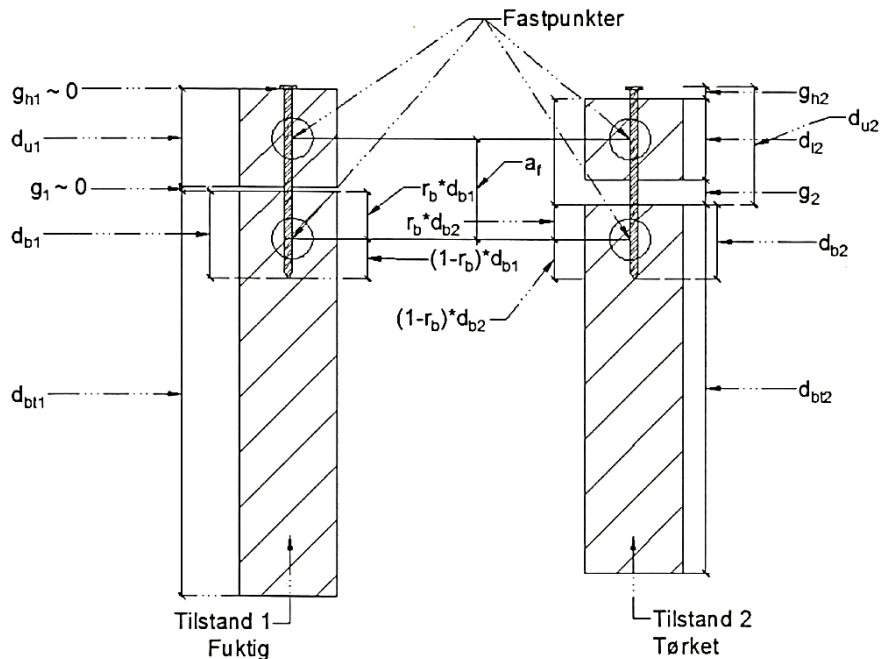
For beregning av krymping og svelling kan gjennomsnittlige verdier for dimensjonsendring vist nedenfor benyttes. Dette er prosentverdier for dimensjonsendringer per prosent endring av fuktinnhold. (Edwardsen & Ramstad, 2010)

- Tangentielt: 0,28 %
- Radielt: 0,15 %
- Aksielt: 0,01 %

I praksis forekommer betydelige avvik fra gjennomsnittsverdiene. Ofte oppgis 0,20-0,25 % som gjennomsnittlig dimensjonsendring for trematerialer (Edwardsen & Ramstad, 2010)

2.3. KLEMTEORI

Gjennom lesning av masteroppgaven til Selmer (2013), senere beskrevet under tidligere forskning, blir en forenklet modell som tar høyde for friksjonen mellom festemiddel og trevirket for beregning av avstanden Δg mellom lekt og stender gjort kjent. Modellen implementerer verdiene r_l og r_b som representerer to relative avstander fra et festemiddels fastpunkt i henholdsvis lekt og stender, til klemflaten mellom stender og lekt.



Figur 5 Symbolforklaringer for klemteori (Selmer, 2013)

Fra modellen finner vi at et festemiddels fastpunkt i stender og lekt kan uttrykkes som:

$$\text{fastpunkt stender} = r_b \times d_b$$

Formel 1 Fastpunkt i stender

$$\text{fastpunkt lekt} = r_l \times d_l$$

Formel 2 Fastpunkt i lekt

Her er d_b er festemiddelets inntrengningsdybde i stenderen, og d_l lektens tykkelse. Videre kan endringen i avstanden mellom lekt og bindingsverk mellom tilstand 1 og 2, vist i figuren ovenfor, uttrykkes som:

$$\Delta g_{21} = r_b \times d_{b1} \times \varepsilon \times (u_1 - u_2) + r_l \times d_{l1} \times \varepsilon \times (u_1 - u_2)$$

Formel 3 Endring i avstand fra fukttilstand 1 til 2

hvor:

ε = krympingskoeffisienten

u_1 = trevirkets fuktinnhold før uttørking i vekt-%

u_2 = trevirkets fuktinnhold etter uttørking i vekt-%

Omformet kan denne formelen uttrykkes som:

$$\Delta g_{21} = \varepsilon \Delta u (r_b \times d_{b1} + r_l \times d_{l1})$$

Formel 4 Omformet formel for endring i avstand fra fukttilstand 1 til 2

hvor:

Δu = gjennomsnittlig fuktendring mellom tilstand 1 og tilstand 2.

Videre omformet, ved kjent Δg_{21} (sprekk) kan r_l og r_b uttrykkes som:

$$r_l = \frac{\frac{\Delta g_{21}}{\varepsilon} - r_b \times d_{b1}}{d_{l1}}$$

Formel 5 omformert formel for utregning av r_l

$$r_b = \frac{\frac{\Delta g_{21}}{\varepsilon} - r_l \times d_{l1}}{d_{b1}}$$

Formel 6 Formel 5 omformert formel for utregning av r_b

Formel 5 er senere anvendt for beregning av r_l etter sammenligning av teoretisk og faktisk sprekk i laboratorieforsøket, og er nærmere beskrevet i diskusjonen under delkapittel 5.4.

2.4. TIDLIGERE FORSKNING

2.4.2. BERGBY (2011)

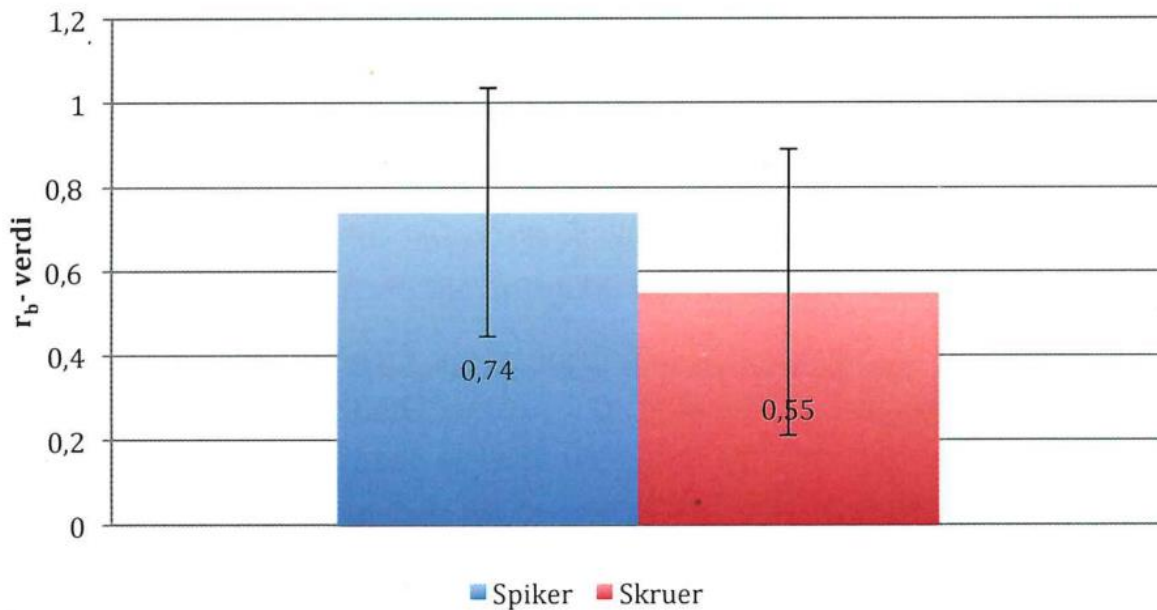
I Jon Christian Bergbys masteroppgave, skrevet i 2011, ble ulike faktorer som kan tenkes å påvirker luftlekkasjene gjennom klemte skjøter i vind og dampspærresjikt undersøkt. I det første av to laboratorieforsøk, ble klemte omleggsskjøter med variasjoner innen lektetykkelser (18, 30, og 48 mm), type festemiddel (maskinspiker eller skruer), samt senteravstanden mellom festemidlene (150, 300 og 600 mm) trykktestet før og etter uttørking av trevirket, for å avdekke ulike sammenhenger mellom parameterne og luftlekkasjeendringene ved uttørking.

Resultatet av forsøket viste at skruene som festemiddel etter uttørking ga vesentlig lavere lekkasjer enn maskinspikeren, at en senteravstand på 600 mm medførte høyere lekkasjer enn ved 150 og 300 mm og at lekkasjene med en lektetykkelse på 48 mm var vesentlig høyere enn lektetykkelsene på 18 og 30 mm.

I det andre forsøket ble et antall ulike festemidlers bevegelser i trevirket undersøkt. Her ble det oppdaget en sammenheng mellom skrueregjengenes plassering og potensialet for oppsprekking. Etter dette kom det fram at de to hovedfaktorene som bidrar til oppsprekking, og dermed økte luftlekkasjer gjennom klemte omleggsskjøter kan knyttes til avstanden mellom midten av gjenget parti og toppen av skruens hode, og differansen mellom høyeste og laveste fuktnivå i trevirket.

2.4.3. SELMER (2013)

Johan Bille Selmer skrev i 2013 en masteroppgave som bygger videre på funnene gjort av Bergby (2011). Her ble det også undersøkt hvilke faktorer som er med på å påvirke bevegelsene i klemte skjøter i vind- og dampspærresjikt. I den forbindelse ble det gjennomført 2 laboratorieforsøk. Det første forsøket undersøkte festemidlenes bevegelser over tre fuktssykluser ved å måle forskjellige typer festemidlers utstikk etter gjentatte fuktendringer i trevirket ved bruk av SINTEFs klimaskap. Resultatene ble brukt til å utlede verdier for den relative avstanden til et festemiddels fastpunkt i bindingsverket til bindingsverkets klemflate. Denne avstanden r_b ble etter forsøket funnet å være 0,74 for en varmforsinket maskinspiker og 0,55 for skruer.



Figur 6 r_b -verdi med standardavvik for spiker og skruer (Selmer, 2013)

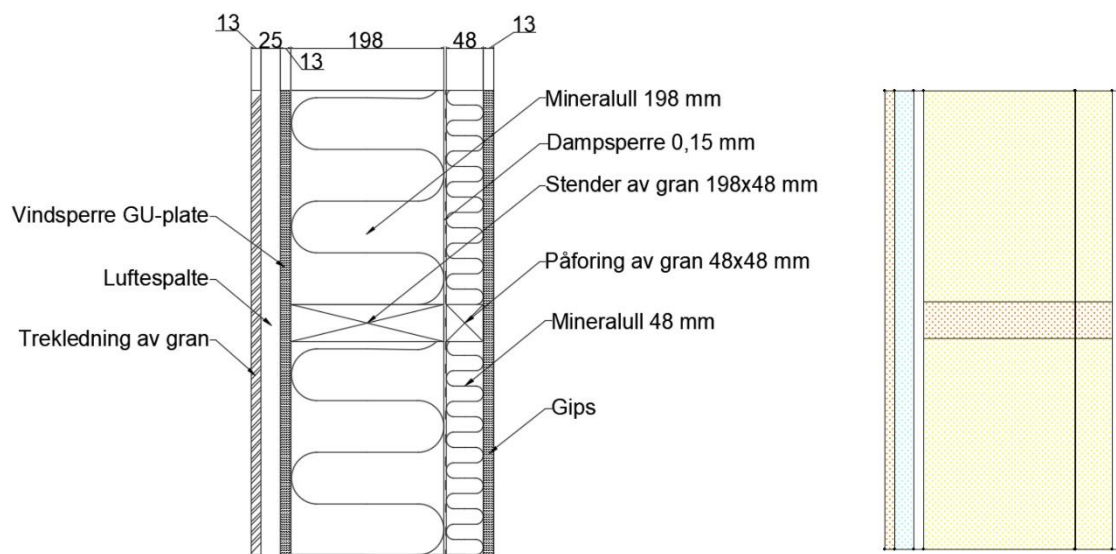
Det andre forsøket undersøkte luftlekkasjene gjennom klemte omleggsskjøter i dampspærren før og etter uttørking ved bruk av ulike festemidler med en lektetykkelse på 18 mm og en senteravstand på 300 mm. Resultatet viste at samtlige varianter hadde en høyere lekkasje etter uttørking, men at maskinspikerne, i motsetning til Bergby (2011), gav lavere lekkasjer enn skruene både før og etter uttørkingen.

Artikkelen «improvement of traditional clamped joints in vapor- and wind barrier layer for passive house buildings» (Gullbrekken, et al., 2012) hadde tidligere undersøkt i hvilken grad resultatene til (Bergby, 2011) influerte den totale lufttettheten i to generiske case-bygg som skulle representere et typisk kontorbygg og en typisk enebolig. Denne modellen ble også brukt i denne oppgaven, for å kunne se den praktiske betydningen av lekkasjerresultatene.

3. ESTIMERTE FUKTVARIASJONER

For å undersøke hvilke fuktvariasjoner som reelt vil opptre i stender og påføring, er det gjennomført simuleringer i dataprogrammet Wufi-2D. Programmet, utviklet av Fraunhofer Institute of Building Physics, lar deg utfører todimensjonale beregninger av hygrotermiske forhold i bygningsdeler av flere sjikt ved varierende klimabelastninger (Geving, 2016).

Med mål om å oppdrive representative verdier av de årlige variasjonene av vanninnhold for stender og lekt, tar simuleringen for seg en sørvendt ytterveggskonstruksjon med bindingsverk av tre. Etter utforming av veggens geometri, er materialegenskaper, hentet fra Wufis database, definert for de ulike komponentene. Figuren nedenfor viser dimensjoner og materialer valgt for vegg.



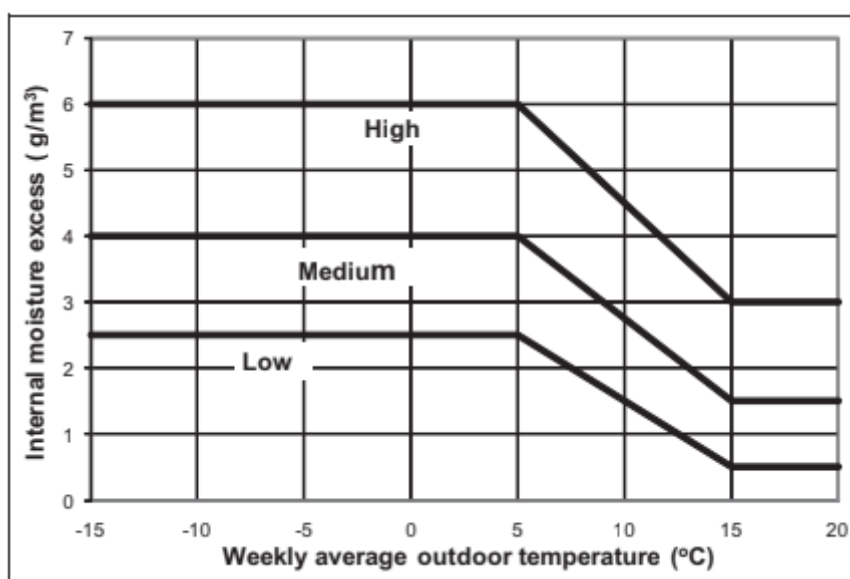
Figur 7 Oppbygning av vegg og definert geometri i Wufi-2D

Programvaren inneholder klimafilere for 12 norske geografiske plasseringer. Disse klimafilene er basert på MDRY (Moisture Design Reference Year), og inneholder klimadata for et definert referanseår hvor fuktbelastningene for et antall konstruksjoner anses som størst over en periode på omlag 10 år (Geving & Torgersen, 1997). Geografisk plassering for simuleringene er satt til Gardermoen. Tabellen på neste side viser månedsgjennomsnittlige MDRY-verdier for Gardermoen. Luftespalten bak kledningen er definert med et luftskift til uteluften på 20 h^{-1} .

Gardermoen 1972				
Måned	Temperatur (°C)	RF (%)	Global stråling (w/m ²)	Hor.regn (mm)
Januar	-9,6	80,0	8,6	36,3
Februar	-5,8	93,5	26,2	45,2
Mars	-2,0	85,1	66,1	63,1
April	2,8	75,9	116,3	75,2
Mai	9,5	74,6	168,2	87,8
Juni	13,2	80,3	186,3	108,1
Juli	16,8	73,2	214,0	71,5
August	13,4	76,6	162,3	125,5
September	8,3	77,7	112,6	36,1
Oktober	4,8	84,7	49,0	19,6
November	-0,9	89,6	15,7	27,2
Desember	-0,2	97,0	4,9	76,4
År	4,2	82,4	94,2	772,1

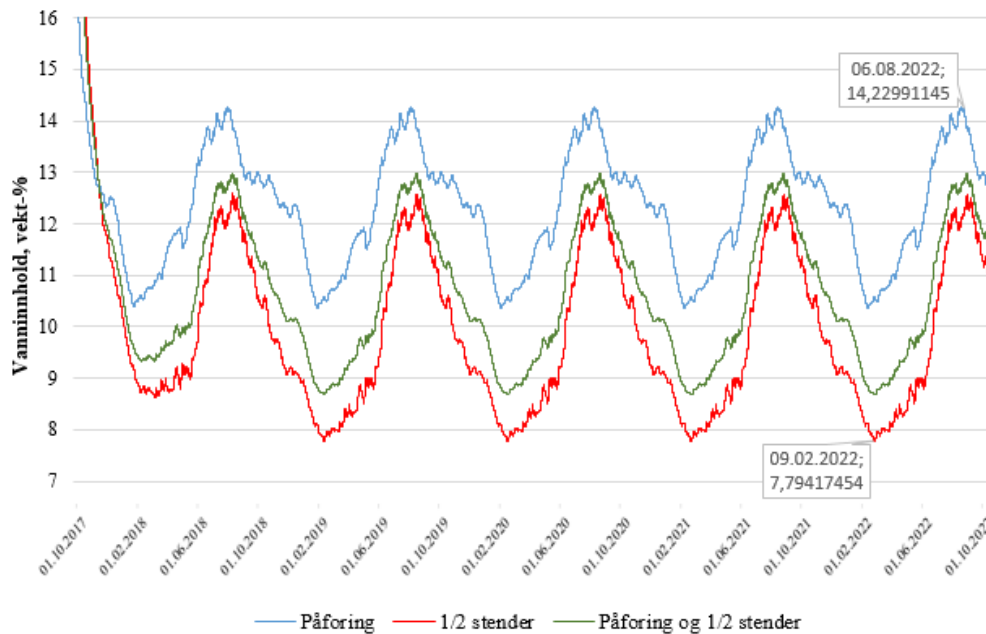
Figur 8 MDRY-verdier for Gardermoen (Geving & Torgersen, 1997)

Som en av flere måter å definere innvendig fuktforløp, kan man, etter, i Wufi velge et realistisk forløp for det innvendige fukttilskuddet som funksjon av utvendig temperatur (moisture load), som videre er definert som differansen mellom inne- og uteluftens vanninnhold. Her kan man enten velge mellom fire fuktighetsklasser etter EN ISO 13788 (2012), eller man kan definere et eget forløp for fukttilskuddet ved ulike temperaturer. Artikkelen «Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings» (Geving & Holme, 2012) omhandler en studie hvor det ble utført temperatur- og relative fuktighetsmålinger i 117 tilfeldig valgte bolighus i Trondheim. Disse målingene ble analysert for å finne sammenhengen mellom fukttilskuddet inne og klimaforholdene utendørs. Da resultatene viste seg å korrelere dårlig med forløpskurvene for fukttilskudd gitt i EN ISO 13700 (både defleksjonspunkt og form), ble nye forløpskurver foreslått på bakgrunn av måleresultatene.



Figur 9 Foreslått innvendig fukttilskuddskurve, basert på 10 % år (Geving & Holme, 2012)

På bakgrunn av funnene som er gjort i studien, er innvendig fuktforløp definert med et fukttilskudd lik medium vist i figur 10. Simuleringen er gjennomført over en periode på 5 år fra oktober 2017. Data for vanninnhold av påføring samt 1/2 av stendertverrsnittet mot dampspærren er deretter studert. Som vist i grafen nedenfor, vil variasjonene etter tørking av den innebygde fukten stabilisere seg om et repetitivt årlig fuktforløp. For halvparten av stenderen mot varm side vil fuktvariasjonene ligge mellom 12,7 og 7,8 vekt-%, mens de for påføringen vil variere mellom 14,2 og 9 vekt-%.



Figur 10 Simulert fuktinnhold i stender og påføring

For valg av intervallverdier ved fuktskyklusene som er gjennomført i forsøkene, er disse verdiene lagt til grunn. For å gi forsøksresultatene en konservativ karakter, og fordi større fuktighetsvariasjoner vil kunne tenkes å resultere i en bedre synliggjøring av fuktpåvirkningstendenser, er imidlertid dette fuktintervallet økt til mellom 14 og 7 vekt-%.

4. LABORATORIEFORSØK

Som del av masteroppgaven er det gjennomført et laboratorieforsøk. Hensikten har her vært å kartlegge lufttetthetsvariasjonene som kommer som følger av gjentakende fuktvariasjoner i trevirket. Gjennom studiet er sammenhengen mellom ulike typer festemidler (skrue og maskinspiker), senteravstand, samt effekten av teiping av omleggsskjøtene undersøkt. Gjennom forsøket har 18 forsøksprøver med ulike parametere for festemidler og senteravstand blitt trykktestet syv ganger, etter å ha blitt utsatt for gjentatte fuktvariasjoner. Å sikre god repeterbarhet i alle ledd gjennom hele forsøket har derfor vært svært viktig for at konklusjoner skal kunne trekkes med troverdig. Dette har således ligget som en prioritet ved utforming av forsøksprøver, oppfuking- og trykktestingsprosedyre.

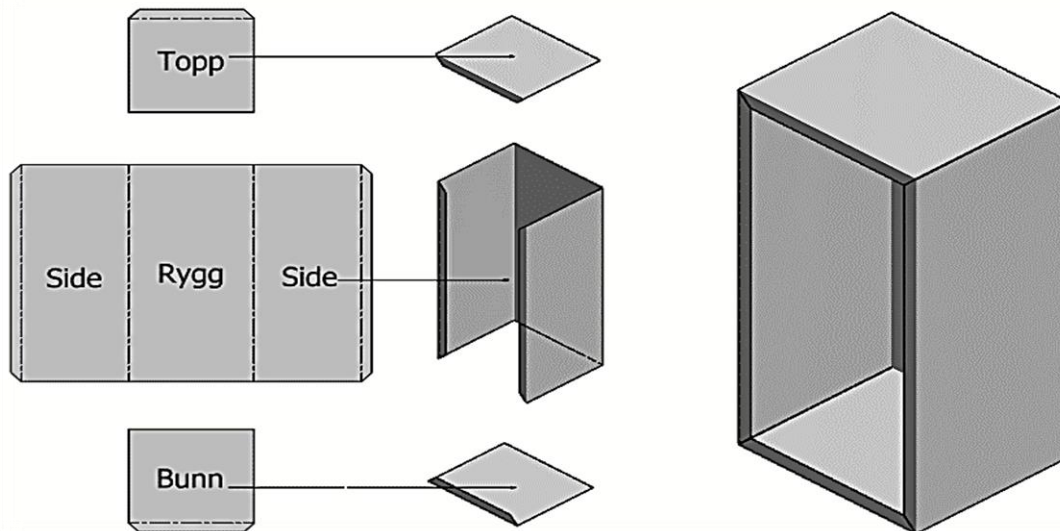
4.1.1. TEST- OG OPPFUKTINGSBOKS

Temperaturen har stor betydning for delyklusenes varighet. Ved oppfukning av trevirket vil høy temperatur kombinert med høy relativ fuktighet tenkes å akselerere oppfukningsprosessen. For å oppnå ideelle forhold for en rask oppfukning, er en damptett boks som lar seg plassere i et av SINTEF Byggforsks varmeskap konstruert. Boksen er samtidig utformet for å kunne brukes som testboks under luftlekkasjemålingene.

