

Fuktegenskaper i pappersreglar

En utredning av fuktbegränsningar hos Wood Tubes pappersreglar



**LUNDS
UNIVERSITET**

Lunds Tekniska Högskola

**LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Avdelning för konstruktionsteknik**

Examenarbete, 22,5hp av:
Olivia Zetterström
Wilma Stålar

© Copyright Olivia Zetterström & Wilma Stålar

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2023

Titel: Fuktegenskaper i pappersreglar
- En utredning av fuktbegränsningar hos Wood Tubes
pappersreglar

Författare: Olivia Zetterström
Wilma Stålar

Handledare: Eva Frühwald Hansson, universitetslektor i
konstruktionsteknik, LTH

Examinator: Annika Mårtensson, professor i konstruktionsteknik, LTH

Nyckelord: Wood Tube. Returpapp. Pappersregel. Fuktsäkerhet.
Byggnadsmaterial. Cirkulärt byggande.

Sammanfattning

Kunskapen kring byggbranschens klimatpåverkan växer och krav på förbättrade åtgärder framförs för att minska klimatavtrycken. År 2045 ska Sverige inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser. Från 1 januari 2022 gäller krav på klimatdeklaration vid uppförande av nya byggnader, syftet med klimatdeklarationen är att minska klimatpåverkan från byggskedet. För att nå klimatmålet krävs det kreativa innovationer inom flera områden. En del av lösningen är att ta vara på de material som redan finns. Detta är något som Wood Tube har gjort med sin pappersregel i returpapper.

Wood Tubes pappersregel används i icke bärande innerväggar och kan ersätta stål- och träreglar. Produkten har 92% mindre klimatpåverkan än en stålregel och använder 4 gånger mindre råvara än en träregel. När Wood Tubes pappersregel kapas blir det inga vassa kanter som kan ge skärskador, vilket är den vanligaste arbetsskadan på byggarbetsplatser idag. Produktens låga vikt är en fördel både avseende transport och arbetsmiljö. Spill av regeln kan återvinnas som kartong och därmed vara en del av ett cirkulärt kretslopp.

Rapporten utreder pappersregelns fuktbeständighet genom en experimentell studie för att kartlägga materialets påverkan i klimat med höga relativa luftfuktigheter. Resultaten visar att Wood Tubes regel absorberar vatten både kapillärt och hygroskopiskt. En ökad fuktkvot bidrar till en dimensionsökning i materialet. Pappersregeln har en minskad tryck- och böjhållfasthet vid höga relativa fuktigheter men ingen påverkan avseende utdragshållfasthet har konstaterats. Ingen mögelpåväxt observeras på materialet efter 3 veckor i relativa luftfuktigheter på 60%, 75%, 85%. I ett väggelement vid en simulerad översvämning visar reglarna ingen synlig fuktpåverkan.

Slutsatsen är att Wood Tubes pappersregel inte påverkas av fukten i de inneklimat som regeln är avsedd för, om produktens användningsområde däremot ska utökas till reglar i ytterväggar eller som bärande delar av en konstruktion bör materialets fuktpåverkan beaktas. Vid en ökad relativ luftfuktighet visar regeln på försämrade egenskaper i tryck- och böjhållfasthet. Vidare studier krävs för att undersöka om produktens användningsområde kan utökas till delar av konstruktionen med högre fuktbelastning.

Abstract

Awareness of the climate impact of the construction industry is increasing and demands for improved measures are needed to reduce the climate footprint. By year 2045, Sweden should have zero net emissions of greenhouse gases. From January 1, 2022, a climate declaration is required for the construction of new buildings, the purpose of the climate declaration is to reduce the climate impact of the construction phase. Reaching the climate goal will require creative innovations in several areas. Part of the solution is to use the materials that already exist. This is something Wood Tube has done with its recycled paper studs.

Wood Tube's paper stud is used in non-bearing interior walls and can replace steel- and wood studs. The product has 92% less climate impact than a steel stud and uses 4 times less raw material than a wooden stud. When Wood Tube's paper studs are cut, there are no sharp edges that can cause an injury. The low weight of the product is an advantage both in terms of transportation and work environment. The paper stud can be recycled as cardboard and thus be part of a circular system.

The report investigates the moisture resistance of the paper stud through an experimental study to map the material's impact in climates with higher relative humidity. The results show that Wood Tubes studs absorb water both capillary and hygroscopically. An increased moisture content contributes to dimensional expansion of the material. The paper stud has a reduced compressive and flexural strength at high relative humidity but no effect on withdrawal strength. No mold growth is observed on the material after 3 weeks in relative humidities of 60%, 75%, 85%. In a wall element during a simulated flood, the studs show no visible moisture impact.

The conclusion of the study is that Wood Tube's paper studs are not affected by the indoor climate for which the stud is intended. At an increased relative humidity, the stud shows reduced qualities in compressive and flexural strength. Further studies are required to investigate whether the product's field of application can be extended to parts of the construction with higher moisture loads.

Förord

Detta examensarbete avslutar vår utbildning på Högskoleingenjörsprogrammet Byggteknik med Arkitektur vid Lunds Tekniska Högskola på Campus Helsingborg. Examensarbetet omfattar 22,5 högskolepoäng.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Eva Frühwald Hansson, universitetslektor i konstruktionsteknik som har stöttat och motiverat oss till arbetet genom hela processen, samt bidragit med värdefull kompetens. Vi vill också tacka Martin Gunder, forskningsingenjör på konstruktionsteknik som stöttat och varit delaktig i experimenten. Tack till vår examinator Annika Mårtensson, professor i konstruktionsteknik.

Ett stort tack till Tobias Söderblom Olsson på Wood Tube som möjliggjort arbetet genom att presentera företaget för oss och bidra med material, ett stort engagemang och värdefull kompetens.

Lund i maj 2023

Olivia Zetterström och Wilma Stålar

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Problemformulering	2
1.4 Avgränsningar.....	2
1.5 Övergripande metod	3
2 Teori	4
2.1 Pappersarkitektur	4
2.2 Papperstillverkning.....	5
2.3 Fuktegenskaper	5
2.3.1 Trä.....	5
2.3.2 Papper.....	6
2.3.3 Gipsskiva.....	6
2.3.4 Oriented Strand Board (OSB-skiva)	7
2.4 Inneklimat	7
2.5 Mögel	8
2.6 Hållfasthet	9
2.6.1 Trä.....	9
2.6.2 Papper.....	9
3 Metod och material	10
3.1 Ånghalt mellan skikt	10
3.2 Material och utrustning	12
3.3 Experimentell studie.....	12
3.3.1 Fuktkvot.....	14
3.3.2 Längdutvidgning.....	14
3.3.3 Kapillärsugning.....	15
3.3.4 Översvämning.....	16
3.3.5 Mögelobservation.....	17
3.3.6 Tryckhållfasthet och tryck-E-modul	17
3.3.7 Böjhållfasthet och E-modul för böjbelastning	18
3.3.8 Utdragning av skruv	18
4 Resultat	20
4.1 Fuktkvot	20
4.2 Längdutvidgning	21
4.3 Kapillärsugning	24
4.4 Översvämning.....	27
4.5 Mögelobservation	29
4.6 Tryckhållfasthet och E-modul i tryck.....	30
4.7 Böjhållfasthet	33
4.8 Utdragning av skruv.....	36

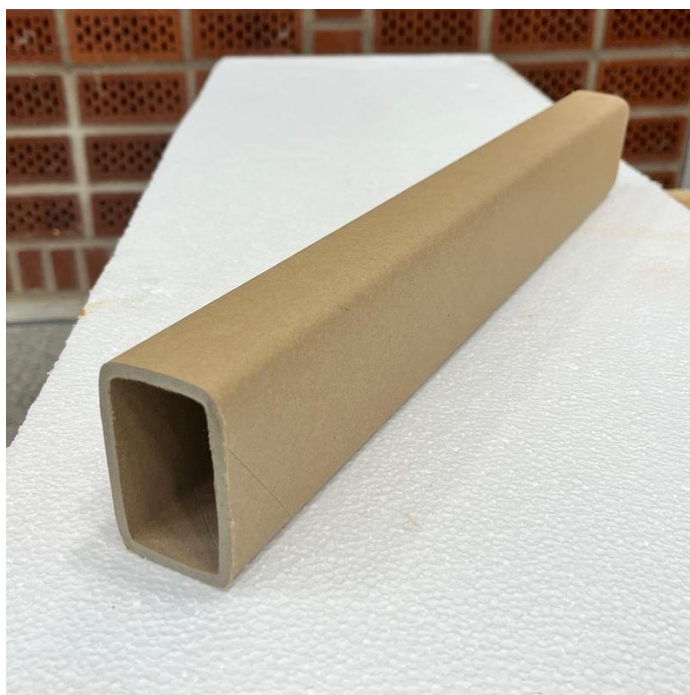
5	Generell diskussion.....	37
6	Förslag till framtida studier.....	39
7	Slutsats.....	40
8	Referenslista.....	41
9	Bilagor.....	44

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Bygg- och fastighetssektorn står för cirka 21% av Sveriges totala utsläpp av växthusgaser (Boverket, 2023). Dessutom bidrar branschen till stora utsläpp utomlands genom importvaror. Från 1 januari 2022 gäller krav på klimatdeklaration vid uppförande av nya byggnader. Syftet med klimatdeklarationen är att minska klimatpåverkan från byggskedet för att nå Sveriges mål om att inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till år 2045. FN:s medlemsländer har tagit fram globala hållbarhetsmål, Agenda 2030. Hållbarhetsmålen ska hjälpa till att bekämpa klimatförändringar genom att främja hållbara innovationer, hållbara städer och samhällen samt en hållbar produktion (United Nations Development Programme, 2022). Intresset och kunskapen kring att bygga mer miljövänligt har ökat och fler miljövänliga alternativ till dagens byggmaterial har nått marknaden med målet att ersätta material som betong och stål.

Ett hållbart alternativ till dagens byggmaterial är en byggregel i papper (se figur 1:1) som det värmländska företaget Wood Tube framställt. Regeln har 92% lägre klimatpåverkan än en stålregel (Wahlström, 2016) och för att framställa regeln krävs 4 gånger mindre material än för att tillverka motsvarande regel i trä. Regeln kan användas till icke bärande innerväggar som ett hållbart alternativ till de stål- och träreglar som används idag. Produktens låga vikt gör den lätt och smidig att arbeta med och det mjuka materialet minskar risk för skärskador vid användning av materialet. Regeln framställs av returpapp som är limmat i flera lager. Limmet består av naturliga ämnen och regeln kan efter användning återvinnas som kartong och därmed vara en del av ett cirkulärt kretslopp (Wood Tube, 2023).



Figur 1:1 Wood Tube pappersregel 45x70mm

Papper är ett fuktkänsligt material vilket innebär att reglarna bör användas varsamt och inte vara i direkt kontakt med fukt. Klimatet i konstruktionen där reglarna står påverkas av det klimat som omger konstruktionen samt vilka material som omger reglarna. Många byggmaterial har ett ångmotstånd som stoppar eller bromsar ångtransporten genom konstruktionen, vilket medför att olika byggmaterial får olika fuktbelastningar. Innerväggar är den del av konstruktionen med lägst fuktbelastning då de inte utsätts för direkt fukt eller stora temperaturskillnader. Däremot kan ett inneklimat uppnå höga relativa luftfuktigheter vid höga ånghalter utomhus och vid samtidigt höga fukttillskott inomhus i form av människor och mänskliga aktiviteter som matlagning, tvättning och duschning.

