

Kristoffer Sigurdsson Østrøm

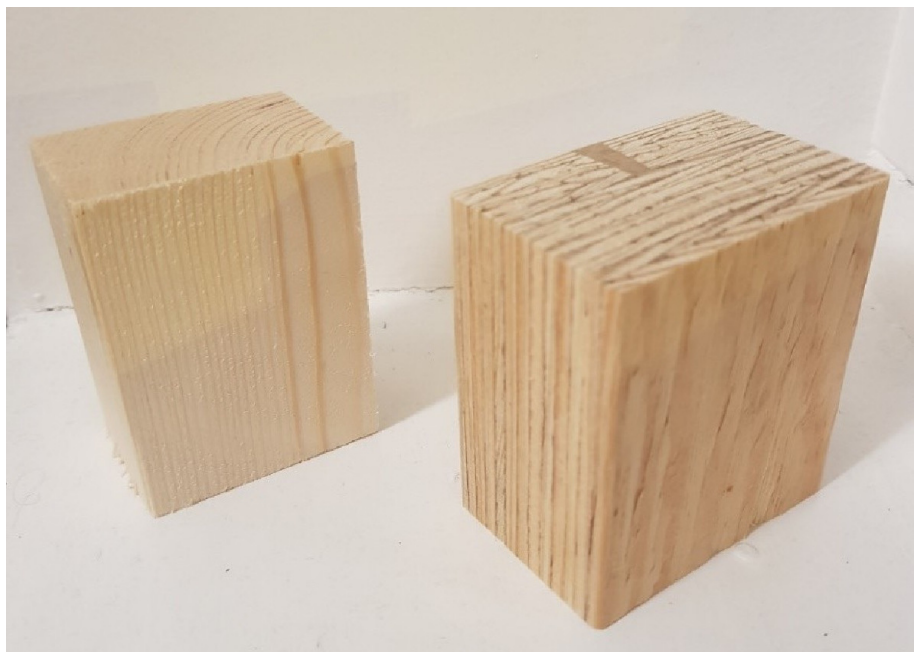
# Oppfukting og uttørking av limte trematerialer

Masteroppgave i Bygnings- og materialteknikk

Veileder: Tore Kvande

August 2020

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





Kristoffer Sigurdsson Østrøm

# Oppfukting og uttørring av limte trematerialer

Masteroppgave i Bygnings- og materialteknikk  
Veileder: Tore Kvande  
August 2020

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



Kunnskap for en bedre verden





# 1 Sammendrag

Hensikten med denne oppgaven er å studere oppfukning og uttørking av limte trematerialer. Materialene som undersøkes er prøvestykker fra LVL-flensene fra Hunton I-bjelker og limtre-K-bjelker, begge av gran. Dette er materialer som er brukt i ZEB-bygget på NTNU Gløshaugen.

Det er gjort to laboratorieforsøk; ett i forbindelse med prosjektoppgaven i faget «TBA4521 Bygnings- og materialteknikk, fordypningsprosjekt» og ett i forbindelse med masteroppgaven i faget «TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave». Det er i tillegg gjort litteratursøk for å avdekke omfanget av relevante studier og for å kunne utarbeide en hypotese og senere sammenligne resultater. Hovedfokuset i denne oppgaven er på forsøket gjort spesifikt for denne masteroppgaven. Dette forsøket undersøker kapillærsuging i materialene ved å følge prosedyren for undersøkelse av vannabsorpsjon ved delvis nedsenking som beskrevet i NS-EN ISO 15148.

Forsøket ble utført ved å ta seks prøver fra LVL-flensene og 6 prøver fra limtre-bjelkene. Tre av prøvene av hver type ble konfigurert slik at fuktopptaket i hovedsak skjedde på tvers av limsjiktene og de tre andre parallelt med limsjiktene. Prøvene ble dekket av aluminiumsteip rundt sidene for å hindre uønsket vanntransport. Først ble prøvene plassert i klimarommet der forsøket ble utført. Her ble de kondisjonert i et klima med 50%RF og 23°C. Deretter ble de plassert i vannkar, der de i 48 timer var i kontakt med fritt vann. Vekten av prøvene ble registrert ved henholdsvis 5 minutter, 20 minutter, 1 time, 2 timer, 4 timer, 6 timer, 12 timer, 24 timer og 48 timer. Resultatene ble behandlet for å utarbeide vannabsorpsjonskoeffisienter. Etter endt forsøk ble prøvene tørket, og vekten ble registrert med økende intervaller fra en time til to uker. Det ble sett på hystereseeffekt, effekt av limlag og sammenligninger mellom LVL-prøvene og gran-prøvene ble diskutert.

Funnene fra forsøket var i flere tilfeller overraskende. Effekten av retningen til vannabsorpsjonen i forhold til limsjiktene var mye mindre betydelig enn antatt, og effekten var til og med omvendt for LVL-prøvene. Det ble oppdaget at hystereseeffekten etter endt forsøk var signifikant, og mye større for LVL-prøvene enn for gran-prøvene. Det ble også avdekket en del mangler med forsøket slik det ble gjennomført, som omtales i diskusjonsdelen.

Forsøket gjort i forbindelse med fordypningsprosjektet er det skrevet en separat oppgave til, men blir kort redegjort for i denne oppgaven.

Det ble tatt 4 prøvestykker fra LVL-flensene fra I-bjelkene og 4 prøver fra limtre-K-bjelkene. Begge bjelker brukes som taksperer i ZEB Laboratory. Disse prøvene ble utsatt for klima med konstant temperatur på 23°C med relativ luftfuktighet varierende fra 50% til 75% til 98% og ned igjen til 75% og så til 50%. Deretter ble prøvene tørket og veid. Sensorene loggførte hele veien målt fuktinnhold, og det ble ved hvert fuktinnvå registrert vekt ved likevekt for å kunne bestemme fuktinnholdet også ved gravimetrisk metode.

Fuktopptaket til gran og LVL ble bestemt til å være relativt likt, med størst forskjell ved 75%RF på 2 prosentpoeng. Resultatene fra elektrisk motstandsmåling lå konsekvent

høyere enn resultatene fra gravimetrisk metode for LVL-prøvene. For gran-prøvene var resultatene omvendt. Det kommer tydelig frem at limlagets påvirkning på motstanden mellom elektrodene til sensorene er signifikante. Det er laget korreksjonstabeller for sensorene som er brukt i forsøket som er presentert i resultatkapittelet. Her er det brukt gjennomsnittet fra målingene ved oppfukning og uttørking, men det kan genereres nye kurver fra rådata presentert i prosjektoppgaven.

# Abstract

This master's thesis aims to investigate wetting and drying of glued wood materials. The materials studied are *Laminated Veneer Lumber*, LVL, from the flange of a Hunton I-beam and glulam from K-beams, both made of Norwegian Spruce. The reason these materials are of interest is that they are used in the ZEB Laboratory building on campus on NTNU Gløshaugen.

Two laboratory experiments have been conducted and will be presented. One was conducted in a previous course, and will be briefly explained and discussed. A full report has been done on that experiment. The other laboratory test is the focus of this thesis and will be presented in full. This is a test to determine water absorption coefficients by partial immersion, in accordance with NS-EN ISO 15148.

In addition to the two laboratory tests, a literature study was conducted to reveal the scope of relevant studies and to obtain valuable, relevant knowledge and data to compare the results to.

The test to determine water absorption coefficients by partial immersion was performed on 12 test specimens. 6 of them from the LVL-flange and 6 of them from the K-beam. 3 of each were exposed to the water by immersion in a way that the water transport mainly would be perpendicular to the glue layers and the other 3 were exposed to water by immersion in a way that made the water transport parallel to the glue layers. Before the immersion test started the specimens were conditioned in the climate room the tests were later performed in. This climate room was set to hold a relative humidity of 50% and a temperature of 23°C. After reaching equilibrium in this climate the test begun. The specimens were weighed at 9 different times during the 48 hours following their first immersion; at 5 min, 20 min, 1 hour, 2 hours, 4 hours, 6 hours, and 12 hours. The results were used to calculate water absorption coefficients. After the test was performed, the specimens were placed back in the climate room until equilibrium was achieved. Hysteresis, effects of the glue layers and their angle, and differences between the LVL-specimens and spruce-specimens were discussed.

The findings were in several cases surprising. The effect of the flow direction relative to the glue layers was much smaller than anticipated and expected after the literature study. For the LVL-specimens the effect was the opposite of the expected result. It was also discovered that the hysteresiseffect after the end of the immersion test was significant, and much bigger for the LVL-specimens than the spruce-specimens. Some faults in the experimental setup were discovered and discussed.

The experiment performed during a previous course is presented in a separate report but is briefly explained in this master's thesis as well as discussed in the discussion section. In that experiment 8 test specimens, 4 of each material, was exposed to different relative humidity: 50%, 75% and 98%. At each RH, the specimens were left there until equilibrium was reached. After they had been through the three different climates, they were incrementally moved back down to 50%. Sorption curves and correction table for electric moisture sensors were produced from the results.



# Innhold

1	Sammendrag.....	i
	Figurliste .....	viii
	Tabelliste.....	viii
2	Innledning .....	1
2.1	Bakgrunn .....	1
2.1.1	Klimaendringenes forløp.....	1
2.1.2	Byggebransjens ansvar .....	1
2.1.3	Zero Emission Buildings .....	2
2.2	Formål og omfang .....	2
2.3	Avgrensninger .....	2
3	Teori .....	4
3.1	Treverkets struktur.....	4
3.1.1	Stammenivå .....	5
3.1.2	Cellenivå .....	6
3.1.3	Fritt og bundet vann .....	6
3.2	Vanndamp og relativ luftfuktighet .....	7
3.3	Porer og poresystemer.....	7
3.4	Fuktbindinger .....	8
3.5	Sorpsjon .....	8
3.6	Kapillærsuging .....	9
3.7	Materialer.....	10
3.7.1	Gran.....	10
3.7.2	LVL .....	11
3.8	Utstyr .....	12
3.8.1	Klimarom .....	12
3.8.2	Vekt .....	12
3.8.3	Vannkar og stålvinkler .....	12
4	Metode .....	13
4.1	Litteratursøk.....	13
4.1.1	Søkemetoder .....	13
4.1.1.1	Scoping study .....	13
4.1.1.2	Citation chaining .....	14
4.1.1.3	Andre metoder .....	14
4.2	Laboratorieforsøk .....	14
4.2.1	Prøvestykker .....	14

4.2.2	Utførelse .....	15
4.2.2.1	Kondisjonering av prøvene og forsøkets klimaforhold.....	15
4.2.2.2	Forsøksoppsett .....	16
4.2.2.3	Forsøksprosedyre .....	17
4.2.2.4	Beregninger og resultatpresentasjon i henhold til NS-EN ISO 15148...18	
4.2.2.5	Uttørking i kondisjoneringsklima .....	19
4.3	Prosjektoppgave: Fuktmåling av LVL og gran.....	19
5	Resultater .....	20
5.1	Litteratursøk.....	20
5.1.1	Vannabsorpsjonskoeffisienter .....	20
5.1.2	Effekt av temperatur .....	21
5.1.3	Effekt av lim på oppfukting og uttørking.....	22
5.2	Forsøksresultater .....	23
5.2.1	Vannabsorpsjon ved delvis nedsenking etter NS-EN ISO 15148.....	23
5.2.2	Stabilisering av fuktinnhold ved kondisjoneringsklima .....	27
5.2.3	Prosjektoppgave .....	28
5.2.3.1	Sorpsjonskurver for LVL og gran utsatt for 50%, 75% og 98% RF.....	29
5.2.3.2	Korreksjonskurver for fuktmåling ved bruk av Hygrotrack S-160-0.....	29
6	Diskusjon.....	31
6.1	Vannabsorpsjon: sammenligning av LVL og gran .....	31
6.2	Effekt av limsjikt på oppfukting .....	32
6.3	Uttørking i klimarom .....	34
6.4	Hystereseeffekten .....	35
6.5	Prosjektoppgave .....	36
6.5.1	Fuktopptak .....	36
6.5.2	Effekt av limlag på elektrisk motstandsmåling.....	36
6.5.3	Sorpsjonskurver og hystereseeffekt.....	36
6.5.4	Sammenligning med tidligere forskning.....	37
6.5.4.1	Sorpsjonskurver.....	37
6.5.4.2	Korreksjonstabeller .....	38
6.6	Avvik og refleksjoner .....	40
6.6.1.1	Skadet prøvestykke.....	40
6.6.1.2	Sviktende forsegling av sidene til prøvestykkene.....	40
6.6.1.3	Inhomogene prøver .....	40
6.6.1.4	Avvik og få prøvestykker.....	40
7	Konklusjon .....	41
8	References .....	42

Vedlegg .....	45
8.1 Vedlegg A: Søk og treff fra litteraturstudie .....	45
8.2 Vedlegg B: Bilder fra forsøket .....	47

# Figurliste

Figur 1: Trestruktur - makro til mikro (Teischinger, 2016). .....	4
Figur 2: Treets ulike lag på stammenivå (Skaug, 2007). .....	5
Figur 3: Illustrasjon av oppbyggingen av en trecelle (Bergstöm, 2016). .....	6
Figur 4: Illustrasjoner av fukt i treceller (Byggforsk, 2015) og (Skaug, 2007). .....	7
Figur 5: Illustrasjon av hystereseeffekten og sorpsjonskurver (Gustavsen, 2019). .....	9
Figur 6: Illustrasjon av poresystem med vanninnhold der vannet danner menisker i overgangen mellom luft og vann. ....	10
Figur 7: Sylindrisk pore med radius $r$ , kontaktvinkel $\theta$ og overflatespenning $\sigma$ . .....	10
Figur 8: Bilde av I-bjelken prøvestykkene er skåret ut av (Hunton, 2018). .....	11
Figur 9: I-bjelke og K-bjelke prøvene ble skåret ut av. ....	14
Figur 10: Illustrasjon av forsøksoppsettet hentet fra NS-EN ISO 15148 seksjon 7.2, figur 1 (Standard Norge, 2003). .....	16
Figur 11: Forsøksoppsettet avbildet underveis i forsøket - karet med LVL-prøvene. ....	17
Figur 12: Vannabsorpsjonskoeffisienter hentet fra "Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials" (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002). .....	20
Figur 13: Vannabsorpsjonskoeffisienter hentet fra "Water Absorption and Contact Angle Measurement of Native European, North American and Tropical Wood Species to Predict Gluing Properties" (Bohme & Hora, 2009). .....	21
Figur 14: Vannabsorpsjonskoeffisient ved fire ulike temperaturer i weymouthfuru (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002). .....	22
Figur 15: Plot av $\Delta m, t$ mot kvadratroten av tid (i sekunder). .....	24
Figur 16: Plot av $\Delta m, t$ mot kvadratroten av tid (i timer). .....	25
Figur 17: Uttøring/stabilisering i kondisjoneringsklimaet etter endt forsøk illustrert ved endring i vektprosent. ....	28
Figur 18: Sorpsjonskurver for LVL og gran fra prosjektoppgaven .....	29
Figur 19: Plottet gjennomsnittlig endring i vektprosent mot tid. ....	32
Figur 20: Plottet endring i vektprosent mot tid for LVL-prøver .....	32
Figur 21: Bilde av prøvestykkene/limsjiktene. ....	33
Figur 22: Fuktutvikling ved uttørring i kondisjoneringsklimaet. ....	34
Figur 23: Endring i fuktinnhold per dag. ....	34
Figur 24: Sorpsjonskurver av LVL fra tørkemethoden sammenlignet med tidligere forskning (Birkeland, 2019). ....	37
Figur 25: Sorpsjonskurver av LVL fra tørkemethoden sammenlignet med tidligere forskning, med egne resultater plottet. ....	37
Figur 26: Sorpsjonskurver fra prosjektoppgaven sammenlignet med Birkelands funn (2019). ....	38

# Tabelliste

Tabell 1: Aktuelle verdier for konstruksjonsvirke sortert på treslag .....	11
Tabell 2: Aktuelle verdier for LVL-flensen .....	11
Tabell 3: Prøvestykkenes mål .....	15
Tabell 4: Krav til klimaforhold i henhold til NS-EN ISO 15148, seksjon 7.1 .....	15
Tabell 5: Initialvekt .....	17



Tabell 6: Veiinger under oppfukting ved delvis nedsenking i henhold til NS-EN ISO 15148 (g).....	23
Tabell 7: Endring i vekt delt på kontaktareal ved oppfukting ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ). .....	23
Tabell 8: Utregning av $A_w$ fra trendlinjene .....	26
Tabell 9: Utregning av $W_w$ fra trendlinjene .....	26
Tabell 10: Gjennomsnittlige resultater for $A_w$ og $W_w$ sortert etter scenario .....	27
Tabell 11: Uttørking etter endt forsøk til vektstabil i $23^\circ\text{C}$ og 50% RF. ....	27
Tabell 12: Utvikling av fuktinnhold, MC [%] under uttørkingen .....	28
Tabell 13: Korreksjonstabell for fuktmåling i gran ved bruk av Hygrotrack S-160-0. ....	30
Tabell 14: Korreksjonstabell for fuktmåling i Hunton I-bjelke LVL-flenser ved bruk av Hygrotrack S-160-0. ....	30
Tabell 15: Oversikt over vannabsorpsjon for LVL og gran. ....	31
Tabell 16: Oversikt over vannabsorpsjon for LVL-prøvene.....	33
Tabell 17: En illustrasjon av hystereseeffekten etter endt forsøk. ....	35
Tabell 18: Illustrasjon av hystereseeffekten fra prosjektoppgaven. ....	35
Tabell 19: Korreksjonstabell fra prosjektoppgave for gran (Østrøm, 2019) .....	39
Tabell 20: Korreksjonstabell fra prosjektoppgave for LVL (Østrøm, 2019) .....	39
Tabell 21: Korreksjonstabell for LVL fra Birkeland (Birkeland, 2019). ....	39
Tabell 22: Korreksjonstabell for gran beregnet med formel fra produsent presentert av Sletfjerding (Sletfjerding, 2019). ....	40

## 2 Innledning

### 2.1 Bakgrunn

#### 2.1.1 Klimaendringenes forløp

Gjennomsnittstemperaturen på jorda har økt med 2°C siden 1880 og CO<sub>2</sub> i atmosfæren har nådd 414 ppm, noe som ifølge ismålinger er en økning på nesten 30% siden 1880 (SeaLevel, 2020). Begge disse parameterne stiger fortsatt årlig. Samtidig smelter polare ismasser med en rate på 426 gigatonn per år, og det arktiske minimumsarealet av is minker med 12,85% per tiår (NASA, Global Climate Change Vital Signs of the Planet, 2020). Dette er noe av årsaken til at havnivået per august 2020 stiger med 3,3 mm per år.

Alle disse effektene, og mange flere, er tett knyttet til hverandre. Dersom isarealet minker, vil mindre stråling bli reflektert og mer absorberes i havet. Dette fører igjen til raskere smelting av isarealene, som igjen gir mindre refleksjon og så videre. Slike forsterkende effekter er det mange eksempler på, og de ultimate konsekvensene er vanskelige å forutse. For eksempel er permafrosten (hovedsakelig i Canada og Sibir) et lager for enorme mengder karbon, og frykten er at dersom dette tiner vil utslippene av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> (metan) være så store at man kommer til et vippepunkt der hvor de forsterkende effektene kommer ut av kontroll (SciencePoles, 2013).

Uansett utvikling, er konsekvensene av klimaendringene store. Dagens forsuring av havene, tørke, flommer, ekstremvær etc. er tett knyttet til CO<sub>2</sub>-utslipp og andre menneskelige handlinger. I Norge forventes det ifølge Faktaark M34 fra Miljødirektoratet «...et varmere og våtere klima, hyppigere ekstreme nedbørshendelser, breer som blir borte og forsuring av havene.» (Johannesen, 2013). Siden treverk er blant de mest klimaavennlige byggematerialene, og klimaendringene fører til mer fuktproblematikk i Norge i fremtiden, er fukt i treverk et høyaktuelt tema.