4.1.1.1 SKROG

For å få plass til den kombinerte test- og oppfuktingsboksen, har de innvendige målene av varmeskapet vært dimensjonerende. Samtidig, for å sørge for å få plass til prøvene inne i oppfuktingsboksen, er boksen konstruert for å kunne romme så mye som mulig. Boksen er derfor målsatt med utvendige dimensjoner lik tørkeskapets indre mål minus 30 mm. På denne måten er det gitt rom for et luftstrømmende sjikt, drevet av skapets vifte, langs boksens utvendige flater, hvilket antatt vil minimere temperaturdifferansene på innsiden av boksen.

For best å kunne oppnå en tett konstruksjon, som samtidig tåler påkjenningene ved gjentakende eksponering for høy temperatur og fuktighet, er boksen laget av 1,5 mm kaldvalset stål. Andre materialer og produkter som er benyttet er påsett at tåler påkjenningene ved oppfuktingene. For å begrense lengden av sveisede skjøter er flatene som danner skrogets rygg og sidevegger med flenser knekt til av en og samme plate. Topp- og bunnplate er også knekt til med korrelerende flenser. At boksens dimensjoner ligger såpass tett oppunder tørkeskapets innvendige mål, gjør toleransen for rammeskjevhet svært liten, og er derfor etter punktsveising blitt nøye kontrollert, før helsveising av skjøtene. Sveisene er videre underveis blitt kontrollert ved bruk av lys og vann for å avdekke eventuelle utettheter.

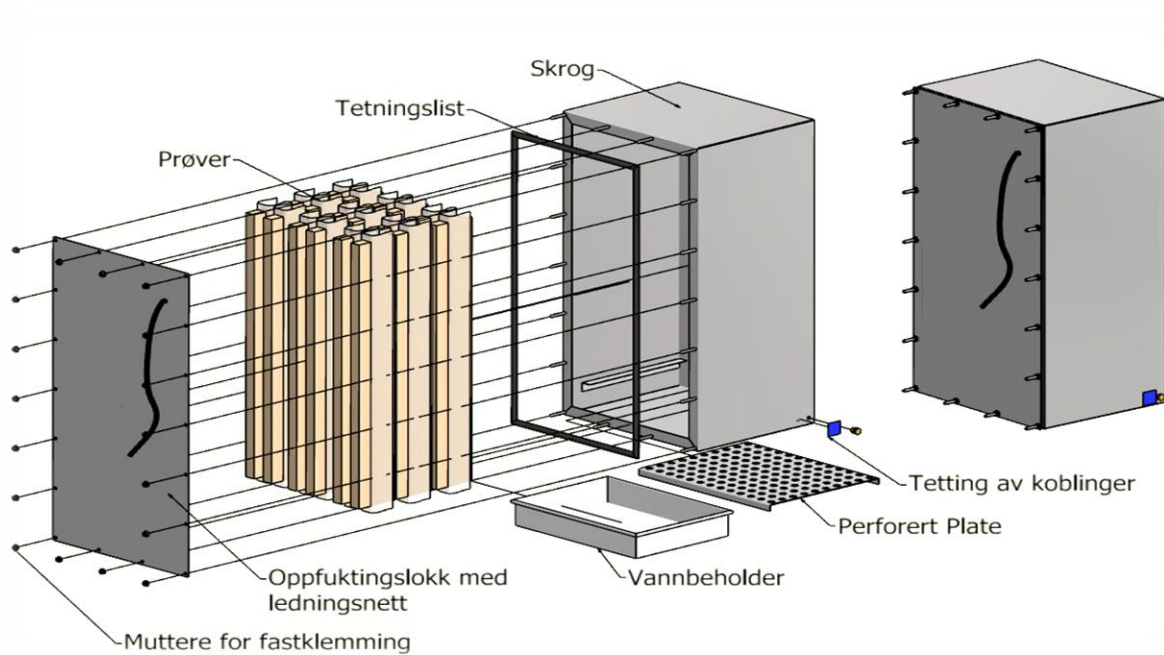


Figur 11 Oppbygning av skrog

For å sikre kontinuerlig klemming er det boret 18 hull med diameter 11 mm, jevnt fordelt langs flensene som danner rammen rundt lysåpningen. Tilhørende M10 muttere er så sveiset fast på hullenes underside, med 100 mm gjengestål skrudd inn til et utstikk på 5 cm. Tetningsmasse av butyl er påført gjengestålet før montering, samt rundt muttere for å eliminere eventuelle lekkasjer tilknyttet gjenget parti og sveiset skjød mellom mutter og flens. I sideveggene er det sveiset fast vinkler til anlegg for en perforert plate, som under oppfukting holder vekten av prøvene. Dette med en avstand på 10 cm over skrogets bunn, for å gi plass til en vannbeholder under prøvene. I hjørnet av et av skrogets sideflater er det boret hull og montert koblinger for mikromanometer og trykkluftstilførsel. Langs rammen rundt lysåpningen er det montert en D-list av EPDM-gummi. Skroget er lakkert for å begrense korrosjon ved oppfuktingene.

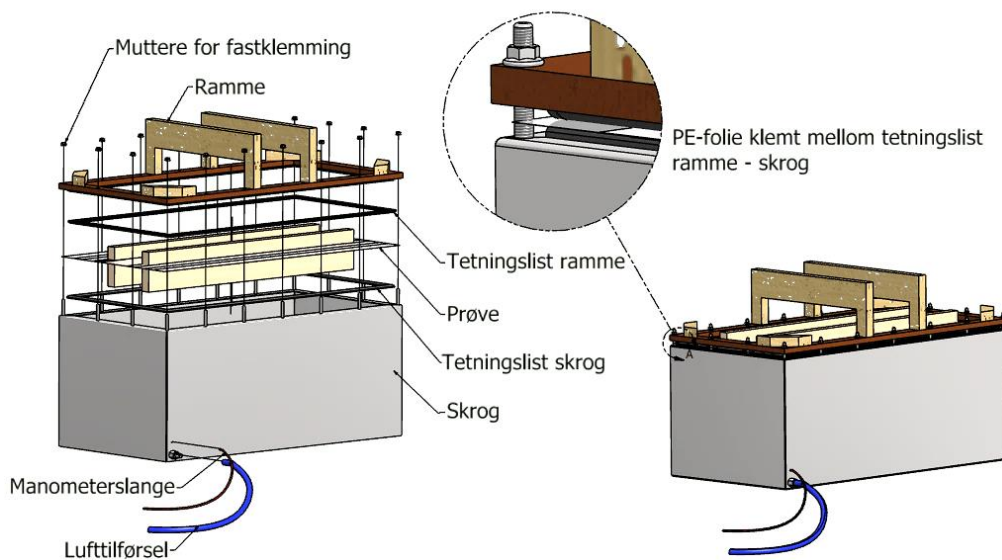
4.1.1.2 LOKK FOR TRYKKTESTING OG OPPFUKTING

For at innretningen skal kunne brukes til lufttetthetsmålingene så vel som oppfuktingene, er to forskjellige «lokk» anvendt. Lokket benyttet ved oppfukting, har som formål å tette lysåpningen, og er laget av samme materiale som skroget. Med dimensjon og gjennomhulling lik flensene, hektes lokket på det utstikkende gjengestålet, og klemmes mot tetningslisten med muttere fra utsiden. For å kunne foreta målinger av prøvenes fuktinnhold, samt temperaturen under oppfuktingene, er et sett ledninger ført gjennom et hull i lokket. Ledningene består av to termoelementer for måling av innvendig temperatur i bunn og topp av boksen, samt fire ledere for tilkobling til fuktmålingsinnretning, nærmere beskrevet i delkapittel 4.1.2.2. For temperaturmåling i midten av skapet er et tredje termoelement ført gjennom et hull i skroget, da dette også er benyttet for kontroll av temperatur under trykktestingene. Gjennomføringene er så forseglet med tetningsmasse.



Figur 12 Oppbygning av oppfuktingsboks

For lufttett klemming av prøvene under trykktestene, er det laget en ramme av OSB, avstivet i hjørner og på midten. På samme måte som oppfukningslokket er rammen gjennomhullet til å passe gjengestålet for fastklemming med muttere. En pakningslist lik skrogets er montert på undersiden av rammen. Figur 13 viser prinsipp for lufttett klemming av PE-folie mellom skrog og ramme.



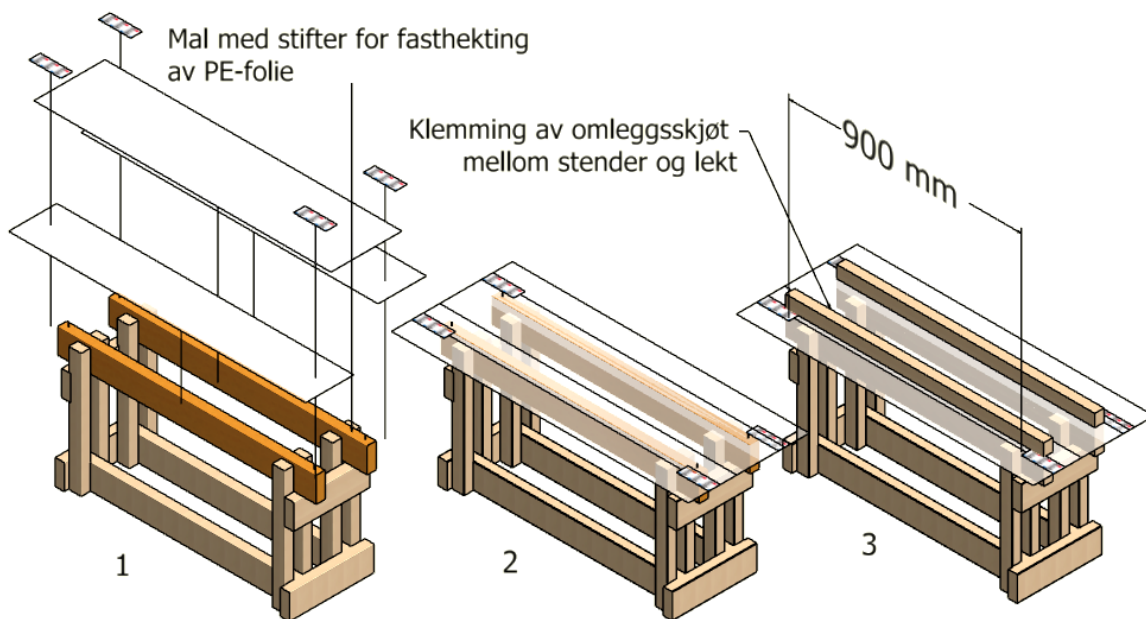
Figur 13 Oppbygning av testboks

4.1.2. PRØVER

Størrelsen av den kombinerte test- og oppfuktingsboksen, begrenset av tørkeskapets dimensjoner, har videre satt begrensninger for prøvenes utforming. I stedet for én, er hver av prøvene valgt utformet med to parallelle omleggsskjøter. Dette er gjort for å doble antall løpemeter omleggsskjøt per prøve, som ellers er begrenset av boksens høyde.

For stender og lekt er det valgt å bruke konstruksjonsvirke av gran C24 med fasede kanter, da færre spisse kanter antas å minke slitasjen på dampspærren ved gjentakende håndtering. For å gjøre delsyklusene mindre tidkrevende er det besluttet å bruke reduserte stendere av dimensjon 36x98 mm. Dette er gjort med antagelsen om en stendertykkelse utover festemidlenes penetreringsdybde ikke vil påvirke festemidlenes fuktbevegelse, og at de eventuelle friksjonsendringene mellom festemidler og trevirke ved økt stenderbredde anses å være neglisjerbare. Lektene valgt i forsøket er av dimensjonen 36x48 mm, hvor 48 mm utgjør lektetykkelsen. Dette er over SINTEFs anbefaling for lektetykkelse (SINTEF byggforsk, 2008). Det ble likevel besluttet å benytte denne lektestørrelsen siden 48 mm går for å være en vanlig utforingslengde for inntrukken dampspærre, og at tynnere klemlekter med ytterligere påføring, selv om anbefalt, sjeldnere antas brukt for klemte skjøter i dampspærresjikt i vegger.

Med en høydebegrensning på tilnærmet 105 cm er stendere og lekter skåret ut i lengder på 1000 mm. En bukk, senere anvendt for å holde prøvene oppe i riktig høyde under lufttrykkmålingene, er også benyttet for korrekt montering av prøvene. To oppmerkede stendere med stifter i endene for fastheking er først plassert i bukken, og brukt som mal for montering av prøvenes dampspærresjikt. Sjiktet består av tre tilskårne stykker av 0,15 mm PE-folie, som ved montering er strukket ut og heftet fast til stendermalene for riktig plassering av omleggsskjøtene. Med en 45 mm PE-teip fra Isola er skjøtene så teipet igjen i øvre og nedre ende, slik at hver omleggsskjøt får lengden 900 mm. Perforeringshullene fasthekingen gir, antas å ikke ha konsekvenser for lufttettheten gjennom PE-folien, da disse vil havne under det teipede området. Etter montering av antall PE-stykker nødvendig for prøvene, er omleggsskjøtene klemt sammen mellom stender og lekt plassert i bukken, med festemidler og senteravstander som nevnt nedenfor.



Figur 14 Montering av forsøksprøver. 1 og 2: montering av PE-folie. 3: Klemming av omlegg mellom stender og lekt.

4.1.2.1 PARAMETERE

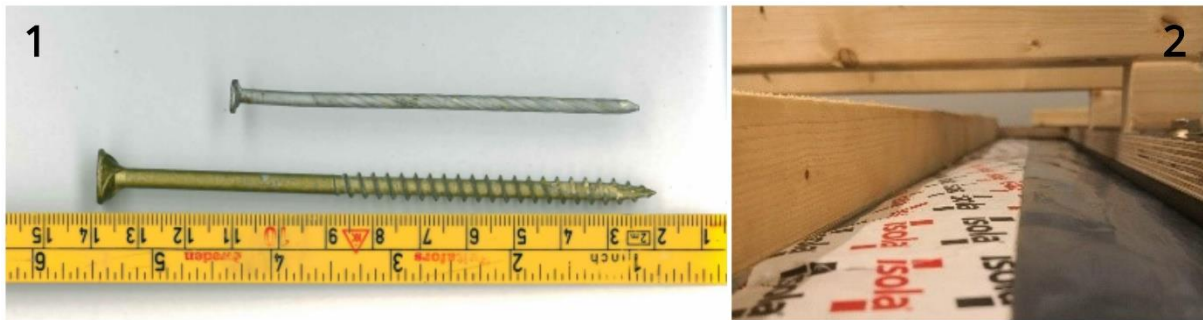
Hva gjelder festemidler brukt i forsøket, er det valgt å se på forskjellen mellom en maskinspiker og en skrue. Maskinspikeren valgt er av type 3,1x90 kammet. Treskruen som er benyttet har dimensjon 6,0x120, med 52 mm glatt hals.

Med en lengde omleggsskjøt per prøve lik 2x900 mm, ble det valgt å montere lektene med varierende senteravstand på henholdsvis 150 mm, 300 mm og 450 mm. Dette ga følgende kombinasjoner av prøver:

- Maskinspiker – 3,1x90, varmforsinket, kammet 17°
 - Senteravstand 450 – 2x3 stk festemidler per prøve
 - Senteravstand 300 – 2x4 stk festemidler per prøve
 - Senteravstand 150 – 2x7 stk festemidler per prøve
- Treskruer – 6x120, 52 mm glatt hals
 - Senteravstand 450 – 2x3 stk festemidler per prøve
 - Senteravstand 300 – 2x4 stk festemidler per prøve
 - Senteravstand 150 – 2x7 stk festemidler per prøve

Med tre prøver per kombinasjon av parametere, er det i alt laget 18 prøver, hvilket gir 5,4 løpemeter omleggsskjøt per kombinasjon. Før montering er lufttrykket i spikerpistol og momentet i drillen testet og tilpasset for en forsinking av festemidlene på 1-2 mm ned i påforingen. Avslutningsvis før siste trykktest, for å avdekke effekten av ytterligere teipbruk, er

omleggsskjøtene av hver prøve teipet igjen med to remser av 45mm PE-teip fra Isola. For senere eksakt fuktberregning av prøvene er remsene, tilpasset til lengder på 1000 mm, veid slik at vektøkningen dette medfører vil kunne trekkes fra ved tørrvektsberregningene. For hver prøve er teipen påført umiddelbart etter siste uttørkingstest uten at den demonteres testriggeren. Dette fordi det strengt talt ikke er nødvendig, og at det ellers vil eliminere usikkerheten tilknyttet tett-klemmingen av prøvene ved de to testene.

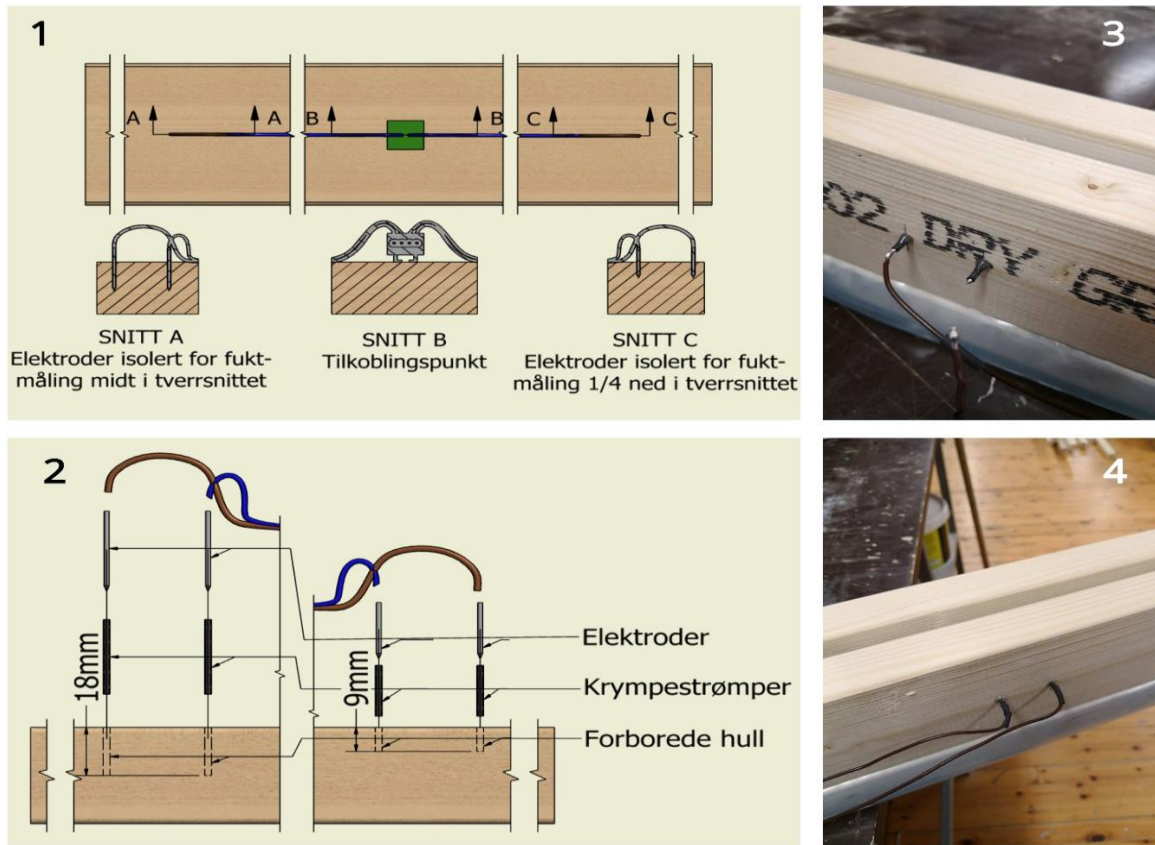


Figur 15 Festemidler og prøve med teipede omleggsskjøter

4.1.2.2 FUKTMÅLINGSINNRETNING

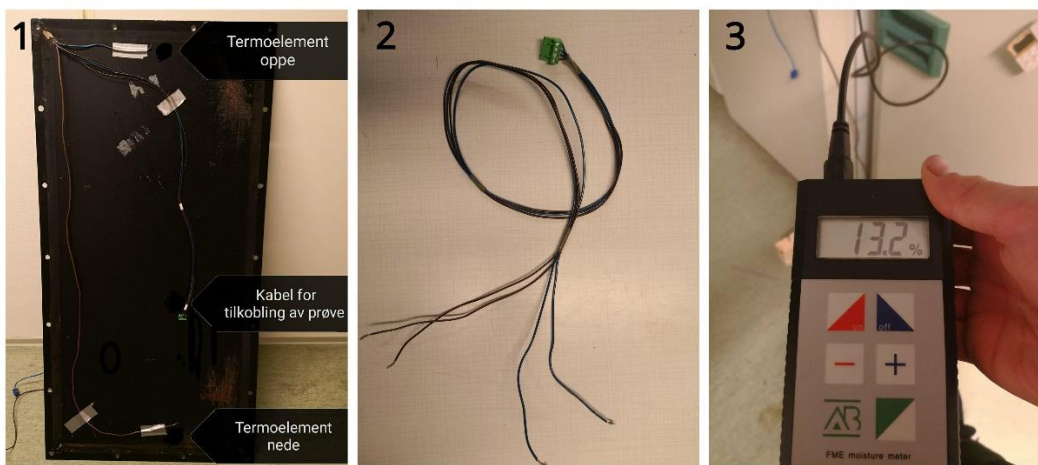
For å gjøre det mulig å måle trevirkets fuktighet underveis gjennom oppfuktingene, er det fastmontert to par elektroder på en av stenderne av henholdsvis én spiker- og én skrueprøve. Dette fordi plassbegrensningene i skapet gjør at tørking og oppfukting av prøvene må deles opp i to puljer. Dette er løst ved at spikerprøvene fuktes opp simultant med tørking av skrueprøvene, og omvendt. Med antagelsen om tilnærmet lik initiell fuktighet, og like omgivende forhold inne i oppfuktingsboksen, antas det videre at fuktinnholdet av prøven som måles også vil være lik for de resterende prøvene.