1.2 Syfte

Wood Tube reglarna används idag till icke-bärande innerväggar, men framöver skulle användningsområdet kunna utökas till ytterväggar eller bärande väggar. I så fall ställs högre krav på materialet i form av fuktbeständighet. Syftet med arbetet är därför att se vilka nuvarande fuktbegränsningar som finns i en pappersregel och hur materialet beter sig i fuktiga klimat för att undersöka materialets funktion och beständighet i klimat med högre relativ luftfuktighet.

1.3 Problemformulering

I detta arbete undersöks hur Wood Tube reglarna påverkas av fukt. Ett antal olika forskningsfrågor kommer undersökas experimentellt:

- Vilka fuktegenskaper har materialet?
 - Kapillaritet i Wood Tube regler (kapillär stighöjd)
 - Fuktpåverkan i en innervägg med Wood Tube regler utsatt för översvämning.
- Vilken kritisk luftfuktighet har materialet?
 - Mögelpåväxt på Wood Tube regler vid olika relativa luftfuktigheter.
- Hur påverkas egenskaperna i Wood Tubes pappersregel i fuktiga miljöer?
 - Inverkan på regelns dimensioner vid ökad fuktkvot.
- Hur påverkas materialets bärighet och infästningar av en ökad luftfuktighet?
 - Inverkan av varierande fuktkvot på tryckhållfasthet.
 - Inverkan av varierande fuktkvot på böjhållfasthet/böjstyvhet.
 - Inverkan av varierande fuktkvot på utdragning av infästningsskruvar.

1.4 Avgränsningar

Studien avgränsas till att undersöka fuktegenskaperna i regeln för fyra klimat med relativa luftfuktigheter på 33%, 60%, 75%, 85% och en konstant temperatur på cirka 20°C. Under studien görs inga omfattande mögelmätningar, mögel kommer endast observeras okulärt och i mikroskop, därmed kan inga vetenskapliga slutsatser dras kring mögeltillväxt på materialet.

Studien avgränsas till att undersöka fuktbelastningen motsvarande konstruktioner i Sverige. Fuktbelastning i byggskedet kommer inte studeras även om det är en fuktkritisk period för många byggmaterial där höga relativa luftfuktigheter kan uppkomma.

Pappersreglarna studeras som material och därmed kommer inte limmet och pappret studeras separat i detalj. Inga vetenskapliga slutsatser kan dras kring vilken komponent i materialet som är mest fuktbegränsande.

1.5 Övergripande metod

Under studiens gång har författarna haft daglig kontakt. En stor del av arbetet har gjorts i laboratoriet på LTH där provningar förberetts och genomförts. Avstämningar med handledare Eva Frühwald Hansson har gjorts veckovis. Experiment har diskuterats och förberetts i samråd med handledare och Martin Gunder, forskningsingenjör på LTH. Författarna har även varit på studiebesök i företaget Wood Tubes fabrik för att se tillverkningsprocessen för byggreglarna.

Studien presenteras i fem kapitel. I kapitel 1 och 2 presenteras bakgrundsfakta som är viktig för att skapa förståelse för studien. I kapitel 3 presenteras metoden, där beräkningar för extrema inomhusklimat presenteras samt vilka metoder som används under den experimentella studien. Resultat och diskussion från den experimentella studien presenteras i kapitel 4. Diskussion och slutsats för studien presenteras i kapitel 5 och 7. Referenslista och bilagor kompletterar rapporten.

2 Teori

2.1 Pappersarkitektur

Användning av papper i byggnader har funnits sedan 1986 i den japanska arkitekten Shigeru Bans arkitektur. Hans första verk var till den finska arkitekten Alvar Altos utställning på the museum of modern art i New York. Ekonomiska faktorer begränsade en interiör i trä och Shigeru Ban tog därmed fram ett förslag för takpaneler, skiljeväggar och utställningsplatser i återvunnet papper (Shigeru Ban Architects, 1986). Efter Shigeru Bans verk i New York 1986 har arkitekten byggt flertal konstruktioner i papper. Arkitektens verk ”Paper House” i Yamanakoko Village i Japan blev det första verket där pappersrören blev godkända som bärande delar i en permanent konstruktion (Shigeru Ban Architects, 1995). Många av Shigeru Bans verk är temporära byggnader för områden som blivit drabbade av naturkatastrofer och krig. Pappersrören som arkitekten använder sig utav är starka och det finns möjligheter att göra pappret vattentät och brandsäkert då det är ett industriellt tillverkat material (Ban, 2013).

I Sverige är det däremot nytt att bygga med pappersreglar och Wood Tube är det första företaget som tagit fram en regel i returpapper som möter branschens krav. Reglarnas främsta användningsområde är inuti konstruktioner där de inte syns men i figur 2:1 redovisas regeln som spalje på ett arkitektkontor.



Figur 2:1 Spaljé av Wood Tube reglar. Källa: Wood Tube

2.2 Papperstillverkning

Papperstillverkning är en industriell process där papprets egenskaper kan styras genom blandning av olika pappersfibrer. De flesta pappersprodukter är uppbyggda av cellulosafibrer från träd. Tillverkningen sker genom två huvudprocesser: mäldberedning och avvattning. Under mäldberedningsprocessen blandas fiberråvaran. Efter önskad blandning renas mälden i silar för att sedan blandas med vatten, därefter sprutas massan ut på virvlar. Under avvattningprocessen färdas mälden på virvlar genom 3 partier i pappersmaskinen. I slutet av processen torkas mälden till ett färdigt pappersark med en torrhet på 95% (SkogsSverige, 2021). Enligt Scallan (1977) är den betydande faktorn för papperstillverkning blötläggningen av träfibrer och fibrernas reaktion till vatten. När fibrerna utsätts för vatten avlägsnas lignin och hemicellulosa och vattnet tar upp det kvarstående utrymmet (Scallan, 1977). Vatten har flera viktiga roller under framställning av papper då vätskan fungerar som ett svällningsmedel för träfibrerna och ökar kontaktytan. Vattnet gör det även möjligt att separera och forma fibrerna (Hubbe, 2007).

Enligt T. Söderbom Olsson (personlig kommunikation, 3 maj 2023) är tekniken densamma för tillverkning av returpapp. Skillnaden är den återvunna fiberråvaran i returpapp. Vid tillverkning av nytt papper kan fiberriktningen bestämmas utifrån vilka egenskaper som önskas i pappret, detta är dock mer begränsat vid tillverkning av returpapper. Däremot innebär detta att det inte finns lika stor spridning av egenskaper i de olika riktningarna i returpappret. Kvalitén i pappret säkerställs genom kontroller av råvaran hos returpappersbruken.

I Sverige återvanns 85% av alla pappersförpackningar år 2021 (SCB, 2022). Återbruket har många fördelar, det är en mindre energikrävande process och det krävs inte samma mängd vatten vid tillverkningen. Ny forskning visar dessutom att fiberbaserat packeteringsmaterial kan återvinnas minst 25 gånger utan att förlora sina rörliga och svällande egenskaper (Eckhart, 2021). Tidigare forskning säger att pappersfibrer endast kan återvinnas 7–8 gånger (Avfall Sverige, 2022).

2.3 Fuktegenskaper

Byggmaterial har olika fuktegenskaper. I det följande kapitlet beskrivs fuktegenskaperna för ett antal material som är viktiga i denna studie.

2.3.1 Trä

Trä är ett anisotrop material med tre huvudriktningar, fiberriktning (stammens längdriktning), tangentiell riktning (vinkelrätt mot fiberriktningen och årsringarna), radiell riktning (vinkelrätt mot fiberriktningen men parallellt med årsringarna). Trä är uppbyggt av cellulosa, hemicellulosa och lignin. Ämnena har lätt att binda vattenmolekyler vilket gör trä till ett fuktkänsligt material. Materialet är hygroskopiskt vilket innebär att det kan binda vatten från luften (Burström & Nilvér, 2019). Fuktegenskaperna beror till stor del av fiberriktningen i materialet. Ångtransport och kapillärsugning i trä sker snabbt längs fibrerna där vattnet transporteras genom hålrummen i cellerna. Det är vattnets ytspänning och attraktionskraft mot porväggen som gör att vattnet stiger, därför har finporösa material en högre kapillaritet än grova material (Polygon, u.å). Kapillärsugning sker enkelt vid

ändrät där de vattenkänsliga cellulosa fibrerna är exponerade. Vid en fuktkvot på cirka 28–30% är trä fibermättat, över denna punkt påverkas inte träets egenskaper (Arfvidsson et al., 2017). Fuktttransport tvärs fiberriktningen sker igenom porer mellan fibrerna, vilket gör fukttransporten i denna riktning mycket långsammare än längs fiberriktningen.

De fuktbetingande rörelserna i trä beror på riktningen. Störst är de i tangentiell riktning, något mindre i radiell riktning och minst i fiberriktningen. Träets mekaniska egenskaper påverkas vid ökad fuktkvot, tryckhållfastheten i träet påverkas mest vid ökad fuktkvot och draghållfastheten påverkas minst (Svenskt trä, 2021). Vid höga relativa luftfuktigheter kan träet angripas av mögelsvampar, rötsvampar och trägnagande insekter. Mögelsvamparna växer endast ytligt och kan inte bryta ner trä. Rötsvampar och trägnagande insekter bryter däremot ner träet (Burström & Nilvér, 2019).

2.3.2 Papper

Pappers fysikaliska egenskaper och dimensioner beror på flera faktorer. De parametrar som påverkar egenskaperna mest är temperatur och mängden fukt som både pappret och rummet innehåller. Papper är ett hygroskopiskt material: När fukthalten ändras i den omgivande luften ändras papprets dimensioner som ett resultat av förändringen av fukthalt i luften. Den vanligaste förändringen är tjocklekssvällning, ytförändringar samt försämrad styvhet och styrka. Vid en låg relativ fuktighet sker en absorption i ytan i det exponerade papperslagret. När den relativa fuktigheten ökar sker absorption i flera av papperslagerna. Vid höga relativa fuktigheter sker fuktupptagningen via kapillär kondensering, där fiber- och pappersstrukturen fylls med vätska (Kungliga tekniska högskolan, 2005). När en pappersprodukt utsätts för höga fukthalter sväller materialet och kan därefter inte återgå till sin ursprungliga dimension. Papper påverkas minst vid en relativ fuktighet mellan 45–55% (SWT paper, u.å). Förpackningar i papper är vanligt förekommande i livsmedelsindustrin där det ställs höga krav på produkterna. För att de ska stå emot fukt och klara livsmedelskraven behandlas de med en laminerad yta (Kristersson et al., 2017).