#### 2.1.2 Byggebransjens ansvar

Ifølge *Global Status Report 2017* publisert av *UN Environment* står bygninger og byggebransjen for til sammen 35% av globalt energiforbruk og 40% av energirelaterte CO<sub>2</sub>-utslipp (Abergel, Dean, & Dulac, Global Status Report, 2017). I tillegg står byggebransjen for 17% av verdens ferskvannsforbruk, 50% av verdens bruk av råmaterialer og 60% av avskoging og annen høsting av landarealer (Bohne, 2019).

Det finnes en rekke tiltak som kan bedre byggebransjens posisjon i forhold til klimaendringer. Produkter som stål og betong står for enorme CO<sub>2</sub>-utslipp, og et voldsomt ferskvannsforbruk. Reduksjonen av etterspørselen her er et avgjørende steg i riktig retning. Dette kan oppnås ved teknologiske fremskritt, bruk av andre byggematerialer og bedre resirkulering. Det er ikke bare byggeprosessen og materialvalgene som må forbedres, men også driftskostnader i form av CO<sub>2</sub>-ekvivalenter. Det er eksisterende byggemasser som står for brorparten av utslippene nevnt ovenfor.

### 2.1.3 Zero Emission Buildings

Kravene til nybygg, og til rehabilitering av eldre bygg, har tatt store steg i riktig retning de siste årene. Fra TEK10 til TEK17 er det gjort store endringer, og standarder for passivhus, NS-EN 3700:2013 og NS-EN 3701:2012, blir brukt. I fronten av utvikling er nå ZEB, *Zero Emission Buildings*. Dette er bygg som ikke bare har beskjedent CO<sub>2</sub>-avtrykk, men som også tilstreber å ha en driftfase som har et positivt CO<sub>2</sub>-avtrykk i løpet av sin levetid.

På NTNU Gløshaugen er et byggeprosjekt ved navn «ZEB Laboratory – Office Living LAB» nesten ferdigstilt. I dette bygget testes det nyskapende løsninger, og det skal brukes til forskning på feltet. For å begrense utslipp fra materialer er det brukt så lite materialer som mulig, og så mye treverk som mulig. I forbindelse med dette møter man på fuktproblematikk. I prosjektoppgaven før denne masteroppgaven var fokus på taksperrer som ble bygget inn mellom to dampette sjikt. Dette er i utgangspunktet ikke en fuktteknisk god løsning, og fuktsituasjonen overvåkes med fuktsensorer. Et annet, mer generelt problem, er under byggeprosessen av slike store trebygg. Underveis vil store arealer av trevirke stå under mer eller mindre åpen himmel og være utsatt for klimapåkjenninger, inkludert fritt vann fra regn og smelting. Derfor er det viktig å undersøke effekten dette har på materialer som blir utsatt for slike klimapåkjenninger.

## 2.2 Formål og omfang

Formålet med denne oppgaven er å undersøke hvordan limte trematerialer oppfuktes og tørker i situasjoner som beskrevet over. Prosjektoppgaven og masteroppgaven brukte prøvestykker skåret ut av taksperrer som er montert i ZEB-bygget. Bjelkene er en I-bjelke levert av Hunton med LVL-flens og en K-bjelke av limtre av gran. LVL, *laminated veneer lumber*, er et produkt som ikke er brukt mye tidligere og ikke forsket mye på. Det omtales i noe litteratur som parallellfinér, da det produseres som kryssfinér, men med parallell fiberretning.

I prosjektoppgaven ble det gjort forsøk på prøvestykkenes opptak av fukt og uttørking i klimasituasjon med 23°C og varierende luftfuktighet på 50%, 75% og 98% RF. Det ble utarbeidet sorpsjonskurver og korreksjonskurver for de elektriske fuktsensorene.

I masteroppgaven ble prøvestykkenes vannabsorpsjon undersøkt etter NS-EN ISO 15148. Først ble prøvene kondisjonert ved 23°C og 50% RF. De ble så ensidig utsatt for fritt vann i samme klima og vektendringer ble registrert ved 5 min, 20 min, 1 time, 2 timer, 4 timer, 6 timer, 12 timer, 24 timer og 48 timer. Prøvenes vertikale sider ble dekket med aluminiumsteip for å sikre vannabsorpsjonens retning. Deretter ble resultatene behandlet og vannabsorpsjonskoeffisienter ble presentert. Det ble også sett på uttørking i samme klima som prøvene ble kondisjonert inn etter endt forsøk.

Hensikten med forsøkene var å undersøke forskjeller mellom rent trevirke og limte trematerialer i forskjellige fuktsituasjoner.

## 2.3 Avgrensninger

I denne oppgaven blir vannabsorpsjonen kun undersøkt radielt og tangentielt. Flere av forsøkene funnet i litteraturstudiet omhandler forsøk ved vannabsorpsjon i fiberretningen. I denne oppgaven er dog vannabsorpsjonens retning bestemt i forhold til limsjiktenes retning, og ikke fibre.

Den termiske situasjonen er holdt konstant under forsøkene. Det er ikke gjort undersøkelser av effekten til temperaturgradienter eller trykkforskjeller.

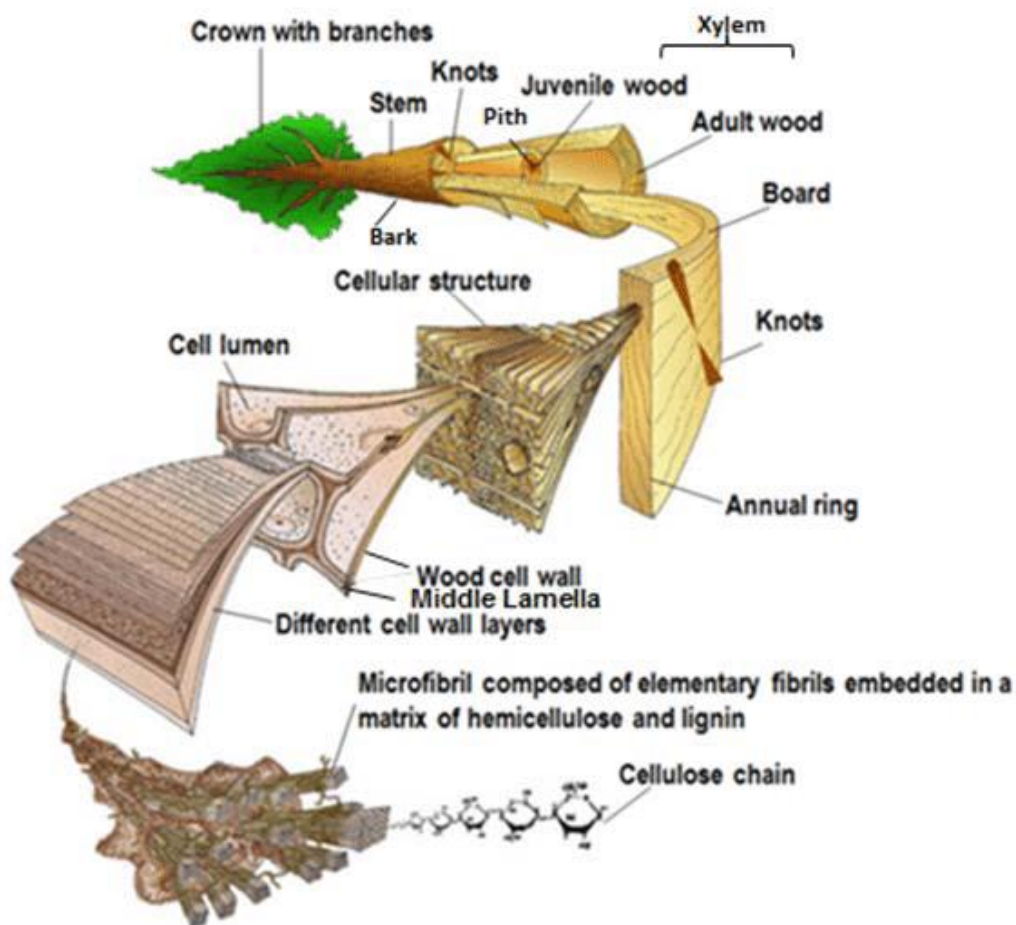
Forsøket er gjort med et begrenset antall prøvestykker, som kan føre til problemer ved avvikende resultater. Dette var fordi tilgangen på materialer var begrenset. Materialene er hentet fra rester fra byggingen av ZEB-bygget på NTNU Gløshaugen. Dette kan medføre at avvik fra normalen ikke oppdages. Det gjør det også vanskelig å identifisere trender med stor sikkerhet.

Fukthistorikken til materialene er ukjente, og hystereseeffekt fra tidligere påkjenning er derfor ikke tatt hensyn til i presentasjonen av resultatene. Da forsøkene er praktisk rettet, ses dette på som uproblematisk.

# 3 Teori

## 3.1 Treverkets struktur

Treverk kan betraktes på mange nivåer. Makronivået med selve treet på flere meter, stammen i centimetermål og årringer på noen millimeter. Mikronivået med treceller på noen få millimeter, cellevegger på noen mikrometer, mikrofibriller på noen nanometer og helt ned til cellulosen på molekylnivå.



**Figur 1: Trestruktur - makro til mikro (Teischinger, 2016).**

Et tre er bygget opp for å tåle sine omgivelser og naturlige påkjenninger best mulig. Stammen er rund for å takle vindpåkjenning på best mulig måte, grenene gror med blader eller nåler på en måte som maksimerer fotosyntesen, kjemikalier i stammen brukes som beskyttelse mot angrep av ulike slag, og treet vokser med ekstra celledannelse og spenninger der det er nødvendig for å takle større påkjenninger (Bergstöm, 2016). Dette er noen eksempler på hvorfor treet ender opp med strukturen vist i illustrasjonen over.

Hovedfunksjonene treet skal utføre for å kunne overleve er å lede vann fra grunnen til bladene, være mekanisk holdbart og kunne lagre kjemikalier.

### 3.1.1 Stammenivå

Denne seksjonen vil kort beskrive treverkets struktur på stammenivå. Alle typer treverk har sin egen karakteristiske oppbygning, men grovt sett kan treet sine ulike lag kategoriseres på følgende måte (Skaug, 2007):

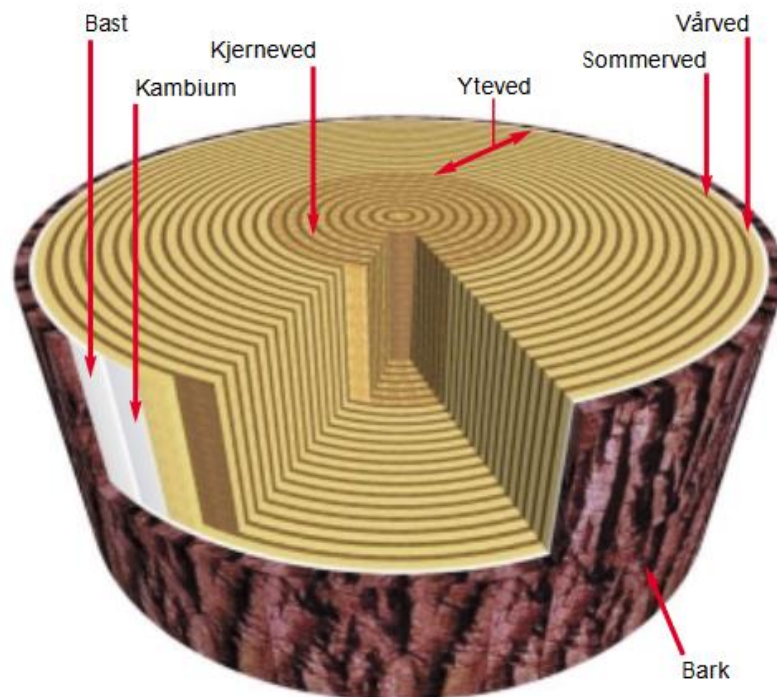
**Barken** er døde celler som beskytter vekslaget innenfor. Også kalt ytterbark.

**Bast** er levende celler som transporterer byggestoffer nedover i treet. Også kalt innerbark.

**Kambiet** består av celler som deler seg, altså vekstlaget. De fleste cellene settes av innover, men det dannes også bastceller utover.

**Yteved** transporterer vann og næringsstoffer oppover i treet. Denne kan videre deles opp i *sommerved* og *vårved*. Vekslingen mellom disse utgjør årringene. Det er de tynnveggede vårvedcellene som primært står for væsketransport, mens de tykkveggede sommervedcellene står for avstivning.

**Kjerneveden** består av døde celler.



**Figur 2: Treet sine ulike lag på stammenivå (Skaug, 2007).**

I tillegg til disse lagene har man horisontalt orienterte kanaler. Disse går i radiell retning ut fra marginen, som er i sentrum av stammen. Disse kanalene, eller margstrålene, har som oppgave å blant annet transportere næringsstoffer som er dannet i kronen innover fra basten. I tillegg finnes det harpikskanaler, som er kjemikaliet treet brukes som forsvarsmekanisme som ble nevnt tidligere, og linseporer som fungerer som ventiler for fukttransport i treverket.

### 3.1.2 Cellenivå

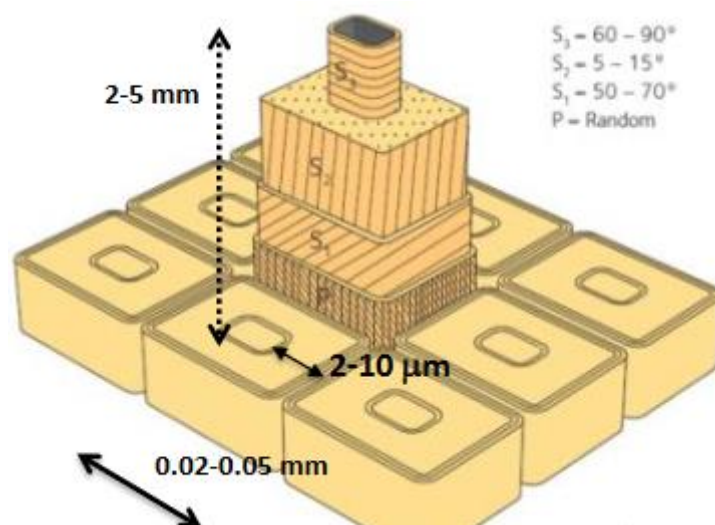
Denne seksjonen vil ta for seg oppbyggingen av trecellene. En trecelle er i hovedsak hulrom omgitt av cellevegger bygget opp av en rekke sjikt. Cellene er tubeformede og måler vanligvis 2-5 mm i lengde i, og omtrent 0,2-0,05 mm i diameter i nordiske bartrær (Hoffmeyer, 2017).

Mellom trecellene finner man *midtlamellen*, som for det meste består av lignin, og fungerer som bindemiddel for å holde cellene sammen. Deretter kommer *primærveggen*, som er en tynn vegg med tilfeldig orienterte cellulosefibriller mettet av ligning. Innenfor primærveggen kommer sekundærveggen, som er delt i tre lag:

Overgangslamellen,  $S_1$ , er det ytterste laget av *sekundærveggen*. Tykkelsen på denne er omtrent 0,25  $\mu\text{m}$ .

Sentralveggen,  $S_2$ , er hoveddelen av sekundærveggen. Tykkelsen på denne er omtrent 1-10  $\mu\text{m}$ .

Tertiærveggen,  $S_3$ , er det innerste laget av sekundærveggen. Tykkelsen på denne er omtrent 0,5-1,0  $\mu\text{m}$ .



**Figur 3: Illustrasjon av oppbyggingen av en trecelle (Bergstöm, 2016).**

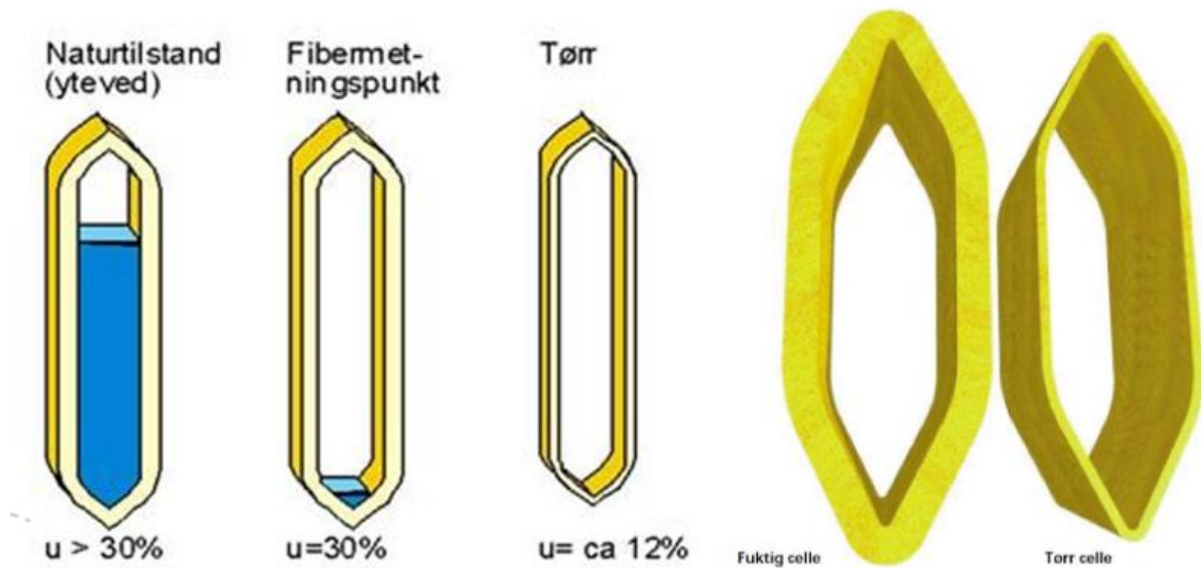
Den nøyaktige vinkelen på orienteringen av fibrene i sekundærveggen er det noe uenighet om i litteraturen. Men det sentrale poenget er det enighet om: mikrofibrillene i  $S_1$  og  $S_3$  er nærmest vinkelrette på aksialretningen, mens mikrofibrillene i  $S_2$  er tilnærmet parallelle med aksialretningen (Hoffmeyer, 2017). Det er denne anretningen av mikrofibrillene i  $S_2$  som gir treverket sin store strekkfasthet (Skaug, 2007).

Innenfor sekundærveggen finner man hulrommet som kalles *lumen*.

### 3.1.3 Fritt og bundet vann

Fukt i treverk vil bli enten bli lagret i celleveggene, som *bundet vann*, eller i hulrommet som *fritt vann*. Fuktigheten av treverk vil være summen av både bundet og fritt vann. Ved uttørking vil celleveggen først begynne å tørke når alt det frie vannet er tørket ut. I nordiske bartrær vil dette vanligvis skje ved omtrent 28% fuktighet, som kalles

*fibermetningspunktet*. Når treverk har nådd fibermetningspunktet betyr det at celleveggene har bundet så mye vann som mulig, og at vann utover dette vil lagres i hulrommet, lumen (Skaug, 2007).



**Figur 4: Illustrasjoner av fukt i treceller (Byggforsk, 2015) og (Skaug, 2007).**

### 3.2 Vanndamp og relativ luftfuktighet

Luft har som regel et visst innhold av fukt i form av vanndamp. Ved normalt trykk og temperatur kan vanndamp betraktes som en ideell gass. Dette gjør at innholdet av vanndamp i lufta kan oppgis på forskjellige måter, som f.eks.: vanndampens partialtrykk ( $p_v$ , Pa), vanndampkonsentrasjon ( $v$ , kg/m<sup>3</sup>) eller vanndampmasse ( $x$ , kg/kg) (Thue, 2016).

Luftens evne til å ta opp og avgi fukt varierer med temperaturen. For enhver temperatur finnes det et metningstrykk,  $p_{sat}$ , eller metningsinnhold,  $v_{sat}$ , som er henholdsvis det største partialtrykket eller vanndampkonsentrasjonen lufta kan ha. Disse verdiene er proporsjonale med temperaturen. Metningstrykket er høyere ved høyere temperatur, og lavere ved lavere temperatur.

En vanlig måte å oppgi luftfuktighet på, som vil bli brukt i dette prosjektet, er ved *relativ luftfuktighet*. Relativ luftfuktighet er definert som forholdet mellom partialtrykket til vanndamp i en gassblanding av tørr luft og vann og vanndampens metningstrykk til vann ved en gitt temperatur,  $RF = \frac{p_v}{p_{sat}} * 100$ , der svaret etter denne formelen er oppgitt i prosent (Samuelsen, 2017).