For hvert elektrodepar er det først forboret to hull normalt på tverrsnittets langside, med en senteravstand 30 mm langs fiberretningen. Disse er plassert 250 mm fra stenderens topp og bunn, hvorav det ene hullparet er boret inn til en dybde på 18 mm (midten av stenderens tverrsnitt), mens det andre er boret inn til 9 mm (1/4 av stendertverrsnittet). Elektrodene, laget av en kobber-tinn-legert sveisestav med diameter 20 mm, er først kappet til og spisset i ene enden. De er deretter isolert med krympestrømper slik at kun liten del av toppen, samt spissen er eksponert. Den isolerte flaten av elektrodene er så påført et 2-komponent epoksyylim og presset ned i hullene, før de er gitt et lite kakk for å sikre at spissen er omsluttet av trevirket. Ledninger er til slutt loddet på de uisolerte endene av elektrodene, som videre er koblet til en 4-polet hankontakt plassert midt på stender.



Figur 16 Fastmonterte elektroder for fuktmåling

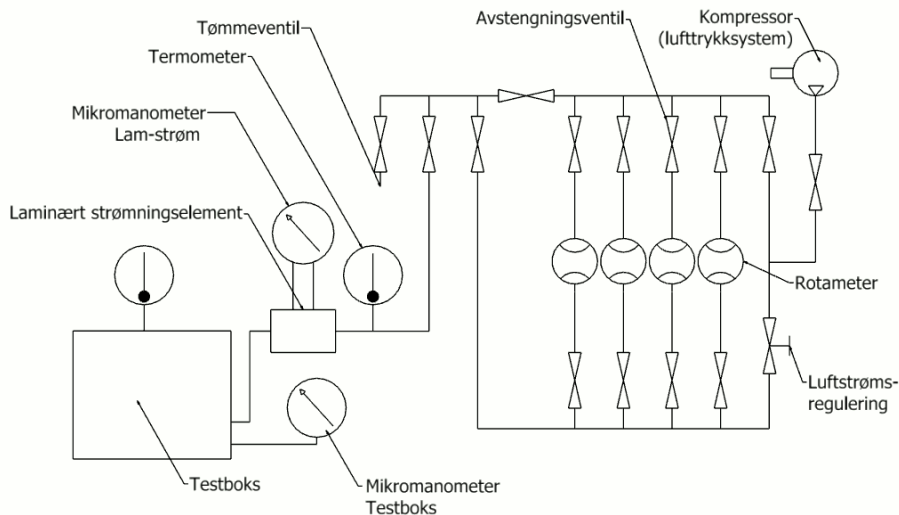
Med tilhørende hunkontakt koblet til ledningsnettet gjennom oppfukningslokket, muliggjør måling av prøvenes fuktinnhold fra utsiden av boksen, representert av den tilkoblede prøven. De to ulike måledybde på henholdsvis 18 og 9 mm gir også anledning til å kartlegge fuktforløpet innover i tverrsnittet. Det samme gjelder ved tørkingen av prøvene, hvor en lik ledning som den ført gjennom oppfukningslokket er koblet til aktuell prøve for fuktmåling underveis.



Figur 17 Tilkoblingsledninger for avlesning av prøver (1 og 2) og avlesning med protimeter (3)

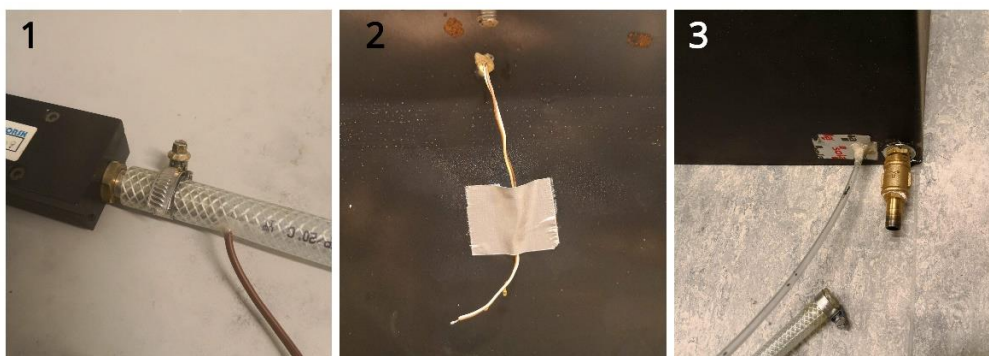
4.1.3. LUFTMÅLINGSRIGG

For luftmengderegulering under lekkasjemåling av prøvene, er SINTEFs luftmålingsrigg benyttet. Tilkoblet laboratoriets sentrale lufttrykksystem på 8 bar, er riggen utstyrt med ventiler som kan åpnes og lukkes for å dirigere luftstrømmen gjennom fire ulike rotametre for avlesning av luftstrøm. Disse har overlappende måleintervaller som spenner fra 0,5 til 1400 l/h. I tillegg er et laminærstrømsselement montert mellom testboksen og resten av måleriggen. Dette er videre koblet til et mikromanometer som leser av trykkdifferansen over elementet. Figuren nedenfor viser en prinsipiell skisse av luftmålingsriggen.



Figur 18 Prinsippskisse for luftmålingsrigg

Forholdet mellom trykkdifferansen og luftstrømmen gjennom elementet er lineært, hvor 6 l/min tilsvarer en trykkforskjell på 96.88 Pa. For presis luftmengdeavlesning er mikromanometeret tilkoblet laminærstrømsselementet benyttet, mens rotametrene har blitt avlest som en kontroll av avlesningenes riktighet. Foruten termoelementet montert gjennom skroget av boksen, er et annet element boret inn gjennom et lite hull i lufttrykkslangen rett før laminærstrømsselementet. Dette er gjort for å kunne overvåke temperaturdifferansene mellom luften i trykkluftanlegget, testboksen og rommet, hvilket ved store avvik vil påvirke måleresultatene. Med en gjennomsnittlig temperaturdifferanse på 0,59°C, med høyeste målte differanse på 0,8°C er trykkforskjellene dette vil medføre videre neglisjert.



Figur 19 Plassering av termoelement før laminærstrømsselement (1) og innsiden av testboks (2), og tilkobling av lufttilførsel og mikromanometer (3)

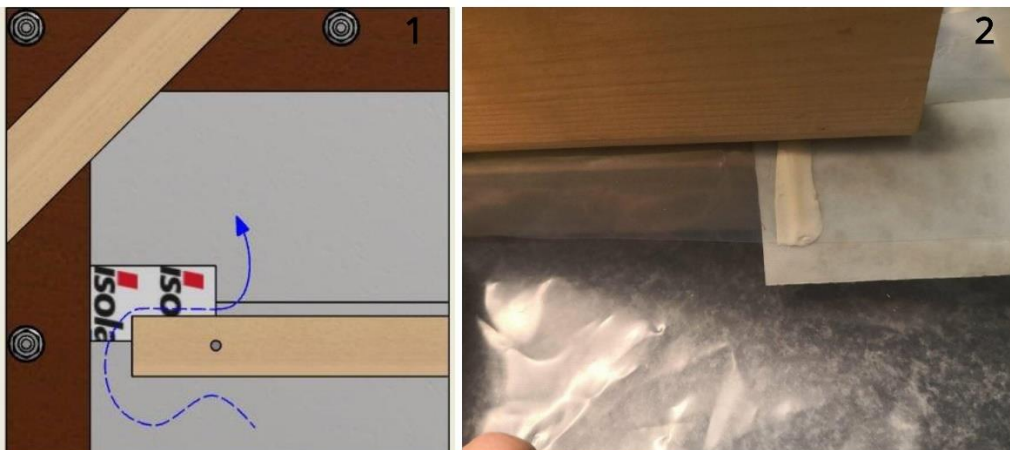
4.1.4. FORSØKSPROSEDYRE

I dette delkapitlet er prosedyren for de ulike prosessene gjennom forsøket beskrevet.

4.1.4.1 UTFORDRINGER UNDERVEIS

Omleggsskjøtene ble i utgangspunktet lagt med en overlapp tilnærmet lik stenderbredden, med underliggende del av omleggsskjøtene 10 mm over stenderens senter. Dette skulle imidlertid vise seg å være en feilvurdering. Selv om festemidlene ble tilstrebet skutt og skrudd ned så rett som mulig, viste dette seg imidlertid ikke alltid å være tilfellet. For en av prøvene med festemiddel maskinspiker og senteravstand 450 mm, flerret en av omleggsskjøtene opp under 1. trykktest. I frykt for at dette også ville skje ved flere av prøvene i løpet av forsøket, ble alle prøvene demontert og laget på nytt med en større overlapp av omleggsskjøtene. På dette tidspunktet hadde skruerprøvene alt vært igjennom første uttørking. For å hindre ytterligere forsinkelser, ble det istedenfor å bestille nye materialer, besluttet å bruke opp igjen de samme. Dette medførte imidlertid at fuktinnholdet til skruerprøvene ble langt lavere enn spikerprøvene ved ny montering.

For å kunne teipe omleggsskjøtene før siste trykktest, måtte overlappen trekkes et stykke utenfor klemflaten mellom stender og lekt. Dette resulterte i en utett passasje mellom lagene av PE-folien under teipen. Løsningen på dette ble å lime sammen lagene av PE-folien under teipen med tetningsmasse. Figuren nedenfor viser passasjen til luftlekkasjen og tiltaket som er gjort for tetting.



Figur 20 Tetting av passasje mellom overlapp av PE-folie under teip

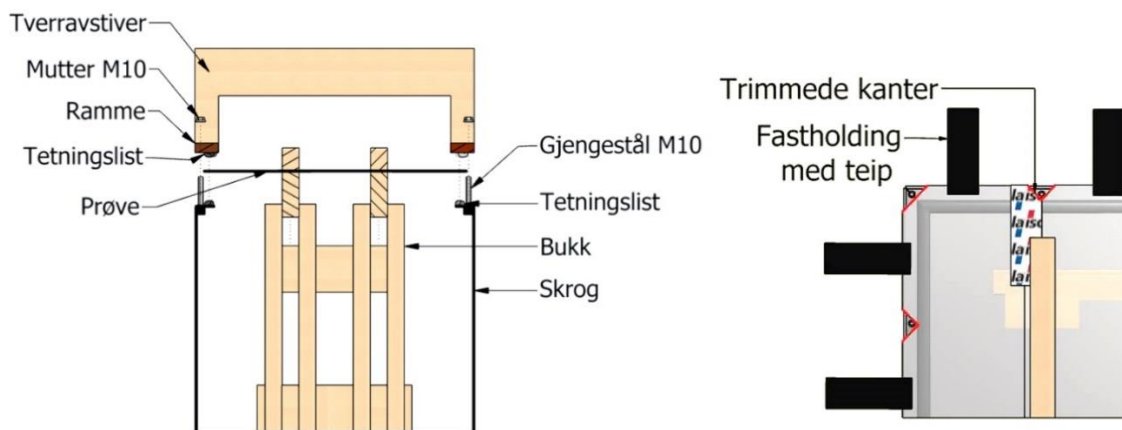
4.1.4.2 TRYKKTESTING AV PRØVER

Gjennom forsøket er hver prøve trykktestet syv ganger. En initiell trykktest er først utført etter montering av prøvene. Påfølgende trykktester er deretter gjort etter hver av de fem delsyklusene. Avslutningsvis, etter teiping av prøvenes omleggsskjøter, er syvende trykktest gjennomført. For senere å kunne fastsette eksakt fuktforløp er prøvene veid umiddelbart etter hver trykktest med en nøyaktighet på $\pm 0,1$ gram.

Bukken, tidligere anvendt under montering av prøvene, har også fungert som opplegg for prøvene under trykktestingene. Med prøven plassert i bukken, er PE-folien strukket ut over tetningslisten av skroget, og midlertidig fastholdt med teipbiter. Ved første trykktest er imidlertid PE-folien først trimmet langs kantene. Dette for å kunne strekke ut folien uten at den

kommer i konflikt med gjengestålet (figur 21). PE-folien er så klemt mellom tetningslistene på rammen og skroget, for en lufttett overgang mellom prøve og boks. For å sikre at rammen klemmes med lik styrke ved hver test, og for ellers å sikre en jevn klem rundt lysåpningen, er mutterne alltid strammet med samme moment.

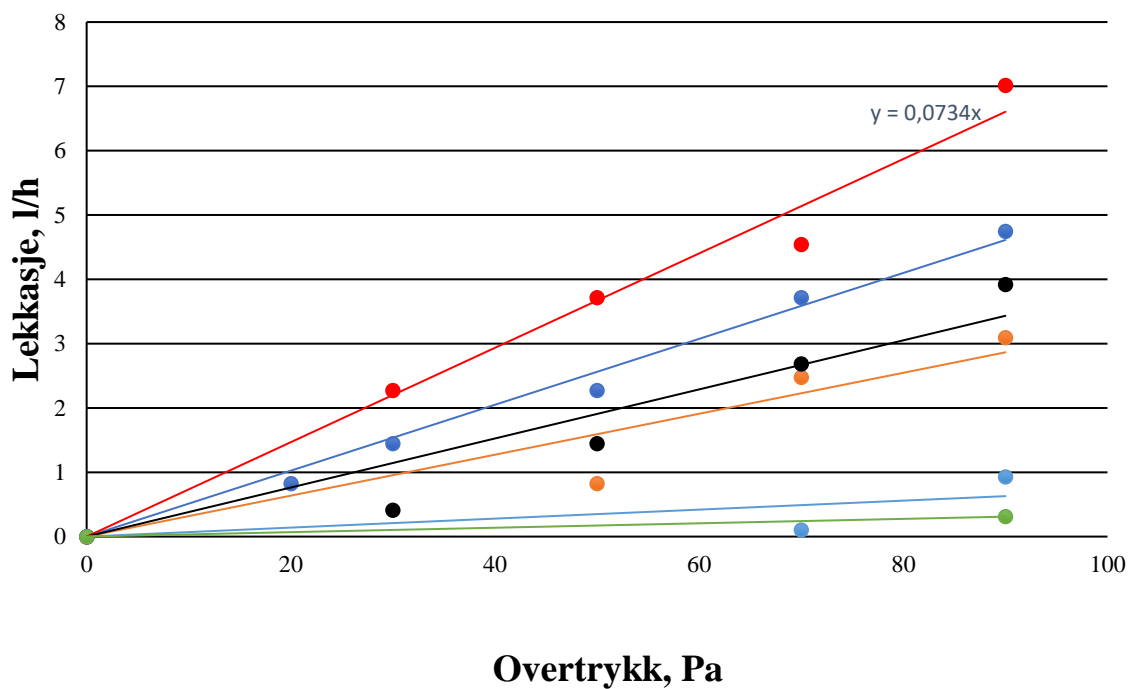
Lekkasjetallene er avlest ved overtrykk på 20, 30, 50, 70 og 90 Pa. Lekkasjeverdienes lineære trendfunksjon er så benyttet for fastsettelse av hver prøves lekkasjetall ved et overtrykk på 50 Pa. Det er disse verdiene som er benyttet som grunnlag for resultatet av forsøket.



Figur 21 Prinsipp for montering av prøve i testboks

4.1.4.3 EGENLEKKASJER

Mellom hver trykktestingsrunde har testboksen blitt frakoplet, og fraktet til varmelaboratoriet for oppfukning av prøver. For å avdekke eventuelle endringer som kan ha oppstått som følge av gjentagende til- og frakoplinger, samt oppfuktingenes påkjenning på pakninger og tetningsmasser, er det utført test av riggens egenlekkasje etter hver oppkopling. Dette er gjort ved bruk av ett stykke PE-folie som dekker hele lysåpningen. Prosedyren for montering og trykktesting har ellers vært lik trykktestingen av forsøksprøvene nevnt tidligere. Figuren på neste side viser testriggens egenlekkasjetall for hver av de 7 trykktestingsrundene. Dette med samme egenlekkasjeverdier for tørk 3 og teiping.



- Initiell
- Tørk 1
- Fukt 1
- Tørk 2
- Fukt 2
- Tørk 3 og teip
- Linear (Initiell)
- Linear (Tørk 1)
- Linear (Fukt 1)
- Linear (Tørk 2)
- Linear (Fukt 2)
- Linear (Tørk 3 og teip)

Figur 22 Egenlekkasjer ved trykktesting

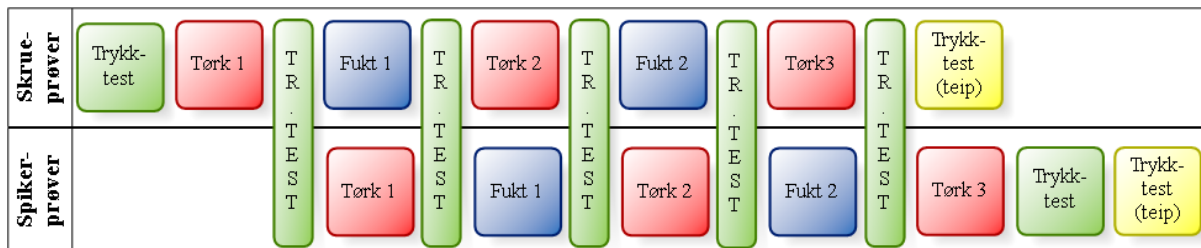
Ved et overtrykk på 50 Pa viser grafen lekkasjevariasjoner fra 0,17 l/hm (Tørk 3 og teip) til 3,65 l/hm (Fukt 1). Til sammenligning opererte Selmer (2013) med en egenlekkasje på 72,25 l/hm. Egenlekkasjene er trukket fra prøvenes lekkasjeverdier presentert i resultatdelen.



Figur 23 Trykktesting av prøve (1) og trykktesting av boksens egenlekkasje (2)

4.1.4.4 FUKTSYKLUSENE

Som tidligere nevnt har plassbegrensninger medført at oppfuktingene har blitt utført i to puljer. I tillegg gjør det faktum at boksen er benyttet både for oppfukting og trykktesting, at disse operasjonene ikke har kunnet foregå samtidig. Som løsning er første trykktest og uttørking utført for halvparten av prøvene (heretter kalt prøvesett 1). I påvente av at disse skal tørkes ned til ønsket fuktinnhold, er de resterende prøvene (prøvesett 2) pakket inn i PE-folie for å holde på fuktigheten etter montering. Etter uttørking av prøvesett 1 er påfølgende trykktest gjennomført ved samme operasjon for alle prøvene, men nå med prøvesett 1 én delsyklus foran de andre. Prosessen hvor prøvene vekselvis er fuktet og tørket mellom felles trykktestinger er deretter gjentatt fram til trykktesten etter siste uttørking av prøvesett 1 er gjennomført. Omleggsskjøtene i prøvesett 1 er så teipet som beskrevet i delkapittel 4.1.2.1, før siste trykktest er utført, mens prøvesett 2, som fortsatt ligger en delsyklus etter, er satt i tørkeskapet for siste uttørking, før gjennomføring av de to siste trykktestene, henholdsvis uten og med teipede omleggsskjøter. Illustrasjonen nedenfor viser koordinering av prøvenes delsykluser gjennom forsøket.



Figur 24 Fuktsyklusforløp av prøver

Ved oppfuktingene er den kombinerte test- og oppfuktingsboksen koblet fra luftmålingsriggen og flyttet til et av tørkeskapene i varmelaboratoriet. koblingspunktene for lufttilførselen og mikromanometeret er henholdsvis plagget og teipet igjen, og i bunnen av skapet er en beholder tilsatt vann. Prøvene er deretter brettet sammen og plassert på en perforert plate over vannbeholderen som tidligere illustrert i figur 12. Prøven påmontert elektroder for fuktavlesning er til slutt koblet til ledningsnett gjennom lokket, før det er heftet på plass og skrudd til for klemming av tetningslisten av skroget.

Både oppfuktingene og uttørkingene er gjennomført med tørkeskapene innstilt til 70 °C, og full viftekapasitet. Med et protimeter innstilt til gjeldende materiale (gran) og aktuell temperatur, er prøvene fuktet og tørket til verdier på henholdsvis 14% og 7%. Dette på bakgrunn av beregninger og vurderinger omtalt i kapittel 3. Oppfuktingene tok i snitt 145,3 timer, mens tiden for uttørkingene i snitt tok 115,2 timer. Høyeste temperaturforskjell mellom bunn, topp og midten av oppfuktingsboksen ble målt til 0,7°C.

Etter siste uttørking er sprekkdannelsen mellom stender og påføring målt med en bladføler for et lite utvalg av prøvene for å se om dette sammenfaller med klemteorien beskrevet i litteraturen. Disse sammenligningene beskrives først i diskusjonsdelen av oppgaven.

Fastsettelse av prøvenes eksakte fuktforløp er gjort etter tørke/veie-metoden. Etter siste trykktest er samtlige prøver demontert. Vekten av den teipede PE-folien, festemidlene og

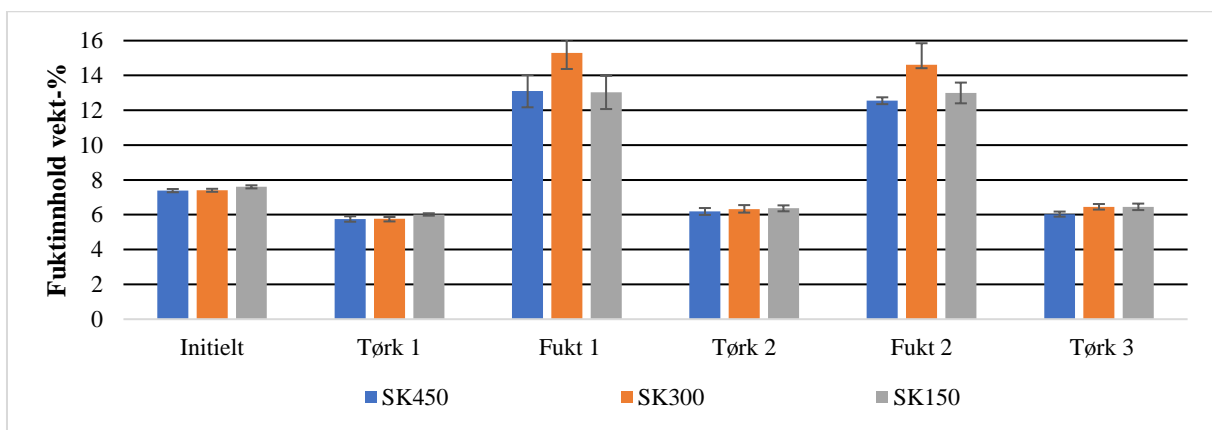
måleinnretninger (for to av prøvene) er så veid for hver av dem. Fratrullet vekten av den ettermonterte teipen i forkant av siste trykktest (20,0 gram/m), er disse tallene trukket fra vekten av prøvene ved hver trykktest. Tallene vi står igjen med er dermed vekten av trevirket etter hver delsyklus. Samtidig er stenderne og lektene plassert i et tørkeskap, og tørket ned til absolutt tørrvekt. Tørrvekten ble fastsatt når vektendring hadde sunket til < 0,1 % per døgn.