2.3.3 Gipsskiva

En gipsskiva är uppbyggd med ett omslutande skal av papper eller kartong och en kärna av gips. Under gipstillverkningen kan tillsatsmedel användas för att påverka egenskaper som till exempel densitet och hållfasthet. Skalet är ofta tillverkat av returpapper och kan ytbehandlas med vattenavvisande medel om gipsskivan ska användas i våtrum eller som vindskydd i fasader (Burström & Nilvér, 2018). Det största användningsområdet för gips i byggbranschen är som gipsskivor till väggar och tak. Gips har goda egenskaper mot brand vilket gör det till ett viktigt material för brandskydd i byggnader. Pappen som omsluter gipsen är ett organiskt material vilket ger materialet en känslighet mot mögelpåväxt om det utsätts för höga relativa fuktigheter under en längre period (Arfvidsson et al., 2017). En gipsskiva bör därför inte användas i klimat där den relativa luftfuktigheten överstiger 80%, då ökar risken för mögel och vid relativa luftfuktigheter över 90% försvagas gipsskivans hållfasthets- och styvhetsegenskaper (Saint Gobain, 2023). Skivor som används invändigt utsätts däremot sällan för någon större fuktpåverkan (Burström & Nilvér, 2019).

2.3.4 Oriented Strand Board (OSB-skiva)

Oriented Strand Board (OSB-skiva) är en träbaserad skiva som används bakom en gipsskiva i Wood Tubes rekommenderade uppbyggnad av en innervägg för att öka väggens hållfasthet. OSB-skivan är uppbyggd av långa träspån som limmas och pressas samman under högt tryck och hög temperatur. Nära ytan ligger spånen i skivans längdriktning och i mitten av skivan ligger spånen vinkelrätt längdriktningen. Fuktrörelsen i OSB-skivans plan är ca 2 mm/m och tjockleksökningen är ca 5% när den relativa luftfuktigheten ändras från 35% till 85%. Densiteten på OSB-skivor är mellan 580–630 kg/m³ (Burström & Nilvér, 2019).

2.4 Inneklimat

Klimatet inuti en byggnad är skyddat mot direkt nederbörd och stora temperaturskillnader. Däremot kan höga relativa luftfuktigheter uppstå i ett inneklimat. Den relativa luftfuktigheten (RF) definieras som kvoten mellan aktuell ånghalt och mättnadsånghalt vid aktuell temperatur. Mättnadsånghalten är den mängd vatten som luften kan bära innan vattnet kondenserar och den ökar med ökad temperatur. Ånghalten i inomhusluften varierar med temperatur, uteklimat, ventilation, fukttillskott och med årstiderna. Under sommarmånaderna har uteluften en hög ånghalt, när den sedan når inomhusluften tillsätts fukt från människor vilket medför en hög relativ luftfuktighet i inneklimatet.

Fukttillskott definieras som effekten av fuktproduktion, det vill säga den mängd fukt som produceras av människor och mänskliga aktiviteter i kombination med hur ofta luften byts ut genom ventilationen (Arfvidsson et al., 2017). Enligt mätningar av relativa luftfuktigheten i småhus under perioden oktober till maj är den relativa luftfuktigheten i genomsnitt ca 33% och fukttillskottet i genomsnitt 1,8 g/m³ (Boverket, 2010). Under sommarmånaderna kan däremot den relativa luftfuktigheten inomhus uppnå 60% (Sandin, 2010). Eftersom fukttillskottet även påverkas av ventilationen i byggnaden finns i Boverkets byggregler ett krav på ett lägsta uteluftsflöde på 0.35 l/s per m² golvarea för att säkerställa ett hälsosamt inomhusklimat (Boverkets byggregler [BBR], 2011).

Då klimatet inuti bostäder påverkas av många parametrar har inneklimatsmodeller utvecklats för att uppskatta och modellera klimaten inomhus. I Fukthandboken (Arfvidsson et al., 2017) presenteras ett flertal inneklimatsmodeller där fukttillskottet minskar linjärt med ökad utomhustemperatur. Skillnaden i fukttillskott vid varma och kalla temperaturer anses bero på omfattande vädring under sommartid, olika matlagingsvanor under sommar och vinter samt torkning av tvätt utomhus under sommartid (Bagge et al., 2019).

På Chalmers Tekniska Högskola har det genomförts en studie på inomhusklimatet i 1000 svenska hushåll baserat på statistiska data under en tidsperiod på ett år (Pallin et al., 2011). Den maximala relativa luftfuktigheten inomhus uppmättes till 72% mellan 22-26e februari i Göteborg. Studien omfattar inte vädringsmånaderna men tar hänsyn till fuktbuffering i material och en maximal fuktproduktion på 300g/h. Vid mätningar av fukttillskottet varje timme under ett år för hushållen har det maximala värdet uppgått till cirka 2,8g/m³ utan hänsyn till fuktbuffering i material. Studien visar att torkning av tvätt är den aktivitet i ett hushåll som genererar mest fukt tillsammans med matlagning. I tabell 2:1 redovisas värden på fuktproduktion för oventilerad torkning av tvätt och matlagning.

Tabell 2:1 Fuktproduktion i bostäder, sammanställning av källor.

Oventilerad torkning av tvätt	Matlagning	Källa
1500 g/person, dag	2000-3000g/dag	Palmer et al., 2009
1250–3500 g/torkning	470-3860g/matlagning	Pallin et al., 2011

Enligt Palmer et al. (2009) genererar oventilerad torkning av kläder en fuktproduktion på 1500 g/dag och person. Pallin et al. (2011) har undersökt samma aktivitet i sin studie och resultatet visar att oventilerad torkning av kläder genererar en fuktproduktion på 1,25–3,5 kg/torkning där en torkning beräknas ta 7-15h och där cirka 20% av den totala fuktproduktionen sker den första timmen och därefter avtar fukttillskottet. Det maximala fukttillskottet uppmättes till 300g/h under en timme.

För att minska skador i konstruktionen på grund av fukt har Boverket tagit fram krav på tätskikt i de delar av konstruktionen som utsätts för direkt fukt, exempelvis badrum med dusch. För tvättstugor gäller krav på vattentätt skikt på golvet, där det vattentäta skiktet ska dras upp på vägg. Väggarna och tak som kan utsättas för vattenstänk, höga luftfuktigheter, våtrengöring och kondensvatten ska utformas med ett vattenavvisande ytskikt (Boverket, 2011). De vattenavvisande ytskikten ska uppnå kraven för VA system (Måleribranschens våtrumskontroll, 2021).

2.5 Mögel

Mögel är vanligt förekommande på organiska byggmaterial i miljöer med hög relativ fuktighet. Mögelsvampar bildar sporer för att sprida sig över stora ytor och sporer finns alltid i luften vilket innebär att det inte finns några rena materialytor. För att sporer ska gro krävs dock ett gynnsamt klimat. Mögelsvamparna behöver näring, syre, rätt temperatur och rätt pH-värde. Näringen kan finnas i byggmaterialet eller tillsättas vid nedsmutsning. Svampen är även i behov av fukt under en viss tid för att växa, därför är det oftast inte farligt med ett klimat med hög RF under en kortare period (Johansson et al., 2005).

Den kritiska luftfuktigheten för ett material är vid den fuktighet som materialets egenskaper förändras drastiskt eller då det sker mikrobiell tillväxt på materialytan. För att bestämma ett materials kritiska fukttillstånd krävs omfattande tester och mätningar. Om det kritiska fukttillståndet inte är väl undersökt för ett material ska den bestämmas till 75% (Boverkets byggregler [BBR], 2014). Sveriges provnings- och forskningsinstitut har sammanställt kritiska fukttillstånd för olika material, se tabell 2:2 (Johansson et al., 2005).

Tabell 2:2 Sammanställning av kritiskt fukttillstånd hos byggmaterial (Johansson et al., 2005).

Materialgrupp	Kritiskt fukttillstånd [% RF]
Smutsade material	75–80
Trä och träbaserade material	75–80
Gippskivor med papp	80–85

För gippskivor påvisades en mögeltillväxt vid RF över 80%. Däremot är gipsen mycket känslig för vattenskada. Ett test har genomförts där en gippskiva fuktades upp under 10 min

och därefter lät torkas i ett klimat med RF 32%. Redan efter 48h började det växa mögelsvamphyfer (Horner et al., 2001 refererad i Johansson et al., 2005).

Studier för mögeltillväxt på papperstapet har gjorts där prover inokulerats av svampar under 110 dagar i en temperatur på 20 grader. I ett experiment påvisades mögel vid RF 77% (Rowan et al., 1999 refererad i Johansson et al., 2005). För samma experiment påträffades mögel vid 82% vid en annan mätning (Grant et al., 1989 refererad i Johansson et al., 2005).

På trä kan mögel snabbt uppkomma om förutsättningarna är goda. Hallenberg et al. (1988) (refererad i Johansson et al., 2005) provade virkets motståndskraft mot mögelangrepp genom att placera 95st okända träprover i olika konstanta klimat och låta det som fanns på materialet växa ut. Vid 65% RF påvisades ingen tillväxt, men vid 75% ökade antalet kontaminerade prover, och vid 85% hade 44% av proverna kontaminerats.

2.6 Hållfasthet

2.6.1 Trä

Då trä är ett anisotrop material skiljer de tekniska egenskaperna sig beroende på belastningens riktning i förhållande till fiberriktningen i materialet. Den högsta hållfastheten uppnås vid drag parallellt fiberriktningen (Burström & Nilvér, 2019). Styvheten vinkelrätt fibrerna är endast ca 50% av hållfastheten parallellt fibrerna för konstruktionsvirke (Isaksson & Mårtensson, 2019). Fuktkvoten har också stor betydelse för träs hållfasthet. Hållfastheten minskar linjärt vid ökad fuktkvot upp till fibermättnadspunkten som är ca 28–30% (Svenskt trä, 2021). Vid dimensionering av träkonstruktioner beaktas fuktens påverkan på konstruktionen genom tre olika klimatklasser enligt Eurokod 5, SS-EN 1995-1-1. De olika klimatklasserna reducerar bärförmågan hos konstruktionselementen där klimatklass 1 gäller för element som är skyddade från fukt och där den relativa luftfuktigheten endast överstiger 65% under några få veckor per år. Klimatklass 2 gäller för konstruktionselement som är ventilerade och skyddade för direkt nederbörd och endast utsätts för en relativ luftfuktighet på över 85% ett fåtal veckor per år. Klimatklass 3 gäller för konstruktioner som inte är skyddade mot direkt nederbörd. Mellan klimatklass 1 och 3 minskar den dimensionerande bärförmågan med cirka 20%. Reduktionen görs med en modifieringsfaktor som tar hänsyn till klimatklass och lastens varaktighet (Isaksson & Mårtensson, 2019).

2.6.2 Papper

Hållfastheten i papper beror på många faktorer, där sambandet mellan olika fibrer och papprets tillverkning är de viktigaste faktorerna. Vid ökad fukthalt minskar hållfastheten i papper (Kungliga tekniska högskolan, 2005). Papper behandlas vanligen som ett ortotrop material med tre huvudriktningar (Andersson, 2006). De flesta pappersfibrerna är orienterade i maskinens riktning och få fibrer är orienterade i breddriktningen. Enligt Stenberg (2002) är en följd av papperstillverkningen att styvheten i längdriktning vanligtvis är 2–3 gånger högre än styvheten i breddriktningen och cirka 100 gånger högre jämfört med tjockleksriktningen (Stenberg, 2002). När det uppstår ett dragbrott kännetecknas det av långa och trasiga fiber i materialet (Kungliga tekniska högskolan, 2005).