### 3.3 Porer og poresystemer

De fleste ikke-metallurgiske byggematerialer er porøse, som betyr at de har poresystemer som kan binde fukt. Slike materialer kalles *hygroscopiske* materialer. Utformingen av poresystemet, størrelsen på porene og fordeling er alle viktige parametere som har stor innvirkning på fuktopptak, uttørking og fukttransport.



Treverkets oppbygning gir et poresystem som på grunn av strukturen fører til størst sugsevne i aksial retning. På tvers av dette er det porer i celleveggene sammen med de submikroskopiske porene mellom mikrofibrillene som bidrar til sugsevnen.

### 3.4 Fuktbindinger

Når materialer blir utsatt for og tar til seg vann vil dette bindes på en rekke forskjellige måter. De to hovedkategoriene er kjemiske bindinger og fysikalske bindinger. Kjemiske bindinger er interessante for noen materialer, som betong, gips og lignende, men for fukt i treverk er dette lite aktuelt. Her er det fysikalske bindinger som er interessante.

Fysikalske bindinger deles gjerne opp i følgende tre hovedgrupper:

#### **Osmose**

Osmose er diffusjon av vann gjennom en semipermeabel membran som tillater fri passasje av vann, men ikke oppløste stoffer. Diffusjonen drives av ulik konsentrasjon av oppløste stoffer (salter, sukker, syrer etc.) på hver side av membranen (Aarnes, 2018). Dette er som regel en liten del av bundet vann, og det er svært vanskelig å skille mellom osmotisk bundet vann og adsorptivt bundet vann. Derfor ser en vanligvis bort fra denne effekten (Thue, 2016).

#### **Adsorpsjon**

Dette er bindingen av gass eller oppløste stoffer til en overflate på et fast legeme. I denne sammenheng binding av vann- eller vandampmolekyler til overflaten i porer. Her er det kjemisk og elektrostatisk tiltrekning, ofte som følge av at H<sub>2</sub>O-molekylet er en dipol (Aarnes, 2018). Siden det er begrenset hvor mange lag vannmolekyler som kan bindes til poreoverflaten er spesifikk poreoverflate avgjørende for hvor mye av vannet bundet i materialet denne bindingen kan stå for. Det varierer også hvor sterke bindinger som dannes, og derfor også hvor mange lag som kan bindes, ut ifra hvilket materiale det gjelder.

#### **Kapillærkondensasjon**

Poresystemer og porer er irregulære i sin form og begrenset i sin utbredelse. Dette gjør at når adsorptivt bundet vann når et visst nivå i porer eller poresystemer vil lagene møtes og krype sammen. Vannoverflaten som innkapsler det resterende porevolumet, vil naturligvis heller ikke være plant. Dette gjør at man får krumninger som man kaller menisker. Krumningen i overflaten gjør at overflatespenningen trekker molekylene fra hverandre. Dette fører til at utskifting av molekyler mellom vannoverflaten og lufta i porene avtar i de krumme områdene, som fører til lavere vandamptrykk (Thue, 2016). Dette gir meniskene en stor tiltrekningskraft på de frie dampmolekylene i porelufta. I tillegg vil de dobbelkrummede meniskene ha en større tiltrekningskraft enn de plane eller enkeltkrummede væskehinnene ellers (Paulsen, 2004). Dette fenomenet er lite aktuelt ved lave fuktnivåer. Men jo nærmere 100% RF man er, jo større vil bidraget fra kapillærkondensasjon på bundet vann være.

### 3.5 Sorpsjon

Sorpsjon er et samleord for absorpsjon, adsorpsjon og desorpsjon. Absorpsjon er i denne forbindelse definert som en prosess der væske eller gass trenger inn i et materiale, mens adsorpsjon er avsetning av væske på overflaten av et materiale (i denne sammenheng

porer). Desorpsjon er når fuktinnholdet for aktuelt område minsker – altså at stoffet avgir væske eller gass til omgivelsene.

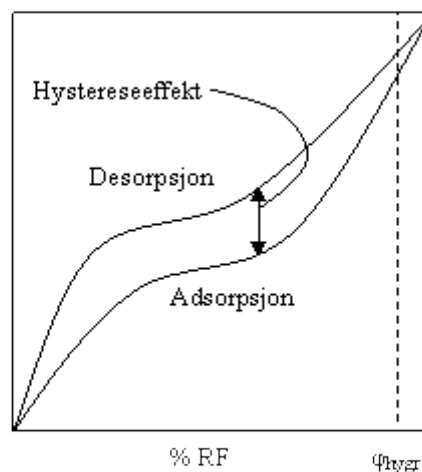
For et hygroskopisk materiale utsatt for fuktig luft vil det etter en tid innstilles en likevekt. Her vil summen av sorpsjonen være tilnærmet lik null, og fuktinnholdet i materiale vil være konstant. Dette kalles *likevektsfuktigheten*, og vil variere basert på fuktinnholdet og temperaturen i luften. Dersom det gjøres målinger for aktuelle nivåer kan man konstruere sorpsjonskurver som illustrerer fuktinnholdet ved gitt RF og temperatur for et gitt materiale.

Sorpsjonskurven deles gjerne inn i tre seksjoner:

1. Ved lav RF er stigningen til fuktinnholdet kraftig, fordi bindingskreftene er svært store.
2. Ved middels RF øker fuktinnholdet saktere i forhold til økningen i RF. Ved et punkt vil økningen være proporsjonal.
3. Ved høy RF (når kapillærkondensasjon i de større porene setter i gang) vil stigningen være høyere igjen. (Geving & Thue, 2002).

Det er vanlig at slike kurver går opp til 98% RF, da dette regnes som den øvre hygroskopiske grense (der materialet tar opp fukt fra fuktig luft).

Ved utarbeiding av sorpsjonskurver er det vanlig å ha en kurve for adsorpsjon/absorpsjon, ved stigende RF, og en kurve for desorpsjon, ved synkende RF. Dette er på grunn av et fenomen som kalles *hysterese*. Materialet når likevekt for en gitt RF i begge situasjonene, men fuktinnholdet ved likevekt i desorpsjonsfasen er høyere enn den er ved adsorpsjonsfasen. Dette viser at fukthistorikken til treverk er viktig for fuktinnholdet i en senere situasjon. Dermed er det en fordel å se på sorpsjonslinjene som grenseverdier, og ikke absolutte verdier for treverkets fuktighet (Time, 1998).

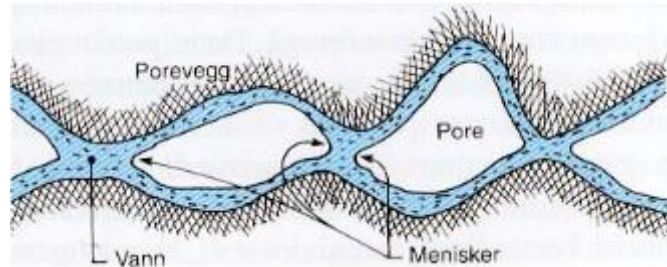


**Figur 5: Illustrasjon av hystereseeffekten og sorpsjonskurver (Gustavsen, 2019).**

### 3.6 Kapillærsuging

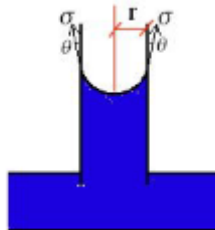
Kapillærsuging er fenomenet som oppstår når et porøst, kapillæraktivt materiale er i kontakt med fritt vann. Vannet vil suges inn i materialets poresystem, og væskestrømmen som oppstår kalles kapillærsuging.

Drivkraften til kapillærsugingen er adhesjonskreftene som oppstår mellom materialets poreoverflater og vannet. Kapillærsuging og kapillærkondensasjon er i prinsippet drevet av samme fenomen, men forskjellen er at ved kapillærsuging er opptaket av væske fra fritt vann og ikke fra vanndamp. Vannets overflatehinne suger vann med innover i materialporene og det dannes konkave menisker i poresystemet (Geving & Thue, 2002).



**Figur 6: Illustrasjon av poresystem med vanninnhold der vannet danner menisker i overgangen mellom luft og vann.**

Den enkleste modellen for å betrakte kapillærsuging er å se på en sylindrisk pore med radius  $r$ .



**Figur 7: Sylindrisk pore med radius  $r$ , kontaktvinkel  $\theta$  og overflatespenning  $\sigma$ .**

Dersom den ene enden av en kapillærpore er i kontakt med fritt vann med trykk lik omgivelsestrykket, vil kapillærkreftene skape en trykkforskjell som gjør at vannet suges inn i poren. Dette kommer av at adhesjonskreftene fører til en strekkspenning i overflatehinna. Denne sugekraften er omvendt proporsjonal med poreradien.

## 3.7 Materialer

I dette forsøket er det brukt prøver fra LVL-flenser av gran og heltre av gran skåret ut av limtrebjelker.

### 3.7.1 Gran

Granvirke utgjør det største trelastvolumet i Norge og utgjør omtrent 2/3 av det totale hogstkvantumet til industriformål de siste ti årene. Sammenlignet med furu har gran blant annet mindre, men flere kvister og en lysere og jevnere farge (Byggforsk, 2015). Gran er mye brukt blant annet i limtrekonstruksjoner, eller andre steder der det av arkitektoniske eller estetiske årsaker ønskes. Prismessig er det i skrivende stund noe dyrere enn furu, men prisen de siste årene har sunket betraktelig mye fortere for gran (Landbruksdirektoratet, 2019).

Typiske aktuelle verdier for gran, furu og bjørk (til sammenligning) for konstruksjonsformål:

**Tabell 1: Aktuelle verdier for konstruksjonsvirke sortert på treslag**

Treslag	Densitet ved 12% MC (kg/m <sup>3</sup> )	Bøyefasthet (N/mm <sup>2</sup> )	Strekfasthet (N/mm <sup>2</sup> )	Trykkfasthet (N/mm <sup>2</sup> )	E-mod (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Gran</b>	470	78	90	50	11,0
<b>Furu</b>	520	87	104	55	12,0
<b>Bjørk</b>	637	147	173	51	14,7

### 3.7.2 LVL

Materialet som skal undersøkes mot granprøvene er prøvestykker som er skåret ut av flensen fra en Hunton I-bjelke, SJ LVL HB 60, som brukes som taksperer i ZEB Living Lab på NTNU Gløshaugen. Steget er laget av en hard trefiberplate som er limt til flensene. Flensene er laget av LVL, en forkortelse av *Laminated Veneer Lumber*. Vegard Frydenlynd, ingeniør i Hunton, bekreftet i e-post-korrespondanse at LVL-flensene er laget som kryssfinér, bare at finerlagene limes sammen parallellt med fiberretningen (personlig kommunikasjon, 8. oktober 2019). Lagene er limt sammen med fenolfomaldehydlim. Produksjonsprinsippene kan sees i en video fra Steico, som er leverandør til Hunton av I-bjelkene (Steico, 2016). LVL er foreløpig en noe uvanlig variant i limtrefamilien, men blir brukt fordi løsninger som dette blant annet gir lav materialbruk, og dermed lavere CO<sub>2</sub>-avtrykk.

**Figur 8: Bilde av I-bjelken prøvestykkene er skåret ut av (Hunton, 2018).****Tabell 2: Aktuelle verdier for LVL-flensen**

Treslag	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Bøyefasthet (N/mm <sup>2</sup> )	Strekfasthet (N/mm <sup>2</sup> )	Trykkfasthet (N/mm <sup>2</sup> )	E-mod (N/mm <sup>2</sup> )
<b>LVL-flens</b>	500	48	36	36	11,6

I den tekniske håndboken til Hunton I-bjelke (Hunton, 2018) kan en lese:

Til flensene bruker vi LVL (Laminated Veneer Lumber) som er en mellomting mellom kryssfinér og limtre. Tverrsnittet er bygget opp av sammenlimte finér lag med parallell fiber retning. Dette garanterer en jevnt høy kvalitetsstandard og definert fasthet. Ved å bruke LVL i flens får vi en bjelke av bedre kvalitet og økt styrke (s. 4).

## 3.8 Utstyr

Denne seksjonen vil gi en kort beskrivelse av utstyret som er brukt under forsøket.

### 3.8.1 Klimarom

Under forsøket ble et klimarom som tilhører SINTEF og NTNU benyttet. Dette holdt tilnærmet 50% RF og 23°C.

### 3.8.2 Vekt

Vekten som ble brukt var en Mettler Toledo med nøyaktighet på 0,001 gram, som er godt innenfor kravet til NS-EN ISO 15148 på  $\pm 0,1\%$  av prøvestykkenes vekt.

### 3.8.3 Vannkar og stålvinkler

Vannkar av hardplast hvor prøvene ble utsatt for vann. Prøvene hvilte på stålvinkler.

# 4 Metode

## 4.1 Litteratursøk

Hensikten med litteratursøket er å tilegne seg kunnskap som er relevant til oppgaven. Dette gjøres i hovedsak ved hjelp av strukturerte søkemetoder. I tillegg til de strukturerte litteratursøkene omtalt under har det blitt benyttet bøker, oppslagsverk, e-post-korrespondanse, forelesningsnotater fra aktuelle fag ved NTNU, SINTEF Byggforsk og andre artikler og informasjonshefter.

### 4.1.1 Søkemetoder

#### 4.1.1.1 Scoping study

Første metode benyttet var «scoping study». Metoden ble brukt med følgende fremgangsmåte som ble presentert i litteratursøkerkurs (Andenæs, 2019) basert på en anerkjent artikkel fra 2005 (Arksey & O'Malley, 2005):

1. Definer nøkkelord
2. Søk i ulike databaser:
  - a. Sciencedirect
  - b. Web of science
  - c. Oria
  - d. Google scholar (veldig spesifikke søkekriterier)
3. Spisse søket om nødvendig for å få rimelig antall treff
4. Behandle treff
  - a. Les tittel og vurder relevans
  - b. Les abstract og vurder relevans
  - c. Les konklusjon og vurder relevans
  - d. Les artikkelen/bokkapitlet/publikasjonen etc.

Det finnes svært lite relevant forskning på limte trematerialer generelt, og spesielt på LVL. Derfor ble søket utvidet til å inkludere kapillærsuging og fuktopptak i treverk. Initiale søk på norsk ga svært få resultater, og søket ble derfor gjort på engelsk. De overordnede søkeordene brukt i scoping study var følgende:

- Wood
- LVL
- Glulam

Disse søkeordene ble kombinert med følgende sekundære søkeord for å spesifisere forskningsområdet:

- Capillarity
- Capillary suction
- Moisture content
- Sorption
- Immersion
- Water absorption

Søkene ble gjort i databasene «Science Direct» og «Web of Science».

Det ble også gjort søk etter standarden «DIN 52617» og «ISO 15148» kombinert med «wood». ISO 15148 er standarden benyttet for dette forsøket, mens DIN 52617 er en ikke-europeisk forkommer. For å finne resultater som omhandlet fuktopptak gjennom limsjikt av samme type som er brukt i LVL-prøvestykkene ble det også gjort søk på «phenol formaldehyde». Fullstendig oversikt finnes i vedlegg A.

#### 4.1.1.2 Citation chaining

Citation chaining er en søketeknikk der man ser på referanser i artikkelen og på artikler som selv har brukt artikkelen som kilde. Ingen av treffene fra scoping study ga noen relevante treff. Denne teknikken ble brukt på en artikkel tilsendt av veileder Tore Kvande. Treffene vurderes på samme måte som ved scoping study. Se punkt 4 under 4.1.1.1.

Metoden kan brukes fremover og bakover i tid. Fremover i tid vil si å se på artikler som siterer artikkelen man søker fra. Bakover i tid vil si å se på artikler og andre kilder benyttet av artikkelen man søker fra.

Citation chaining fremover i tid ble gjort ved å søke på artikkelen, og sortere for «citations» i Google Scholar. Citation chaining bakover i tid ble gjort ved å gå gjennom referanselisten til artikkelen på samme måte som treffene i punkt 4 i 4.1.1.1.

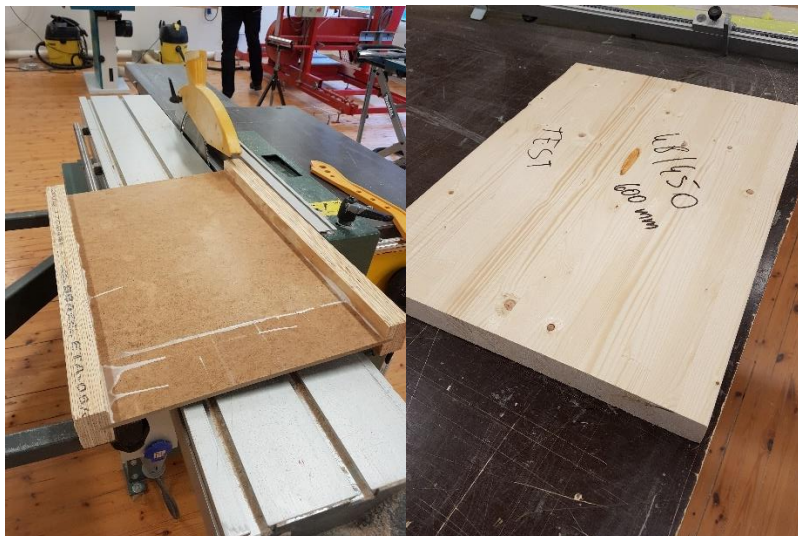
#### 4.1.1.3 Andre metoder

Kilder ble også valgt basert på egen erfaring, spesielt når det kom til aktuelle bøker. I tillegg så ble kilder benyttet som undervisningsmateriale i fag ved NTNU brukt; hefter, kompendium, forelesningsnotater, bøker, artikler osv. En svært viktig kilde var også selvfølgelig norsk standard for forsøket, NS-EN ISO15148.

## 4.2 Laboratorieforsøk

### 4.2.1 Prøvestykker

Prøvestykkene ble tatt fra taksperrer til overs fra ZED Living Lab-prosjektet; en I-bjelke med LVL-flens og en K-bjelke av limt gran.



Figur 9: I-bjelke og K-bjelke prøvene ble skåret ut av.

Da materialmengden var begrenset ble størrelsene på prøvestykkene beregnet for å maksimere utnyttelsen av materialmengden. I henhold til NS-EN ISO 15148 (Standard Norge, 2003) seksjon 6.3 skal minst tre prøver testes. Dersom kontaktflaten på prøvestykkene er mindre enn 100 cm<sup>2</sup> skal minst seks prøvestykker testes med et totalt kontaktflateareal på minst 300 cm<sup>2</sup>. Dette var ikke mulig å oppfylle med materialene til rådighet. Da det var 4 forskjellige testscenarier, det ble laget 12 prøvestykker – 3 for hvert scenario. I henhold til NS-EN ISO 15148 ble prøvene tillaget i begge mulige orienteringer. Scenarioene var som følger:

1. LVL med kapillærsuging på tvers av limsjiktene.
2. LVL med kapillærsuging parallelt med limsjiktene.
3. Gran med kapillærsuging på tvers av limsjiktene.
4. Gran med kapillærsuging parallelt med limsjiktene.

Etter maksimeringsberegninger ble prøvestykkene tilskåret etter følgende mål:

**Tabell 3: Prøvestykkenes mål**

Scenario	Lengde [mm]	Bredde [mm]	Kontaktflateareal [cm <sup>2</sup> ]	Høyde
<b>1</b>	101	59	59,6	39
<b>2</b>	153	39	59,7	59
<b>3</b>	124.2	48	59,6	48
<b>4</b>	124.2	48	59,6	48

Etter tilskjæring ble sidene av prøvestykkene dekket med aluminiumsteip for å oppfylle kravene om vann- og damptett forsegling av sidene for å sikre retningen av vanntransporten.

For prøvestykkene av gran er det kun ett limsjikt helt i overkant av prøven, 7 mm under overkanten av prøvene. De skal brukes til sammenligning med LVL-prøvene, som har mange limsjikt, for å se på effekten limsjiktene har på opptak av vann og ved tørking.

#### 4.2.2 Utførelse

Utførelsen av forsøket ble gjort i henhold til prosedyren angitt i NS-EN ISO 15148 (Standard Norge, 2003).