4.1.5. RESULTAT

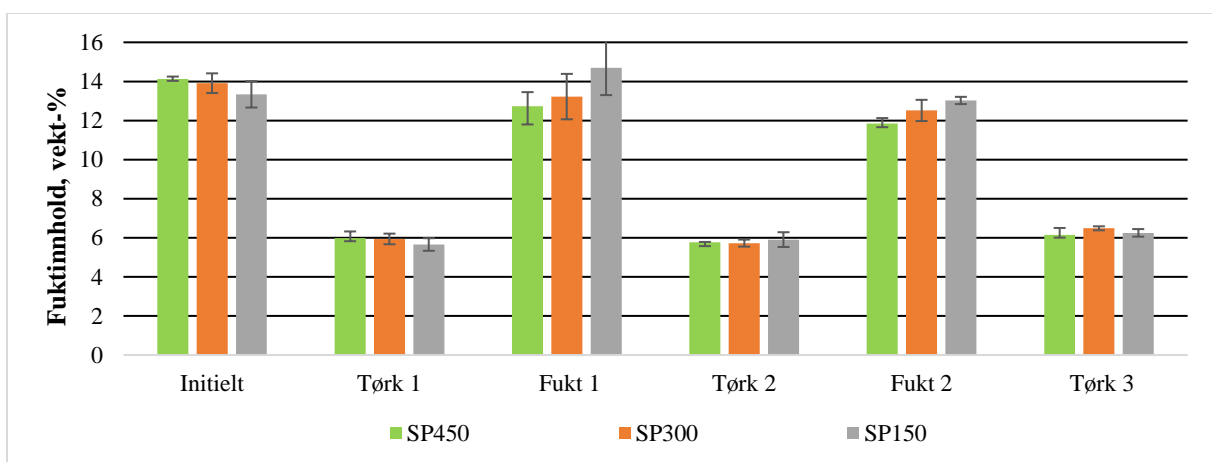
Lekkasjene som presenteres i dette delkapitlet er fastsatt som beskrevet i trykktestingsprosedyren i delkapittel 4.1.4.2. Alle lekkasjeværdier er fastsatt ved avlesning av trykkforskjellen over laminærstrøms-elementet mellom testboks og lufttrykkssystem. Egenlekkasjeværdier er så trukket fra avleste prøveverdier før omregning fra Pa til l/hm.

4.1.5.1 FAKTISK VANNINNHold

Medberegnet den initielle fuktigheten (vanninnholdet ved montasje), er det gjennomført tre hele fukt- og tørksykluser. Etter komplett uttørring av prøvene er faktisk vanninnhold ved alle delsyklusene beregnet. Grafene nedenfor viser gjennomsnittlig vanninnhold med tilhørende standardavvik for de seks ulike prøvekombinasjonene.



Figur 25 Faktiske verdier for fuktinnhold i vekt-% - skruerprøver



Figur 26 Faktiske verdier for fuktinnhold i vekt-% - spikerprøver

Resultatet av beregningene viser at faktisk gjennomsnittlig fuktinnhold, sett samlet gjennom alle oppfukningene, varierer mellom 11,9 % og 15,3 %. Ser man på uttørringene ligger de

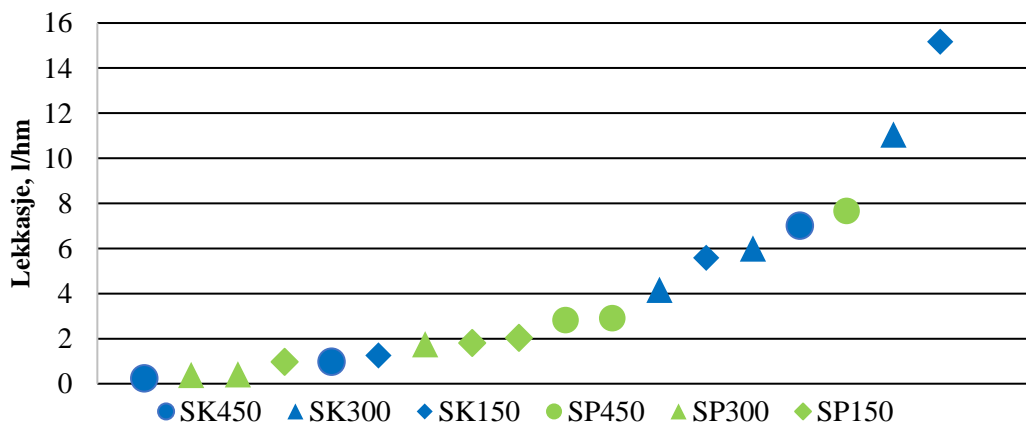
gjennomsnittlige verdiene mellom 5,7 % og 6,5 %. Høyeste og laveste verdi i løpet av oppfuktingene (16,6% og 11,6%) finner vi hos henholdsvis SP150-2 (etter fukt 1), og SP450-1 (etter fukt 2). De individuelle prøvevariasjonene viser seg å være mindre gjennom uttørkingene. Vanninnholdet ligger her mellom 5,2 % (SK150-3 etter tørk 3) og 6,7% (SP150-1 etter tørk 1).

For å oppnå sammenlignbare resultater hvor disse fuktvariasjonene er tatt høyde for, ble det forsøkt å korrigere luftlekkasjene for hver prøve. Tanken var her å beregne den teoretiske endringen av luftstrøm som ville følge av tverrsnittsendringen i sprekken, gitt av fuktavviket. Den teoretiske modellen viste seg imidlertid å korrelere dårlig med måleresultatene, og ble derfor forkastet. Mulige forklaringer på dette er drøftet under diskusjonskapitlet. For videre sammenligninger av resultatene er det derfor sett bort ifra fuktvariasjonene.

Som tidligere nevnt i delkapittel 4.1.4.1, ble alle prøvene besluttet demontert og forsøksprosedyren restartet, etter at det ble gjort kjent at omleggsskjøtene var uheldig plassert i forhold til festemidlene. Skruerprøvene, som på dette tidspunkt hadde vært gjennom 1. uttørking, fikk som konsekvens av dette et lavere fuktinnhold ved ny montering, noe som fremkommer ved sammenligning av initiell fukt i figur 25 og figur 26. Konsekvenser dette har hatt for prøvenes lekkasjeforløp gjennom syklusene er drøftet i diskusjonskapitlet.

4.1.5.2 LEKKASJE ETTER MONTERING

Figuren nedenfor viser prøvenes luftlekkasjer ved den initielle trykktesten. Prøvetypene, illustrert med ulik farge og symbol for henholdsvis type festemiddel og senteravstand, er sortert i stigende rekkefølge etter lekkasjetall. Resultatet viser at 11 av 18 prøver hadde et lekkasjetall under 2,9 l/hm, og at 16 av 18 prøver hadde en lekkasje under 7,7 l/hm.



Figur 27 Lekkasjer etter initiell trykktest sortert etter størrelse, 50 Pa overtrykk

De to resterende prøvene SK300-1 og SK 150-3 skilte seg noe ut, med lekkasjeverdier på henholdsvis 11,1 l/hm og 15,2 l/hm. Dette viste seg imidlertid å korrelere dårlig med lekkasjetallene etter påfølgende trykktest, hvor lekkasjetallene, til tross for lavere fuktighet, var lavere. Grunnen til at dette ikke ble fanget opp under målingene er fordi endelig lekkasjetall ved 50 Pa, hvor avleste verdier er korrigert med lekkasjetall og trendjustert, ikke ble fastsatt før etter at trykktestene var gjennomført.

Da dette resultatet, hvilket strider imot hva som anses som logisk endring av lufttetthet som funksjon av fuktighet, ble oppdaget, ble det utformet et Excel-ark for nærmere analysering av fuktforløpet til hver enkelt prøve.

I arket er en celle for hver lekkasjeverdi formatert med en den logiske formelen «HVIS» («IF» på engelsk). Innbakt ligger et utsagn om hvorvidt absoluttverdien av differansen mellom luftlekkasjeverdien i cellen over og luftlekkasjeverdien til foregående syklus skal returneres, eller om det skal gis en feilmelding. Dersom cellen ligger i en kolonne som inneholder oppfukningsverdier, returneres verdien dersom differansen mellom de to cellene er positiv. Er verdien negativ returneres en feilmelding. Motsatt, for celler i kolonner med uttøringsverdier, returneres absoluttverdien dersom differansen er negativ, og en feilmelding dersom den er positiv.

I tillegg er det opprettet en regel for de returnerte verdiene som formaterer cellene i fargekoder etter størrelsen på lekkasjeendringen. Ved å definere én høyst sannsynlig og én svært lite sannsynlig verdi for lekkasjeendringene mellom delsyklusene, formateres cellene med fargekoder etter verdi. Dette i spekteret mellom gult (svært lite sannsynlig) og grønt (høyst sannsynlig). Sannsynlighetene er definert på bakgrunn hva som etter erfaring gjennom trykktestene anses som normal lekkasjevariasjon. Høyst sannsynlig, og svært lite sannsynlig verdi er ved denne analysen satt til henholdsvis > 20 l/hm og < 2 l/hm.

Analyseverktøyet gjør det således enkelt å fange opp lekkasjevariasjoner som etter fuktskyklusene vil kunne kategoriseres som besynderlige, eller som åpenbart «feil» i forhold til hva som etter modellen anses som sannsynlig. For verdier som faller under disse kategoriene er det sett nærmere på faktorer som kan være med på å forklare unormalitetene. Figuren nedenfor viser skjermbilde av Excel-arket.

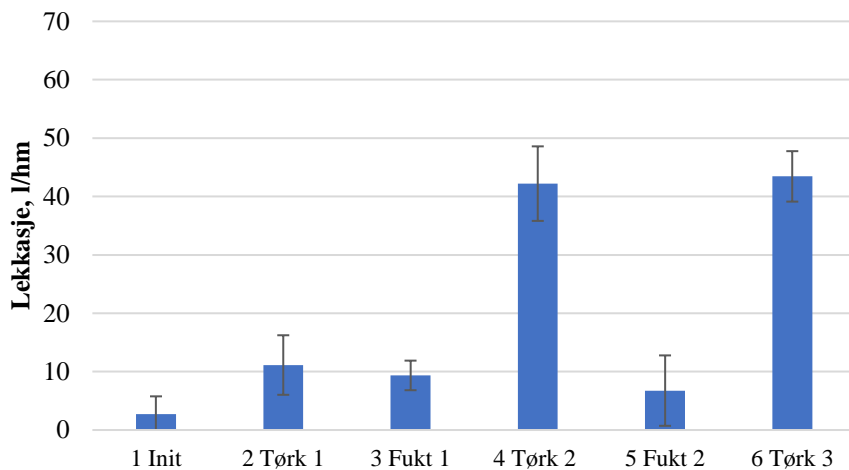
	Initial	Tørk 1	Fukt 1	Tørk 2	Fukt 2	Tørk 3	Tøp
1:SK450-1	0,226582	4,683944	5,784123	35,67526	3,197317	48,08501	39,67002
		4,457362	FEIL	29,89114	32,47795	44,88769	8,414987
2:SK450-2	7,000111	17,1497	11,4323	40,07145	1,812652	44,56985	39,71849
		10,14959	5,717408	28,63915	38,2588	42,7572	4,851363
3:SK450-3	0,975559	11,55692	10,83689	50,86756	15,24138	37,68177	29,33979
		10,58136	0,720026	40,03066	35,62617	22,44038	8,341977
4:SK300-1	11,04963	6,256168	3,661809	24,04408	1,611247	41,07042	33,54666
		FEIL	2,594359	20,38227	22,43283	39,45918	7,523766
5:SK300-2	4,15903	11,75077	3,014793	31,53889	2,172665	28,17667	25,87184
		7,59174	8,735977	28,5241	29,36623	26,00401	2,304838
6:SK300-3	5,996858	16,44101	6,184417	30,05478	3,183471	24,3915	10,42527
		10,44415	10,25659	23,87037	26,87131	21,20803	13,96623
7:SK150-1	5,591529	3,496908	2,866256	13,92847	0,966748	23,63057	22,42276
		FEIL	0,630652	11,06221	12,96172	22,66382	1,207805
8:SK150-2	1,251234	1,885662	2,854927	42,25242	2,866256	44,57362	38,14374
		0,634428	FEIL	39,39749	39,38617	41,70737	6,429881
9:SK150-3	15,17467	10,20876	6,195746	15,94127	1,325502	27,75813	23,93897
		FEIL	4,013011	9,745524	14,61577	26,43262	3,819158
10:SP450-1	2,813387	43,00266	6,933395	62,02921	11,03578	74,44085	28,3957
		40,18927	36,06926	55,09582	50,99343	63,40507	46,04515
11:SP450-2	7,666009	32,18087	9,213057	68,47798	12,56898	71,44179	40,70852
		24,51486	22,96782	59,26492	55,90899	58,87281	30,73327
12:SP450-3	2,895209	22,91243	5,407746	62,29104	12,9806	134,5542	48,4595
		20,01722	17,50468	56,8833	49,31044	121,5736	86,09469
13:SP300-1	0,395259	21,16649	2,377847	31,74533	1,684256	30,83271	22,29311
		20,77123	18,78864	29,36749	30,06108	29,14846	8,539606
14:SP300-2	1,748454	32,81278	2,294767	33,22189	2,863739	38,22556	25,75351
		31,06433	30,51802	30,92712	30,35815	35,26183	12,47205
15:SP300-3	0,421693	59,79361	8,107843	71,91446	2,970736	71,99628	37,6654
		59,37192	51,68577	63,80662	68,94373	69,02555	34,33088
16:SP150-1	2,037975	43,29092	3,841816	51,96773	4,291203	38,31179	26,40871
		41,25295	39,4491	48,12592	47,67653	34,02059	11,90308
17:SP150-2	0,973042	46,50586	2,649745	47,03581	6,370718	55,32618	44,72845
		45,53282	43,85612	44,38606	40,66509	48,95546	10,59772
18:SP150-3	1,808876	30,06611	1,231093	17,37251	0,386447	20,73788	18,14352

Figur 28 Formatert Excel-ark for analyse av lekkasjevariasjoner

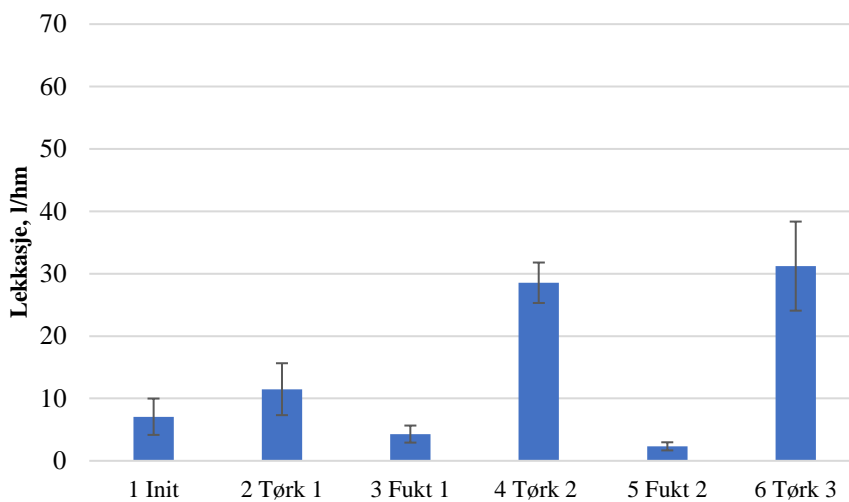
4.1.5.3 LEKKASJER GJENNOM DELSYKLUSENE

Figurene på de to neste sidene viser gjennomsnittlige luftlekkasjer ved et overtrykk på 50 Pa, gjennom alle delsyklusene for de seks ulike prøvevariantene. De individuelle variasjonene er her illustrert med prøvenes standardavvik.

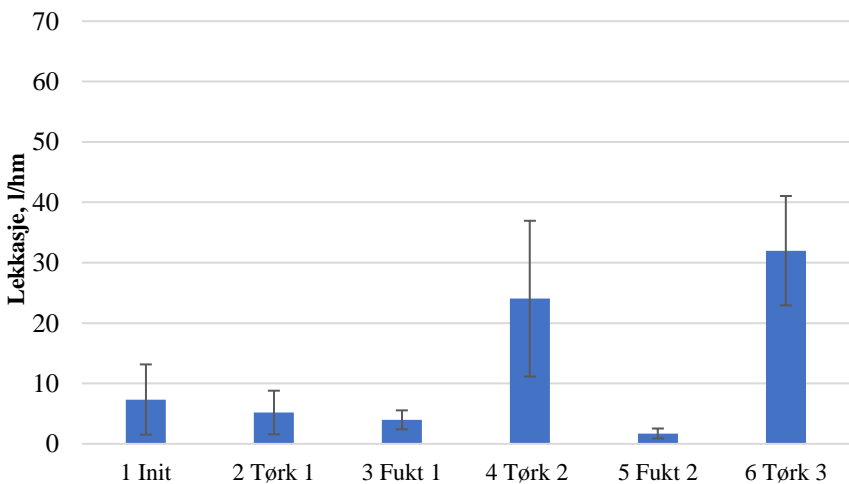
Resultatene viser sterkt økende lekkasjeverdier fra initiell til siste trykktest for samtlige prøvetyper. En annen trend som gjør seg synlig hos samtlige seks typer, er relativt jevne og lave gjennomsnittlige lekkasjeverdier etter hver oppfukting. Disse verdiene spenner fra 1,7 l/hm (SK150 etter fukt 2) til 12,2 l/hm (SP450 etter fukt 2). Alle prøvetypene bortsett fra én (SP150) viser en økende lekkasjeutvikling etter uttørking for hver syklus. Den største lekkasjeendringen mellom uttørkingene finner vi hos spikerprøven med senteravstand (SP450), med en gjennomsnittlig lekkasjeendring på 30,4 l/hm (figur 32).



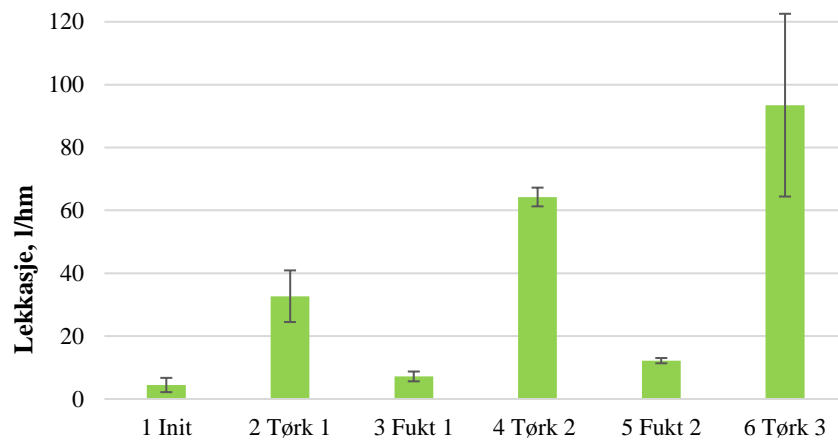
Figur 29 Skruerprøver med senteravstand 450 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik



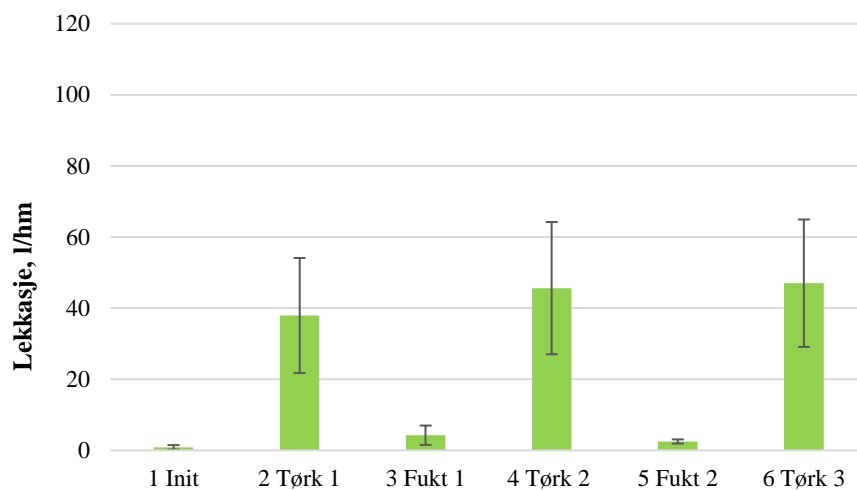
Figur 30 Skruerprøver med senteravstand 300 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik



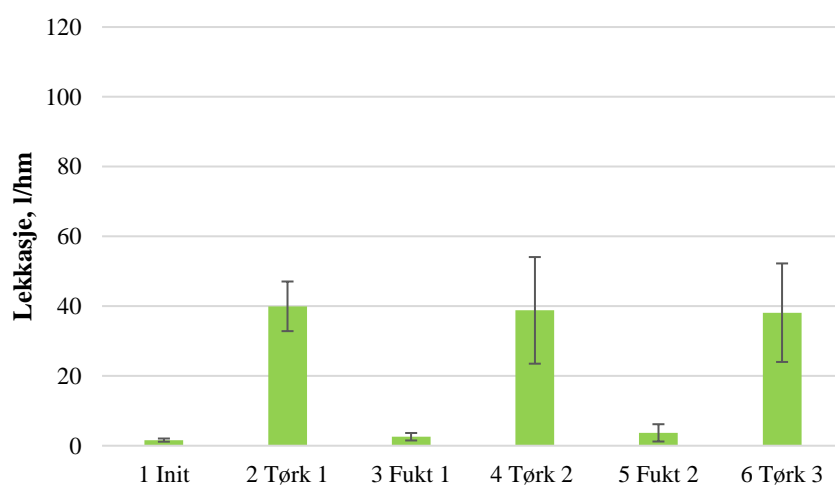
Figur 31 Skruerprøver med senteravstand 150 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik



Figur 32 Spikerprøver med senteravstand 450 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik

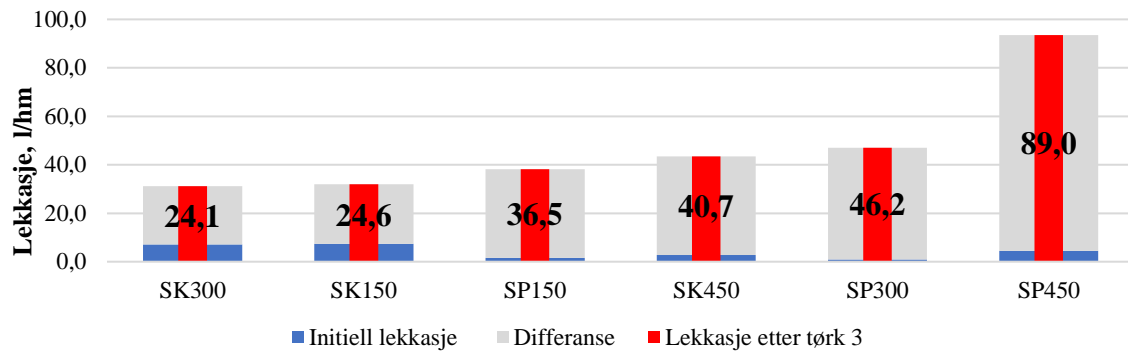


Figur 33 Spikerprøver med senteravstand 300 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik



Figur 34 Spikerprøver med senteravstand 150 mm - Gjennomsnittlig luftlekkasje med standardavvik

Figuren nedenfor viser luftlekkasjen før og etter fuktskyklusene, samt differansen mellom disse verdiene hvilket representerer lekkasjeendringen i løpet av fuktskyklusene. Her vises det at både lekkasjeendringen og sluttlekkasjen er minst hos skruerprøvene med senteravstand 300 og 150 mm. De gjennomsnittlige lekkasjeverdier etter endte fuktskykluser, var for disse prøvene på henholdsvis 31,2 og 32,0 l/hm. Med en overlapp mellom spikerprøven med minst senteravstand (SP150) og skruerprøven med den største senteravstanden (SK450), korrelerer ellers lekkasjeverdier med type festemiddel og senteravstand.