3 Metod och material

3.1 Ånghalt mellan skikt

Wood Tube pappersreglar används till icke bärande innerväggar. För att undersöka hur materialet påverkas i fuktiga klimat görs en utredning kring vilka maximala luftfuktigheter som uppstår i ett inneklimat. Därefter genomförs en experimentell studie där materialet testas i klimat med olika relativa luftfuktigheter.

För att undersöka en potentiell högsta relativ luftfuktighet i ett inneklimat (dvs för fallet icke bärande innervägg) studeras de aktiviteter med högst fuktproduktion, det vill säga matlagning och torkning av tvätt (Pallin et al., 2011; Palmer et al., 2009). Vid matlagning används vanligtvis en köksfläkt som samlar upp det mesta av ångan som produceras och därmed anses torkning av kläder vara den mest fuktkritiska aktiviteten för konstruktionen.

Torkning av kläder kan generera en fuktproduktion på 3500 g för en torkning där 20% av fuktproduktionen sker den första timmen (Pallin et al., 2011). Detta skulle innebära en maximal fuktproduktion på 700 g den första timmen. För en tvättstuga på 25 m³ som utformats i enlighet med gällande krav på ytskikt och ventilation skulle detta generera ett fukttillskott på 22 g/m³ i rummet, se bilaga 2. Den relativa luftfuktigheten i rummet skulle därmed uppnå 100%. Fuktproduktion från torkning av tvätt beror till stor del på mängden tvätt som torkas. Det är rimligt att anta att ett fukttillskott på 700 g/h är ovanligt i mindre rum som tvättstugor då detta medför en hög relativ luftfuktighet som i sin tur bidrar till en försämrad torkningsprocess. Vid stora fuktproduktioner används ofta forcerad ventilation som exempelvis vädring eller portabla fläktar och avfuktare för att säkerställa en bättre torkningsprocess. Det är även vanligt att torktumla en stor mängd tvätt idag vilket minskar fuktproduktionen till följd av torkningen.

Det högsta simulerade värdet på fuktproduktion i bostäder är 300 g/h under en timme och det maximala värdet på fukttillskott har simulerats till cirka 2,8 g/m³ (Pallin et al., 2011). I simulationen har därmed fuktproduktion av denna storleksordning uppkommit i rum med större volym. Ett fukttillskott på 2,8 g/m³ skulle motsvara en fuktproduktion på 300 g/h under en timme i ett rum med en volym på 84 m³, se beräkning i bilaga 2. Bagge & Johansson (2019) har gjort mätningar på den relativa luftfuktigheten inomhus för 36 lägenheter under 2015. Det högsta uppmätta värdet på RF inomhus uppnådde då ett maximalt värde på 60% vid en uteluftstemperatur på 20 °C.

I bilaga 2 har beräkningar gjorts för den relativa luftfuktigheten i ett rum på 25 m³ och en fuktproduktion på 300 g/h. Beräkningarna görs för april, den månaden med högst ånghalt utomhus. Vädringsmånaderna studeras inte. Med de givna parametrarna når klimatet en relativ luftfuktighet på 91%, vilket också anses orimligt högt ur torkningsperspektiv. Luftfuktigheter av denna storlek är mest skadligt för ytskikten i konstruktionen. På grund av ångmotstånd i materialen som omger reglarna kommer klimatet där reglarna befinner sig uppnå en maximal relativ luftfuktighet på 37% vilket inte anses vara skadligt för materialet.

I studier uppmätts dock sällan luftfuktigheter på över 70% i inneklimat på grund av alla faktorer som påverkar den relativa luftfuktigheten inomhus. Det kan därför anses osannolikt att luftfuktigheter på över 70% är vanligt förekommande i ett inneklimat. Fuktbelastningen för reglarna vid 70% RF inomhus beräknas till 34% vid vattenavvisande ytskikt som i tvättstugor och 52% för innerväggar med ett lager gips och tapet.

Klimatdata som används i beräkningarna presenteras i tabell 3:1.

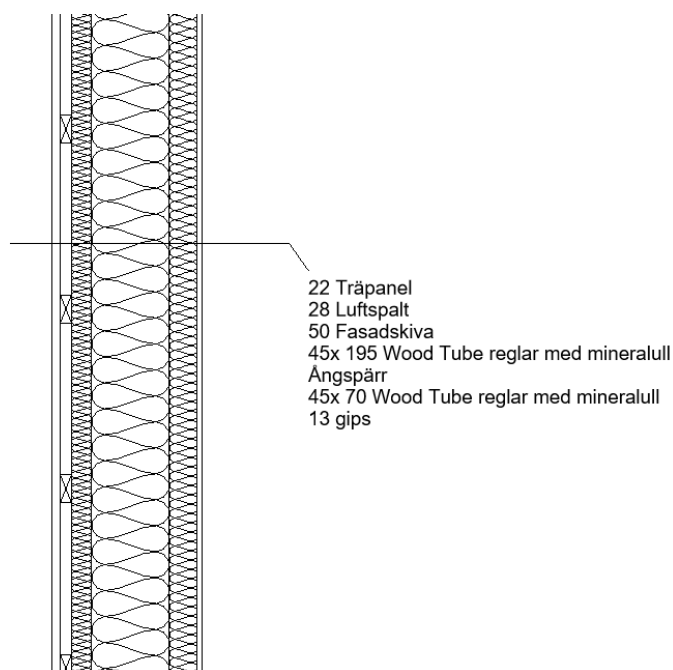
Tabell 3:1 Klimatdata för Lund, april.

Lund, april		Referens
Temperatur (T)	7,7°C	1
Relativ luftfuktighet (RF)	77%	1
Ånghalt utomhus (v_u)	0,00625 kg/m ³	1
Volym (V)	25m ³	-
Luftomsättning (n)	0,504 oms/h	2
Fuktproduktion tvätt (G_1)	0,3 kg/h	3
Vattenavvisande färg (Z)	90 000 s/m	1

- 1) Arfvidsson et al., 2017.
- 2) Boverkets byggregler [BBR], 2011
- 3) Pallin et al., 2011

I framtiden kanske användningsområdet för Wood Tubes pappersreglar utökas för att användas som material i utfackningsväggar. En utfackningsvägg är en fasadvägg där de bärande delarna består av pelare och balkar, reglarna i väggen är därmed inte bärande. En utfackningsvägg är ofta utsatt för en hög relativ luftfuktighet på grund av en stor temperaturskillnad över väggen, därmed är det av stor vikt att säkerställa att fukt känsliga material inte befinner sig i en miljö med för hög relativ fuktighet. För att undersöka vilken fuktbelastning Wood Tubes pappersreglar skulle få i en utfackningsvägg görs en beräkning på ånghalten mellan skikten i konstruktionen.

Klimatdata från Fukthandboken (Arfvidsson et al., 2017) hämtas. Beräkningar görs för en vägg med uppbyggnad enligt figur 3:1 nedan för Lund i februari då det mest kritiska klimatet för väggen är under perioder med hög relativ fuktighet utomhus i kombination med stor temperaturskillnad. Beräkningarna redovisas i bilaga 1. Med de givna parametrarna kommer skiktet med pappersreglar vara i ett klimat med 70% RF. Samma beräkning görs för Karlstad i januari med samma resultat. Värdena används vid den experimentella studien.



Figur 3:1 Utfackningsvägg

3.2 Material och utrustning

Material och utrustning som används vid majoriteten av experimenten presenteras nedan. Kompletterande material för provningarna presenteras under respektive experiment.

- MTS provningsmaskin
- Uttorkningsugn med temperatur 70 °C
- Kern industrivåg 0,5g-3000g
- Klimatboxar, 500x350x350 mm med RF 33%, 75%, 85%
- Klimatrum med RF 60%

3.3 Experimentell studie

För att undersöka hur materialegenskaperna i pappersreglar från Wood Tube förändras i fuktiga klimat konditioneras reglarna i klimatboxar. Klimaten som undersöks är RF 33% som motsvarar ett torrt inomhusklimat, 75% som är kritisk luftfuktighet hos ett flertal organiska material och 85% som maximal luftfuktighet som förväntas uppstå i ett inneklimat. Klimaten skapas genom att placera kärl med saltlösningar i botten av klimatboxarna. För att säkerställa att klimatboxarna håller ett konstant klimat placeras en fläkt som cirkulerar luften i boxen samt en fuktmätare. Reglarnas egenskaper testas även i ett klimat med 60% relativ luftfuktighet som motsvarar ett högt värde på luftfuktighet i ett inomhusklimat. Proverna konditioneras i ett klimatrum med ett konstant klimat med RF 60%. Temperaturen för klimatboxarna, som är placerade i labbet, och för klimatrummet, är ca 20 grader Celsius.

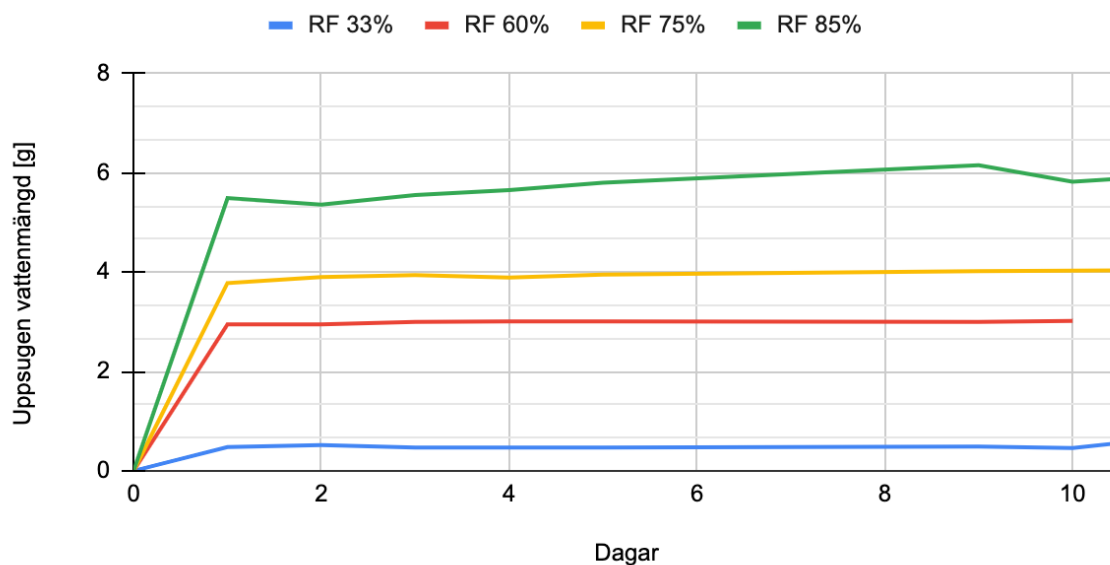
För att skapa en RF på 33% används Magnesiumklorid, $MgCl_2$ som placeras i en behållare i botten av klimatboxarna. För att undvika direkt kontakt mellan proverna och saltlösningen används ett plastgaller. För att skapa klimatet med 75% RF används Natriumklorid, NaCl och för klimatet med 85% RF används Kaliumklorid, KCl (Hedenblad,1987, refererad i Greenspan, 1977).

I figur 3:2 redovisas en bild på en klimatbox och provbitar med RF 33%.