##### 4.2.2.1 Kondisjonering av prøvene og forsøkets klimaforhold

Før forsøkets start ble prøvene kondisjonert i klimarommet der forsøket senere ble gjennomført. Kravene til klimaforhold er gitt i tabell 1 i seksjon 7.1 i standarden:

**Tabell 4: Krav til klimaforhold i henhold til NS-EN ISO 15148, seksjon 7.1**

	Temperatur [°C]	Luftfuktighet [%]
<b>Tillat område for testforhold</b>	18 – 28	40 – 60
<b>Tillatt variasjon av testforhold</b>	± 2	± 5

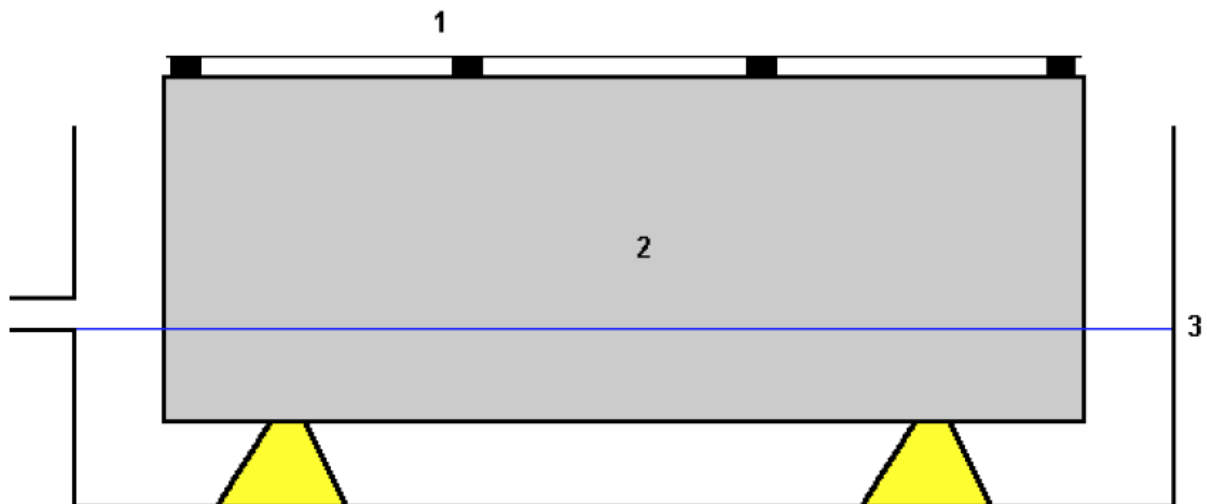


Klimarommet der forsøket ble gjennomført oppfylte kravene gitt i Tabell 4. Rommet var innstilt til å holde en temperatur på 23°C og en luftfuktighet på 50%. Under kondisjoneringen varierte temperaturen med under 1°C og luftfuktigheten med under 1%.

Før forsøket ble det stadfestet at vektendringen til prøvene over en periode på 24 timer var mindre enn 0,1%, i henhold til standardens seksjon 6.5. Da dette kravet var bekreftet oppnådd ved to påfølgende målinger ble prøvene ansett som kondisjonert. Forsøket ble så utført i samme klimarom, med samme konfigurasjon, som da kondisjoneringen ble utført.

#### 4.2.2.2 Forsøksoppsett

Forsøksoppsettet er i henhold til beskrivelsene gitt i standarden. Et vannkar med vannivå på  $5 \pm 2$  mm over underkanten av prøvestykkene. Prøvestykkene skal hvile på punktstøtter som ikke skader prøvematerialene. Punktstøttene er i det praktiske forsøket erstattet av stålvinkler som ligger orientert slik som avbildet i Figur 10. I standarden fastslås det at et gitter skal brukes for å veie ned prøvene dersom det var nødvendig, noe det ikke var i dette forsøket. Prøvene lå stabilt uten stabiliserende toppvekt.



Figur 10: Illustrasjon av forsøksoppsettet hentet fra NS-EN ISO 15148 seksjon 7.2, figur 1 (Standard Norge, 2003).



**Figur 11: Forsøksoppsettet avbildet underveis i forsøket - karet med LVL-prøvene.**

#### 4.2.2.3 Forsøksprosedyre

Forsøket ble utført etter prosedyren beskrevet i NS-EN ISO 15148 seksjon 7.2.

Først ble initialvekten,  $m_i$ , av prøvene etter kondisjonering registrert før forsøkets oppstart:

**Tabell 5: Initialvekter**

Prøvestykke	Vekt [g]
<b>G1</b>	137,872
<b>G2</b>	132,282
<b>G3</b>	132,122
<b>G4</b>	121,549
<b>G5</b>	122,312
<b>G6</b>	121,078
<b>LVL1</b>	134,452
<b>LVL2</b>	143,345
<b>LVL3</b>	135,614
<b>LVL4</b>	210,656
<b>LVL5</b>	204,097
<b>LVL6</b>	203,901

Prøvene nummerert 1-3 er orientert slik at vanntransporten skjer på tvers av limsjikt, mens prøvene nummerert 4-6 er orientert slik at vanntransporten skjer parallelt med limsjikt.

Etter at initialvekter var bestemt, ble prøvene plassert i vannkarene på tvers av stålvinklene. Vannivået ble holdt så konstant som mulig med minst  $5 \pm 2$  mm avstand fra undersiden av prøvene til vannkanten. Idet prøvene ble plassert i vannkarene ble tidtaker startet. Ved bestemte tidsintervaller ble prøvene veid. Dette ble gjort ved å løfte

prøvene ut av vannkaret, tørke av overflødig vann (og i noen tilfeller klemme vann ut av hulrom som oppstod), for så å veie dem og plassere dem tilbake i vannkaret. Dette ble gjort så fort som mulig ved hver veiing.

Tidene prøvene ble veid var som følger, der tiden representerer tiden fra prøvene ble plassert i vann:

- 5 minutter
- 20 minutter
- 1 time
- 2 timer
- 4 timer
- 6 timer
- 12 timer
- 24 timer
- 48 timer

Veietidene avviker noe fra standarden, da det var vanskelig å gjennomføre forsøket under covid-19. I henhold til standarden skulle prøvene vært veid ved 8 timer, ikke 6 timer, og en gang mer enn det som er gjort her mellom 8 og 24 timer.

Etter 48 timer i vannkar ble prøvene flyttet til tørking i klimarommet der forsøket og kondisjoneringen fant sted. Prøvene ble veid etter 24 timer, 50 timer og så med varierende intervaller over de neste ukene. Prøvene stabiliserte seg med vektendring på under 0,1% av totalvekt, og veiingen ble avsluttet.

Etter endt forsøk ble prøvene tørket i tørkeskap ved 105°C til vektendringen var under 0,1% av totalvekt per døgn. Dette ble gjort for å kunne se på nøyaktig fuktinnhold.

#### 4.2.2.4 Beregninger og resultatpresentasjon i henhold til NS-EN ISO 15148

Standarden gir en instruks om hvordan resultatene skal behandles. Både beregninger og resultatpresentasjon inngår i instruksjonen, og oppsummeres her.

Regn ut prøvestykkenes kontaktareal.

Regn ut endringen i masse per areal:

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A}$$

Resultatet skal plottes mot kvadratroten av tiden,  $\sqrt{t}$ .

Resultatet vil bli en graf av type A eller B.

**Type A** graf vil ha punkter som ligger tett til en lineær trendlinje. Altså være tilnærmet lineær. Denne trendlinjen kan trekkes til  $t = 0$  hvor den krysser y-aksen i  $\Delta m'_0$ .

Vannabsorpsjonskoeffisienten,  $A_w$  eller  $W_w$ , beregnes da etter følgende formel:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}$$

der

$\Delta m'_{t_f}$  er verdien til  $\Delta m$  på trendlinjen ved  $t = t_f$  i  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;

$t_f$  er tiden ved avsluttet forsøk, i sekunder.

Eller

$$W_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}$$

der

$\Delta m'_{t_f}$  er verdien til  $\Delta m$  på trendlinjen ved  $t = t_f$  i  $\text{kg}/\text{m}^2$ ;

$t_f$  er tiden ved avsluttet forsøk, i timer.

Dersom resultatet gir en rett linje med en brå reduksjon i stigningstall indikerer dette at vannet har trengt gjennom prøvestykket – synlig vann på oversiden av prøven. Da skal  $A_w$  beregnes med en verdi av  $t_f$  mindre enn hele forsøkets varighet, det vil si omtrent der vannet på oversiden av prøven oppstod. Verdien av  $t_f$  skal oppgis i rapporten.

**Type B** graf vil ikke være lineær, men en kurve av et slag. Dette er ikke aktuelt i denne oppgaven, da resulterende grafer var av type A.

#### 4.2.2.5 Uttørking i kondisjoneringsklima

Etter endt forsøk ble prøvene satt til tørking i klimarommet med samme konfigurasjon som under kondisjoneringen og veid regelmessig inntil prøvene hadde stabilisert seg med en vektendring per døgn på under 0,1%.

Etter dette ble prøvene så plassert i tørkeskap ved 105°C over 72 timer. Vektendringen var da under 0,1% per døgn og prøvene antatt frie for fukt.

### 4.3 Prosjektoppgave: Fuktmåling av LVL og gran

Her vil en kortversjon av metoden brukt i prosjektoppgaven presenteres. For fullstendig metode, se prosjektoppgaven (Østrøm, 2019).

I prosjektoppgaven ble 4 prøvestykker av samme LVL-flens og 4 prøvestykker av gran fra samme K-bjelke som ble brukt i masteroppgaven benyttet. Disse prøvene ble utsatt for klima med konstant temperatur på 23°C og relativ luftfuktighet varierende fra 50% til 75% til 98% og ned igjen til 75% og deretter til 50%. Deretter ble prøvene tørket og veid. Fukttinnholdet ble målt ved både elektrisk motstandsmetode og gravimetrisk metode.

Sorpsjonskurver ble beregnet og presentert, i tillegg til korreksjonskurver for sensorene som ble brukt i forsøket. Dette er sensorer av typen Hydrotrac S-160-0 levert av Omnisense. Dette er samme type fuktsensorer som er installert i ZEB Living Lab på Gløshaugen.

## 5 Resultater

### 5.1 Litteratursøk

En oversikt over søkene resultatene fra litteratursøket finnes i vedlegg A.

#### 5.1.1 Vannabsorpsjonskoeffisienter

Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin og Goudreau (2002) gjennomførte undersøkelser av vannabsorpsjonskoeffisienten til tre ulike bygningsmaterialer ved fire ulike temperaturer. Forsøket ble utført ved delvis nedsenking. En vesentlig forskjell fra forsøket som ble utført i undertegnede oppgave var at det ble undersøkt longitudinal vanntransport. Bygningsmaterialene var weymouthfuru (*Pinus strobus*), rød teglstein og betong. Temperaturene var 3°C, 12°C, 21°C og 35°C. Vannabsorpsjonskoeffisientene ble presentert og kan sees i Figur 12. (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002)

**Table 2a. Water absorption coefficient ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$ ) of eastern white pine.**

Temp. = 3°C		Temp. = 12°C		Temp. = 21°C		Temp. = 35°C	
Specimen ID	Water Absorp. Coef.	Specimen ID	Water Absorp. Coef.	Specimen ID	Water Absorp. Coef.	Specimen ID	Water Absorp. Coef.
WD-T2-1	0.0068	WD-T3-1	0.0099	WD-T1-1	0.0114	WD-T4-1	0.0151
WD-T2-2	0.0078	WD-T3-2	0.0089	WD-T1-2	0.0116	WD-T4-2	0.0139
WD-T2-3	0.0075	WD-T3-3	0.0088	WD-T1-3	0.0112	WD-T4-3	0.0136
WD-T2-4	0.0077	WD-T3-4	0.0092	WD-T1-4	0.0109	WD-T4-4	0.0132
WD-T2-5	0.0080	WD-T3-5	0.0096	WD-T1-5	0.0111	WD-T4-5	0.0144
WD-T2-6	0.0076	WD-T3-6	0.0099	WD-T1-6	0.0112	WD-T4-6	0.0142
Average	0.0075	Average	0.0094	Average	0.0112	Average	0.0142
Standard deviation	0.0004	Standard deviation	0.0005	Standard deviation	0.0002	Standard deviation	0.0007

**Figur 12: Vannabsorpsjonskoeffisienter hentet fra "Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials" (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002).**

Boehme og Hora (2009) gjennomførte en omfattende studie av vannabsorpsjon og kontaktflatevinkel for 40 ulike tresorter. Hensikten med studien var å undersøke vannabsorpsjonen til tresortene for å kunne gjøre antakelser om adhesjonen til vannløselig lim, e.g. KPVAC-lim. Det ble også undersøkt kontaktvinkel per tid, som er et annet mål på vannopptak.

Funnene i forsøkets første del er relevante for denne oppgaven, da de gir en oversikt over vannabsorpsjonskoeffisientene avbildet i Figur 13. Spesielt interessant er tresort nummer 15, som er gran. Det er ikke spesifisert granart. Forsøket er utført etter standarden DIN 52617: 1987 som senere er erstattet av NS-EN ISO 15148. Prosedyren ligner den som er foreskrevet i NS-EN ISO 15148 som er fulgt i forsøket presentert i

denne oppgaven. Vannabsorpsjonen skjer radialt etter tangentiell avskjæring etter lakkering for å hindre damp og vanntransport i uønsket retning. (Bohme & Hora, 2009)

No. Trade name	Botanical name	Density g/cm <sup>3</sup>	No. Wood species/ Trade name	Abbreviation DIN 4076	w <sub>i</sub> kg/m <sup>2</sup> *√h	W <sub>24</sub> kg/m <sup>2</sup>	t <sub>50</sub> min		
1	Pitch Pine, fatwood	<i>Pinus spp.</i>	0,785						
2	Western Redcedar	<i>Thuja plicata</i>	0,300	2	Western Redcedar	RSW	0,0158	0,077	600,9
3	Larch	<i>Larix decidua</i>	0,660	36	Afzelia	AFZ	0,0350	0,171	122,4
4	Niangon	<i>Tarrietia utilis</i>	0,705	4a	Niangon/fatty	NIA	0,0357	0,175	117,7
4a	Niangon/fatty	<i>Tarrietia utilis</i>	0,848	37	Angélique/Basralocus	AGQ	0,0391	0,192	98,1
5	Redwood	<i>Sequoia sempervirens</i>	0,421	27	Meranti, heavy	MER	0,0420	0,206	85,0
6	Douglas/Oregon Pine	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,587	34	Teak	TEK	0,0426	0,209	82,7
7	Dark Red Meranti	<i>Shorea spp.</i>	0,680	13	Afzelia	AFZ	0,0496	0,243	61,0
8	Sapele	<i>Entandrophragma cylindricum</i>	0,581	17	Utile	MAU	0,0527	0,258	54,0
9	Afromosia	<i>Pericopsis eleta</i>	0,723	32	Balau/Bangkirai	BAU	0,0547	0,268	50,1
10	Pine, heartwood	<i>Pinus sylvestris</i>	0,631	8	Sapele	MAS	0,0552	0,270	49,2
10a	Pine, sapwood	<i>Pinus sylvestris</i>	0,579	28	Meranti, light	MER	0,0553	0,271	49,1
11	Oak	<i>Quercus spp.</i>	0,707	29	American Mahogany	MAE	0,0556	0,272	48,5
12	Teak	<i>Tectona grandis</i>	0,695	12	Teak	TEK	0,0570	0,279	46,2
13	Afzelia	<i>Afzelia spp.</i>	0,791	7	Dark Red Meranti	MER	0,0604	0,296	41,1
14	Iroko/Kambala	<i>Chlorophora excelsa</i>	0,655	21	American Mahogany	MAE	0,0622	0,305	38,8
15	Spruce	<i>Picea abies</i>	0,524	1	Pitch Pine, fatwood	PIP	0,0649	0,318	35,6
16	Douglas/Oregon Pine	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,496	33	Cedro	CED	0,0650	0,318	35,5
17	Utile	<i>Entandrophragma utile</i>	0,598	22	Niangon	NIA	0,0659	0,323	34,5
18	Beech	<i>Fagus sylvatica</i>	0,692	6	Douglas/Oregon Pine	DGA	0,0684	0,335	32,1
19	Danta (Ivory Coast)	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	0,789	31	Pitch Pine	PIP	0,0700	0,343	30,6
20	Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,527	40	Framiré/Idigbo	FRA	0,0714	0,350	29,4
21	American Mahogany	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,590	5	Redwood	RKW	0,0738	0,362	27,5
22	Niangon	<i>Tarrietia utilis</i>	0,672	30	Andiroba	ADI	0,0755	0,370	26,3
23	Khaya-Mahogany	<i>Khaya ivorensis</i>	0,694	23	Khaya-Mahogany	MAA	0,0768	0,376	25,4
24	Danta (Ghana), heart	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	0,748	9	Afromosia	FR	0,0824	0,404	22,1
25	Danta (Ghana), sap	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	0,630	20	Cedro	CED	0,0841	0,412	21,2
26	Danta (Ivory Coast)	<i>Nesogordonia papaverifera</i>	0,836	38	Azobé/Bongossi	AZO	0,0845	0,414	21,0
27	Meranti, heavy	<i>Shorea spp.</i>	0,657	19	Danta (Ivory Coast)	KOB	0,0850	0,421	20,3
28	Meranti, light	<i>Shorea spp.</i>	0,596	35	Greenheart	GRE	0,0851	0,417	20,7
29	American Mahogany	<i>Swietenia macrophylla</i>	0,698	3	Larch	LA	0,0908	0,445	18,2
30	Andiroba	<i>Carapa guianensis</i>	0,650	4	Niangon	NIA	0,0920	0,451	17,7
31	Pitch Pine	<i>Pinus spp.</i>	0,550	26	Danta (Ivory Coast)	KOB	0,0946	0,463	17,8
32	Balau/Bangkirai	<i>Shorea spp.</i>	0,947	11	Oak	EI	0,0970	0,475	15,9
33	Cedro	<i>Cedrela spp.</i>	0,533	10	Pine, heartwood	KI	0,0974	0,477	15,8
34	Teak	<i>Tectona grandis</i>	0,749	39	Angélique/Basralocus	AGQ	0,1078	0,528	12,9
35	Greenheart	<i>Ocotea roiaei</i>	0,819	25	Danta (Ghana), sap	KOB	0,1116	0,547	12,0
36	Afzelia	<i>Afzelia spp.</i>	0,896	14	Iroko/Kambala	IRO	0,1124	0,551	11,9
37	Angélique/Basralocus	<i>Dicorynia guianensis</i>	0,987	24	Danta (Ghana), heart	KOB	0,1168	0,572	11,0
38	Azobé/Bongossi	<i>Lophira alata</i>	0,119	15	Spruce	FI	0,1526	0,748	6,4
39	Angélique/Basralocus	<i>Dicorynia guianensis</i>	0,680	16	Douglas/Oregon Pine	DGA	0,1960	0,960	3,9
40	Framiré/Idigbo	<i>Terminalia ivorensis</i>	0,513	10a	Pine, sapwood	KI	0,2224	1,090	3,0
				18	Beech	BU	0,2704	1,325	2,1

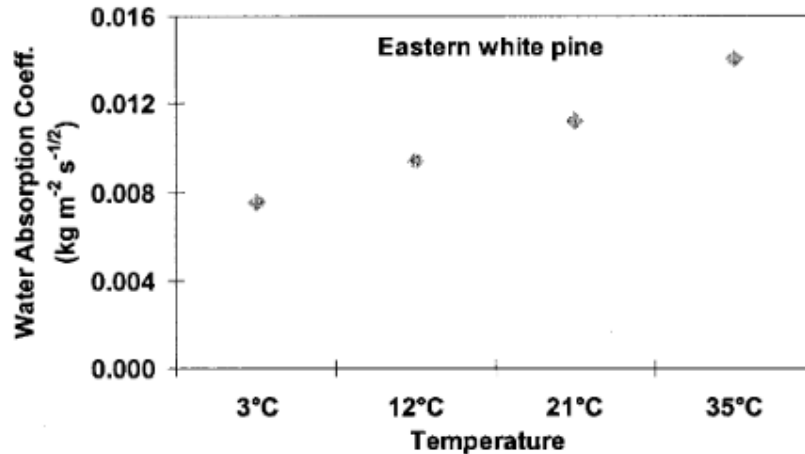
w<sub>i</sub> = Water absorption coefficient in kg/(m<sup>2</sup>\*h<sup>0,5</sup>); W<sub>24</sub> = Water absorption after 24 hours (gained by regression analysis); t<sub>50</sub> = Time needed to absorb 50g/m<sup>2</sup> of water in minutes (calculated)

**Figur 13: Vannabsorpsjonskoeffisienter hentet fra "Water Absorption and Contact Angle Measurement of Native European, North American and Tropical Wood Species to Predict Gluing Properties" (Bohme & Hora, 2009).**

### 5.1.2 Effekt av temperatur

Ifølge Geving og Thue (2002) har målte og beregnede fuktfordelinger ved fri vannoppsuging i forskjellige materialer vist at væskestrømmen er avhengig av kapillærtranssportkoeffisienten, *fuktdiffusivitet*. Da overflatespenningen,  $\sigma$  (N/m), og dynamisk viskositet,  $\eta$  (Ns/m<sup>2</sup>), for vann er temperaturavhengige størrelser vet vi at temperatur har en innvirkning på fukttransporten i porøse materialer generelt (Geving & Thue, 2002).

Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin og Goudreau (2002) konkluderte etter forsøk på furu at overflatetemperatur hadde signifikant innvirkning på longitudinal vannabsorpsjon. Oversikt over gjennomsnittlig vannabsorpsjonskoeffisient for de fire ulike temperaturnivåene kan ses i Figur 14 (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002).



**Figur 14: Vannabsorpsjonskoeffisient ved fire ulike temperaturer i weymouthfuru (Mukhopadhyaya, Kumaran, Normandin, & Goudreau, 2002).**

Virta, Koponen og Absetz (2006) konkluderte med at temperaturvariasjon hadde liten innvirkning på fuktprofilen under fibermetningspunktet. I forsøket undersøkte de vannabsorpsjon ved kortvarig delvis nedsenking for ulike tresorter, inkludert norsk gran. Hensikten var å simulere slagregn. Prøvestykkene var trebord beregnet på utvendig fasade. Undersøkelsen av vannabsorpsjonen ble gjort ved CT-skanning, for å bestemme vanninnhold i forhold til avstand fra vannspeilet. Det ble også gjort målinger av vanninnhold generelt i prøvestykkene (Virta, Koponen, & Absetz, 2006).

### 5.1.3 Effekt av lim på oppfukning og uttørking

Van den Bulcke, Van Acker og De Smet (2009) utførte forsøk på kryssfinér av ulike typer trevirke og ulike produksjonsmetoder og lim. Forsøket gikk ut på å utsette kryssfinér for utendørs klima over lang tid og se på vannopptaket. Selv om det ikke var fokus på det i forsøket ble det konkludert med at limtype var avgjørende for vannopptaket. Kryssfinér der fenolformaldehyd var brukt hadde høyere vannopptak enn andre typer. Dette resulterte også i at tørketiden var lenger. Antakelsen var at selv om fenolformaldehyd fungerer som en fuktsperre ved lavere fuktinnhold skjedde det fukttransport i perioder med mye regn. Dette resulterte også i saktere tørketid for kryssfinérplater med fenolformaldehyd, da mer fukt var tatt opp gjennom limsjiktene (Bulcke, Acker, & Smet, 2009).

Kielmann og Mai (2016) utførte et omfattende forsøk av forbehandlinger og belegg til bruk på trevirke for å beskytte mot værpåvirkning. Før simulering av værpåvirkning ble prøvene testet for vannopptak etter standarden DIN 52617, som senere har blitt erstattet av NS-EN ISO 15148. Vannabsorpsjonen ble målt på prøver av bøk med forskjellige forbehandlinger og belegg, inkludert prøver kun behandlet med fenolformaldehyd. De kom frem til at vannopptaket til prøvene behandlet med fenolformaldehyd var 88% lavere enn kontrollprøvene, som var ubehandlet (Kielmann & Mai, 2016).

## 5.2 Forsøksresultater

### 5.2.1 Vannabsorpsjon ved delvis nedsenking etter NS-EN ISO 15148

Vekten av prøvene ble registrert ved 9 målinger over 48 timer, som kan ses i Tabell 6.

**Tabell 6: Veiinger under oppfukning ved delvis nedsenking i henhold til NS-EN ISO 15148 (g)**

	Initialvekt	5 min	20 min	1 t	2 t	4 t	6 t	12 t	24 t	48 t
<b>G1</b>	137.872	138.453	138.784	139.168	139.593	140.182	140.755	142.179	144.578	149.117
<b>G2</b>	132.282	133.069	133.463	133.94	134.579	135.386	136.046	137.712	140.323	145.435
<b>G3</b>	132.122	132.923	133.389	134.02	134.55	135.631	136.528	139.001	143.519	150.923
<b>G4</b>	121.549	123.37	124.887	127.177	129.141	131.756	134.17	139.228	145.773	152.566
<b>G5</b>	122.312	123.084	123.853	125.279	126.753	128.778	130.485	134.745	141.428	150.316
<b>G6</b>	121.078	121.872	122.735	123.99	125.268	127.09	128.782	132.824	139.217	148.419
<b>LVL1</b>	134.452	137.817	138.883	140.995	143.064	145.691	148.231	155.093	167.689	182.098
<b>LVL2</b>	143.345	145.645	147.186	148.882	149.914	151.421	152.866	157.167	167.226	183.165
<b>LVL3</b>	135.614	137.272	141.426	147.77	153.898	160.833	166.195	174.948	182.384	189.537
<b>LVL4</b>	210.656	212.843	214.496	217.603	220.88	225.767	228.602	236.626	246.509	260.777
<b>LVL5</b>	204.097	205.812	206.378	207.363	208.375	209.916	210.849	213.279	216.73	222.791
<b>LVL6</b>	203.901	206.009	207.025	208.726	210.505	213.322	215.127	220.159	228.695	246.579

Disse resultatene ble behandlet i excel for å danne grunnlaget for beregninger av vannabsorpsjonskoeffisienter i henhold til NS-EN ISO 15148 seksjon 8.

Først ble resultatene fra veiingen brukt til å beregne endringen i vekt per kontaktflateareal, ved å bruke formelen for  $\Delta m_t$  fra metodekapittelet:

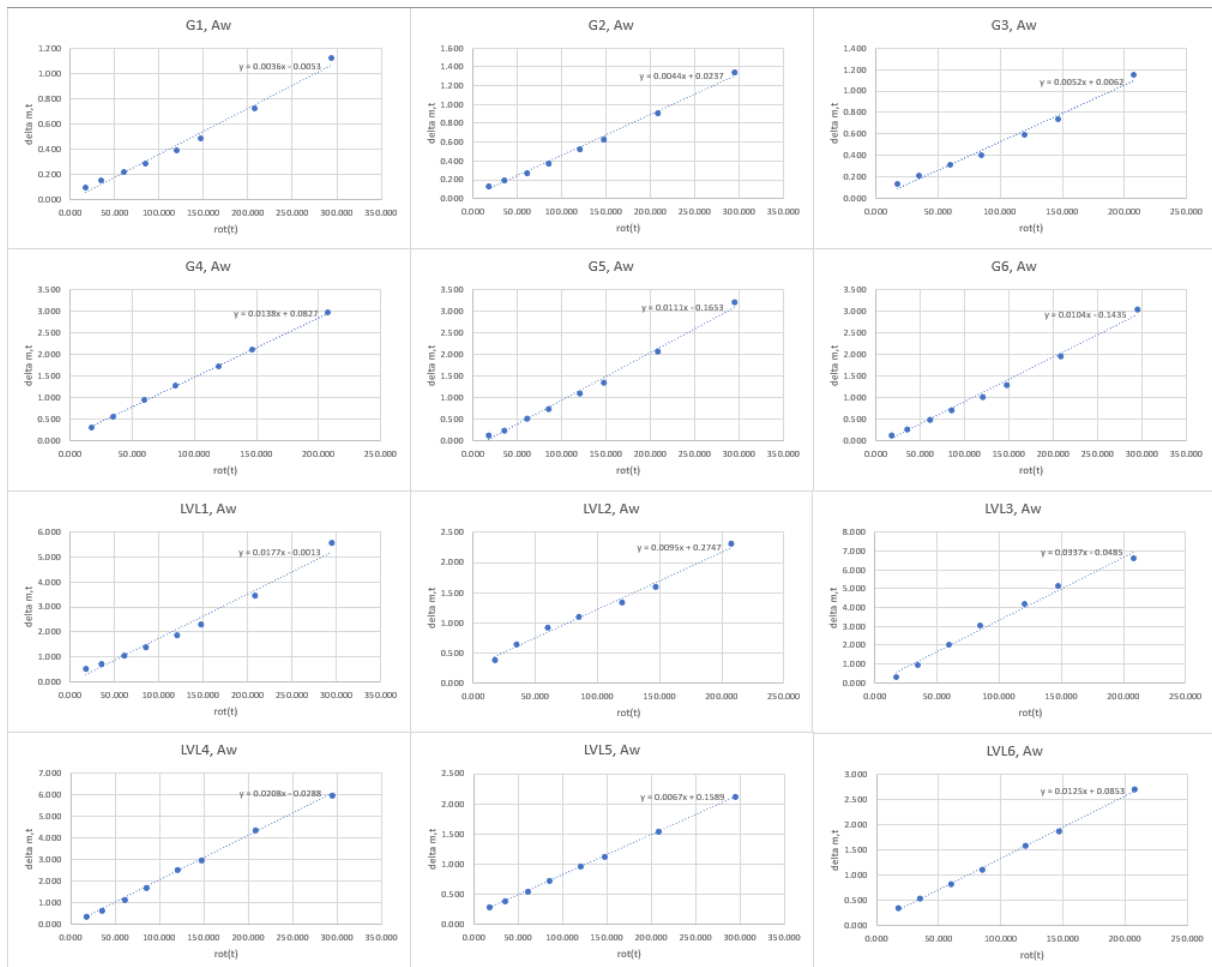
$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad 1$$

**Tabell 7: Endring i vekt delt på kontaktareal ved oppfukning (kg/m<sup>2</sup>).**

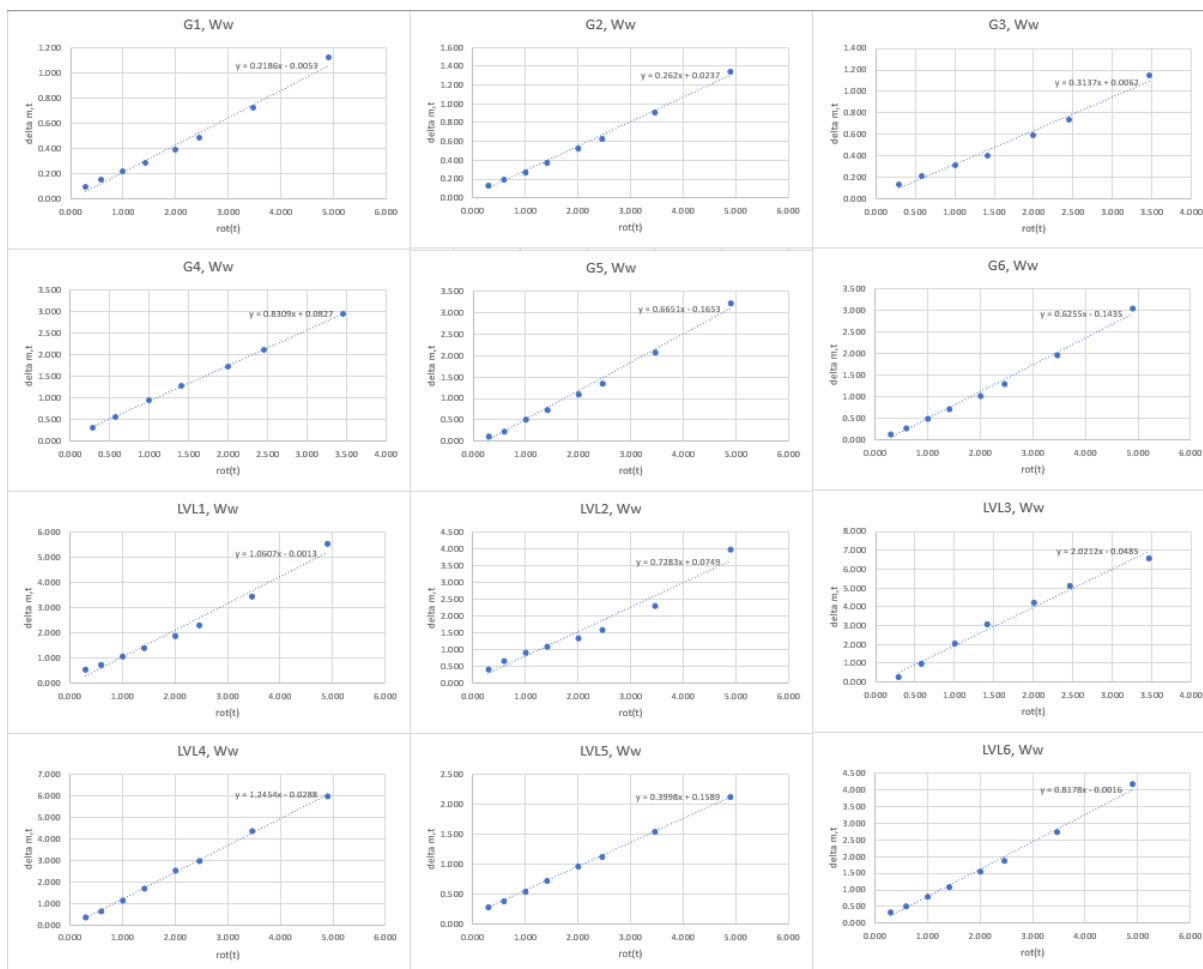
	$\Delta m_5$	$\Delta m_{20}$	$\Delta m_{60}$	$\Delta m_{120}$	$\Delta m_{240}$	$\Delta m_{360}$	$\Delta m_{720}$	$\Delta m_{1440}$	$\Delta m_{2880}$
<b>G1</b>	0.097	0.153	0.217	0.289	0.388	0.484	0.723	1.125	1.887
<b>G2</b>	0.132	0.198	0.278	0.385	0.521	0.632	0.911	1.349	2.207
<b>G3</b>	0.134	0.213	0.318	0.407	0.589	0.739	1.154	1.912	3.155
<b>G4</b>	0.306	0.560	0.944	1.274	1.713	2.118	2.966	4.064	5.204
<b>G5</b>	0.130	0.259	0.498	0.745	1.085	1.371	2.086	3.207	4.699
<b>G6</b>	0.133	0.278	0.489	0.703	1.009	1.293	1.971	3.043	4.587
<b>LVL1</b>	0.564	0.742	1.096	1.443	1.883	2.308	3.457	5.567	7.981
<b>LVL2</b>	0.385	0.643	0.927	1.100	1.353	1.595	2.315	4.000	6.670
<b>LVL3</b>	0.278	0.974	2.036	3.063	4.224	5.122	6.589	7.834	9.032
<b>LVL4</b>	0.367	0.644	1.166	1.715	2.535	3.011	4.357	6.016	8.410
<b>LVL5</b>	0.288	0.383	0.548	0.718	0.976	1.133	1.541	2.120	3.137
<b>LVL6</b>	0.354	0.524	0.810	1.108	1.581	1.884	2.728	4.160	7.161



I henhold til NS-EN ISO 15148 ble vektendringen plottet mot roten av tiden for å finne en trendlinje av type A eller B. Da funnene i litteraturstudiet hadde vannabsorpsjonskoeffisienter av både  $A_w$  og  $W_w$ , altså per  $\sqrt{\text{sek}}$  og per  $\sqrt{h}$ , måtte begge modelleres og beregnes. Avhengig av kurveform og observasjoner underveis i forsøket vil man måtte justere  $t_f$  i henhold til NS-EN ISO 15148. Hvis fritt vann forekommer på toppen av prøvestykket skal  $t_f$  justeres til da dette oppstod. Hvis ikke skal  $t_f$  settes lik 24 timer (eller 86400 sekunder). Da det ble observert fukt på oversiden av G3, G4 og LVL3 under veiing ved 12 timer vil disse bli modellert med  $t_f = 12$ , mens resten av prøvene modelleres med  $t_f = 24$ . Forsøket pågikk i 48 timer, men i henhold til standarden skal man forholde seg til 24 timer.



Figur 15: Plot av  $\Delta m,t$  mot kvadratroten av tid (i sekunder).



**Figur 16: Plot av  $\Delta m,t$  mot kvadratrotten av tid (i timer).**

Formlene fra trendlinjene gir for  $t = t_f$ :

$$\Delta m'(t_f) = \Delta m'_{t_f} + \Delta m'_0$$

Og som kjent fra metodekapittelet:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}, \text{ med } t \text{ i sekunder}$$

$$W_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}}, \text{ med } t \text{ i timer}$$

Utregningene er gjort i Excel og presenteres i tabeller under.

**Tabell 8: Utregning av A,w fra trendlinjene**

	$t_{f,sek}$	Trendlinje, sek	$\Delta m'_{0,sek}$	$\Delta m'_{tf,sek}$	$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{s}$ )
<b>G1</b>	86400	0,0036t - 0,0053	-0,0053	311,035	1.05818059
<b>G2</b>	86400	0,0044t + 0,0237	0,0237	280,184	0.953124696
<b>G3</b>	43200	0,0052t + 0,0062	0,0062	224,646	1.080798742
<b>G4</b>	43200	0,0138t + 0,0827	0,0827	596,243	2.868277581
<b>G5</b>	86400	0,0111t - 0,1653	-0,1653	958,875	3.262721358
<b>G6</b>	86400	0,0104t - 0,1435	-0,1435	898,417	3.0569649
<b>LVL1</b>	86400	0,0177t - 0,0013	-0,0013	1529,279	5.202717234
<b>LVL2</b>	86400	0,0095t + 0,2747	0,2747	821,075	2.792419327
<b>LVL3</b>	43200	0,0337t - 0,0485	-0,0485	1455,792	7.004415871
<b>LVL4</b>	86400	0,0208t - 0,0288	-0,0288	1797,091	6.113925718
<b>LVL5</b>	86400	0,0067t + 0,1589	0,1589	579,039	1.969390093
<b>LVL6</b>	86400	0,0125t + 0,0853	0,0853	1080,085	3.674233594

**Tabell 9: Utregning av W,w fra trendlinjene**

	$t_{f,sek}$	Trendlinje, sek	$\Delta m'_{0,sek}$	$\Delta m'_{tf,sek}$	$W_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{h}$ )
<b>G1</b>	24	0,2186t - 0,0053	-0.0053	311.035	1.05818059
<b>G2</b>	24	0,262t + 0,0237	0.0237	280.184	0.953124696
<b>G3</b>	12	0,3137t + 0,0062	0.0062	224.646	1.080798742
<b>G4</b>	12	0,8309t + 0,0827	0.0827	596.243	2.868277581
<b>G5</b>	24	0,6651t - 0,1653	-0.1653	958.875	3.262721358
<b>G6</b>	24	0,6255t - 0,1435	-0.1435	898.417	3.0569649
<b>LVL1</b>	24	1,0607t - 0,0013	-0.0013	1529.279	5.202717234
<b>LVL2</b>	24	0,7283t + 0,0749	0.2747	821.075	2.792419327
<b>LVL3</b>	12	2,0212t - 0,0485	-0.0485	1455.792	7.004415871
<b>LVL4</b>	24	1,2454t - 0,0288	-0.0288	1797.091	6.113925718
<b>LVL5</b>	24	0,3998t + 0,1589	0.1589	579.039	1.969390093
<b>LVL6</b>	24	0,8178t - 0,0016	0.0853	1080.085	3.674233594

I henhold til NS-EN ISO 15148 vil gjennomsnittsverdier bli presentert for hver prøvetype. På grunn av en observasjon gjort ved 2-timersveilingen er prøvestykket LVL3 utelatt fra dette. Det ble nemlig observert en stor sprekk på undersiden av prøven som kunne føre til mye fritt vann. Dette ble klemt ut så godt som mulig underveis, men resultatene blir likevel utelatt i gjennomsnittsberegningene. Det ble også observert at teipen på LVL3 hadde løsnet ved 6-timersmålingen. Dette skjedde også med G1, G2, G3 ved 24-timersmålingen, men dette blir ikke vurdert som et problem, da forsøket i teorien var over.