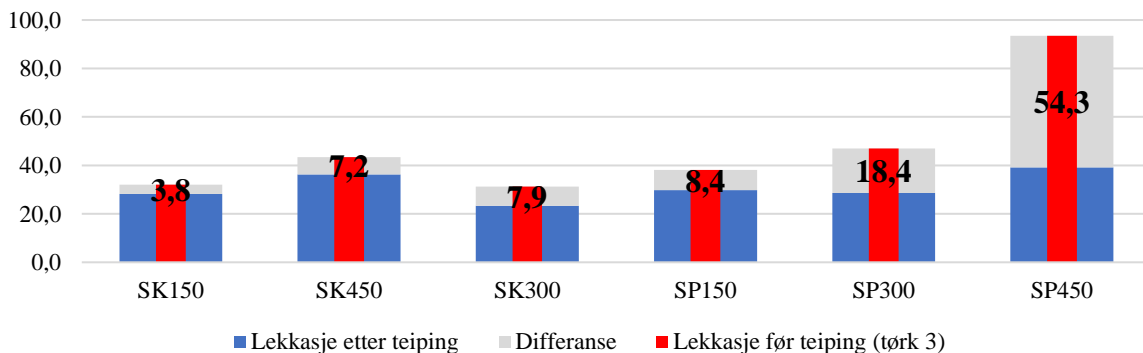


Figur 35 Prøvetypenes lekkasjer før, og etter endt fuktskykluser med differanseverdier, sortert etter størrelse

4.1.5.4 LEKKASJER ETTER TEIPING

Etter gjennomførte målinger av lekkasjeverdier etter siste uttørking, er omleggsskjøtene teipet igjen som beskrevet i delkapittel 4.1.2.1. Prøvene er deretter testet på nytt for å avdekke hvilke endringer av lekkasjeverdier som kan knyttes til teipen. Figuren nedenfor viser lekkasjeverdier før og etter gjenteiping av omleggsskjøtene, og differansen mellom dem sortert etter størrelse.

Resultatet viser at SK300 er prøvetypen med den laveste lekkasjeverdien etter påføringen av teip (23,3 l/hm). Den største lekkasjeverdien er det fortsatt SP450 som står for, med en verdi på 39,8 l/hm. Alle spikerprøvenes reduksjon i lekkasjetall er, etter teiping av omleggsskjøtene, større enn skruerprøvenes. Videre ses det at gjennomsnittlig lekkasjeverdi avtar minst hos skruerprøvene med senteravstand 150 mm (SK150). I motsatt ende representerer spikerprøvene med avstand 450 mm (SP450) den største differansen mellom gjennomsnittlig luftlekkasje før og etter teiping. Bortsett fra SK450 og SK300 som har relativt like endringsverdier, følger minste senteravstand endringene av lekkasjeverdi innad for de to festemidlene.



Figur 36 Prøvetypenes lekkasjer før og etter teiping med differanseverdier, sortert etter størrelse

4.1.6. BETYDNINGEN FOR LEKKASJETALL I BYGNINGER

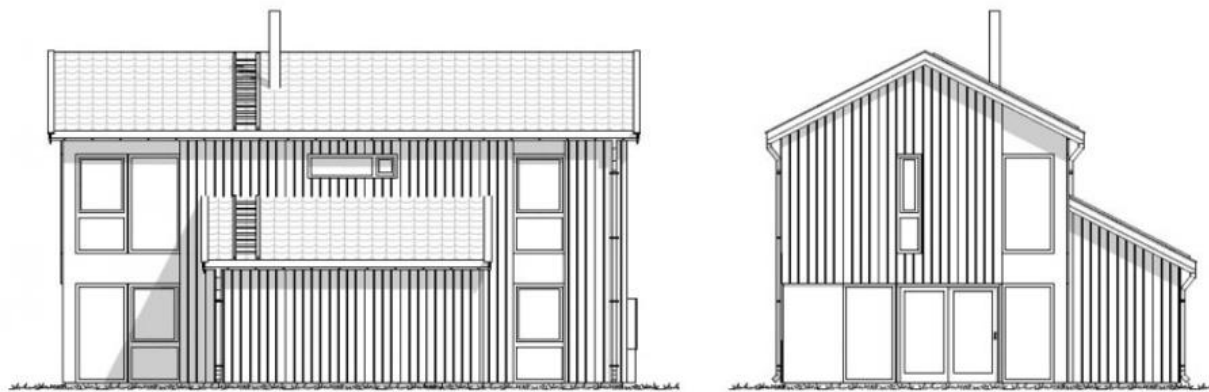
For å danne et bilde av den praktiske betydningen av lekkasjetallene til klemte og teipede dampspærreskjøter, er resultatene fra forsøket anvendt for beregning av lekkasjetall ved to bygninger. Målet har her vært å prøve å tallfeste hvilken andel av bygningers lekkasjetall dampspærreskjøtene, typisk vil representere, ved tilfredsstilt tetthet i henhold til NS 3700:2013, NS 3701:2012 og TEK17. Bygningene som ble undersøkt var en enebolig fra boligleverandøren Norgeshus, og kontorbygget Lysgården, som er et pågående prosjekt med planlagt ferdigstillelse i juni 2019 (Veidekke, 2017).

For beregning av lekkasjetallene gjennom dampspærreskjøtene har følgende antagelser og forenklinger blitt lagt til grunn:

- All luftlekkasje i bygningen skjer gjennom utetthetene i dampspærreskjøtene
- Vindspærresjiktets bidrag til lufttettheten er valgt sett bort ifra (dvs. all lekkasje gjennom dampspærresjikt forlater også klimaskallet)
- Tak anses å være lufttett
- Dampspærreskjøter langs bunnsvill, toppsvill vindus- og dørkarmer, og vertikale skjøter i hjørner samt hver 15. meter

4.1.6.1 ENEBOLIG - DRÅPEN

Dråpen er en toetasjes enebolig uten kjeller med BRA på 140 m². For mengdeberegning av dampspærreskjøter etter antagelsene listet ovenfor, ble nødvendige data hentet fra dwg-filer bestående av plan- snitt- og fasadetegninger, ved å bruke ulike måleverktøy i AutoCAD.



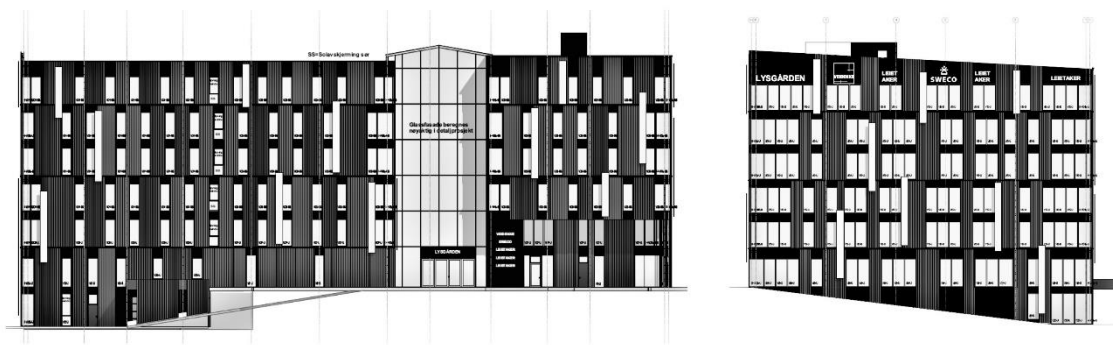
Figur 37 Hustypen *Dråpen* fra husprodusenten Norgeshus (Norgeshus, 2018)

4.1.6.2 KONTORBYGG - LYSGÅRDEN

Lysgården er i skrivende stund et fortsatt pågående byggeprosjekt på Sluppen i Trondheim. Kontorbygget som er planlagt ferdigstilt i juni 2019, har et bruttoareal på over 12500 m² over 7 plan, medregnet et kjellerplan over en mindre del av BYA. For mengdeberegninger som er gjort ved dette bygget ble detaljløsninger studert og nødvendige dimensjoner samlet inn fra en 3D-modell av bygningen. For dette ble ulike funksjoner i Solibri Model Checker anvendt.

Ved nærmere studering av vinduenes plassering og innfesting er det etter hva som ligger av informasjon i modellen antatt at vinduene er plassert på toppen av hver dekkekant. Omkretslengden under vinduene er derfor ikke tatt med i beregning av lengdene av

dampsperreskjøtene. Glassfelt som går fra dekker til dekke (fire felt i plan 1 på byggets nordside) er det kun antatt dampsperreskjøter på hver side av glassfeltenes høyderetning (overgangene mellom fasadetyperne). Ved beregning av oppvarmet volum er det forenklet valgt å neglisjere volumet mellom glasstaket og takplanet. Det er også valgt å se bort ifra hjørnevinduenes betydning for lengden av dampsperreskjøter i hjørnene. Vindusfelt bestående av flere vinduer er antatt å ikke ha innbyrdes vertikale dampsperreskjøter og er derfor målt som ett vindu.

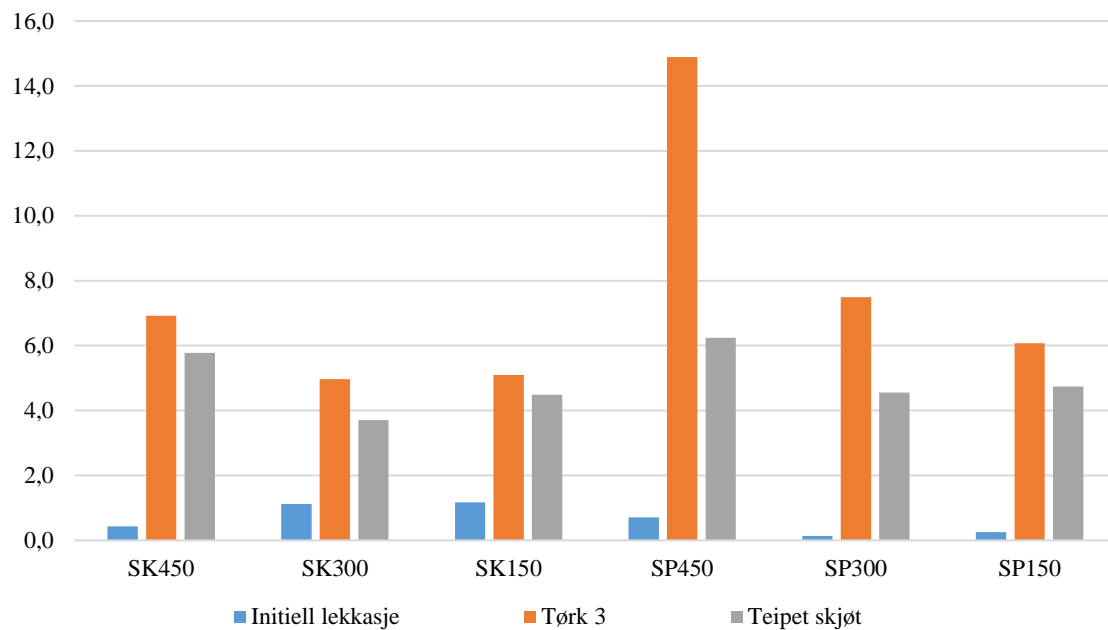


Figur 38 Lysgården, fasade mot sør (venstre) og vest (høyre) (HUS arkitekter, 2018)

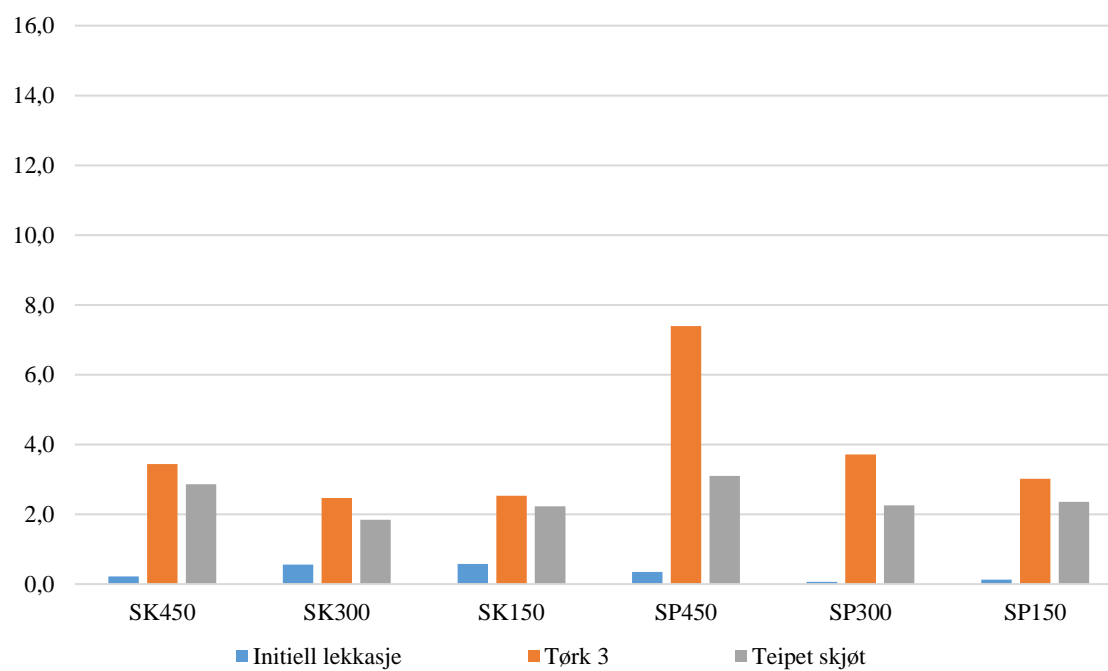
4.1.6.3 RESULTAT

Grafene på de to neste sidene viser andelen av kravpålagt luftskift per time som kan knyttes til dampsperreskjøtene. Dette på bakgrunn av resultatene fra kapittel 4.1.5. Grafene viser prosentandel lekkasje etter initiell trykktest (lekkasje etter montering), 6. trykktest (lekkasje etter siste fuktskyklus) og 7. trykktest (lekkasje etter teiping) for alle typer festemidler og senteravstander.

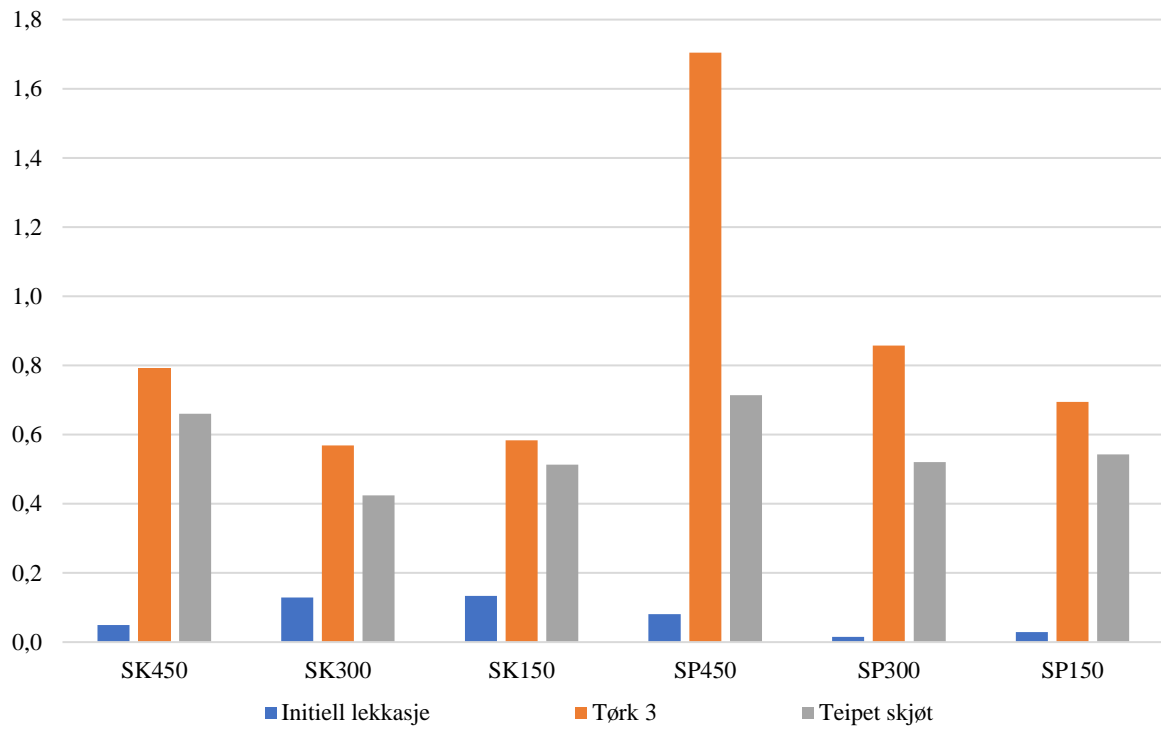
Som den av prøvetyperne med det høyeste lekkasjetallet etter syklusene, er det naturlig nok SP450 som også oppnår de høyeste prosentverdiene for lekkasjene gjennom dampsperreskjøtene. For eneboligen vil disse lekkasjene utgjøre 14,9 % av lekkasjekravet i henhold til NS 3700:2013 og 7,4 % ved en total lekkasje lik minimumskravene etter TEK 17 (2017). For kontorbygget Lysgården er prosentandelene som kan knyttes til dampsperreskjøtene langt mindre. Høyeste verdi ligger her på 1,70% ved en lufttetthet som innfrir krav i henhold til 3701:2012, og 0,68 % ved en lufttetthet etter minimumskravene. Alle verdier som er brukt i beregningene, samt luftlekkasjetall (m^3/h) og prosentvis lekkasjeandel ved samtlige delsykluser finnes i vedlegg 2.



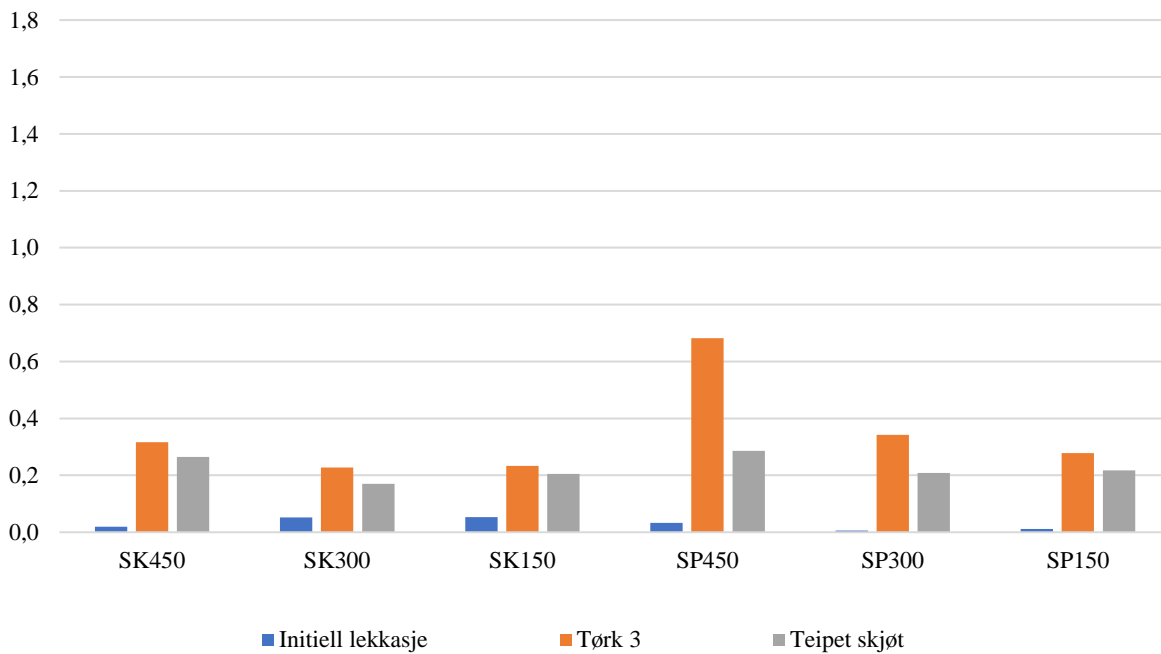
Figur 39 Enebolig (Dråpen) – Dampsperrreskjøtenes prosentvise lekkasje av passivhuskrav (0,6 oms/h)



Figur 40 Enebolig (Dråpen) – Dampsperrreskjøtenes prosentvise lekkasje av minimumskrav (1,5 oms/h)



Figur 41 Kontorbygg (Lysgården) – Dampspærreskjõtenes prosentvise lekkasje av passivhuskrav (0,6 oms/h)



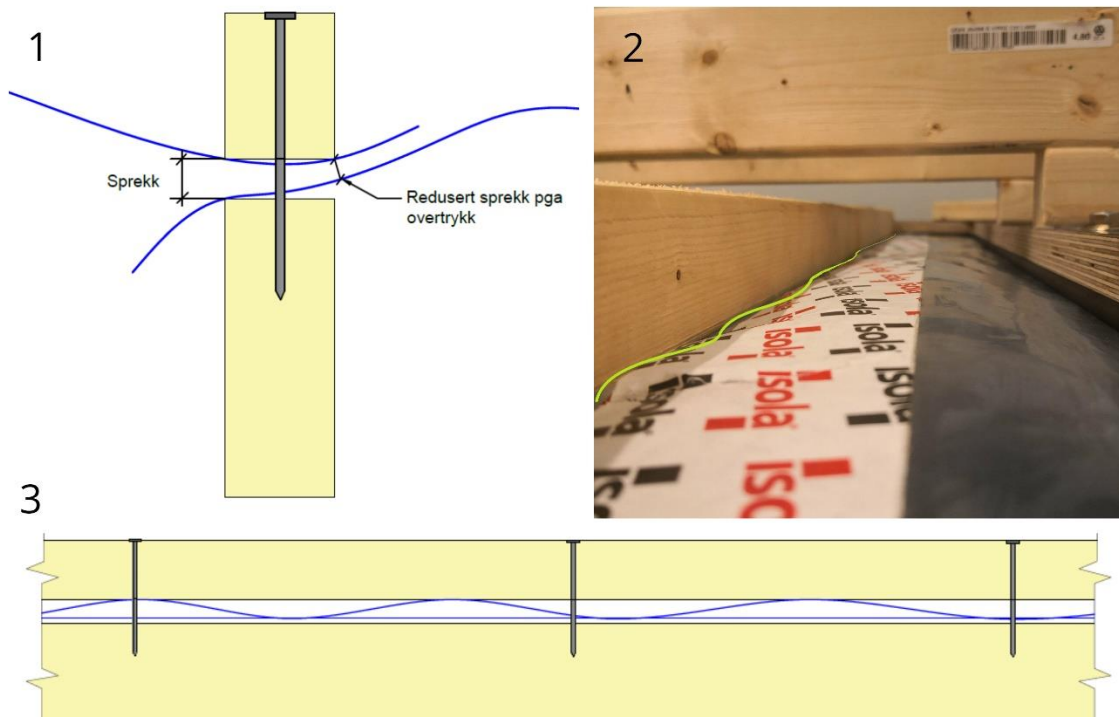
Figur 42 Kontorbygg (Lysgården) – Dampspærreskjõtenes prosentvise lekkasje av minimumskrav (1,5 oms/h)

5. DISKUSJON

I dette kapittelet er de ulike resultatene som har kommet frem under forsøkene diskutert. Her drøftes først forsøksresultatenes riktighet, og i hvilken grad resultatene etter, trykktestings utforming, lar seg overføre til hva som er tilfellet for en dampspærreskjøt i praksis. Videre poengteres tendensene og sammenhengene som kan ses mellom parameterne som er undersøkt. Det er også sett på hvorvidt forsøksresultatene sammenfaller med akseptert klemteori, hva gjelder svell og svinn som følger av fuktighetsvariasjoner i trevirket, beskrevet i litteraturdelen. Avslutningsvis diskuteres konsekvensen av lekkasjene gjennom klemte dampspærreskjøter på bakgrunn av lekkasjeberegningene som er gjort for eneboligen Dråpen og kontoret Lysgården.