Figur 3:2 Klimatbox

Proverna vägs innan de placeras i de olika klimaten och därefter vägs proverna kontinuerligt tills de inte längre ökar i vikt, då anses proverna vara i jämvikt med klimaten. Varje gång proverna tas ur klimatboxen minskar luftfuktigheten, för att minimera felkällorna mäts vikten på en 10 mm bit, en 100 mm bit och en 150 mm bit tills provernas viktökning avstannat, då anses alla prover med samma mått vara i jämvikt med klimatet, se figur 3:3. När proverna med en storlek på 150 mm är i jämvikt med klimatet påbörjas mätningar av viktökningen hos de 480 mm stora proverna.



Figur 3:3 Viktökning av 150mm provbitar vid konditionering i klimaten med RF 33%, 60%, 75%, 85%.

Provbitarna namnges enligt följande system baserat på vilket klimat som provbitarna befinner sig i, A = 33%, B = 60%, C=75%, D=85% relativ luftfuktighet. Siffran efter första bokstaven indikerar vilken regel som testas av alla i samma RF. De små bokstäverna är förkortningar för vilket experiment som regeln används för. Ett exempel på en provbeteckning är till exempel B2tr – vilket står för provkropp 2 konditionerat i 60% RF för tryckprovning.

Tabell 3:2 Namngivning av prover.

Beteckning	Experiment
mö	Mögelobservation
bö	Böjhållfasthet
tr	Tryckhållfasthet
fu	Fuktkvot
ut	Utdragning av skruv
lä	Längdutvidgning

Samtliga experiment utförs i laboratoriet på LTH.

3.3.1 Fuktkvot

Wood Tube provbit 45x70x10 mm

För att beräkna fuktkvoten i de 4 klimaten konditioneras 10 mm långa provbitar av Wood Tubes pappersregel. Varje provbit vägs och vikten noteras. Tre provbitar placeras i respektive klimat med RF 33%, 60%, 75%, 85%. När provbitarna är i jämvikt med klimatet tas proverna ut och vägs. Proverna placeras därefter i uttorkningsugnen i 70 °C och provet vägs kontinuerligt tills allt vatten avdunstat och proverna inte längre minskar i vikt. Fuktkvoten u beräknas enligt ekvationen nedan.

$$u [\%] = \frac{Vatten [g]}{torrvikt [g]} * 100$$

3.3.2 Längdutvidgning

- Digitalt skjutmått
- Wood Tube provbit 45x70x100 mm

För att utreda hur mycket regelns dimensioner ändras i olika relativa fuktigheter placeras tre 100 mm regler i klimaten med 33%, 60%, 75% och 85% RF. Med ett digitalt skjutmått mäts längd, bredd, höjd och godstjocklek, se figur 3:4. Mätningpunkten markeras på provbiten och regeln vägs. När reglarna är i jämvikt med klimatet tas de ut och nya mått tas vid markeringarna. Längdförändringen noteras.



Figur 3:4 Digitalt skjutmått och provbit med markering.

3.3.3 Kapillärsugning

- Kärll, 2st 500x350x350 mm
- Oklassat trä, 45x70x1000 mm
- Wood Tube provbit, 45x70x50 mm samt 45x70x480 mm

För att kontrollera den kapillära stighöjden för materialet genom tvärsnittet kapas en regel i 7st 50 mm bitar som vägs och staplas vertikalt. Experimentet utförs med två vattenhöjder, 5 mm och 45 mm. I varje kärll placeras en träregel med tvärsnittsmått 45x70 mm, och två 350 mm (7st. 50mm) staplade Wood Tube regler, se figur 3:5 och figur 3:6. För att undersöka eventuella felkällor i den kapillära stighöjden på grund av skarvarna placeras även en 480 mm lång regel i vattenbadet. Den nedersta provbiten placeras med tvärsnittet i direkt kontakt med vattnet och en tyngd på 520 g placeras på de staplade provbitarna för att säkerställa att skarvarna är i direkt kontakt med varandra.



Figur 3:5 Bild efter 7 timmar i 45mm vattenbad



Figur 3:6 Bild efter 6 timmar i 5mm vattenbad.

Provbitarnas vikt kontrolleras i olika tidsintervaller. Tidsintervallet begränsas av laboratoriets öppettider. Efter avslutat experiment vägs de olika reglarna och jämförs med ursprungsvikten. Reglarna placeras i en uttorkningsugn i 70°C tills vikten inte längre minskar, då beräknas fuktkvoten enligt

$$u [\%] = \frac{\text{vatten [g]}}{\text{torrvikt [g]}} * 100$$

Den kapillära stighöjden jämförs även med stighöjden i träregeln och den 480 mm långa pappersregeln.

3.3.4 Översvämning

- Kärll 540x350x1000 mm och 350x350x500 mm
- Stålskena U 70/55
- Gipsskiva Gyproc GNE 13 Normal Ergo
- OSB skiva
- Akrylfog pro, Illbruk
- Wood Tube provbit 45x70x500 mm



Figur 3:7 Väg med dubbel gips.



Figur 3:8 Väg med enkel gips och OSB.

För att studera hur en innervägg uppbyggd av pappersreglar påverkas av en plötslig översvämning byggs tre exempelväggar upp, enkel gips, dubbel gips (se figur 3:7), enkel gips och OSB (se figur 3:8) i enlighet med Wood Tubes montageguide. Väggar placeras i kärll och tätas med silikon runt väggkanterna och stålskenan för att förhindra vattenläckage. Därefter tillsätts vatten på ena sidan av väggen med en vattenhöjd på 45mm respektive 5 mm där skivmaterialen är i kontakt med vattnet. Efter två dygn observeras hur mycket fukt som pappersregeln har utsatts för.

3.3.5 Mögelobservation

- Dino-Lite Digital Microscope Premier.
- Wood Tube provbit 45x70x10 mm
- Oklassat trä 45x70x10 mm

För att observera mögel placeras sex provbitar i RF 60%, 75% och 85%. Pallin et al., 2011 Efter två veckor tas proverna ut och undersöks okulärt och i mikroskop för att kontrollera om det finns påväxt på någon utav provbitarna. På tre utav provbitarna kontrolleras mögel på regelns yta och på tre bitar kontrolleras mögel i tvärsnittet. De områden som undersöks markeras på provbitarna och bilder tas genom mikroskopet och används som jämförelse till nästa observation. En provbit i trä från respektive klimat undersöks också. Eventuell mögelmängd på provbitarnas yta och i tvärsnittet dokumenteras. Undersökningen sker efter två veckor och tre veckor.

3.3.6 Tryckhållfasthet och tryck-E-modul

- Wood Tube provbit 45x70x100 mm

För att undersöka reglarnas tryckhållfasthet och styvhet i tryck konditioneras 100 mm långa regler i respektive klimat och tas ut när reglarna är i jämvikt med klimatet. Längden på reglarna bestämdes till 100 mm för att undvika knäckning. Tvärsnittsarean mäts. Reglarna placeras därefter i MTS provningsmaskin vertikalt, se figur 3:9. Regeln placeras centralt i maskinen och provningsmaskinen trycker regeln på en jämn yta över tvärsnittet. Lasten ökar och regeln komprimeras. Tryckkraft och deformation mäts. Försöken upprepas för tre regler från respektive klimat med RF 33%, 60%, 75%, 85%.



Figur 3:9 MTS provningsmaskin vid mätning av tryckhållfasthet och styvhet vid tryckbelastning.

3.3.7 Böjhållfasthet och E-modul för böjbelastning

- Wood Tube provbit 45x70x480 mm samt 45x70x1000 mm

För att studera regelns böjhållfasthet och böjstyvhet utförs experiment på två längder på reglarna, 480 mm och 1000 mm. Pappersreglarna med längden 480 mm konditioneras i RF 33%, 60%, 75%, 85%. Klimatboxarnas storlek begränsar längden på reglarna. När reglarna är i jämvikt med respektive klimat placeras reglarna som en fritt upplagd balk i MTS provningsmaskin i trepunktsböjning, se figur 3:10. En metallplatta med måtten 30x30 mm placeras för att fördela punktlasten på en jämn yta på balken. Försöken upprepas med tre provbitar av längden 480 mm från respektive klimat 33%, 60%, 75% och 85%. Ytterligare tre provbitar på 1000 mm som är i jämvikt med laboratoriets klimat och tre provbitar som är i jämvikt med klimatrummet med RF 60% testas för att undersöka skillnader på grund av balkarnas längd.



Figur 3:10 Fritt upplagd balk i MTS provningsmaskin. Balklängd 480 mm

3.3.8 Utdragning av skruv

- Essve Boardskruv 3,9x30 mm
- Wood Tube provbit 45x70x150 mm

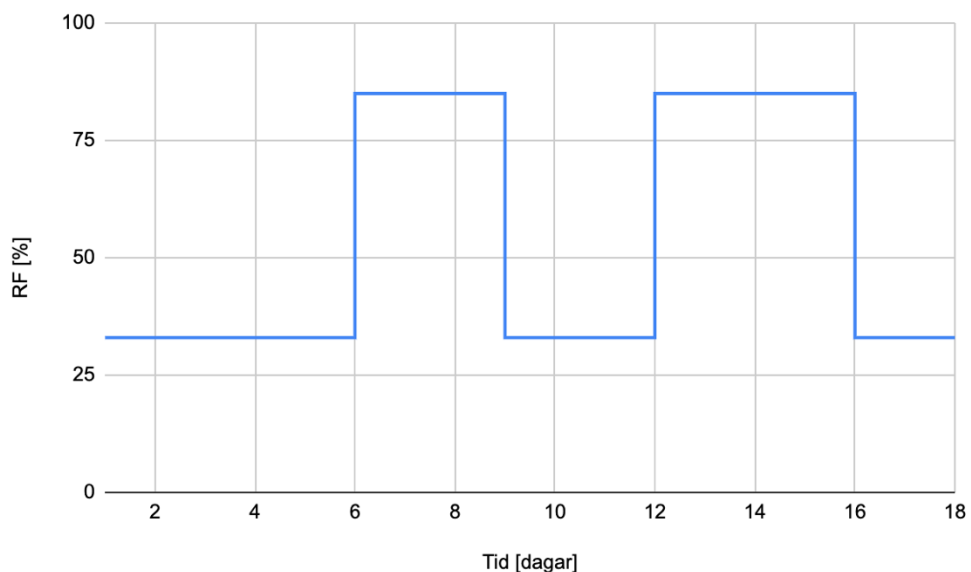
En Essve boardskruv 3,9x30 mm skruvas in i respektive regel, skruven är vald utefter Wood Tube montageguide (Wood Tube, 2022). I experimentet testas tre regler från respektive klimat med vardera en skruv. Reglar tillsammans med skruvarna placeras i klimaten med RF 33%, 60%, 75%, 85%. För att kontrollera att provbitarna är i jämvikt med klimatet vägs bitarna tills viktökningen avstannat. Därefter tas bitarna ut och provas i MTS provningsmaskin. För att få grepp om skruvarna i maskinen används ett verktyg som är anpassat för provningsmaskinen, se figur 3:11. Wood Tube regeln hålls fast i provningsmaskinen genom att den är inskjuten i en stålprofil. Dragkraft och utdragningsdeformation mäts.



Figur 3:11 MTS provningsmaskin för utdragning av skruv.

Ytterligare tre regler testas efter att de har utsatts för varierande fukt, genom att flytta proverna mellan klimatboxarna med 33% och 85% RF. Tiden som reglarna var i de olika klimaten anpassades efter att de alltid skulle vara lika länge i det torra respektive fuktiga klimatet men utan att de behöver flyttas på helgerna. Hur länge proverna fanns i de olika klimaten kan ses i figur 3:12.