**Tabell 10: Gjennomsnittlige resultater for  $A_w$  og  $W_w$  sortert etter scenario**

	<b>Kapillærsuging i forhold til limsjikt</b>	$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{s}$ )	$W_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{h}$ )
<b>G1-3</b>	På tvers	1.03070134	1.14704607
<b>G4-6</b>	Parallelt	3.06265461	3.06698165
<b>LVL1-2</b>	På tvers	3.99756828	4.38213715
<b>LVL4-6</b>	Parallelt	3.91918313	4.02108236

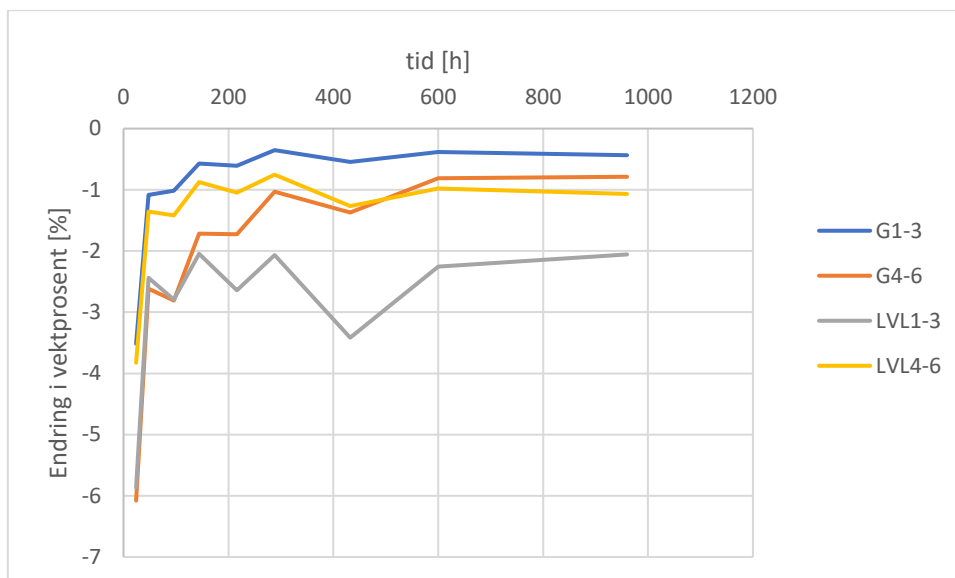
### 5.2.2 Stabilisering av fuktinnhold ved kondisjoneringsklima

Etter endt forsøk ble prøvene satt tilbake i klimarommet med samme konfigurasjon til de var vektstabile. Under kan man se en oversikt over vekten av prøvene ved starten av forsøket, ved endt forsøk etter 48 timer og etter 2 uker stabilisering i 23°C og 50% RF.

**Tabell 11: Uttørking etter endt forsøk til vektstabil i 23°C og 50% RF.**

	<b>Før start (<math>m_i</math>)</b>	<b>Etter endt forsøk (<math>m_{48}</math>)</b>	<b>Etter to uker tørke (<math>m_{\infty}</math>)</b>	<b>Vektendring (<math>\Delta m_h</math>)</b>	<b>Endring vektprosent</b>
<b>G1</b>	137.872	149.117	139.841	1.969	1.42813624
<b>G2</b>	132.282	145.435	134.419	2.137	1.61548812
<b>G3</b>	132.122	150.923	134.331	2.209	1.67193957
<b>G4</b>	121.549	152.566	123.856	2.307	1.89799998
<b>G5</b>	122.312	150.316	124.864	2.552	2.08646739
<b>G6</b>	121.078	148.419	123.443	2.365	1.95328631
<b>LVL1</b>	134.452	182.098	140.035	5.583	4.15241127
<b>LVL2</b>	143.345	183.165	148.358	5.013	3.49715721
<b>LVL3</b>	135.614	189.537	139.399	3.785	2.79100978
<b>LVL4</b>	210.656	260.777	220.918	10.262	4.87144919
<b>LVL5</b>	204.097	222.791	207.568	3.471	1.70066194
<b>LVL6</b>	203.901	246.579	213.331	9.430	4.6247934

I Figur 17 kan man se endringen i vektprosent i perioden prøvene ble stabilisert i kondisjoneringsklimaet, og i Tabell 12 utviklingen i fuktinnhold i samme periode.



**Figur 17: Uttøring/stabilisering i kondisjoneringsklimaet etter endt forsøk illustrert ved endring i vektprosent.**

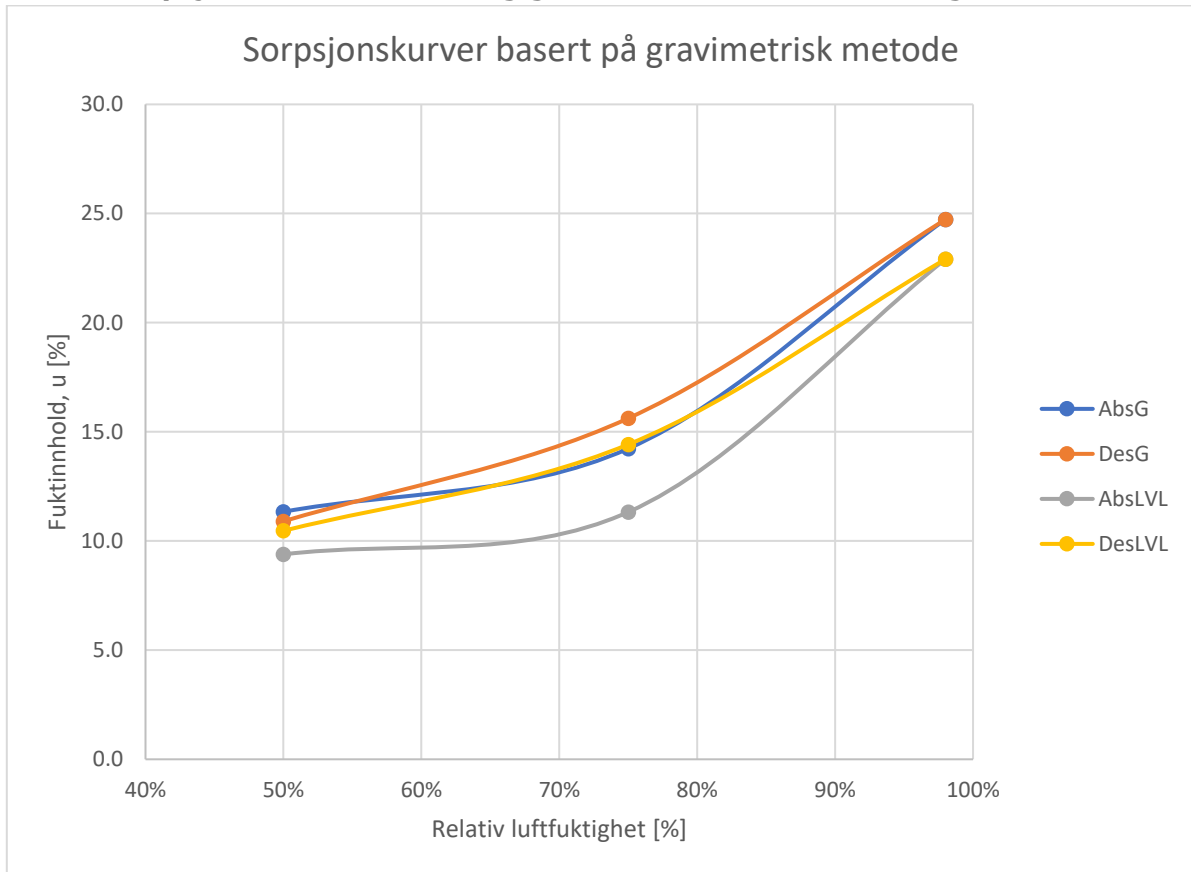
**Tabell 12: Utvikling av fukttinnhold, MC [%] under uttøringen**

	0	24	48	96	144	216	288	432	600	960
<b>G1</b>	17.9	14.6	13.6	12.8	12.4	11.8	11.6	11.1	10.8	10.4
<b>G2</b>	20.7	16.7	15.6	14.6	14.0	13.4	12.9	12.3	11.8	11.3
<b>G3</b>	25.4	19.5	17.6	15.8	14.8	13.8	13.2	12.3	11.8	11.2
<b>G4</b>	38.9	29.1	25.2	21.3	19.0	16.7	15.4	13.7	12.8	12.0
<b>G5</b>	35.6	27.8	24.4	20.9	18.8	16.7	15.6	13.9	12.9	12.0
<b>G6</b>	35.3	27.3	24.1	20.7	18.7	16.6	15.4	13.8	12.8	11.9
<b>LVL1</b>	46.9	38.3	34.8	30.7	27.7	24.0	21.2	17.0	14.5	12.4
<b>LVL2</b>	39.1	31.9	29.3	26.6	24.6	22.0	20.0	16.7	14.5	12.2
<b>LVL3</b>	54.1	43.5	39.3	34.6	31.4	27.3	24.2	19.0	15.6	12.7
<b>LVL4</b>	34.2	28.4	26.2	23.9	22.5	20.8	19.5	17.3	15.5	13.3
<b>LVL5</b>	17.5	14.0	12.8	11.8	11.3	10.8	10.5	10.0	9.7	9.4
<b>LVL6</b>	31.3	25.6	23.8	21.8	20.5	18.9	17.8	15.8	14.4	13.3

### 5.2.3 Prosjektoppgave

Her vil de viktigste resultatene fra prosjektoppgaven presenteres. Fullstendig presentasjon av resultatene kan finnes i prosjektoppgaven (Østrøm, 2019).

### 5.2.3.1 Sorpsjonskurver for LVL og gran utsatt for 50%, 75% og 98% RF



**Figur 18: Sorpsjonskurver for LVL og gran fra prosjektoppgaven**

### 5.2.3.2 Korreksjonskurver for fuktmåling ved bruk av Hygrotrack S-160-0

Målingene fra sensorene viker fra resultatene fra tørke-/veiemetoden. Derfor presenteres det her korreksjonstabeller for både furu og gran, basert på resultatene i dette prosjektet. Disse er laget med bakgrunn i gjennomsnittsverdiene som er målt ved likevekt i en temperatur på 23°C og henholdsvis 50%, 75% og 98% relativ luftfuktighet. Verdier utover disse er lineærinterpolert mellom de respektive målte verdier.

Da fukthistorikken til treverk der dette skal brukes er ukjent blir det her brukt gjennomsnittsverdier fra absorpsjon og desorpsjonsmålingene for å lage korreksjonskurve.

**Tabell 13: Korreksjonstabell for fuktmåling i gran ved bruk av Hygrotrack S-160-0.**

<b>RF</b>	<b>Elektrisk motstandsmetode (%)</b>	<b>Tørke-/veiemetode (%)</b>
<b>50%</b>	8,24	11,1
<b>55%</b>	9,09	11,9
<b>60%</b>	9,94	12,6
<b>65%</b>	10,80	13,4
<b>70%</b>	11,65	14,1
<b>75%</b>	12,50	14,9
<b>80%</b>	14,21	17,0
<b>85%</b>	15,91	19,2
<b>90%</b>	17,62	21,3
<b>95%</b>	19,33	23,4
<b>98%</b>	20,35	24,7

**Tabell 14: Korreksjonstabell for fuktmåling i Hunton I-bjelke LVL-flenser ved bruk av Hygrotrack S-160-0.**

<b>RF</b>	<b>Elektrisk motstandsmetode (%)</b>	<b>Tørke-/veiemetode (%)</b>
<b>50%</b>	11,14	10,0
<b>55%</b>	12,46	10,6
<b>60%</b>	13,78	11,2
<b>65%</b>	15,10	11,8
<b>70%</b>	16,41	12,3
<b>75%</b>	17,73	12,9
<b>80%</b>	19,90	15,1
<b>85%</b>	22,06	17,2
<b>90%</b>	24,23	19,4
<b>95%</b>	26,40	21,6
<b>98%</b>	27,7	22,9

## 6 Diskusjon

### 6.1 Vannabsorpsjon: sammenligning av LVL og gran

Vannabsorpsjonskoeffisientene til prøvene var svært varierte, som kan sees i tabell 8 og 9. Resultatene fra LVL3 ikke tas med, da en sprekk samlet fritt vann i underkant av prøven.

De resterende prøvenes gjennomsnittlige vannabsorpsjon er presentert i tabell under.

**Tabell 15: Oversikt over vannabsorpsjon for LVL og gran.**

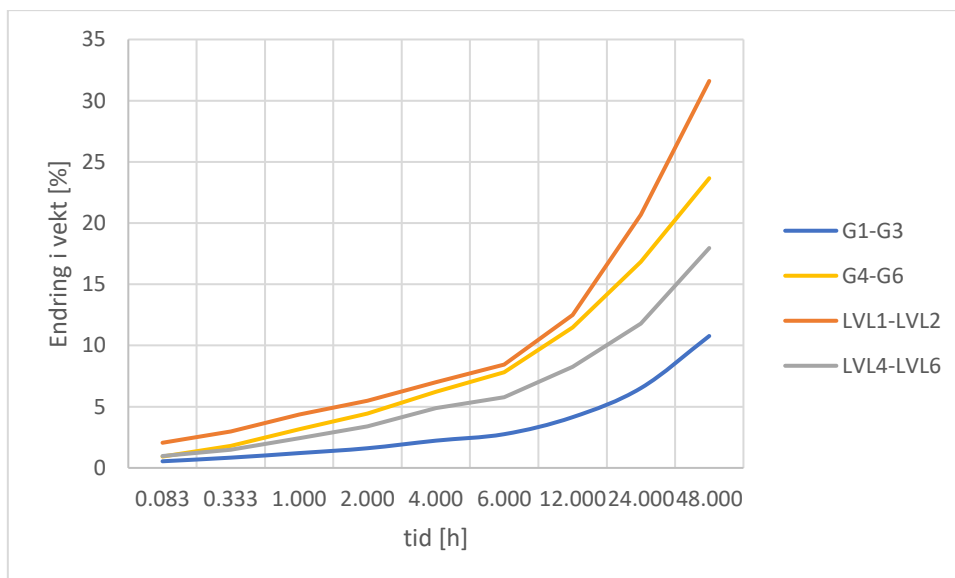
	<b>Kapillærsuging i forhold til limsjikt</b>	$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{s}$ )	$W_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{h}$ )	<b>Vektendring etter 48t (%)</b>
<b>G1-3</b>	På tvers	1.03070134	1.14704607	10.7764325
<b>G4-6</b>	Parallelt	3.06265461	3.06698165	23.6649869
<b>LVL1-2</b>	På tvers	3.99756828	4.38213715	31.6081581
<b>LVL4-6</b>	Parallelt	3.91918313	4.02108236	17.9609782

Det er tydelig at vannabsorpsjonen i LVL-prøvene med fukttranssport på tvers av limsjiktene er mye høyere enn i granprøvene. Dette motstrider funn i litteratursøket, der det ble funnet forsøk som hadde indikert saktere oppfukning av kryssfinérplater med limsjikt av fenolformaldehyd, som er det som finnes i LVL-prøvene (Bulcke, Acker, & Smet, 2009).

En forklaring på dette kan være den grove trestrukturen i finérlagene i LVL-flensene til Hunttons I-bjelker. Grov trestruktur kan forbindes med større porer i poresystemet. Finere porer har større sugkraft, men mindre transportkapasitet. Større porer har mindre sugkraft, men større transportkapasitet. Da prøvene ble utsatt for et konstant vannspeil over 48 timer, og prøvenes overside ved endt forsøk viste synlig fritt vann i overkant av prøvene, er det ingen overraskelse at LVL-prøvene hadde større opptak av fukt totalt. Dette gir da også utslag i  $A_w$  og  $W_w$ , selv ved 24 og 12 timer.

Granprøvene som hadde opptak parallelt med limsjikt har et mye høyere fuktopptak enn prøvene med fuktopptak på tvers av limsjiktene. Dette stemmer godt overens med antakelser isolert sett, men de har likevel lavere vannabsorpsjonskoeffisienter enn LVL-prøvene.





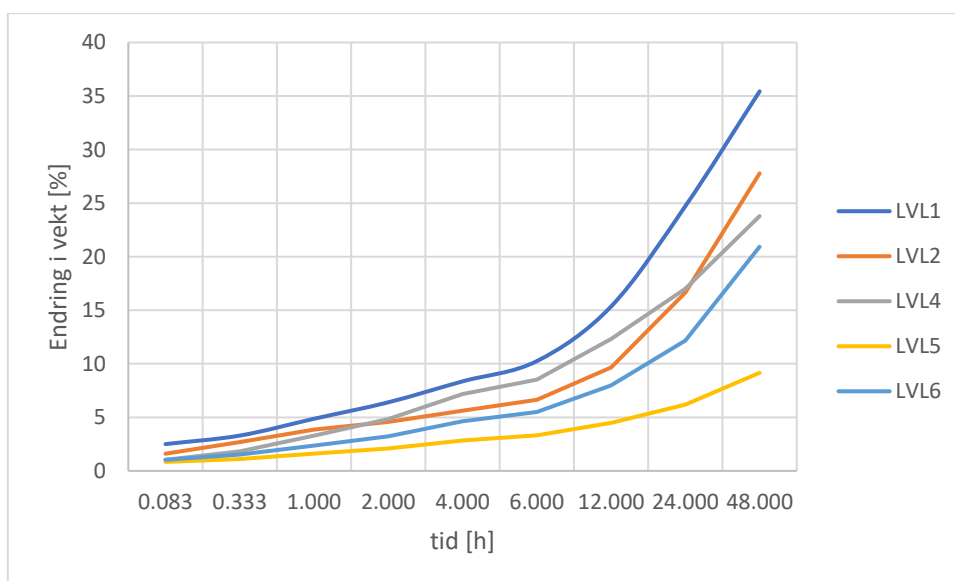
**Figur 19: Plottet gjennomsnittlig endring i vektprosent mot tid.**

I Figur 18 kan man se at fuktopptaket var relativt jevnt de første 6 timene. Jo lenger prøvene ble utsatt for fritt vann, jo større ble forskjellene i vektendringen.

## 6.2 Effekt av limsjikt på oppfukting

Hypotesen før forsøkets gjennomførelse var at prøvene med opptak på tvers av limsjiktene ville ha tregere fuktopptak. Denne hypotesen ble styrket av litteratursøket, spesielt av konklusjonen i forsøket på kryssfinérplater av Bulcke, Acker og Smet (2009) (Bulcke, Acker, & Smet, 2009).

Resultatene som er illustrert i Figur 19 og Tabell 14 viser at fuktopptaket i LVL-prøvene med vannopptak på tvers av limsjiktene har høyere gjennomsnittlig vannabsorpsjonskoeffisient og endring i vektprosent. I figur 20 kan man se de individuelle vektendringene for LVL-prøvene.



**Figur 20: Plottet endring i vektprosent mot tid for LVL-prøver**

**Tabell 16: Oversikt over vannabsorpsjon for LVL-prøvene.**

	Kapillærsuging i forhold til limsjikt	$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> *√s)	$W_w$ (kg/m <sup>2</sup> *√h)	Vektendring etter 1t (%)	Vektendring etter 12t (%)	Vektendring etter 24t (%)
<b>LVL1</b>	På tvers	5.202717234	5.19634754	10.248267	15.3519472	24.7203463
<b>LVL2</b>	På tvers	2.792419327	3.567926759	6.64201751	9.64247096	16.6598068
<b>LVL4</b>	Parallelt	6.113925718	6.101189051	22.5500317	12.3281559	17.0196909
<b>LVL5</b>	Parallelt	1.969390093	1.958611998	8.51910223	4.49884124	6.18970392
<b>LVL6</b>	Parallelt	3.674233594	4.003446036	3.30823089	7.97347732	12.1598227

I Tabell 15 og Figur 20 kan man se et tydelig avvik i LVL5, med mye lavere fuktopptak enn LVL4 og LVL6. Dette er det ikke funnet en god forklaring på. Dersom man ser bort fra dette avviket er trenden mindre tydelig. I Tabell 15 er vektendringene ved 1 time, 12 timer og 24 timer presentert.