5.1. FEILKILDER

En faktor som det ved utforming av forsøket ikke ble tatt høyde for, og som kan ha konsekvenser for testresultatenes overførbarhet til lekkasjene som faktisk inntreffer gjennom dampspærreskjøter i yttervegger, er bulingen som skjedde ved de tre flatene av PE-folie mellom stenderne og rammen. Med et økt overtrykk øker også bulingen, hvilket vil påvirke spalttykkelsen av sprekken mellom de omlagte PE-folielagene. Dette blir sett på som en forklaring på hvorfor de teoretiske lekkasjene, som i forsøk på å korrigere for fuktavvikene (kap. 4.1.5.1), viste seg å stemme dårlig med testresultatene, og derfor ble forkastet. I en typisk yttervegg vil isolasjon på begge sider av dampspærresjiktet motvirke bulingen som kan tenkes å inntreffe ved større trykkforskjeller. Det anses derfor som sannsynlig at reduserte lekkasjer som følge av buling av dampspærren vil være mindre sannsynlig i en komplett yttervegg. Med andre ord kan lekkasjen gjennom dampspærreskjøtene i praksis tenkes å være større enn de verdiene som foreligger etter forsøket. Bilde 1 i figuren nedenfor illustrerer den reduserte spalten som kan tenkes å komme som følge av bulingen.



Figur 43 Buleffekt ved trykktesting (1) og bølgeformasjon etter påføring av teip (2 og 3)

Et annet fenomen som må nevnes, viste seg etter påføring av teipen før siste trykktest. Selv om omleggsskjøtene ble forsøkt teipet med høy nøyaktighet, gjorde teipen at PE-folien fikk en viss bølgeform langs inngangen mellom stender og påføring. Dette var tilfellet for alle prøvene, og er forsøkt illustrert i bilde 2 og 3 i figuren på forrige side. Bølgeformasjonen kan tenkes å ha motvirket klemeffekten fra bulingen etter teipingen, som følge av at spalten mellom PE-folien og påføringen åpnes opp mellom bølgetoppene. Omleggsskjøtene vil fortsatt være tette, men lekkasjeverdiene gjennom perforeringene i dampsperran forårsaket av festemidlene kan tenkes å påvirkes av dette. Den reduserte bulingen mellom trykktest 6 (etter 3. uttørking) og trykktesten etter teipingen kan konsekutivt tenkes å ha gitt en lavere reduksjon av lekkasjetall enn hva som ville vært tilfellet dersom disse fenomenene ikke hadde inntruffet. Den reduserte lekkasjen ved teiping av omleggsskjøter kan med andre ord anses å være større enn hva som kommer fram i forsøksresultatet.

5.1.7. ANALYSE AV TRYKKTESTINGSRESULTATER

Som beskrevet i delkapittel 4.1.5.2 ble det, etter at det ved andre trykktest ble avdekket trykktestingsresultater som indikerte at noe var feil, utformet et analyseverktøy i Excel. Ved å se på skjermbildet av Excel-arket i figur 28 på side 26, ser man at det, etter formateringen som tidligere er beskrevet, kom frem feilmeldinger for 5 av de 108 luftlekkasjeendringene. Alle disse tilhører skruerprøver, og kan knyttes til trykktesten etter første uttørking og påfølgende oppfukning. Ses det bort ifra endringene mellom trykktest etter siste uttørking og trykktest etter teiping av omleggsskjøter hvor sannsynlighetsdefineringene ikke gjør seg like gjeldende, finner vi at de lekkasjetallene som etter modellen er kategorisert som lite sannsynlige også kan knyttes til skruerprøvene ved overnevnte trykktester.

Sett i sammenheng med de faktiske fuktendringene mellom initiell fukt og første uttørking kan unormalitetene begrunnes. Som følge av de lave initielle fuktverdiene hos skruerprøvene, ble fuktendringen etter påfølgende uttørking svært liten. Konsekutivt ble også lekkasjevariasjonene mellom initiell trykktest og trykktest etter første uttørking små. Med relativt lave lekkasjeverdier, ble nøyaktighetsvariasjoner tilknyttet avlesning og fastklemming av ramme desto mer utslagsgivende, og tre av prøvene fikk lavere verdier enn ved foregående test. At unormalitetene forplantet seg videre til trykktesten etter første oppfukning, kan forklares med at liten sprekkdannelse som følger av lite svinn etter uttørkingen delsyklusen tidligere, ga mindre potensiale for lekkasje ved svelling etter oppfukning. Lekkasjevariasjonene ble igjen små, og nøyaktighetsavvikene ble igjen utslagsgivende for to av prøvene.

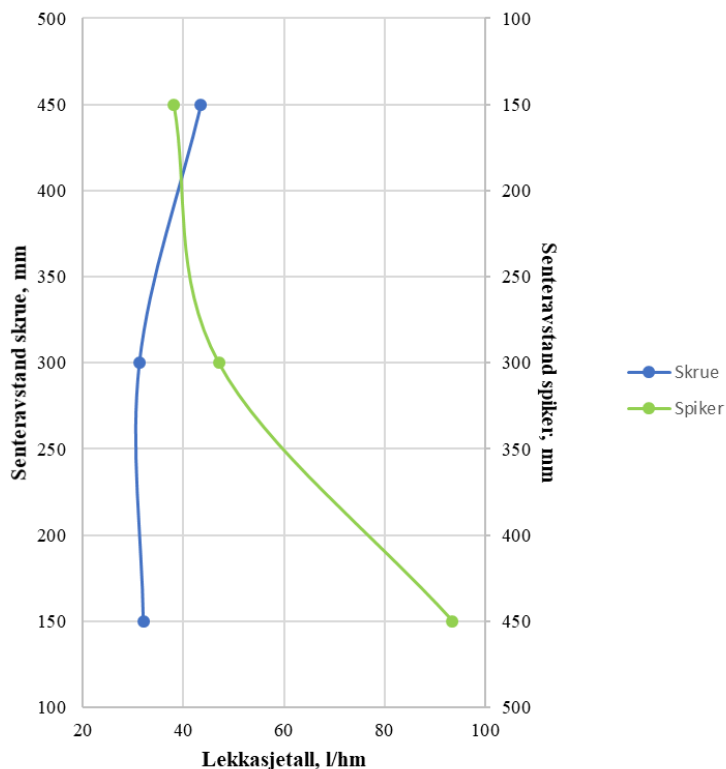
De resterende lekkasjeendringene mellom delsyklusene viste seg etter analyseverktøyet å være godt innenfor de definerte sannsynlighetsparameterne. Det må poengteres at dette slettes ikke er et verktøy som bekrefter at lekkasjeverdiene er riktige, men snarere et verktøy for å avdekke resultater som åpenbart er feilaktige.

Ved trykktestingene ble imidlertid gode rutiner for å avdekke eventuelle punkteringer av prøvenes PE opprettholdt. Prøvene ble nøysomt montert med likt moment for å sikre lik, jevn og tett klemming mellom ramme og testboks, og egenlekkasjetester ble gjennomført i forkant av hver trykktestingsrunde for å avdekke eventuelle tetthetsendringer. På bakgrunn av dette er det lite som tyder på at det foreligger større feil ved trykktestingsresultatene.

5.2. FESTEMIDLER OG SENTERAVSTAND ...

5.2.1. ... ETTER ENDTE FUKTSYKLUSER

Resultatene viser at lekkasjetallene etter gjennomførte fuktskykluser er mindre hos skrueneprovne enn hos spikerprovne. Bortsett fra SK450 (skrueprovne med lengst senteravstanden), som etter tredje uttørking hadde et litt høyere lekkasjetall enn SP150 (spikerprovne med minst senteravstand), gjelder dette for alle prøvene uavhengig av testet intervall for senteravstand (150-450 mm). Ut ifra dette vil det, innenfor dette intervallet, være rimelig å anslå at skruen vil gi en bedre lufttetthet en maskinspikere uavhengig av senteravstandene opp til en verdi på om lag 400 mm. Ved senteravstander større enn dette ved bruk av skruene, vil man anslagsvis kunne oppnå lavere lekkasjeverdier med maskinspikere dersom disse er festet med en senteravstand mindre enn 190 mm. Dette er illustrert i figuren nedenfor, hvor festemidlenes senteravstand er plottet som funksjon av lekkasjetallet, med skruens og spikerens senteravstand på henholdsvis venstre høyre akse.



Figur 44 Senteravstander som funksjon av lekkasjetall for skrue og spiker etter endte sykluser

Av grafen i figuren over ser man også at lekkasjetallet som funksjon av senteravstanden er mye mer variasjonsfølsom ved bruk av spikeren som festemiddel. Lekkasje hos dampspærreskjøter klemt med skruer påvirkes med andre ord ikke i like stor grad av senteravstanden. En endring fra 150 til 450 mm senteravstand medfører etter forsøket som er gjort en lekkasjeøkning på 11,46 l/hm ved bruk av skruen, mens det ved bruk av maskinspikeren vil medføre en økt lekkasje på 55,4 l/hm. Det er med dette god grunn til å tro at skruen som festemiddel ikke er like avhengig av lav senteravstand for å oppnå god klem, også etter gjentagende fuktskykluser.

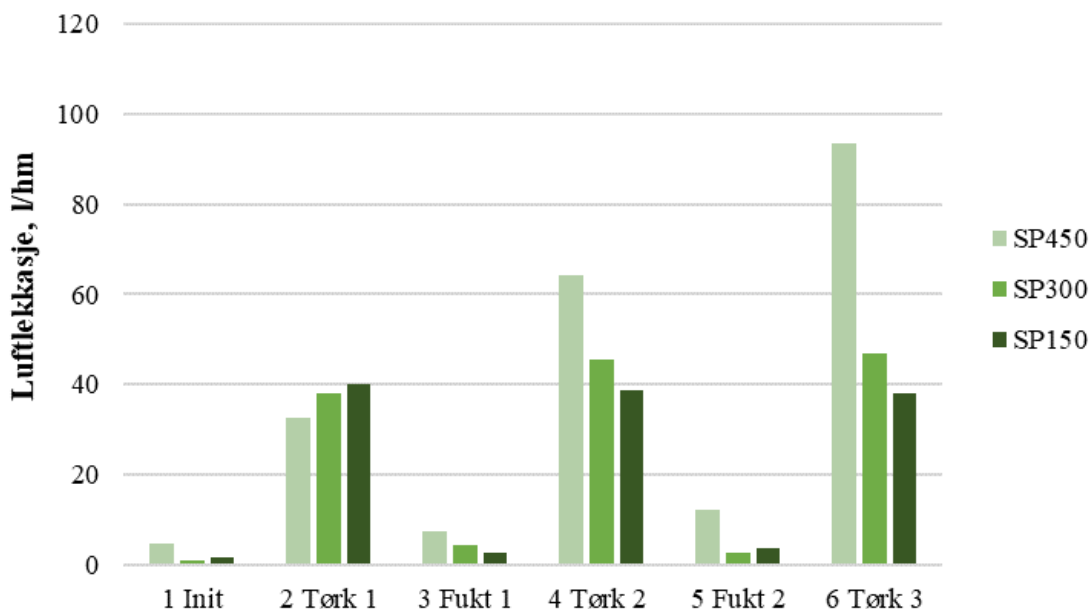
Ved sammenligning av luftlekkasjeverdier mellom skrue- og spikerprøvene med lik innbyrdes senteravstand, ses det etter endte fuktskykluser at SP450 har en lekkasje som er 115,2% større

en SK450. SP300s lekkasjetall er 50,6% større enn SK300, og SP150 19,2% større enn SK150. At lekkasjeforskjellen øker med senteravstanden er nok en indikasjon på at spikerens klemmeffekt i større grad er avhengig av en lav senteravstand an hva som er tilfellet ved klemming med skruer.

5.2.2. ... GJENNOM FUKTSYKLUSENE

Ut ifra resultatene som foreligger, kan man også se noen sammenhenger mellom festemidlene, og mellom de ulike senteravstandene når det kommer til lekkasjeforløpet gjennom delsyklusene.

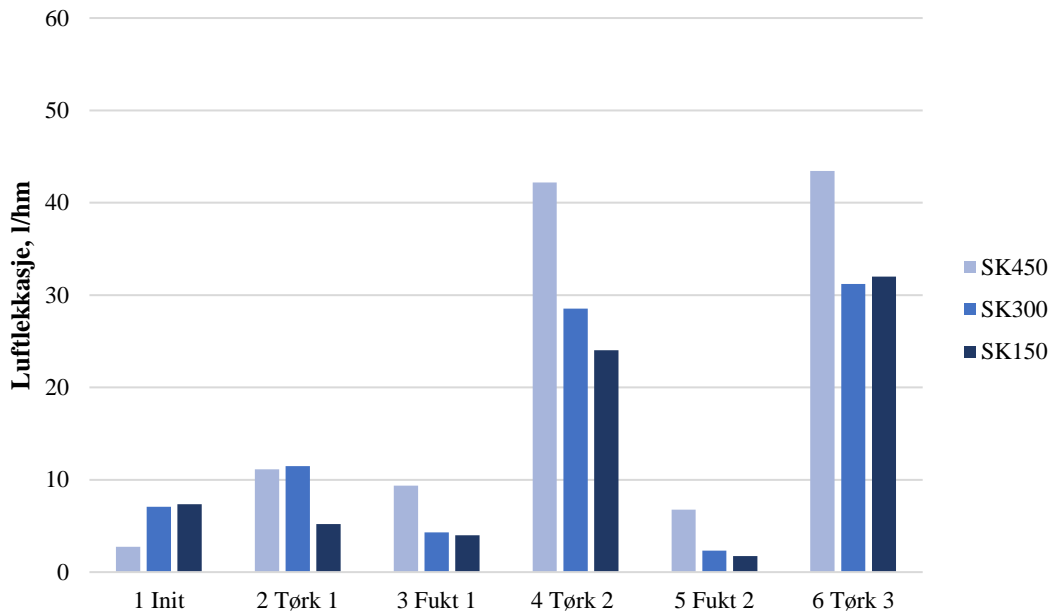
Sammenligning av lekkasjetallene gjennom delsyklusene hos spikerprøvene viser en klar sammenheng mellom senteravstandene og lekkasjeutvikling. Gjennomsnittlig lekkasjetall for prøvene med senteravstand 150 mm viser seg å være forholdsvis like gjennom delsyklusene. For prøvene med senteravstand på 300 ses en liten tendens til økning for hver uttørking, mens det for senteravstand 450 mm inntreffer relativt store endringer mellom hver syklus.



Figur 45 Spikerprøvenes lekkasjeutvikling gjennom delsyklusene

Årsaken til sammenhengen som foreligger mellom senteravstandene og luftlekkasjeutviklingen kan ses som en direkte konsekvens av den reduserte friksjonsflaten mellom festemiddel og trevirket, som igjen kommer av det reduserte antallet av festemidler. Uttrekkskraften som følger av svellingen i trevirket har mest sannsynlig vært stor nok til bryte friksjonen mellom spiker og trevirket i SP450, mens dette kan ses å ikke ha vært tilfellet for SP150. Fuktvariasjonene er vurdert som for små til å kunne si noe om hvorvidt det har skjedd et uttrekk av festemidlene i SP 300.

Som følge av at skruerprøvene ble montert med en lavere initiell trefukt, ble fuktighetsendringen etter påfølgende uttørking liten. Dette gjør det vanskeligere å trekke noen klare sammenhenger mellom senteravstandene og lekkasjeutviklingen ved bruk av skruer. Man kan imidlertid ved sammenligning av lekkasjene etter 2. og 3. uttørking se at lekkasjeverdiene er relativt jevne hos SK300 og SK450. For SK150 vises derimot en lekkasje som er 33% høyere. Dette er to observasjoner som det er vanskelig å finne noen sammenfallende forklaring på.



Figur 46 Skruerprøvenes lekkasjeutvikling gjennom delsyklusene

5.3. EFFEKTEN AV TEIPING

Resultatet etter siste teiping viser at alle prøvene hadde lekkasjeverdier mellom 28,2 og 39,2 l/hm. Ved sammenligning av de ulike prøveparametrene og lekkasjeverdiene ser vi imidlertid at SK450, som før påføring av teipen hadde en lekkasjeverdi på under halvparten av SP450 (43,4 og 93,5 l/hm), hadde oppsiktsvekkende like verdier etter teipingen (36,2 og 39,2 l/hm). Lekkasjereduksjonen som følge av teiping har altså vært mye større for spikerprøven enn hva som er tilfellet hos skruerprøven. Dette viser seg også å være tilfellet ved sammenligning av festemidlene ved de andre senteravstandene. Skruerprøvenes lekkasjeendring i prosentandel av spikerprøvenes var på 13,3 %, 43,0 % og 45,7 % for henholdsvis 450, 300 og 150. Vi ser altså en forskjell i lekkasjeendringene mellom de to festemidlene som øker med minkende senteravstand.

Dette kan forklares som en naturlig konsekvens av tetthetstilstandene ved de forskjellige prøvene før teipingen. Ved å anse omleggsskjøtene som tilnærmet tette etter teiping vil lekkasjeendringen dette medføre avhengige av lekkasjetallene etter siste uttørkingstest, hvilket nesten uten unntak hadde økende verdier for økende stenderavstandsverdier (se side 30).

Den minste lekkasjeendringen fant sted hos skruerprøven med den minste senteravstanden (SK150). Dette uten at lekkasjene for denne prøvetypen var lavest. En forklaring på dette kan

knyttet til antallet festemidler som perforerer dampspærren. Med antagelsen om at omleggsskjøtene er teipet tett vil perforeringene, foruten egenlekkasjene til testtriggen, representere de eneste utetthetene. Her vil ikke bare antall festemidler bestemme lekkasjene som følge av perforering, men også typen. Etter demontering av prøvene ble det for et utvalg undersøkt perforeringshullene gjennom PE-folien laget av maskinspikeren og skruen. Samtidig ble tykkelsen av halsen av hvert festemiddel kontrollert for å kunne beregne de faktiske lekkasjearealene gjennom perforeringene. Som vist i figuren nedenfor lagde spikeren en perforering som etter gjentatte fuktendringer hadde blitt om lag 1 mm større enn spikerens hals. For hull perforert av skruene viste perforeringshullene å seg å være nærmere 1,3 mm mer enn skruelhalsen.



Figur 47 Festemidler og perforeringer

Dette vil naturlig nok gi ulike lekkasjearealet per perforering hos de to festemidlene, både på grunn av at forskjellen mellom hull- og halsdiameter, og ytterligere på grunn av at skruelhalsen er tykkere enn spikerhalsen. Etter dette vil lekkasjearealet rundt hver spikerhals ha et areal på $5,7 \text{ mm}^2$ mens lekkasjearealet rundt hver skruelhals vil være $9,6 \text{ mm}^2$. Et lekkasjeareal som er 68 % større per festemiddel hos skruene enn hos spikerne er en begrunnelse for hvorfor samtlige skruerprøvenes lekkasjereduksjon var lavere enn spikerprøvenes, etter påføring av teip.

Lekkasjeendringen ved teiping kan med dette anses å avhengige av både antall og type festemidler, samt sprekkdannelsen mellom stender og lekt, da dette i større grad vil åpne opp for lekkasjene gjennom perforeringen. Det faktum at lekkasjeendringene etter påføring av teip, etter resultatene viser seg å være minst hos de prøvetyperne som ellers innehar de beste

resultatene med hensyn til lekkasjeverdier etter fuktskyklusene, gjør at det kan settes spørsmålstegn ved gevinsten av ekstra teiping her, sett over et lengre tidsperspektiv.

5.4. TEORETISK OG MÅLT SPREKK, OG r_l

Etter siste uttørking ble som sagt sprekkeene i omleggsskjøtene målt for en skrueprøve og en spikerprøve. Fuktendringen mellom høyeste og laveste vanninnhold (i løpet av fuktskyklusene) for prøvene etter utregning av eksakt fukt, var på 9,67 vekt-% for skrueprøven og 7,62 vekt-% for spikerprøven. Etter klemteorien beskrevet i litteraturen vil teoretisk sprekk ved disse fuktendringene ligge på henholdsvis 1,23 mm og 0,84 mm. Dette med en antatt krympingskoeffisient på 0,20% per prosentvis fuktendring og med r_b -verdier for de to festemidlene (relativavstand fra festemiddelets fastpunkt i bindingsverket til bindingsverkets klemflate) etter verdiene som kom fram i masteroppgaven til Johan Bille Selmer (Selmer, 2013). Her er r_l -verdien videre antatt å være på 0,5, hvilket vil si at festemiddelets fastpunkt ligger i midten av påforingen.