Efter konditioneringen genomförs experimenten för utdragning i MTS provningsmaskin för att undersöka hur ett växlande klimat påverkar infästningsskruvarna. Resultaten för samtliga utdragningsförsök antecknas och jämförs med handberäkningar på vilken last som skruvarna kan utsättas för i ett realistiskt fall.



Figur 3:12 Tidsintervall över provbitar som växlat klimat

4 Resultat

Resultat från experimenten presenteras i tabeller, diagram och bilder. Efter varje resultat finns även en kort diskussion kring resultatet. En generell diskussion presenteras i kapitel 5.

4.1 Fuktkvot

Materialets fuktkvot i de olika klimaterna redovisas i tabell 4:1, för provbitarna från samma klimat redovisas även ett medelvärde. Provbitar som konditionerats i ett klimat med RF 33% har en jämviktsfuktkvot på i snitt 4,7 %. För 60%, 75% och 85% RF blir jämviktsfuktkvoten 7,5%, 8,7% respektive 10,8%. Skillnaden mellan fuktkvoten hos provbitarna från samma klimat anses bero på felkällor i mätningarna och försummas här. Slutsatsen dras att fuktkvoten är densamma för varje provbit i samma klimat.

Tabell 4:1 Fuktkvot för provbitar i klimat med olika RF.

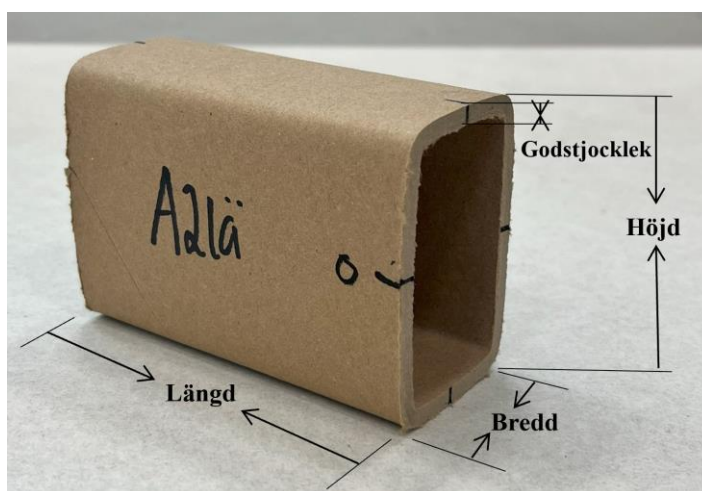
RF	Provbit	Vikt uppfuktad [g]	Vikt efter uttorkning [g]	Fuktkvot [%]
33%	A1fu	5.8	5.6	4.9
	A2fu	5.7	5.5	4.8
	A3fu	5.8	5.5	4.5
Medelvärde		5.8	5.5	4.7
60%	B1fu	5.9	5.5	7.6
	B2fu	5.9	5.5	7.5
	B3fu	5.9	5.5	7.5
Medelvärde		5.9	5.5	7.5
75%	C1fu	6.0	5.5	8.7
	C2fu	5.8	5.4	8.6
	C3fu	5.9	5.4	8.8
Medelvärde		5.9	5.4	8.7
85%	D1fu	6.0	5.4	10.8
	D2fu	6.1	5.5	10.8
	D3fu	6.0	5.4	10.7
Medelvärde		6.0	5.4	10.8

Pappret som reglarna är tillverkade av absorberar fukt från omgivningen, materialet är alltså hygroskopiskt. Viktökningen för provbitarna vid konditioneringen var snabb och efter en dag var de flesta provbitarna i jämvikt med klimatet. Materialet absorberar därmed fukt snabbt. Det konstaterades även att de större provbitarna absorberade vatten lika snabbt som de mindre bitarna. Viktökningen per 10 mm längd i samtliga provbitar var densamma. Därmed sker vattenabsorption både genom materialytan och genom tvärsnittet. Vid 75% RF och en konstant temperatur på 20 °C har trä en jämviktsfuktkvot på 15%. Jämfört med pappren tar därmed trä upp mer vatten från det omgivande klimatet. Detta kan bero på limmet i pappersregeln som fungerar som en ångbroms. Då pappersregeln tillverkas av

tunnlimmade lagerpapper är limmet en stor del av materialet jämfört med exempelvis limträ som också består av tunnlimmade lager, men där limmet är en mindre del av materialet.

4.2 Längdutvidgning

Fuktbetingade rörelser är vanligt för en del material som till exempel trä och träbaserade material. I tabell 4:2 redovisas pappersregelns svällning i olika riktningar efter konditionering i klimat med olika RF. Dimensionsförändringen redovisas i tabell 4:3 och ökningen av materialets dimensioner per procentenhetsökning av RF och fuktkvot redovisas i tabell 4:4. De olika dimensionerna som mäts är längd, bredd, höjd, godstjocklek enligt figur 4:1.



Figur 4:1 Regelns dimensioner

Tabell 4:2 Provbitarnas dimensioner före och efter konditionering i klimat med olika RF.

RF	Provbit	Rumsklimat RF 24%				Efter klimatisering			
		Längd [mm]	Bredd [mm]	Höjd [mm]	Godstjocklek [mm]	Längd [mm]	Bredd [mm]	Höjd [mm]	Godstjocklek [mm]
33%	A1lä	99.1	46.3	69.8	4.3	99.2	46.6	69.9	4.3
	A2lä	99.0	46.1	69.9	4.2	99.2	46.4	70.1	4.3
	A3lä	99.1	46.3	69.9	4.2	99.2	46.7	70.0	4.2
60%	B1lä	98.8	45.4	69.9	4.3	99.0	46.4	70.2	4.2
	B2lä	98.3	46.3	69.9	4.4	98.6	46.7	70.3	4.8
	B3lä	99.3	46.7	69.7	4.8	99.5	47.2	70.3	4.5
75%	C1lä	99.2	44.6	70.0	4.4	99.6	46.0	70.6	4.6
	C2lä	98.6	46.6	70.0	4.6	99.0	47.5	70.4	4.6
	C3lä	99.2	44.3	70.2	4.4	99.6	46.1	70.6	4.5
85%	D1lä	99.2	45.9	70.0	4.4	99.8	47.4	70.6	4.7
	D2lä	99.1	46.1	69.7	4.0	99.7	47.6	70.7	4.7
	D3lä	99.2	45.4	70.2	4.3	99.7	47.3	70.9	4.5

Tabell 4:3 Dimensionsförändring av materialet efter konditionering i klimat med olika RF. Startklimat var 20 grader och 24% RF.

RF	Provbit	Förändring i längd		Förändring i bredd		Förändring i Höjd		Förändring i godstjocklek	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
33%	A1lä	0.1	0.1	0.3	0.65	0	0	0	0
	A2lä	0.1	0.1	0.3	0.65	0.2	0.29	0.1	2.38
	A3lä	0.1	0.1	0.4	0.86	0.1	0.14	0	0
Medelvärde		0.1	0.1	0.33	0.72	0.1	0.14	0.03	0.79
Ökning per %-enhets ökning av RF			0.01		0.08		0.02		0.09
60%	B1lä	0.2	0.2	1.1	2.42	0.3	0.43	0	0
	B2lä	0.3	0.31	0.4	0.86	0.4	0.57	0.4	9.09
	B3lä	0.3	0.3	0.5	1.07	0.5	0.72	-0.3	-6.25
Medelvärde		0.27	0.27	0.67	1.45	0.4	0.57	0.03	0.95
Ökning per %-enhets ökning av RF			0.01		0.04		0.02		0.03
75%	C1lä	0.5	0.5	1.4	3.14	0.6	0.86	0.2	4.55
	C2lä	0.4	0.41	0.8	1.72	0.3	0.43	0	0
	C3lä	0.4	0.4	1.8	4.06	0.4	0.57	0.1	2.27
Medelvärde		0.43	0.44	1.33	2.97	0.43	0.62	0.1	2.27
Ökning per %-enhets ökning av RF			0.01		0.06		0.01		0.04
85%	D1lä	0.6	0.6	1.5	3.27	0.7	1	0.3	6.82
	D2lä	0.6	0.61	1.5	3.25	1	1.43	0.6	15
	D3lä	0.5	0.5	1.9	4.19	0.7	1	0.2	4.65
Medelvärde		0.57	0.57	1.63	3.57	0.8	1.14	0.37	8.82
Ökning per %-enhets ökning av RF			0.01		0.06		0.02		0.14

Den största dimensionsförändringen har skett i materialets godstjocklek, däremot observeras en stor felkälla i de små mätvärdena. Exempelvis har provbit tre, som konditionerats i klimat med RF 60% en minskning av godstjockleken med 6% efter uppfuktning medan provbit två från samma klimat visade en ökning av godstjockleken med 9%. En liten spridning mellan provbitarna i kombination med osäkerhet vid mätningarna anses vara förklaringen till skillnaden.

För provbitar som konditionerats i ett klimat med RF 85% observeras en dimensionsökning i samtliga riktningar. Minst är ökningen i längd och höjd och störst är ökningen i bredd och godstjocklek. I tabell 4:4 sammanställs dimensionsökningen vid ökning av RF med 1%-enhet samt vid ökning av fuktkvoten med 1%-enhet. På grund av för stora felkällor sammanställs inte ökningen av godstjocklek.

Tabell 4:4 Ökning av pappersregelns dimensioner per procentenhetsökning av RF.

Riktning	Ökning per procentenhetsökning av RF [%]	Ökning per procentenhetsökning av fuktkvot [%]
Längd	0,01	0,08–0,14
Bredd	0,04–0,08	0,41–1,03
Höjd	0,01–0,02	0,13–0,2

Jämfört med trä, exempelvis furu och gran, sker en större dimensionsökning hos pappersreglarna. Vid en ökning av fuktkvoten med 1%-enhet för trä ökar dimensionerna med 0,01–0,02% längs fiberriktningen (Burström & Nilvér, 2019). För pappersregeln sker en ökning med 0,08–0,14% längs regeln vid en ökning av fuktkvoten med 1%-enhet.