Vannabsorpsjonskoeffisienten til LVL4 er høyest, etterfulgt av LVL1. Den laveste vannabsorpsjonskoeffisienten har LVL5. Etter en time har LVL4 størst endring i vekt, mens etter 12 og 24 timer har LVL1 størst endring i vekt. Hvorfor variasjonen mellom prøver av samme konfigurasjon er så stor har det ikke blitt funnet svar på. Her vil det være ønskelig med forskning på mye større utvalg av prøver.

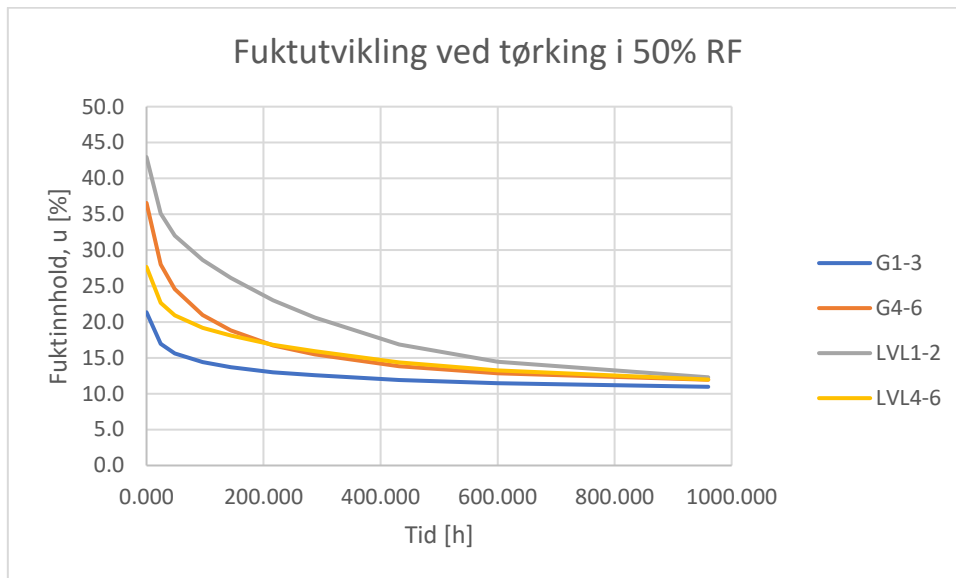
Et overraskende funn er at granprøvene med opptak på tvers av limsjiktene, som kun har ett limsjikt i overkant, har betydelig lavere fuktopptak enn granprøvene med fuktopptak parallelt med limsjiktene. Da dette ikke var tilfelle for LVL-prøvene var dette en veldig interessant observasjon. Dette var det som var hypotesen før forsøket startet, men antakelsen var at det ville gjelde i større grad for LVL-prøvene. Irregulariteten til limsjiktene til LVL-prøvene, og mulige sprekker som følge av dette, kan være med på å forklare forskjellen. Det tette limsjiktet i gran-prøvene kan være med på å skape et overtrykk i overkant på grunn av større motstand i limsjiktet, noe som bidrar til redusert kapillærsuging.



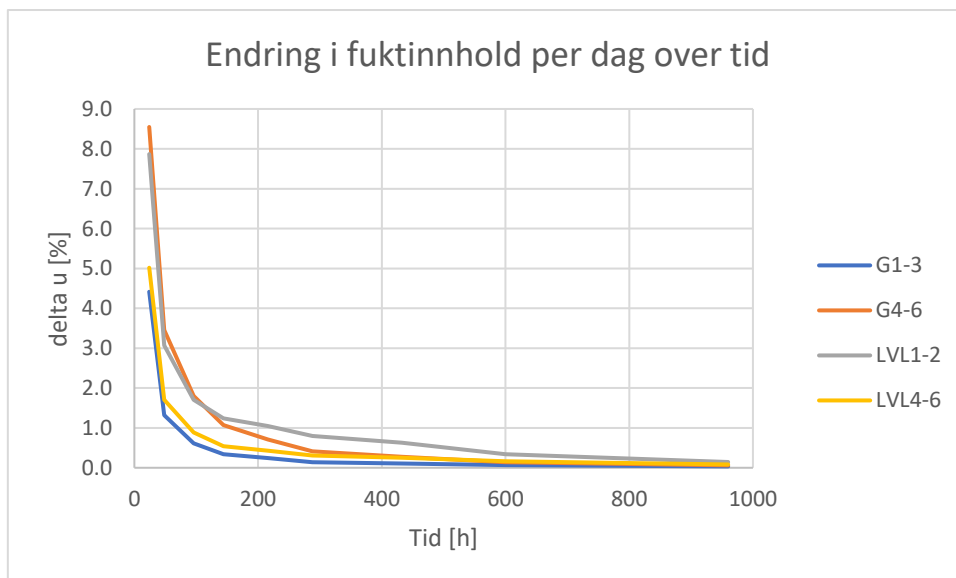
**Figur 21: Bilde av prøvestykkene/limsjiktene.**

### 6.3 Uttørking i klimarom

Etter endt forsøk ble prøvene oppbevart og veid over 40 dager i klimarommet der kondisjoneringen og selve forsøket fant sted med samme konfigurasjon med 50% RF og 23°C. Under stabiliseringen ble aluminiumsteipen beholdt på for å sikre uttørking i hovedsak skjedde kun i ønskelig retning. I Figur 17 kan man se endringen i vektprosent over tid. I Figur 22 er en annen visualisering av uttørkingen gjort, her ved utviklingen til fuktinnholdet i prøvene under tørkeperioden.



**Figur 22: Fuktutvikling ved uttørking i kondisjoneringsklimaet.**



**Figur 23: Endring i fuktinnhold per dag.**

Fra disse illustrasjonene kan man se at endringen over tid er størst for LVL1-2 og minst for G1-3. Selv om resultatene ikke er konsekvente for gran- og LVL-prøvene med tanke på fukttransport i forhold til limsjiktene, er det tydelig at LVL-prøvene med fukttransport på tvers av limsjiktene helt klart tørker saktest etter å ha blitt utsatt for fritt vann.

## 6.4 Hystereseeffekten

Prøvene ble vektstabile i 50% RF ved 23°C både før og etter forsøket.

**Tabell 17: En illustrasjon av hystereseeffekten etter endt forsøk.**

	<b>Fuktinnhold før forsøk, u [%]</b>	<b>Fuktinnhold etter forsøk og uttørring, u [%]</b>	<b>Hystereseeffekt uttrykt ved <math>\Delta u</math> [%]</b>	<b>Gjennomsnitt</b>	
<b>G1</b>	8.8	10.4	1.6	1,78	2,0
<b>G2</b>	9.4	11.3	1.8		
<b>G3</b>	9.4	11.2	1.9		
<b>G4</b>	9.8	12.0	2.2	2,27	
<b>G5</b>	9.6	12.0	2.4		
<b>G6</b>	9.7	11.9	2.2		
<b>LVL1</b>	7.8	12.4	4.6	3,87	4,0
<b>LVL2</b>	8.3	12.2	3.9		
<b>LVL3</b>	9.6	12.7	3.1		
<b>LVL4</b>	7.9	13.3	5.4	4,13	
<b>LVL5</b>	7.5	9.4	1.9		
<b>LVL6</b>	8.2	13.3	5.1		

Hystereseeffekten er veldig stor etter gjennomført vannabsorpsjonsforsøk ved delvis nedsenking. Hystereseeffekten i LVL-prøvene er signifikant større enn for gran-prøvene. Forskjellene mellom prøvene med vanntransport på tvers av limsjiktene i forhold til vanntransport parallelt er liten. Denne forskjellen kan sannsynligvis forklares av at fuktinnholdet i disse prøvene var høyere underveis i forsøket.

Dersom man ser bort ifra LVL5 er hystereseeffekten til LVL-prøvene med parallell vannabsorpsjon enda større (5,25 prosentpoeng).

Til sammenligning var hystereseeffekten etter forsøket i prosjektoppgaven, der prøvestykkene ble utsatt for 98% RF inntil likevekt var oppnådd som følger.

**Tabell 18: Illustrasjon av hystereseeffekten fra prosjektoppgaven.**

	<b>Fuktinnhold før forsøk, u [%]</b>	<b>Fuktinnhold etter forsøk, u [%]</b>	<b>Hystereseeffekt uttrykt ved <math>\Delta u</math> [%]</b>	<b>Gjennomsnitt</b>	
<b>G1</b>	11.2	10.9	-0.3	-0,6	3,0
<b>G2</b>	11.4	10.9	-0.5		
<b>G3</b>	11.5	11.0	-0.5		
<b>G4</b>	11.3	10.9	-0.5		
<b>LVL1</b>	9.3	10.5	1.2		
<b>LVL2</b>	9.5	10.6	1.1		
<b>LVL3</b>	9.4	10.4	1.1		
<b>LVL4</b>	9.4	10.4	1.0		

Hystereseeffekten er 2,6 prosentpoeng større for gran-prøvene og 1,0 prosentpoeng større for LVL-prøvene etter forsøk ved delvis nedsenking i vannspeil over 48 timer sammenlignet med prøver utsatt for 98% luftfuktighet til oppnådd likevekt.

## 6.5 Prosjektoppgave

Her vil diskusjon av funn i prosjektoppgaven presenteres. En fullstendig rapport er presentert i prosjektoppgaven med tilgjengelig rådata (Østrøm, 2019).

### 6.5.1 Fuktopptak

Granprøvene stabiliserte seg før LVL-prøvene gjennom alle faser av forsøket. LVL-lagene, som ligger med fiberretningen, har i dette forsøket vært eksponert i like stor grad i de avsagde endene. Dette gjelder også granprøvene, da disse er kuttet til i limsjiktene, i tillegg til i lengderetningen. Det er likevel interessant å merke seg at gran stabiliserer seg fortere.

Det ble observert soppvekst på LVL-prøvene ved første veiing etter at de ble satt i 98% RF.

### 6.5.2 Effekt av limlag på elektrisk motstandsmåling

Av litteraturstudiet kom det frem at limlaget vil ha en innvirkning på målingen. Flere kilder bekreftet at limlaget ville gi forhøyet måleresultat, og at avviket ville øke ved økende RF. Dette stemmer godt med observerte forskjeller. Avviket øker fra 1,14 prosentpoeng ved 10%WME og 50%RF til 4,86 prosentpoeng ved 17.2%WME og 85%RF. Avviket forholder seg jevnt på litt over 4,8 prosentpoeng fra 75% til 98% RF (12,9 til 22,9 %WME).

Der de elektriske motstandsmålingene gir høyere verdier for LVL er det motsatt for gran. Sensorene kommer med en innebygget korreksjonskurve som gir resultatene på Omnisense sine sider. Så ved bruk av korreksjonskurvene presentert i denne rapporten vil man korrigere en korrigert verdi.

### 6.5.3 Sorpsjonskurver og hystereseeffekt

Sorpsjonskurvene presentert i Figur 17 viser tydelig at fuktinnholdet er signifikant høyere ved uttørking og bekrefter at fukthistorikk spiller en stor rolle for fuktinnholdet. Dette gjør også at korreksjonskurvene som er presentert over kan være misvisende, da disse baserer seg på gjennomsnittet av kurvene for oppfukting og uttørking. Dette er en konservativ tilnærming, da verdiene som produseres av disse korreksjonskurvene vil gi høyere fuktnivå enn det er naturlig å anta at er tilfelle for treverk ved normal luftfuktighet og normal fukthistorikk.

Disse korreksjonskurvene kan dog reproduseres ved bruk av rådata i denne rapporten, og er kun presentert som forslag.

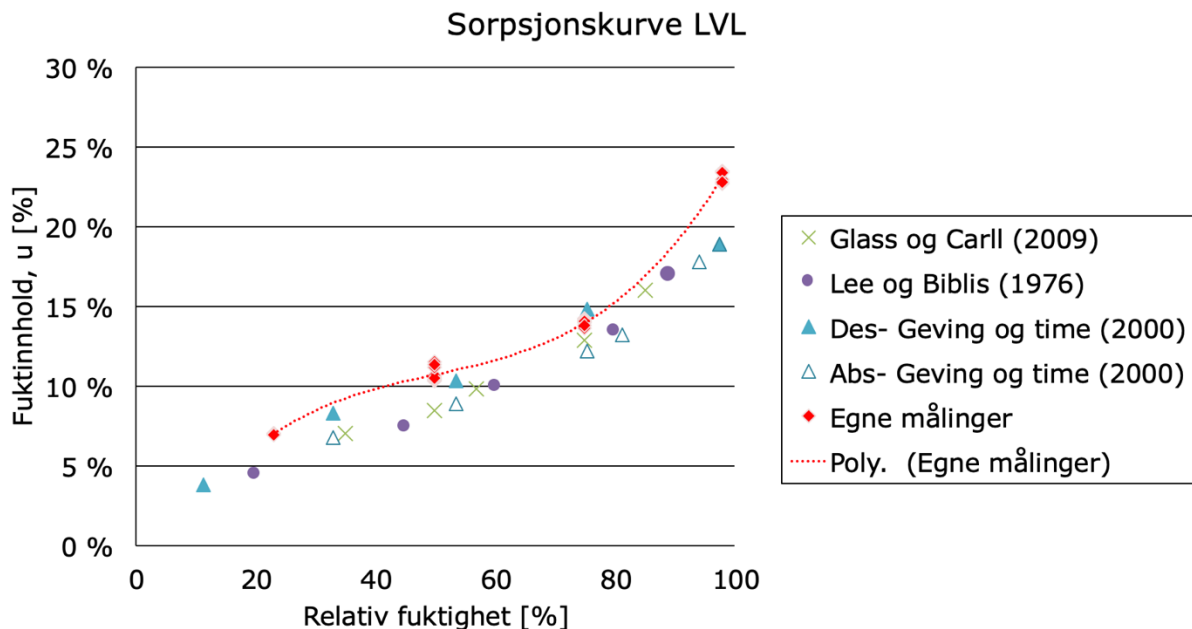
En interessant observasjon er at sorpsjonskurvene for gran gir lavere fuktinnhold ved 50% RF ved avsluttet forsøk. Dette er da motsatt av hystereseeffekten som observeres for LVL og for gran ved høyere RF.

Hystereseeffekten for LVL-prøvene er større enn for granprøvene. Ved 50% RF er forskjellen så stor som 3,1 prosentpoeng for LVL, mens den er 1,4 prosentpoeng for gran.

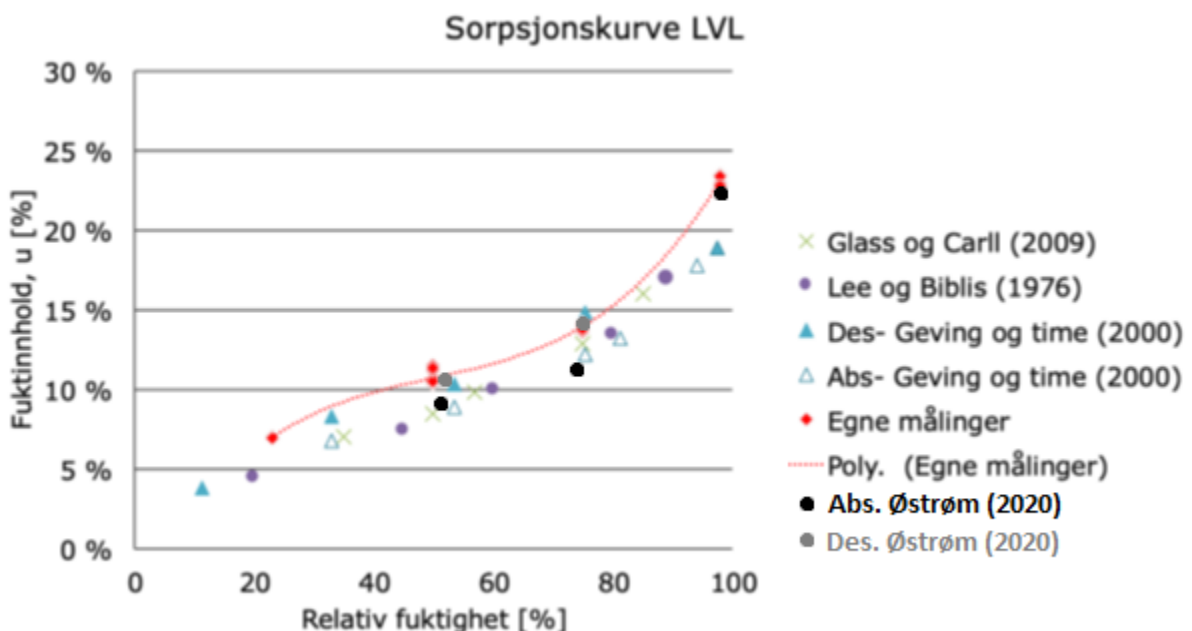
## 6.5.4 Sammenligning med tidligere forskning

### 6.5.4.1 Sorpsjonskurver

Et tilsvarende forsøk ble gjort på furu- og LVL-prøver i en masteroppgave fra 2019 (Birkeland, 2019). Her ble målingene plottet i en graf sammen med tidligere forskning på fuktopptak i LVL-prøver, som kan sees i Figur 24 under.



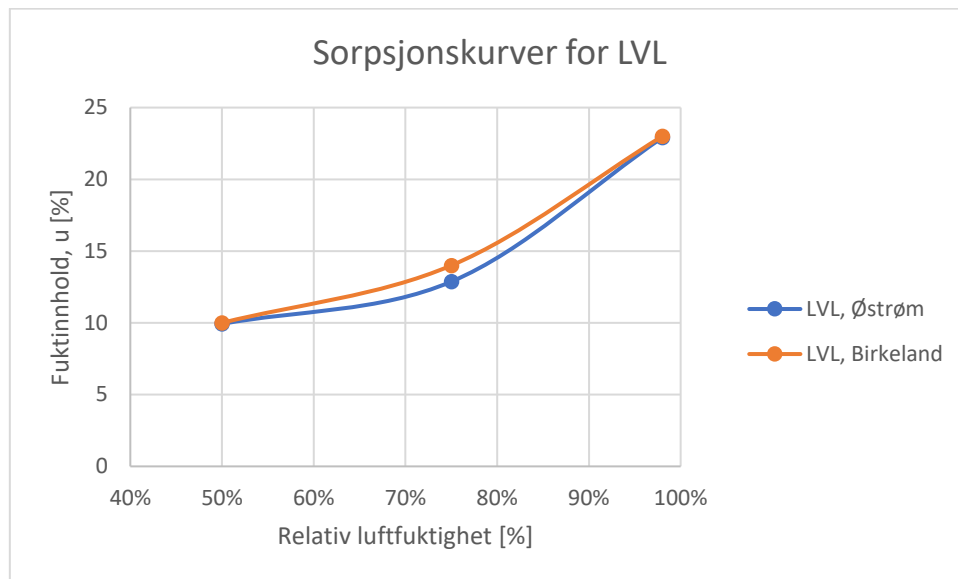
**Figur 24: Sorpsjonskurver av LVL fra tørkemetoden sammenlignet med tidligere forskning (Birkeland, 2019).**



**Figur 25: Sorpsjonskurver av LVL fra tørkemetoden sammenlignet med tidligere forskning, med egne resultater plottet.**

Da det ikke var mulig å finne rådata fra tidligere forskning, ble egne resultater grafisk fremstilt i Figur 25 som illustrasjon.

I Birkelands masteroppgave fra 2019 ble det presentert sorpsjonskurve for LVL basert på gjennomsnittet av absorpsjon og desorpsjon. I Figur 26 er denne sorpsjonskurven presentert sammen med sorpsjonskurven beregnet på samme måte fra prosjektoppgaven.