De faktisk målte sprekkeene var på 1,35 mm hos skrueprøven og 1,20 mm hos spikerprøven, hvilket tilsvarer en økning på 9,8 % hos skrueprøven og 43% hos spikerprøven i forhold til teoretisk sprekk.

Disse avvikene kan til dels forklares med den antatte krympingskoeffisienten på 0,20%. Som beskrevet i litteraturen vil krympingen variere avhengig av årringenes plassering i tverrsnittet. En annen forklaring er feil defineringen av r_l . Festemidlene som er forsøkt innfestet med et nedsenk mellom 1-2 mm, vil i praksis kunne tenkes å flytte fastpunktet mellom festemiddel og lekt/påforing vekk fra klemflaten som følger av friksjonen mellom nedsunket hode og trevirket. Ved gjentagende fuktendringer kan denne friksjonen videre kunne tenkes å øke, ettersom gjentagende svellinger vil kunne føre til at hodet graver seg ytterligere inn, og i økt grad omslutes av trevirket. Den relative avstanden r_l kan etter dette med høy sannsynlighet tenkes å ha vært større enn 0,5.

En r_l lik 1 gir en teoretisk sprekke dannelse lik 1,20 mm for spikerprøven, hvilket nesten må sies å stemme for godt overens med den faktisk målte sprekke dannelsen. En r_l lik 1 vil si at fastpunktet ligger helt øverst i påforingens høydetverrsnitt, så langt vekk fra klemflaten det er mulig å komme, og at hele påforingstverrsnittets svinn dermed bidrar til sprekke dannelsen. At dette faktisk kan ha vært tilfellet for spikerprøvene i dette forsøket, virker ikke veldig usannsynlig. Ved gjentagende fuktendringer kan spikerhodene ha blitt tilsluttet og fastholdt av treverket slik at friksjonen her, etter hvert, har blitt høyere en friksjonen mellom påforingen og resten av spikerflaten, hvilket kanskje også kan tenkes å ha fått redusert friksjon som følger av gjentatte bevegelser gjennom fuktskyklusene. Det må imidlertid sies at en r_l på 1, som følger av fastholding av et nedsunket hode, i praksis er lite sannsynlig, siden hodet har en viss tykkelse og må ligge plassert noe innenfor stendertverrsnittet for å kunne tenkes å kunne fastholdes. En r_l i nærheten av 1 anses imidlertid etter ovennevnte scenario som sannsynlig.

For skruen vil en r_l på 0,63 gi en teoretisk sprekk som er lik målingene (1,35 mm). To mulige forklaring på forskjellen i r_l ved de to festemidlene kan myntes på forskjellen i halstykkelser, og at utformingen av hodene er ulike. For spikeren var tykkelsen 3,1 mm mens den glatte halsen hos skruene ble målt til om lag 4,2 mm. Ved utregning av overflaten av halsene gjennom påføringstverrsnittet medfører dette en friksjonsflate hos skruen som er 35% større en spikerens. Figur 15 på side 17 viser at utformingen av hodene er forskjellig, hvor spikerhodet er relativt tynt og flatt, både på over- og undersiden. Skruehodet er derimot tykt og konisk utformet, hvilket kan tenkes å gi en annen friksjonen mellom hodet og trevirket.

5.5. LEKKASJENES PAKTISKE KONSEKVENNS

Regneeksemplene i kapittel 4.1.6 viser at lekkasjeverdier til SP450, som etter endte sykluser hadde den største lekkasjeverdien, for eneboligen Dråpen vil representere 14,9 % ved en total luftlekkasje lik passivhuskravet på $0,6 \text{ h}^{-1}$. Ved overholdelse av minimumsverdiene på $1,5 \text{ h}^{-1}$ vil 7,4 % komme fra dampspærreskjøtene. For kontorbygget Lysgården utgjør dampspærreskjøtene langt mindre lekkasjeandeler. Ved oppfyllelse av passivhus- og minstekravverdier vil dampspærreskjøtene representere henholdsvis 1,7 og 0,7 %

Grunnen til de store forskjellene mellom de to byggene kommer naturligvis av volumforskjellene. I bygninger vil klimaskallets flate per enhet oppvarmet volum minke med bygningsstørrelsen. Med dette følger også antall løpemeter omleggsskjøt per enhet oppvarmet volum, gitt at klimaskallet inneholder et «normalt» antall vinduer, dører, m.m. For eneboligen Dråpen ble antall løpemeter omleggsskjøter beregnet lik $0,96 \text{ m/m}^3_{v50}$, mens antall løpemeter for kontorbygget Lysgårdens, på tross av et høyt antall vinduer, ble beregnet lik $0,11 \text{ m/m}^3_{v50}$. Etter dagens kravdefinisjon for lufttetthet (luftskift per time), vil det med andre ord være mye enklere å oppnå lave lekkasjetall for større bygninger som kontorer og boligblokker enn hva det vil være for mindre eneboliger.

De utregnede lekkasjeandelene må sies å være lave for både eneboligen og kontorbygget, hvilket indikerer at tradisjonell klemming av omleggsskjøter kan anses å gi tilstrekkelig tetting for å overholdelse av lufttetthetskravene, også over et lengre tidsperspektiv. Ved strengere prosjektspesifikke lufttetthetskrav kan det imidlertid for mindre bygninger tenkes at lekkasjene gjennom omleggsskjøtene kan bli utslagsgivende for hvorvidt lufttetthetskrav innfris eller ikke.

Det må også poengteres at beregningene som er gjort har vært konservative, ved antagelsen om at all lekkasje gjennom omleggsskjøtene i dampspærresjiktet, også forlater klimaskallet. Dette vil ikke være tilfellet i praksis hvor vindspærresjiktet også vil bidra til lufttettheten av klimaskallet. At omleggsskjøter i dampspærren representerer en svært liten del av bygningenes luftlekkasjer bekreftes derfor ytterligere.

Testresultatenes riktighet bes imidlertid å tas i betraktning før man eventuelt kan fastslå dampspærrens minimale påvirkning av lufttettheten. Med dette henvises det spesielt til bulingen av PE-folien ved trykktestene, som sannsynligvis har medvirket til reduserte lekkasjeverdier.

6. SVAKHETER VED OPPGAVEN

Forskjellen mellom fuktsimuleringen som ble gjennomført i Wufi-2D og de faktiske fuktvariasjonene, kommer til dels av at det bevisst ble valgt et litt større fuktintervall for å kunne fremlegge et konservativt resultat, og til dels på grunn av måleavvik ved fuktavlesningene. Dette har medført at fuktintervallet er ytterligere større enn hva som kom fram under simuleringene. Hvor vidt fuktskyklusene som er gjennomført representerer et reelt fuktforløp for et norsk klima kan dermed diskuteres.

Temperaturen og hyppigheten av fuktskykleringen har grunnet tidsbegrensningene vært mye større og raskere enn hva som vil være tilfellet i praksis. Prøvene har blitt utsatt for temperaturer opp til 70 °C og har hatt en fuktighetsendringer om lag 25 ganger raskere enn hva som vil være tilfellet over et år i praksis. Dette kan tenkes å ha påvirket lekkasjeverdiene satt opp mot lekkasjene ved et reelt fuktforløp.

Fuktavvikene som ble avdekket etter komplett uttørking av prøvene, medfører en økt usikkerhet ved slutningene og sammenhengene som er gjort etter sammenligning av de forskjellige prøveparametrene. Hvor stor innvirkning avvikene ved hver delsyklus har hatt for de gjennomsnittlige lekkasjetallene i løpet av, og etter delsyklusenes slutt, er det vanskelig å avgjøre med sikkerhet. At forsøket måtte avbrytes, og begynnes på nytt gav uheldige konsekvenser med tanke på sammenlignbarheten mellom de to festemidlene, da skrueprøvene, til tross for at faktum var kjent, ble besluttet montert med et lavere vanninnhold på grunn av tidspress. Dette antas særlig å ha påvirket lekkasjeverdiene etter de to påfølgende delsyklusene, men kan også tenkes å ha hatt konsekvenser for lekkasjetallene etter delsyklusenes slutt, da et mindre tverrsnitt ved montering generelt vil gi et mindre potensiale for sprekkdannelse ved svinn og et større potensiale for klem ved svelling. Det er likevel innen rimelighetens grenser å tro at svellingene i løpet av oppfuktingene har medført et visst uttrekk av festemidlene i stender og nedsenk i påføring som kan tenkes å ha «stabilisert» forholdene igjen før siste trykktestingsrunde.

Det anses som sannsynlig at bulingen av PE-folien, som er beskrevet i delkapittel 5.1, har vært en reduserende faktor for lekkasjene som har inntruffet ved trykktestene. Da det er mindre sannsynlig at dette fenomenet vil inntreffe i en komplett yttervegg, er det grunn til å tro at lekkasjene som vil kunne skje i praksis vil være større. Dette med det forbehold at fuktvariasjonene ved tenkt scenario har vært lik fuktvariasjonene gjennom forsøket.

Det er også grunn til å tro at bølgingen av PE-folien som er beskrevet i kapittel 5.1, har medført mindre lekkasjeendringer etter siste uttørkingstest, og dermed større lekkasjeverdier.

7. KONKLUSJON

Første fuktskyklus etter montering medfører merkbare økninger av luftlekkasjer gjennom klemte omleggsskjøter. Dette gjelder både ved klemming med skruer og med maskinspiker. Gjentakende store fuktighetsendringer kan potensielt føre til ytterligere luftlekkasjeendringer, avhengig av festemiddel og senteravstand

Ved gjentatte fuktskykluser vil omleggsskjøter klemt med maskinspiker med en senteravstand på 450 mm gi den største lekkasjeutviklingen. Her kan man også se en videre betydelig endring mellom 2. og 3. uttørking. For lavere senteravstander er endringene mellom syklusene avtagende, hvor det ved en senteravstand på 300 mm kan observeres en liten endring mellom 2. og 3. uttørking, mens en senteravstand på 150 mm ikke gir noen merkbare videre lekkasjeendringer etter 1. uttørking.

Etter de gjentatte fuktskyklusene gir skruer en lavere lekkasjeverdi enn maskinspiker. Ved sammenligning av festemidlene uavhengig av senteravstandene anslås det at skruer festet med en senteravstand på om lag 400 mm vil gi like lekkasjeverdier som maskinspikere festet med en senteravstand nært 190 mm. En senteravstand mindre enn 300 mm ved bruk av skruer gir ingen gevinst med hensyn til lavere lekkasjeverdier.

Gevinsten av teiping vil i stor grad være avhengig av perforeringsgraden som følger av anvendt festemiddel og senteravstand. Teiping av omleggsskjøtene medfører størst reduksjon i lekkasjetall for omleggsskjøtene festet med spiker og hvor senteravstanden er høy. Omvendt gir teiping den minste lekkasjereduksjonen for omleggsskjøter festet med skruer og en lav senteravstand.

Sammenligning av praktisk og teoretisk sprekke etter siste uttørking viser at festemiddelets fastpunkt i påforingen, hos spikeren ligger veldig nært toppen av påføringstverrsnittet, lengst fra klemflaten ($r_1 \approx 1$), mens det hos skruen er plassert 63 % av påføringstykkelser fra klemflaten ($r_1 = 0,63$).

Beregninger gjort av kontorbygget Lysgården og eneboligen Dråpen viser at omleggsskjøtene for begge byggene representerer en liten del av de tillatte lekkasjene, selv ved krav om innfrielse av passivhuskrav på $0,6 \text{ h}^{-1}$.

På bakgrunn av valgt påføringstykkelser for forsøket (48 mm) og de festemidlene som er undersøkt, anbefales skruen (6x120, 5 mm glatt hals) med en senteravstand på 300 mm for best varig klemming.

8. VIDERE ARBEID

I en yttervegg med inntrukket dampspærre, vil påføring, avhengig av ulike valg av konstruksjonsprinsipp, ville måtte festes til stender for å gi hold til den innvendige platekledningen. Dette medfører at det i dampspærren vil inntreffe et antall perforeringer ved hver påføring som festes. Selv om hver påføring som er festet til stender ikke vil representere en klemt omleggsskjøt, vil fuktendringsmønsteret være det samme. Sprekkdannelser som konsekutivt vil kunne opptre mellom stender og lekt, vil kunne tenkes å åpne opp for lekkasjer gjennom perforeringene. Dette tilfellet er direkte sammenlignbart med tilfellet i dette forsøket hvor teipet omleggsskjøt fortsatt, hadde godt merkbare lekkasjer. Det er derfor grunn til å tro at dette også vil være tilfellet for hver påføring som er innfestet til stender gjennom dampspærren. Med en senteravstand på 600 mm vil antall løpemetre av denne lekkasjen tenkes å bli stor. Hvilken lekkasje dette potensielt medfører er noe det vil være spennende å se nærmere på.

REFERANSER

- Bergby, J. C., 2011. *Lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampspærresjikt*, Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Blom, P. & Uvsløkk, S., 2012. *Bygg tett – ventiler rett*, s.l.: SINTEF Byggforsk .
- Edvardsen, K. I. & Ramstad, T., 2010. *Trehus*. s.l.:Sintef Byggforsk.
- Geving, S., 2016. *Wufi*. [Internett]
Available at: <http://www.wufi.no/>
[Funnet 19 05 2018].
- Geving, S. & Holme, J., 2012. Mean an diurnal indoor humidity loads in residential bulidings. *Journal of building Physics*, pp. 392-421.
- Geving, S. & Thue, J. V., 2002. *Fukt i bygninger*. s.l.:s.n.
- Geving, S. & Torgersen, S. E., 1997. *Klimadata for fuktberegninger*, s.l.: Norges Byggforskningsinstitutt.
- Gullbrekken, L., Bergby, J. C., Uvsløkk, S. & Time, B., 2012. Improvement of traditional clamped joints in vapour- and wind barrier layer for.
- HUS arkitekter, 2018. *ntnu.blackboard.com*. [Internett]
Available at:
https://ntnu.blackboard.com/webapps/blackboard/content/listContent.jsp?course_id= 5812_1 &content_id= 279263_1
[Funnet Mai 2018].
- Jørgensen, P., Tronstad, S. & Tengs, A., 1995. *Tørking av bjørk*, Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Lovdata, 2017. *Forskrift om tekniske krav til byggverk*. [Internett]
Available at: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>
[Funnet 2 Oktober 2017].
- Norgeshus, 2018. *Norgeshus.no*. [Internett]
Available at: <http://www.norgeshus.no/hus/drapen/>
[Funnet 2018].
- Selmer, J. B., 2013. *Festemidlers innflytelse på lufttetthet av klemte skjøter i vind- og dampspærresjikt*, Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- SINTEF Byggforsk, 1998. *Byggdetaljblad 474.511 Vurdering av fuktsikkerhet. Kontrollpunkter*. s.l.:s.n.
- SINTEF Byggforsk, 2007. *523.255 Bindingsverk av tre. Varmeisolering og tetting*. s.l.:s.n.
- SINTEF byggforsk, 2008. *523.002 Yttervegger over terreng. Egenskaper og konstruksjonsprinsipper. Krav og anbefalinger*, s.l.: s.n.
- Standard Norge, 2012. *NS 3701:2012 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Yrkesbygninger*. s.l.:Standard Norge.

Standard Norge, 2013. *NS 3700:2013 - Kriterier for passivhus og lavenergibygninger - Boligbygninger*. s.l.:Standard norge.

Tronstad, S., 2002. *Tre og fuktighet - fra produsent til forbruker*, s.l.: Norsk Treteknisk Institutt.

Veidekke, 2017. *Veidekke.no*. [Internett]

Available at: <http://veidekke.no/om-oss/nyheter-og-media/pressemeldinger/article25809.ece>
[Funnet Mai 2018].

VEDLEGG

Vedlegg 1

Vedlegg 1 inneholder tallverdier for alle trykktestmålinger som er gjennomført i laboratorieforsøket

Initiell test, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	Diff	
1	SK450-1	4308,8	0	0	0,20644	0,20644	0,82576	21,4	20,6	0,8	0,22658154
2	SK450-2	4505,7	2,89017	5,16102	7,43187	9,70273	10,9414	20,6	19,9	0,7	7,00011077
3	SK450-3	4337,4	0	0	1,65153	1,85797	1,65153	20,5	19,7	0,8	0,9755594
4	SK300-1	4398,6	4,74814	7,43187	12,18	13,6251	19,199	21	20,7	0,3	11,0496264
5	SK300-2	4386,2	2,06441	2,89017	4,33526	5,16102	7,01899	21	20,3	0,7	4,15903003
6	SK300-3	4569,6	2,68373	5,36746	6,60611	7,01899	9,0834	21	20,4	0,6	5,99685807
7	SK150-1	4715,8	1,65153	3,30306	7,84476	8,0512	8,0512	21	20,2	0,8	5,59152887
8	SK150-2	4640	0,20644	0	0,82576	1,44509	4,33526	21,3	20,5	0,8	1,25123361
9	SK150-3	4623,9	7,63832	11,1478	16,5153	19,6119	23,1214	21,3	20,5	0,8	15,1746692
10	SP450-1	4967,5	1,44509	2,47729	2,68373	3,30306	4,5417	21,1	20,6	0,5	2,81338744
11	SP450-2	4721	4,95458	5,98679	7,84476	8,87696	11,5607	21	20,5	0,5	7,66600874
12	SP450-3	4535,5	1,65153	2,47729	2,89017	2,89017	4,95458	21,2	20,7	0,5	2,89520856
13	SP300-1	4470,8	0	0	1,0322	0,41288	0,61932	21	20,4	0,6	0,39525891
14	SP300-2	4542,5	0	0,20644	2,47729	3,09661	3,5095	21,2	20,7	0,5	1,74845421
15	SP300-3	4614,6	0	0	0,41288	0,82576	1,0322	19,8	19,6	0,2	0,42169342
16	SP150-1	4412,4	0	0,41288	1,85797	3,5095	5,16102	20,5	20,1	0,4	2,03797507
17	SP150-2	4641,1	0	0	1,85797	1,23865	2,06441	21,2	20,6	0,6	0,97304183
18	SP150-3	4478	0	0,61932	1,0322	3,71594	4,33526	20,2	19,8	0,4	1,80887595

* Verdier er korrigeret for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje

Tørk 1, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	Diff	
1	SK450-1	4244,7	2,06441	3,09661	5,57391	6,19323	7,22543	21,4	20,6	0,8	4,68394
2	SK450-2	4444,8	8,67052	11,7671	18,3732	22,7085	26,8373	20,6	19,9	0,7	17,1497
3	SK450-3	4273,5	8,25764	9,0834	12,5929	13,2122	15,6895	20,5	19,7	0,8	11,5569
4	SK300-1	4334,8	3,71594	4,95458	5,36746	7,43187	10,7349	21,5	20,7	0,8	6,25617
5	SK300-2	4322,6	7,01899	9,49628	12,5929	14,2444	16,7217	21	20,3	0,7	11,7508
6	SK300-3	4505,5	13,2122	14,2444	17,5475	17,7539	20,4377	21,4	20,4	1	16,441
7	SK150-1	4647,9	0	1,0322	4,33526	5,57391	7,63832	21	20,2	0,8	3,49691
8	SK150-2	4584,5	0	1,0322	2,47729	2,89017	3,5095	21,2	20,5	0,7	1,88566
9	SK150-3	4556,4	5,16102	7,22543	10,5285	13,0058	16,7217	21,2	20,5	0,7	10,2088
10	SP450-1	4633,3	33,237	40,4624	44,5912	47,275	51,8167	21,1	20,6	0,5	43,0027
11	SP450-2	4403	20,4377	26,218	33,8563	38,1916	45,6235	21	20,5	0,5	32,1809
12	SP450-3	4212,8	13,0058	16,7217	24,9794	29,9339	32,8241	21,2	20,7	0,5	22,9124
13	SP300-1	4166,2	10,9414	15,2766	24,9794	27,0438	30,3468	21	20,4	0,6	21,1665
14	SP300-2	4230,2	23,7407	27,2502	34,2692	38,6045	42,9397	21,2	20,7	0,5	32,8128
15	SP300-3	4320,9	37,7787	52,436	68,5384	76,1767	68,5384	19,8	19,6	0,2	59,7936
16	SP150-1	4119,4	30,5533	38,6045	44,7977	49,5458	56,3584	20,5	20,1	0,4	43,2909
17	SP150-2	4318,6	38,1916	37,5723	48,5136	51,6102	59,8679	21,2	20,6	0,6	46,5059
18	SP150-3	4221,4	15,2766	23,3278	33,237	39,4302	42,9397	20,2	19,8	0,4	30,0661
* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje											

Fukt 1 l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	Diff	
1	SK450-1	4563,7	3,09661	4,33526	5,78035	7,84476	8,67052	21,4	20,6	0,8	5,78412318
2	SK450-2	4678,9	6,19323	9,28984	11,5607	14,6573	16,9282	20,6	19,9	0,7	11,4322974
3	SK450-3	4569,6	4,12882	8,25764	11,7671	14,6573	17,1346	20,5	19,7	0,8	10,8368915
4	SK300-1	4661,8	1,65153	2,89017	4,33526	4,74814	5,16102	21,4	20,7	0,7	3,66180943
5	SK300-2	4712	1,23865	2,47729	3,5095	3,92238	4,33526	21	20,3	0,7	3,01479326
6	SK300-3	4902,2	3,09661	4,5417	6,81255	8,0512	9,28984	21	20,4	0,6	6,18441723
7	SK150-1	4924,7	1,65153	2,06441	3,30306	3,92238	3,71594	21	20,2	0,8	2,86625647
8	SK150-2	4911,4	1,44509	2,47729	2,89017	3,30306	4,5417	21,2	20,5	0,7	2,85492739
9	SK150-3	4796,3	3,92238	5,16102	6,60611	7,63832	8,25764	21,2	20,5	0,7	6,19574631
10	SK450-1	4901	4,5417	4,74814	7,22543	9,0834	9,90917	21,1	20,6	0,5	6,9333951
11	SK450-2	4629,6	5,98679	6,81255	9,70273	12,18	12,3865	21	20,5	0,5	9,21305714
12	SK450-3	4524,1	2,68373	3,71594	5,36746	8,0512	8,0512	21,2	20,7	0,5	5,40774607
13	SP300-1	4455,1	0,61932	1,44509	2,47729	3,92238	3,92238	21	20,4	0,6	2,37784737
14	SP300-2	4448,9	0,61932	1,44509	2,06441	3,92238	3,92238	21,2	20,7	0,5	2,29476748
15	SP300-3	4646,3	4,5417	6,19323	8,67052	11,3543	10,7349	19,8	19,6	0,2	8,10784274
16	SP150-1	4416,7	1,0322	2,06441	4,33526	6,19323	6,39967	20,5	20,1	0,4	3,84181587
17	SP150-2	4730,4	0,82576	1,44509	2,47729	4,5417	4,5417	21,2	20,6	0,6	2,64974522
18	SP150-3	4539,5	0	0	1,23865	2,68373	2,68373	20,2	19,8	0,4	1,23109303
* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje											