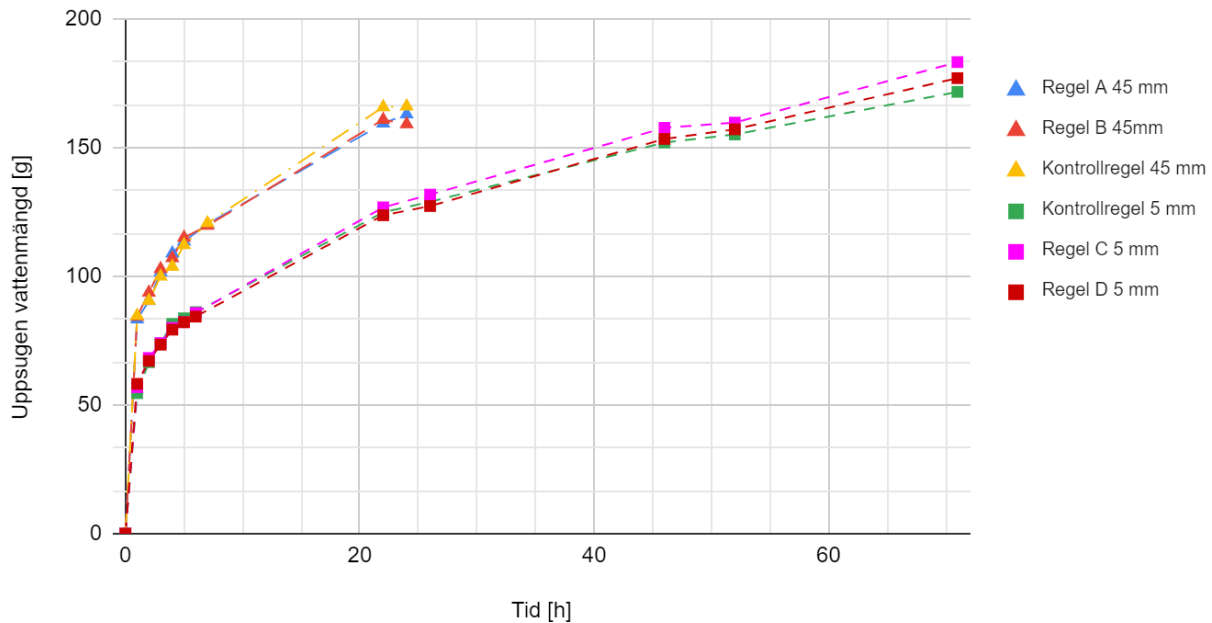
En ökning av längden på en regel kan medföra stora problem i konstruktionen. En träregel med längden 2,5 m ökar längden med ca 3 mm vid en ökning av RF från 24% till 85% (Burström & Nilvér, 2019) medan en pappersregel med samma längd ökar ca 13 mm vid samma klimat. Dimensionsökningar i tvärsnittet är relativt små och anses inte skapa problem för konstruktionen när materialet används som en regel.

För trä finns en stor skillnad i svällning beroende på riktningen. Trä har större fuktbetingande rörelser i tangentiell och radiell riktning än i fiberriktningen (longitudinell riktning). Det finns likheter med pappersregelns fuktbetingande rörelser. Förändringen längs pappret är mindre än förändringen i papprets tjockleksriktning (godstjockleken). Limmet i pappersregeln kan också påverka de fuktbetingande rörelserna. Beroende på hur limmet reagerar i kontakt med fukt kan dimensionerna hos materialet påverkas.

Slutsatsen dras att det finns fuktbetingande rörelser hos materialet. Felkällor i mätningar resulterar i att exakta mått på dimensionsförändringar i tjockleksriktning är svårt att fastställa. Däremot kan slutsatsen dras att materialet sväller mer i papprets tjockleksriktning än längs materialet.

4.3 Kapillärsugning

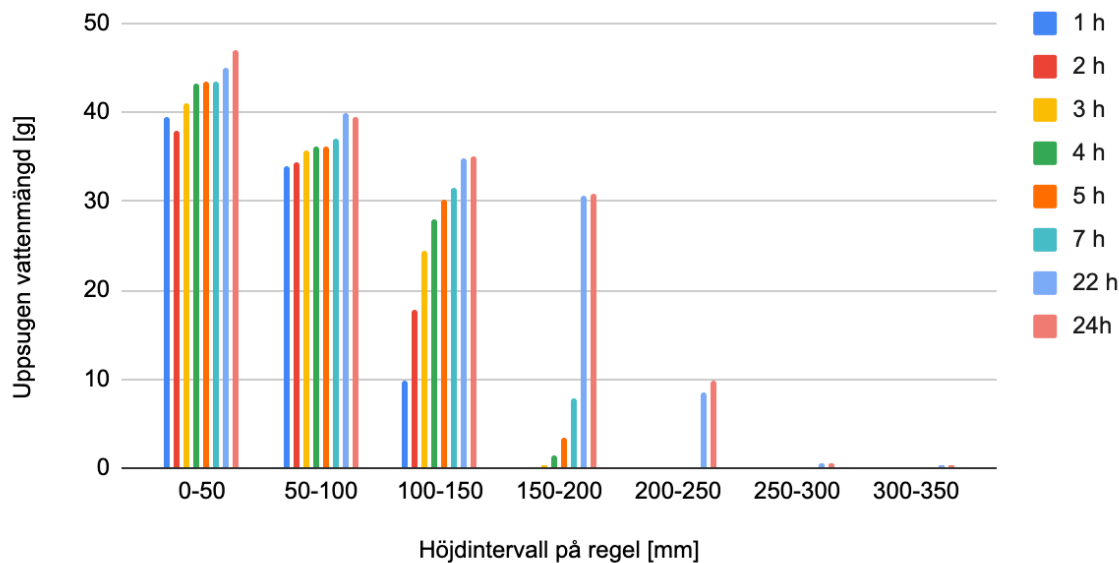
Resultatet över materialets vattenupptagning över tid redovisas i figur 4:2. Experimentet gjordes med två vattenhöjder, 45 mm och 5 mm för att undersöka eventuella skillnader i materialets kapillaritet.



Figur 4:2 Resultat över total vattenupptagning över tid för prov med 5 mm vattenhöjd och 45 mm vattenhöjd

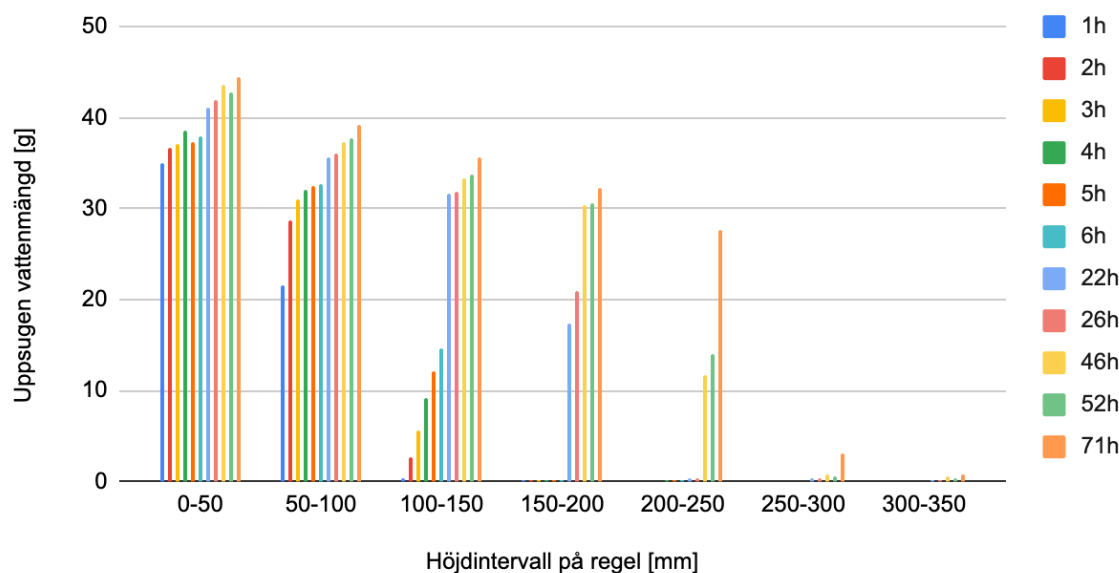
Vattenupptagningen i de kapade reglarna och de okapade kontrollreglarna är densamma och därför dras slutsatsen att skarvarna i de kapade reglarna inte påverkar kapillariteten i materialet. Den kapillära stighöjden kan därmed fastställas genom att studera fuktkvoten i varje 50 mm intervall i de kapade reglarna. Mer vatten absorberades av reglarna som placerades i vattenbadet med 45 mm vattenhöjd än i reglarna i 5 mm vattenhöjd. Detta beror på att materialet absorberade vatten både genom materialytan (dvs från sidan) och genom tvärsnittet (kapillärt). I provningen med 5 mm vattenhöjd absorberades vatten till största del genom tvärsnittet, dvs via kapillaritet.

Provningen med 45 mm vattenbad avbröts efter 24 h då limmet i provbitarna löstes upp och kontaktytan mellan bitarna minskade och bidrog till för stora felkällor i provningen. I figur 4:3 redovisas ett diagram över den uppsugna vattenmängden för varje höjdintervall på regeln över tid för provningen av regel A med 45 mm vattenbad. Efter 22 h hade vattnet stigit 200–250 mm i regeln. I tabell 4:5 redovisas fuktkvoten för varje skikt i regeln. Diagram över den kapillära stighöjden för regel B finns i bilaga 3. Provningarna följer varandra och inga större skillnader observerades.



Figur 4:3 Resultat av vattenupptagning i varje 50 mm provbit i den staplade regeln A vid 45 mm vattenbad

Den kapillära stighöjden för den staplade regeln C med 5 mm vattenbad redovisas i figur 4:4. Efter 3 dygn har vattnet stigit kapillärt 250–300 mm i regeln. Experimentet avslutades efter 71 h då kärlet torkat ut efter helgen. Materialets maximala kapillära stighöjd har inte fastställts av proverna och med stor sannolikhet hade den kapillära stighöjden ökat om provningen fortgått. Resultatet från samma provning med regel D finns i bilaga 3. Proverna följer varandra och inga större skillnader har observerats. Fuktkvoten för samtliga höjdintervaller i proverna har sammanställts i tabell 4:5.



Figur 4:4 Vattenupptagning i varje 50 mm provbit i den staplade regeln C vid 5 mm vattenbad

Tabell 4:5 Fuktkvot för staplade provbitar i 45 mm vattenbad och 5 mm vattenbad

Höjdintervall [mm]	Fuktkvot 0 h [%]	Fuktkvot 1 h [%]	Fuktkvot 3 h [%]	Fuktkvot 5 h [%]	Fuktkvot 24 h [%]
Regel A 45mm vatten					
50-100	5.8	124.5	130.9	132.9	144.6
100- 150	5.1	39.3	90.0	110.4	126.9
150- 200	4.4	4.6	5.8	16.1	111.5
200- 250	3.9	4.0	4.2	4.4	38.1
250- 300	4.7	4.9	5.0	5.1	6.7
300- 350	4.8	4.8	4.9	5.1	6.1
Regel B 45mm vatten					
50-100	5.6	121.9	129.0	133.6	144.2
100- 150	5.0	39.2	89.5	110.4	127.2
150- 200	4.1	4.3	6.1	14.2	110.7
200- 250	4.2	4.4	4.5	4.8	31.3
250- 300	4.7	4.8	4.9	5.1	6.8
300- 350	4.7	4.7	4.8	5.0	6.0
Regel C 5mm vatten					
50-100	6.1	81.8	115.2	120.4	132.7
100- 150	6.0	7.2	26.0	48.9	117.6
150- 200	5.4	5.6	5.7	5.8	72.1
200- 250	4.1	4.2	4.3	4.4	5.6
250- 300	3.0	3.1	3.1	3.2	4.0
300- 350	4.7	4.8	4.8	4.9	5.2
Regel D 5mm vatten					
50-100	6.1	6.4	117.1	142.4	131.7
100- 150	6.0	3.7	21.5	121.2	116.8
150- 200	5.5	3.7	5.8	42.1	60.8
200- 250	4.5	3.6	4.8	4.8	6.1
250- 300	3.1	3.6	3.3	3.8	4.2
300- 350	4.3	3.6	4.4	4.3	4.9

Fuktkvoten för provbitarna i 45 mm vattenbad är högre än för provbitarna i 5 mm provningen. Efter uttorkning beräknades fuktkvoten i provbitarna på höjdintervallet 50–100 mm till cirka 144%. Detta beror på att den höga vattenhöjden möjliggjort en vattenupptagning genom materialytan och tvärsnittet. Provbitarna i höjdintervallet 0–50 mm löstes upp i provningen med 45 mm vattenhöjd vilket bidrog till en stor felkälla. Ett foto på provbitarna redovisas i figur 4:5.