**Figur 26: Sorpsjonskurver fra prosjektoppgaven sammenlignet med Birkelands funn (2019).**

#### 6.5.4.2 Korreksjonstabeller

Et annet mål med prosjektoppgaven (Østrøm, 2019) og Birkelands masteroppgave (2019) var å utarbeide korreksjonstabeller for sensorene levert av OmniSense som brukes i ZEB-bygget på NTNU Gløshaugen, Hygrotrack S-160-0. Her vil resultatene bli presentert. De vil også sammenlignes med en korreksjonskurve som er presentert i en masteroppgave av Sletfjerding (2019) som ble oppgitt fra produsent for norsk gran, i form av følgende formel:

$$\%MC_{spruce} = -0,504256 + 1,1386808 * \%MC_{measured} + 0,0111586 * (\%MC_{measured} - 16,5)^2 - 0,0010783 * (\%MC_{measured} - 16,5)^3$$

**Tabell 19: Korreksjonstabell fra prosjektoppgave for gran (Østrøm, 2019)**

RF, GRAN	Elektrisk motstandsmetode (%)	Tørke-/veiemetode (%)
50%	8,24	11,1
55%	9,09	11,9
60%	9,94	12,6
65%	10,80	13,4
70%	11,65	14,1
75%	12,50	14,9
80%	14,21	17,0
85%	15,91	19,2
90%	17,62	21,3
95%	19,33	23,4
98%	20,35	24,7

**Tabell 20: Korreksjonstabell fra prosjektoppgave for LVL (Østrøm, 2019)**

RF, LVL	Elektrisk motstandsmetode (%)	Tørke-/veiemetode (%)
50%	11,14	10,0
55%	12,46	10,6
60%	13,78	11,2
65%	15,10	11,8
70%	16,41	12,3
75%	17,73	12,9
80%	19,90	15,1
85%	22,06	17,2
90%	24,23	19,4
95%	26,40	21,6
98%	27,7	22,9

Birkeland utarbeidet ikke korreksjonstabell for gran, men for furu og LVL. Korreksjonstabellen for LVL kan sees i Tabell 18.

**Tabell 21: Korreksjonstabell for LVL fra Birkeland (Birkeland, 2019).**

RF, LVL	Elektrisk motstandsmetode (%)	Tørke-/veiemetode (%)
23%	7,0	7,0
43%	9,0	10,0
50%	9,5	11,0
60%	11,5	11,0
65%	12,5	12,5
75%	15,5	14,0
79%	17,5	15,0
85%	20,0	17,0
90%	22,5	19,0
98%	27,0	23,0



I tabell 19 er formelen presentert av Sletfjerding (2019) presentert som tabell basert på de elektriske motstandsmålingene gjort i forbindelse med prosjektoppgaven.

**Tabell 22: Korreksjonstabell for gran beregnet med formel fra produsent presentert av Sletfjerding (Sletfjerding, 2019).**

<b>RF, GRAN</b>	<b>Elektrisk motstandsmetode (%)</b>	<b>Tørke-/veiemetode (%)</b>
<b>50%</b>	8,24	10,2
<b>55%</b>	9,09	10,9
<b>60%</b>	9,94	11,6
<b>65%</b>	10,80	12,4
<b>70%</b>	11,65	13,1
<b>75%</b>	12,50	14,0
<b>80%</b>	14,21	15,7
<b>85%</b>	15,91	17,6
<b>90%</b>	17,62	19,6
<b>95%</b>	19,33	21,6
<b>98%</b>	20,35	22,8

## 6.6 Avvik og refleksjoner

### 6.6.1.1 Skadet prøvestykke

Underveis i forsøket ble det avdekket at prøvestykket LVL3 tidlig var skadet. Det var en stor flis/sprekk på den ene siden som kunne føre til oppsamling av uønsket fritt vann. Dette gjorde at et allerede lite utvalg av prøver ble enda mindre.

### 6.6.1.2 Sviktende forsegling av sidene til prøvestykkene

Underveis i forsøket løsnet teipen på flere av prøvene. Etter 48 timer hadde teipen løsnet på alle prøvene. Teipen ble trykket på plass underveis, men dette er likevel en stor svakhet ved forsøket da forsegling av sidene for å hindre at fukt kan transporteres utenom limsjiktene er helt avgjørende i et slikt forsøk.

Det ble diskutert med veileder, Tore Kvande, og laboratorieansvarlig, Ole Aunrønning, hva slags forsegling som skulle brukes. Det ble enighet om aluminiumsteip. Dette for å hindre at eventuell lakkering eller annen overflatebehandling ikke skulle trekkes inn i porene av materialene.

### 6.6.1.3 Inhomogene prøver

LVL-prøvene som er tatt av flensen til Hunton I-bjelker ble skåret løs fra steget. Men steget av trespon er forankret i flensene og er dermed en del av prøvestykkene av LVL. Dette skulle helst vært unngått, men var umulig med materialene tilgjengelige ved dette forsøket.

### 6.6.1.4 Avvik og få prøvestykker

For hvert scenario; LVL med absorpsjon på tvers og parallelt med limsjing, og gran med absorpsjon på tvers og parallelt med limsjikt, så var det store variasjoner i resultatene. Det er vanskelig å si hva som er avvik når utvalget er så lite.

## 7 Konklusjon

Vannabsorpsjonskoeffisienter for LVL-prøvene og gran-prøvene ble beregnet for de fire forskjellige konfigurasjonene; granprøver (G) og LVL-prøver (LVL) med fuktabsorpsjon på tvers av (1-3) og parallelt med (4-6) limsjiktene.

	<b>Kapillærsuging i forhold til limsjikt</b>	$A_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{s}$ )	$W_w$ (kg/m <sup>2</sup> * $\sqrt{h}$ )
<b>G1-3</b>	På tvers	1.03070134	1.14704607
<b>G4-6</b>	Parallelt	3.06265461	3.06698165
<b>LVL1-2</b>	På tvers	3.99756828	4.38213715
<b>LVL4-6</b>	Parallelt	3.91918313	4.02108236

Resultatene fra forsøket avkreftet hypotesen etter litteratursøket om at fuktabsorpsjon ved kapillærsuging på tvers av limsjiktene i LVL-prøvene ville være lavere enn for prøvene med fuktabsorpsjon parallelt med limsjiktene. Det ble derimot funnet at absorpsjonskoeffisientene for granprøvene viste denne tendensen.

Det ble avdekket at LVL-prøvene tok opp mer fukt, i tillegg til å tørke saktere enn granprøvene, i dette forsøket. Fra prosjektoppgaven var både oppfukning og uttørking tregere for LVL-prøvene enn for gran-prøvene. Resultatene fra prosjektoppgaven stemmer bedre med hypotesen etter litteratursøket. Det at uttørkingen var langsommere i begge forsøkene er likevel verdt å merke seg.

Hystereseeffekten i LVL-prøvene var større enn i gran-prøvene etter begge forsøk, og veldig stor etter forsøket ved delvis nedsenking. Dette er et viktig funn, da dette tyder på at det er mer alvorlig for LVL-materialer å bli utsatt for fritt vann enn det er for andre trematerialer.

## 8 References

- Aarnes, H. (2018). *Botanisk- og plantefysiologisk leksikon: Adsorpsjon*. Hentet fra UiO: Institutt for biovitenskap:  
<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/a/adsorpsj.htm>
- Abergel, T., Dean, B., & Dulac, J. (2017). *Global Status Report*. UN Environment.
- Abergel, T., Dean, B., & Dulac, J. (2017). *Global Status Report 2017*. UN Environment.
- Andenæs, E. (2019). Litteratursøkekurs. Trondheim: NTNU.
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, ss. 19-32.
- Bell, E., & Krueger, N. (1949). *Effect of plywood glue lines on the accuracy of moisture-meter indications*. Madison: Forest Products Research Society.
- Bergstöm, E. (2016). *Design of Timber Structures*. Stockholm: Swedish Wood.
- Birkeland, I. M. (2019). *Fuktmåling i LVL med trådløse sensorer*. Trondheim: NTNU.
- Bohme, C., & Hora, G. (2009). Water absorption and Contact Angle Measurement of Native European, North American and Tropical Wood Species to Predict Gluing Properties. *Holzforschung*, ss. 269-275.
- Bohne, R. (2019). Introduction to TBA4171. Trondheim.
- Brischke, C., Rapp, A. O., & Bayerbach, R. (2007). Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment Issue 10*, ss. 1566-1574.
- Bulcke, J. V., Acker, J. V., & Smet, J. D. (2009). An experimental set-up for real-time continuous moisture measurements of plywood exposed to outdoor climate. *Building and Environment, vol 44, issue 12*, ss. 2368-2377.
- Byggforsk, S. (2015). *571.523 Trevirke. Treslag og materialelegenskaper*. Hentet fra Byggforskserien:  
[https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke\\_treslag\\_og\\_materialelegenskaper](https://www.byggforsk.no/dokument/578/trevirke_treslag_og_materialelegenskaper)
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. Oslo: Norsk byggforskningsinstitutt.
- Gustavsen, A. (2019). *Fuktmekanikk*. Hentet fra Byggningsfysikk:  
<http://www.byggningsfysikk.no/Fuktmekanikk.php>
- Hoffmeyer, P. (2017). Wood as a building material (A4). I H. J. Sandhaas, *Timber Engineering* (ss. 21-35). Karlsruhe: Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).
- Hunton. (2018). *Teknisk Håndbok: Hunton I-bjelken*. Hentet fra Hunton:  
[https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/09/i-bjelken\\_teknisk\\_handbok.pdf](https://www.hunton.no/wp-content/uploads/2018/09/i-bjelken_teknisk_handbok.pdf)

- Johannesen, J. (2013). *Fremtidens klima i Norge*. Bjerknessenteret.
- Kielmann, B. C., & Mai, C. (2016). Application and artificial weathering performance of translucent coatings on resin-treated and dye-stained beech-wood. *Progress in Organic Coatings*, vol. 95, ss. 54-63.
- Landbruksdirektoratet. (2019). *Tømmeravvirkning og - priser*. Hentet fra Landbruksdirektoratet: <https://www.landbruksdirektoratet.no/no/statistikk/skogbruk/tommeravvirkning>
- Luo, Z., Guan, H., & Zhang, X. (2019). The temperature effect and correction models for using electrical resistivity to estimate wood moisture variations. *Journal of Hydrology*.
- Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., & Goudreau, P. (2002). Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials. *Journal of Building Physics volume 26, issue 2*, ss. -.
- NASA. (2019). *NASA Global Climate Change*. Hentet fra Vital Signs of the Planet: <https://climate.nasa.gov/>
- NASA. (2020). *Global Climate Change Vital Signs of the Planet*. Hentet fra Climate NASA: <https://climate.nasa.gov/>
- NS-EN ISO 15148 Byggematerialers og -produkters hygrottermiske egenskaper: Bestemmelse av vannabsorpsjonskoeffisient ved delvis nedsenking. (2003, Februar). *NS-EN ISO 15148*. Norge: Standard Norge.
- Østrøm, K. (2019). *Fuktmåling av LVL og gran*. Trondheim: NTNU.
- Paulsen, T. (2004). *Suction i porøse bygningsmaterialer (teglprodukter og granvirke)*. Trondheim: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU).
- Samuelsen, E. (2017). *Relativ Luftfuktighet*. Hentet fra Store Norske Leksikon: [https://snl.no/relativ\\_fuktighet](https://snl.no/relativ_fuktighet)
- SciencePoles. (2013). *What is happening to carbon in Arctian tundra permafrost?* Hentet fra Sciencepoles Articles: <http://www.sciencepoles.org/interview/what-is-happening-to-carbon-in-arctic-tundra-permafrost>
- SeaLevel. (2020). *Atmospheric Carbon Dioxide (CO2) levels, 1800–present*. Hentet fra Sealevel.info: <https://www.sealevel.info/co2.html>
- Skaug, E. (2007). *Fokus på tre nr. 40: Trevirkets oppbygging og egenskaper*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Sletfjerding, E. B. (2019). *Smart vapour barriers in compact timber-framed roofs*. Trondheim: NTNU.
- Standard Norge. (2003, Februar). *NS-EN ISO 15148. Byggematerialers og -produkters hygrottermiske egenskaper: Bestemmelse av vannabsorpsjonskoeffisient ved delvis nedsenking (ISO 15148:2002)*. Standard Norge.
- Steico. (2016, Juli 25). *STEICO Produktion LVL Furnierschichtholz*. Hentet fra YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=OGFHc08jv5c>

- Teischinger, A. (2016). OPPORTUNITIES AND LIMITS OF TIMBER IN CONSTRUCTION. *World Conference on Timber Engineering*. Vienna: WCTE2016.
- Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk Grunnlag*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Time, B. (1998). *Hygroscopic Moisture transport in Wood*. Trondheim: Norwegian University of Science and technology.
- Virta, J., Koponen, S., & Absetz, I. (2006). Modelling moisture distribution in wooden cladding board as a result of short-term single-sided soaking. *Building and Environment vol. 41, issue 11*, ss. 1593-1599.

# Vedlegg

## 8.1 Vedlegg A: Søk og treff fra litteraturstudie

Søk	Nøkkelord	Databaser	Søkedato	Sortering	Antall treff (titler lest)	Abstracts lest	Artikler lest	Notat
1	"wood"+"capillarity"	Sciedirect & Web of Science	06.05.2020	Construction and building materials, building and environment	101		4	Ett treff som var noe relevant og interessant lesning.
2	"wood"+"capillary suction"	Sciedirect & Web of Science	06.05.2020	Construction and building materials, building and environment	59		2	0 Ingen interessante treff
3	"wood"+"moisture content"	Sciedirect & Web of Science	06.03.2020		39043		0	Altfor omfattende treff - prøver andre søkeord-kombinasjoner
4	"wood"+"sorption"	Sciedirect & Web of Science	06.03.2020		25016		0	Altfor omfattende treff - prøver andre søkeord-kombinasjoner
5	"wood"+"immersion"	Sciedirect & Web of Science	06.03.2020		22107		0	Altfor omfattende treff - prøver andre søkeord-kombinasjoner
6	"wood"+"immersion"+"water"	Sciedirect & Web of Science	06.03.2020		18413		0	Altfor omfattende treff - prøver andre søkeord-kombinasjoner
7	"wood"+"water absorption"	Sciedirect & Web of Science	06.03.2020	Construction and building materials	693(300)		12	300 titler og 12 abstracts gjennomgått uten relevante funn
8	"LVL"+"capillarity"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020		19		0	0 Ingen interessante treff
9	"LVL"+"capillary suction"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020		4		0	0 Ingen interessante treff
9	"LVL"+"capillary suction"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020		4		0	0 Ingen interessante treff
10	"LVL"+"moisture content"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020	Construction and building materials, building and environment, wood composites	114		3	Ett treff som var noe relevant og interessant lesning.
11	"LVL"+"sorption"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020	Construction and building materials	5		0	0 Ingen interessante treff
12	"LVL"+"immersion"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020	Construction and building materials	6		0	0 Ingen interessante treff
13	"LVL"+"water absorption"	Sciedirect & Web of Science	18.03.2020	Construction and building materials, building and environment, measurements	13		1	0 Ingen interessante treff
14	"glulam"+"capillarity"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020		7		0	0 Ingen interessante treff
15	"glulam"+"capillary suction"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020		7		0	0 Ingen interessante treff
16	"glulam"+"moisture content"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020	Construction and building materials, building and environment, Journal of Building Engineering, Wood composites	185		8	2 Ett noe relevant treff, duplikat
17	"glulam"+"sorption"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020		46		4	1 Ett noe relevant treff, duplikat
18	"glulam"+"immersion"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020		41		3	En artikkel delvist lest. Ikke relevant

18	"glulam" + "immersion"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020			41	3	1	En artikkel delvist lest. Ikke relevant
19	"glulam" + "water absorption"	Sciedirect & Web of Science	25.03.2020	Construction and building materials, Sustainability of Construction materials, measurements		10	0	0	Ingen interessante treff
20	"water absorption coefficient" + "wood"	Google Scholar	11.06.2020		1080 (300)		21	2	Mange treff som omhandlet andre bygningmaterier, termiske egenskaper osv. Noen relevante!
21	"water absorption coefficient" + "wood"	Sciedirect & Web of Science	11.06.2020			205	4	0	Ingen interessante treff
22	"ISO 15148" + "wood"	Sciedirect & Web of Science	11.06.2020			25	1	0	Ingen treff som omhandlet forsøk på tre.
23	DIN 52617 + "wood"	Sciedirect & Web of Science	11.06.2020			3	3	0	
24	"water absorption coefficient" + "wood"	Oria	11.06.2020			251	6	2	To artikler lest, en relevant
25	"water absorption" + "phenol formaldehyde" + "wood"	Sciedirect & Web of Science	16.06.2020	Construction and building materials, building and environment, Materials & Design		603	8	2	To gode treff

Search Number	Author	Publication Year	Title	Publishers/published in	Pages	Citations	Short Description
1	Jari Virta, Simo Koponen, Ilmari Absetz	2005	Modelling moisture distribution in wooden cladding board as a result of short-term single-sided water soaking	Helsinki University of Technology, presented in "Building and Environment volume 41, issue 11" November 2006 by Elsevier	1593-1599	14	Undersøkelse av fuktdistribusjon i trepanel ved nedsenking som skal simulere slagregn
10, 16, 17	A.A. Chiniforush, A. Akbarnezhad, H. Valipour, S. Malekmohammadi	2019	Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study	The University of Sydney, presented in "Construction and Building Materials volume 207" May 2019 by Elsevier	70-83	5	Litteratursaket til prosjektoppgaven. Handlet om utvidelsekoeffisienter, og ikke direkte relevant. Men interessant.
19	Henrik Heräjärvi, Veikko Mötönen, Maija Reinikkala, Reeta Stöd	2014	behaviour and dimensional stability of untreated, CC impregnated and pine oil treated glulam made of Scots pine and Norway spruce	"International Biodeterioration and Biodegradation volume 86, part 8" January 2014 by Elsevier	66-70	6	Hovedsakelig fokus på effekt av impregnering og behandling, og deretter mekaniske egenskaper. Ikke særlig relevant.
20	Christian Boehme & Guido Hora	2009	Water absorption and Contact Angle Measurement of Native European, North American and Tropical Wood Species to Predict Gluing Properties	Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Fraunhofer-Arbeitsgruppe for Holzforschung vol. 50 issue 3	269-275	1	God undersøkelse av diverse trearters vannabsorpsjonskoeffisienter. Ingen for limte trematerialer.
24	Isabel Fernandez, Angeles Fernandez, Katia Rodriguez, Vanessa Baño, Andrés Dieste	2013	The effect of wood species on the anti-skid resistance of coatings	Forestry and Wood Research Centre (CETEMAS)			Ikke interessant. Kun fokus på "anti-skid resistance of coatings"
24	Phalguni Mukhopadhyaya, Kumar Kumaran, Nicole Normandin, Patrick Goudreau	2002	Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials	Journal of Building Physics vol. 26, issue 2			Vannabsorpsjonskoeffisient bestemt ved forsøk. Testet furu, murstein og betong
25	Bodo Caspar Kielmann & Carsten Mai	2016	Application and artificial weathering performance of translucent coatings on resin-treated and dye-stained beech-wood	Progress in Organic Coatings, vol. 95	54-63	14	Vannabsorpsjonstest for bok med ulike overflatebehandlinger
Citation chaining, via Google Scholar og Oria, fra følgende artikkel:							
	Lars Wadsö	1995	Capillarity in wood and related concepts: a critical review	Lund University, Division of Building Materials	53		"...present what is known about capillary phenomena in wood and discuss how it should be measured and modelled."
2.1	Eva Liptáková and Jozef Küdela	2009	Analysis of the Wood-Wetting Process	Technical University of Zvolen, published in Holzforschung Volume 48: Issue 2	139-144	1	Fokus på kontaktvinkel, ikke direkte relevant.
2.2	M. A. Stanish, G.S. Schajer and Ferhan Kayihan	1986	A mathematical model of drying for hygroscopic porous media	AIChE Journal Volume 32, Issue 8	1301-1311	144	Fokus på spesiell tørketeknikk. Fluidmekaniske og termodynamiske ligninger er brukt til å beregne tørkeprosessen. Ikke relevant.
2.3	Christen Skaar	1988	Wood-water relations	Springer-Verlag	283		Kapittel 3 svært interessant, men fokus på molekylært nivå.
2.4	J. F. Siau	1984	Transport Processes in Wood	Springer-Verlag	246		Interessant fagbok, men med mye overlappende stoff som allerede er tilgjengelig via fagbøker tilgjengelig under studietiden ved NTNU.

8.2 Vedlegg B: Bilder fra forsøket