Tørk 2, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	diff	
1	SK450-1	4258,3	28,076	30,9661	35,5078	40,9785	45,3138	21,4	20,6	0,8	35,6753
2	SK450-2	4447,9	12,3865	22,2956	43,2287	59,8472	71,1602	20,6	19,9	0,7	40,0714
3	SK450-3	4306,5	31,379	40,8753	47,4814	63,0677	77,9315	20,5	19,7	0,8	50,8676
4	SK300-1	4346,4	12,5929	17,341	24,9794	32,5145	36,2304	21,2	20,7	0,5	24,0441
5	SK300-2	4347,7	17,0314	21,4699	32,6177	42,6301	48,6168	21,1	20,3	0,8	31,5389
6	SK300-3	4533	16,5153	22,2956	32,4112	38,9141	44,0751	21,4	20,4	1	30,0548
7	SK150-1	4670,4	5,78035	8,67052	14,2444	19,7151	23,8439	21	20,2	0,8	13,9285
8	SK150-2	4595,2	24,7729	31,5855	41,9075	53,365	65,3386	21	20,5	0,5	42,2524
9	SK150-3	4565,7	5,57391	9,28984	16,5153	23,431	28,1792	21	20,5	0,5	15,9413
10	SK450-1	4611,8	40,4624	52,0231	70,6028	73,5962	78,7572	21,1	20,6	0,5	62,0292
11	SK450-2	4386,8	34,4756	48,9265	74,3187	92,3823	102,085	21	20,5	0,5	68,478
12	SK450-3	4224,1	28,076	39,8431	65,8547	88,6664	99,6078	21,2	20,7	0,5	62,291
13	SP300-1	4153,5	16,5153	22,5021	35,095	42,8365	46,1396	21	20,4	0,6	31,7453
14	SP300-2	4218,1	16,9282	22,9149	34,6821	45,3138	51,3006	21,2	20,7	0,5	33,2219
15	SP300-3	4321,6	28,2824	46,0363	75,3509	103,117	120,045	19,8	19,6	0,2	71,9145
16	SP150-1	4133	44,3848	49,9587	52,8489	54,8101	59,7647	20,5	20,1	0,4	51,9677
17	SP150-2	4338,6	24,7729	34,8885	52,0231	62,2419	67,403	21,2	20,6	0,6	47,0358
18	SP150-3	4216,4	8,25764	11,7671	18,7861	23,6375	27,147	20,2	19,8	0,4	17,3725

* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje

Fukt 2, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	DIFF	
1	SK450-1	4504,3	0,41288	1,85797	3,92238	4,85136	5,67713	21,4	20,6	0,8	3,19732
2	SK450-2	4716,2	0,20644	1,0322	2,06441	2,99339	3,19983	20,6	19,9	0,7	1,81265
3	SK450-3	4530,3	9,0834	12,18	16,9282	19,0958	20,5409	20,5	19,7	0,8	15,2414
4	SK300-1	4693,7	0	0,82576	2,06441	2,78695	2,78695	21,2	20,7	0,5	1,61125
5	SK300-2	4714,1	0,41288	1,23865	2,47729	3,40628	3,81916	21	20,3	0,7	2,17267
6	SK300-3	4785,2	1,23865	2,06441	3,09661	4,85136	5,26424	21,1	20,4	0,7	3,18347
7	SK150-1	4937,5	0	0	1,23865	1,96119	1,96119	21	20,2	0,8	0,96675
8	SK150-2	4828,4	0,82576	2,06441	3,09661	4,23204	4,64492	21,2	20,5	0,7	2,86626
9	SK150-3	4862,8	0	0,61932	1,44509	2,16763	2,78695	21,2	20,5	0,7	1,3255
10	SK450-1	4854,9	5,78035	7,84476	11,7671	14,4509	16,9282	21,1	20,6	0,5	11,0358
11	SK450-2	4626,5	5,98679	8,67052	13,2122	17,341	19,6119	21	20,5	0,5	12,569
12	SK450-3	4469,1	7,01899	10,1156	14,4509	16,7217	18,1668	21,2	20,7	0,5	12,9806
13	SP300-1	4415,0	1,44509	1,65153	1,65153	2,06441	1,65153	21	20,4	0,6	1,68426
14	SP300-2	4455,4	1,0322	1,65153	3,30306	4,12882	4,74814	21,2	20,7	0,5	2,86374
15	SP300-3	4599,0	1,65153	1,85797	3,71594	3,30306	4,74814	19,8	19,6	0,2	2,97074
16	SP150-1	4416,4	2,06441	3,30306	4,12882	6,19323	6,39967	20,5	20,1	0,4	4,2912
17	SP150-2	4584,0	2,27085	4,12882	7,01899	9,0834	10,5285	21,2	20,6	0,6	6,37072
18	SP150-3	4494,2	0,41288	0,61932	0,61932	0,20644	0	20,2	19,8	0,4	0,38645

* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje

Tørk 3, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	Diff	
1	SK450-3	4252,3	29,727	39,843	51,61	58,526	65,648	21,3	20,9	0,4	48,085
2	SK450-3	4455,3	20,025	29,315	44,798	60,487	76,177	22,7	23	0,3	44,57
3	SK450-3	4287,9	20,644	28,902	42,32	47,481	53,675	22,3	22,2	0,1	37,682
4	SK300-3	4365,3	24,773	31,585	42,32	51,404	60,281	22,5	23	0,5	41,07
5	SK300-3	4358,2	17,754	21,47	29,521	35,508	39,843	22,5	23	0,5	28,177
6	SK300-3	4517,2	12,386	17,341	24,773	32,205	39,017	22,1	22,8	0,7	24,392
7	SK150-3	4663,3	11,767	16,515	23,947	31,482	38,192	22,3	21,5	0,8	23,631
8	SK150-3	4590,8	25,599	32,824	46,449	57,391	66,474	21,9	21,2	0,7	44,574
9	SK150-3	4587,2	11,767	17,341	28,282	38,501	48,101	21,9	21,2	0,7	27,758
10	SK450-3	4633,4	51,817	65,029	72,977	85,879	103,32	22,5	21,5	1	74,441
11	SK450-3	4416,3	40,256	57,597	80,512	89,699	97,027	21,8	21	0,8	71,442
12	SK450-3	4219,8	71,635	98,679	143,58	174,65	202,83	21,4	21	0,4	134,55
13	SP300-3	4177,9	21,883	28,076	31,482	35,508	39,533	21,4	21,3	0,1	30,833
14	SP300-3	4253,2	15,69	23,121	40,153	53,262	66,164	22	21,2	0,8	38,226
15	SP300-3	4348,7	31,585	46,036	70,706	101,57	123,35	21,7	21,2	0,5	71,996
16	SP150-3	4149,7	22,089	28,902	42,527	44,282	58,629	21,2	20,7	0,5	38,312
17	SP150-3	4331,1	43,146	48,307	55,223	62,345	71,532	20,7	20,4	0,3	55,326
18	SP150-3	4245,8	12,799	16,722	21,263	25,908	29,315	21,6	21,1	0,5	20,738
* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje											

Etter teiping, l/hm								Temp			50 Pa Trend
Nr	Type	Vekt	20	30	50	70	90	lam	boks	DIFF	
1	SK450-1	4292,3	23,741	29,521	41,288	51,713	56,978	21,8	21,1	0,7	39,67
2	SK450-2	4495,3	18,58	26,631	42,114	55,326	62,345	22,6	23	0,4	39,718
3	SK450-3	4327,9	13,419	19,818	32,618	40,05	45,417	22,6	23,8	1,2	29,34
4	SK300-1	4405,3	17,135	23,741	35,095	43,972	52,849	22,6	23	0,4	33,547
5	SK300-2	4398,2	13,212	21,057	26,631	34,063	37,779	22,6	22,9	0,3	25,872
6	SK300-3	4557,2	0,8258	5,161	11,767	16,722	20,438	22,5	22,9	0,4	10,425
7	SK150-1	4703,3	7,4319	13,832	23,947	31,998	39,43	22,5	21,8	0,7	22,423
8	SK150-2	4630,8	16,722	24,36	39,637	52,23	64,616	22,4	21,7	0,7	38,144
9	SK150-3	4627,2	10,116	14,864	24,566	33,34	41,288	22,1	21,3	0,8	23,939
10	SK450-1	4673,4	13,832	19,612	30,45	37,985	44,488	22,1	21,6	0,5	28,396
11	SK450-2	4456,3	21,263	28,902	41,288	54,604	63,584	22,2	21,4	0,8	40,709
12	SK450-3	4259,8	29,934	36,334	50,475	60,9	70,5	22,1	21,6	0,5	48,459
13	SP300-1	4217,9	11,354	15,07	22,812	30,14	35,611	22,5	21,7	0,8	22,293
14	SP300-2	4293,2	10,735	16,102	26,734	35,714	44,282	22,3	21,6	0,7	25,754
15	SP300-3	4388,7	17,754	25,599	39,74	50,372	61,003	22	21,3	0,7	37,665
16	SP150-1	4189,7	13,419	19,405	28,489	35,198	39,224	21	21,5	0,5	26,409
17	SP150-2	4371,1	22,089	31,585	47,585	59,868	69,261	21	20,8	0,2	44,728
18	SP150-3	4285,8	9,7027	13,419	19,405	23,225	27,457	21,9	21,1	0,8	18,144
* Verdier er korrigert for testtriggens egenlekkasje egenlekkasje											

Vedlegg 2

Vedlegg 2 inneholder mengdeberegninger av antall løpemeter dampspærreskjøter, samt utregnede verdier for luftlekkasjetall og lekkasjeandeler for eneboligen Dråpen og kontorbygget Lysgården.

Enebolig Dråpen – mengder

Hus 1. Dråpen (enebolig)				
Klemte skjøter				
1. etg	Karmer	Bunnsvill	Toppsvill	SUM
Fasade 1 N	26800	11704	11704	50208 mm
Fasade 2 Ø	18110	7094	8104	33308 mm
Fasade 3 S	19320	11704	11704	42728 mm
Fasade 4 V	19310	5594	7804	32708 mm
omkrets	Høyde	Antall		
Hjørner	-	2400	6	14400 mm
Skjøt hver 15. m	39316	2400	3	7200 mm
2. etg	Karmer	Bunnsvill	Toppsvill	
Fasade 1 N	18120	11704	11704	41528 mm
Fasade 2 Ø	0	5704	5704	11408 mm
Fasade 3 S	24160	11704	11704	47568 mm
Fasade 4 V	11680	5704	5704	23088 mm
omkrets	Høyde	Antall		
Hjørner	-	2400	4	9600 mm
omkrets	34816	2400	3	7200 mm
*Med antatt klemte skjøter i topp- og bunnsvill (minus dørterstel), alle innvendige hjørner, rundt dør- og vinduskarmer, og vertikal skjøt hver 15 m			SUM	320,944 m
			Oppv. BRA	139,9 m ²
			Innv. H	2,4 m
			Volum	336 m ³
Omleggsskjøt per m³		0,955190476		
Kravnivå	oms/h	V ₅₀ for krav		
Passivhus/ energitiltak	0,6	201,456		
Minimumskrav	1,5	503,64		

Enebolig Dråpen – lekkasjeverdier

L/hm (50 Pa)							
	1 Init	2 Tørk 1	3 Fukt 1	4 Tørk 2	5 Fukt 2	6 Tørk 3	7 Tape
SK450	2,734	11,130	9,351	42,205	6,750	43,446	36,243
SK300	7,069	11,483	4,287	28,546	2,322	31,213	23,281
SK150	7,339	5,197	3,972	24,041	1,720	31,987	28,168
SP450	4,458	32,699	7,185	64,266	12,195	93,479	39,188
SP300	0,855	37,924	4,260	45,627	2,506	47,018	28,571
SP150	1,607	39,954	2,574	38,792	3,683	38,125	29,760
m ³ /h etter beregnet m skjøt							
SK450	0,877	3,572	3,001	13,545	2,167	13,944	11,632
SK300	2,269	3,685	1,376	9,162	0,745	10,018	7,472
SK150	2,355	1,668	1,275	7,716	0,552	10,266	9,041
SP450	1,431	10,494	2,306	20,626	3,914	30,002	12,577
SP300	0,274	12,172	1,367	14,644	0,804	15,090	9,170
SP150	0,516	12,823	0,826	12,450	1,182	12,236	9,551
Lekkasje i % av passivhus /energiltak							
SK450	0,436	1,773	1,490	6,724	1,075	6,921	5,774
SK300	1,126	1,829	0,683	4,548	0,370	4,973	3,709
SK150	1,169	0,828	0,633	3,830	0,274	5,096	4,488
SP450	0,710	5,209	1,145	10,238	1,943	14,892	6,243
SP300	0,136	6,042	0,679	7,269	0,399	7,491	4,552
SP150	0,256	6,365	0,410	6,180	0,587	6,074	4,741
Lekkasje i % av minimumskrav							
SK450	0,174	0,709	0,596	2,689	0,430	2,769	2,310
SK300	0,450	0,732	0,273	1,819	0,148	1,989	1,484
SK150	0,468	0,331	0,253	1,532	0,110	2,038	1,795
SP450	0,284	2,084	0,458	4,095	0,777	5,957	2,497
SP300	0,054	2,417	0,271	2,908	0,160	2,996	1,821
SP150	0,102	2,546	0,164	2,472	0,235	2,430	1,896

Kontorbygg Lysgården – mengder

	Takhøyde	omkrets dekke (ikke overgang betongvegg, plan 0)	glassfasade (lengde)	BRA	Hjørner	Vertikale skjøter overgang fasadetyper (ikke hjørner)	vertikale skjøter	Omkrets Toppsvill-skjøt (dekke mot yttervegg)	Omkrets bunnsvill-skjøt (dekke mot yttervegg)
	m		m2		Antall			m	
Plan 0	3,47	25,97	0	437,91	1	2	5	25,97	25,97
Plan1	3,73	194,89	36,15	2030,15	6	8	27	158,74	158,74
Plan 2	3,23	201,25	9,65	2080,34	8	2	24	201,25	191,6
Plan 3	3,23	201,25	9,65	2080,34	8	2	24	201,25	191,6
Plan 4	3,23	201,25	9,65	2080,34	8	2	24	201,25	191,6
Plan 5	3,23	201,25	9,65	2080,34	8	2	24	201,25	191,6
Plan 6	3,22	201,25	9,65	2080,34	8	2	24	201,25	191,6
SUM	23,34	1227,11		12869,76			152	1190,96	1142,71
Klemte Skjøter		(meter)	Kravnivå	oms/h	V ₅₀ ved krav				
UK dekker		1190,96	Passivhus	0,6	27714,6				
Ok dekker		1142,71	Minimumskrav	1,5	69286,5				
Vertikalt (hjørner, overgang og hver 15. m)		505,42	*Med antatt klemte skjøter i topp- og bunnsvill (minus dørterskel), alle innvendige hjørner, rundt dør- og vinduskarmer, og vertikal skjøt hver 15 m.						
Vinduer og dører		2212,98	*Vinduer er videre antatt plassert på en slik måte at det anses som usansynlig med klemte dampspærreskjøter langs karm på underside.						
sum		5052,07	*For utregning av BRA er arealet av dekketytterkanter brukt som mål.						
Oppvarmet volum		*For oppvarmet volum er ikke volum mellom glasstak og takplan medberegnet.							
Kubikkmeter		46191							
Omleggsskjøt per m3		0,109373471							

TYPE	Høyde	Bredde	Antall (per plan)						OMK. (uten nedkant for vindu/dører plassert dekkekant)	TYPE	Høyde	Bredde	Antall (per plan)						OMK. (uten nedkant for vindu/dører plassert dekkekant)		
			0	1	2	3	4	5					6	0	1	2	3	4		5	6
Dør	2,94	1,21	0	1	0	0	0	0	7,09	V01U	2,77	1,02	0	0	4	6	6	6	6	183,68	
Dør med vindu	3,21	1,01	1	0	0	0	0	0	7,43	V01U x 2	2,77	2,02	0	0	1	2	2	2	2	68,04	
Dør med vindu	3,6	1,02	0	1	0	0	0	0	8,22	V02U	2,77	1,22	0	0	1	0	0	0	0	6,76	
Dør uten vindu	3,2	1,21	0	1	0	0	0	0	7,61	V03-SS	2,77	1	0	0	0	9	8	8	9	222,36	
Hjørne mot gf	2,77	2,8	0	0	1	1	0	0	25,02	V04-SS	2,77	1	0	0	0	5	6	6	5	143,88	
Hjørne mot gf	2,77	5,11	0	0	0	0	1	1	21,3	V06U	2,12	1,02	0	2	0	0	0	0	0	12,56	
Hjørne mot gl-f	2,77	2,8	0	0	0	1	0	0	16,68	V07U	2,77	1	0	0	7	0	0	0	0	45,78	
Hjørne mot gl-f	2,77	1,95	0	0	0	0	1	1	14,98	V07U x 3	2,77	3,03	0	0	1	0	0	0	0	8,57	
Hjørne NV	2,98	8,95	0	1	0	0	0	0	14,91	V08	2,77	1	0	0	5	0	0	0	0	32,7	
Hjørne SV	2,77	5	0	0	0	0	1	1	21,08	V10U	2,97	1,02	0	3	0	0	0	0	0	20,88	
Hjørne SØ	2,77	6,6	0	0	1	1	0	0	36,42	V11U	3,27	1,02	0	3	0	0	0	0	0	22,68	
Hjørne SØ	2,77	5,07	0	0	0	1	1		21,22	V11U	3,27	1,02	0	1	0	0	0	0	0	7,56	
Hjørnevindu NV	2,77	10,8	0	0	0	0	0	1	16,34	V12U	3,22	1,02	1	0	0	0	0	0	0	7,46	
Hjørnevindu NV	2,77	8,95	0	0	0	0	1	1	28,98	V13/14U	2,77	1,2	0	0	5	3	3	3	2	107,84	
Hjørnevindu NV	2,77	8,4	0	0	1	1	0	0	27,88	V13/14U x 2	2,77	2,4	0	0	4	4	4	4	3	150,86	
Hjørnevindu NØ	2,77	5,5	0	0	1	1	0	0	33,12	V13/14U x 3	2,77	3,6	0	0	2	2	2	2	2	91,4	
Hjørnevindu NØ	2,77	6,69	0	0	0	0	1	1	24,46	V13/14U x 4	2,77	4,8	0	0	3	3	3	3	4	165,44	
Hjørnevindu SV	3,22	5,29	1	0	0	0	0	0	11,73	V15	2,77	1,2	0	0	3	3	3	3	1	87,62	
Hjørnevindu SØ	2,97	5,05	0	1	0	0	0	0	10,99	V15 x 2	2,77	2,4	0	0	3	4	4	4	2	134,98	
Hjørnsne SV	2,77	4,27	0	0	1	0	0	0	9,81	V15 x 3	2,77	3,6	0	0	1	1	1	1	2	54,84	
Hjørnsne SV	2,77	4,1	0	0	0	1	0	0	19,28	V16U	2,72	1,22	1	0	0	0	0	0	0	6,66	
Port	3,01	2,52	1	0	0	0	0	0	8,54	V17U	2,98	1,22	0	1	0	0	0	0	0	7,18	
Port	2,52	1,62	1	0	0	0	0	0	6,66	V17U x 3	2,98	3,63	0	1	0	0	0	0	0	9,59	
Udef vindu	2,11	1,01	1	0	0	0	0	0	6,24	V18U	2,97	1,22	0	2	0	0	0	0	0	14,32	
Udef vindu m dør	2,97	3,02	0	1	0	0	0	0	8,96	V18U x 2	2,97	2,43	0	2	0	0	0	0	0	16,74	
Udef vindu m dør	2,97	4,3	0	1	0	0	0	0	10,24	V18U x 3	2,97	3,63	0	2	0	0	0	0	0	19,14	
Udef vindu m dør	2,97	3,6	0	1	0	0	0	0	9,54	V19U	3,2	1,22	0	4	0	0	0	0	0	30,48	
Udef. Hjørne NØ	2,98	9,03	0	1	0	0	0	0	14,99	V19U x 2	3,2	2,43	0	1	0	0	0	0	0	8,83	
Udef. Hjørne SØ	2,97	4,27	0	1	0	0	0	0	10,21	Vindusfelt m	3,25	2,4	0	1	0	0	0	0	0	8,9	
Udef. Mot gf	2,77	2	0	0	1	1	0	0	22,62	Åpn-vindu SS	2,77	1	0	0	1	1	1	1	1	32,7	
																sum					2212,98 m

Kontorbygg Lysgården – lekkasjeverdier

L/hm (50 Pa)							
	1 Init	2 Tørk 1	3 Fukt 1	4 Tørk 2	5 Fukt 2	6 Tørk 3	7 Tape
SK450	2,734	11,130	9,351	42,205	6,750	43,446	36,243
SK300	7,069	11,483	4,287	28,546	2,322	31,213	23,281
SK150	7,339	5,197	3,972	24,041	1,720	31,987	28,168
SP450	4,458	32,699	7,185	64,266	12,195	93,479	39,188
SP300	0,855	37,924	4,260	45,627	2,506	47,018	28,571
SP150	1,607	39,954	2,574	38,792	3,683	38,125	29,760
m3/h etter beregnet m skjøt							
SK450	13,813	56,230	47,242	213,221	34,104	219,490	183,101
SK300	35,711	58,011	21,658	144,216	11,733	157,690	117,619
SK150	37,078	26,256	20,068	121,455	8,687	161,603	142,309
SP450	22,523	165,196	36,298	324,677	61,611	472,262	197,980
SP300	4,320	191,596	21,523	230,512	12,662	237,539	144,341
SP150	8,117	201,852	13,005	195,980	18,606	192,612	150,351
Lekkasje i % av passivhus /energiltak							
SK450	0,050	0,203	0,170	0,769	0,123	0,792	0,661
SK300	0,129	0,209	0,078	0,520	0,042	0,569	0,424
SK150	0,134	0,095	0,072	0,438	0,031	0,583	0,513
SP450	0,081	0,596	0,131	1,172	0,222	1,704	0,714
SP300	0,016	0,691	0,078	0,832	0,046	0,857	0,521
SP150	0,029	0,728	0,047	0,707	0,067	0,695	0,542
Lekkasje i % av minimumskrav							
SK450	0,020	0,081	0,068	0,308	0,049	0,317	0,264
SK300	0,052	0,084	0,031	0,208	0,017	0,228	0,170
SK150	0,054	0,038	0,029	0,175	0,013	0,233	0,205
SP450	0,033	0,238	0,052	0,469	0,089	0,682	0,286
SP300	0,006	0,277	0,031	0,333	0,018	0,343	0,208
SP150	0,012	0,291	0,019	0,283	0,027	0,278	0,217