Figur 4:5 Nedersta provbitarna (0-50mm) efter 45 mm vattenbad i 24h.

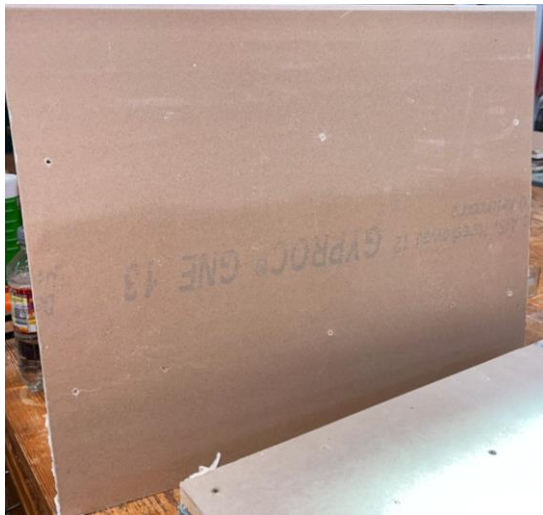
Den kapillära stighöjden i kontrollreglarna avläses till 238 mm för 45 mm provningen och 254 mm för 5 mm provningen efter respektive maxtid. För att bromsa avdunstningen av vattnet i kärnen under nätterna placerades ett glas över delar av kärnen. Detta medförde en ökad relativ luftfuktighet i behållaren med reglarna och anses vara anledningen till en viktökning av provbitarna högst upp då inget vatten observerades okulärt genom tvärsnittet i provbitarna.

Slutsatsen dras att vatten stiger kapillärt i materialet. Höga vattennivåer i direkt kontakt med materialet skadar materialet. Materialets tvärsnitt bör inte vara i direkt kontakt med vatten. Den kapillära stighöjden i materialet är inte fastställt, men efter 71 h med 5 mm vattennivå observeras en kapillär stighöjd på 250–300 mm.

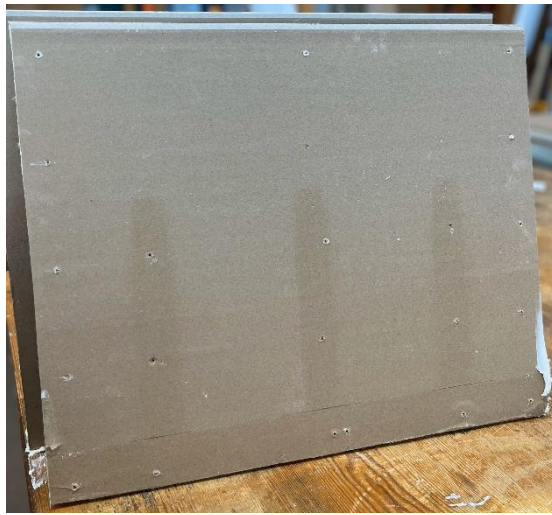
4.4 Översvämning

Vid översvämningförsöken placerades väggen i ett vattenbad på 5 mm under två dygn med konstant vattennivå, därefter tillsättes inget nytt vatten tills kärlet torkat ut efter ytterligare två dagar. Väggen demonterades därefter och kapillariteten mellan materialen observerades. I väggen med enkel gips steg vattnet kapillärt längs stålskenan och reglarna på baksidan av väggen vilket visar att vattnet stiger kapillärt mellan material. Den synliga kapillära stighöjden mellan materialen observerades till cirka 250 mm.

För väggelementet med dubbel gips observerades en kapillaritet mellan gipsskivorna. I figur 4:6 redovisas fukten på baksidan av det yttersta gipslagret. Bakom det andra gipslagret steg vattnet kapillärt längs med reglarna. Resultatet redovisas i figur 4:7. En ökad fukthalt hos reglarna i båda väggelementen observerades efter experimenten men inga synliga förändringar av reglarnas dimension och styvhet konstaterades.



Figur 4:6 Yttre gipsskiva i väggelement med 2 lager gips



Figur 4:7 Inre gipsskiva i väggelement med 2 lager gips

För väggelementet med ett lager gips och OSB observerades en kapillaritet mellan skivmaterialen. Vatten steg kapillärt genom OSB skivans tvärsnitt som varit i kontakt med vatten men ingen fuktvandring genom gipsskivan till OSB skivan och vidare till pappersreglarna kunde fastställas. I figur 4:8 och 4:9 redovisas skivmaterialen efter experimentet.



Figur 4:8 Gipsskiva i väggelement med gips och OSB



Figur 4:9 OSB-skiva i väggelement med gips och OSB

En kapillaritet hos samtliga material i väggelementen observerades. Den största kapillariteten har skett längs pappen på gipsens baksida. Kapillaritet mellan material beror på ett kapillärt undertryck som skapas mellan materialen. Detta gör att vatten stiger mellan material och i materialet. Både gipsskivan som använts vid provningen och OSB-skivan är fuktkänsliga material med en kapillaritet. Vid översvämning som medför skador likt utfört experiment påverkas samtliga element i väggen. I mögelmätningar på gips har det konstaterats att gips kan utsättas för påväxt vid uttorkning redan efter 48 h på grund av en långsam uttorkning där fukt tillsätts i materialet inifrån och skapar ett gynnsamt klimat för mögelpåväxt (Horner et al., 2001 refererad i Johansson et al., 2005). Även trä visar en försämring av egenskaper vid ökad fukthalt och riskerar att utsättas för påväxt vid höga fukthalter under lång tid.

Slutsatsen dras att egenskaperna i samtliga material i väggelementen försämras vid översvämning. Med största sannolikhet krävs ett byte av flera material efter en översvämning. Däremot har inga större skador observerats på reglarna bakom väggelementen. Mer omfattande mätningar på fuktbelastningen hos reglarna krävs för att fastställa hur egenskaperna i pappersreglarna förändras vid översvämning med 5 mm vattennivå. Uttorkning av materialet är också intressant att studera för att undersöka om reglarna behöver bytas vid en översvämning eller om egenskaperna återställs efter uttorkning.

Översvämningstestet med 45 mm vatten fick avbrytas då vattennivån skapade ett för högt tryck mot väggelementet och tätningen mellan stålskenan och kärlet brast vilket medförde att vatten läckte in i stålskenan och nådde reglarna.

4.5 Mögelobservation

Mögelobservation gjordes efter två veckor och tre veckor för materialprover som placerats i klimat med RF 75% och RF 85%. Samma punkt på proverna observerades och foton togs för att undersöka eventuella förändringar. Inget mögel observerades på proverna. Materialprover från klimatet med RF 60% undersöktes vid första mätningen men då proverna från de fuktigare klimatet inte visade någon påväxt gjordes inte fler mätningar på provbitarna från klimatet med RF 60%. I figur 4:10 och 4:11 redovisas bilder på ett materialprov från klimatet med RF 85% med förstöringsfaktor 50. Då materialet är tillverkat av återvunna fibrer finns det stor spridning av färg och fibrer i materialet vilket försvårar observationen. Fler bilder från mögelobservationen finns i bilaga 4.



Figur 4:10 Mögelobservation 3/5, RF 85% förstöringsfaktor 50.



Figur 4:11 Mögelobservation 11/5, RF 85% förstöringsfaktor 50

Tre provbitar i trä placerades i varje klimat, inget mögel observerades på någon av proverna. För att konstatera en kritisk luftfuktighet hos pappersregeln krävs mer omfattande mätningar. Då organiska material utsätts för mögelpåväxt vid klimat med hög RF kommer pappersreglarna troligen utsättas för påväxt om materialet befinner sig i en gynnsam miljö under en lång tid. Detta är dock inget som observerats i studien, troligtvis på grund av den för korta tiden.

Mögelsporer har inte inokulerats på proverna i studien, mögelsporer från luften i laboratoriet kan dock ha kontaminerat proverna. För att säkerställa att det inte finns någon tidig påväxt på proverna krävs en undersökning av proverna med en större

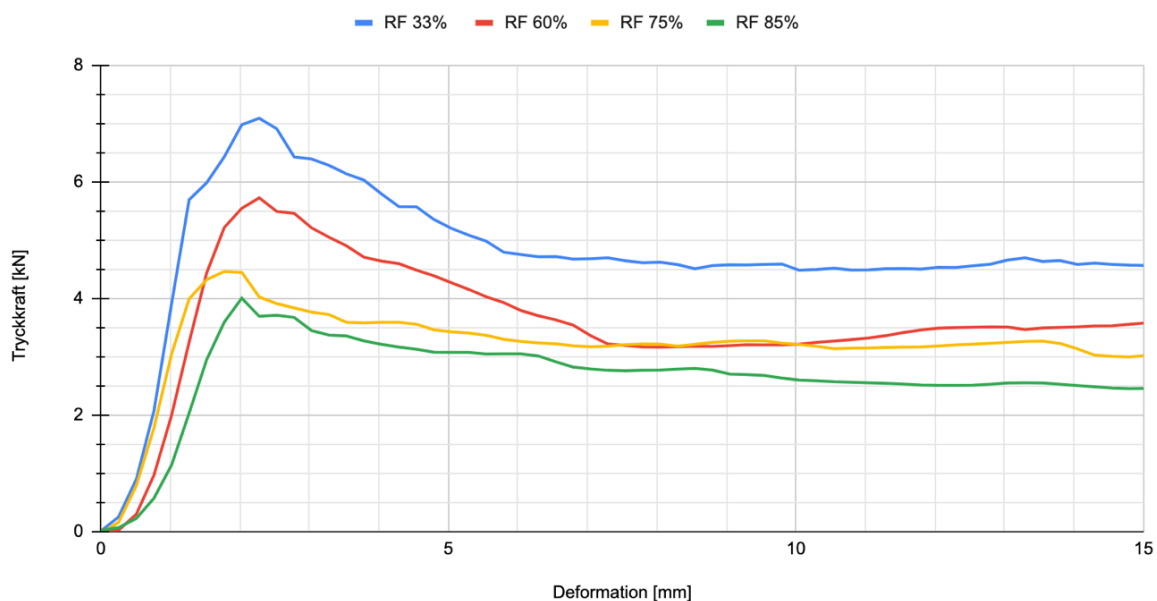
förstoringsfaktor. Slutsatsen dras att ingen synlig påväxt observerats på provbitarna i RF 60%, 75% och 85% efter tre veckors konditionering.

4.6 Tryckhållfasthet och E-modul i tryck

För att undersöka tryckhållfastheten hos materialet valdes längden på provbitarna till enbart 100 mm för att undvika knäckning. I figur 4:12 redovisas en provbit efter utfört experiment där bilden redovisar hur materialet buktats i skarvarna vid deformation. I figur 4:13 redovisas ett diagram för skillnaden i arbetskurvan (kraft mot förskjutning) mellan provbitarna som hade konditionerats i de olika klimaten med RF 33%, 60%, 75% och 85%.

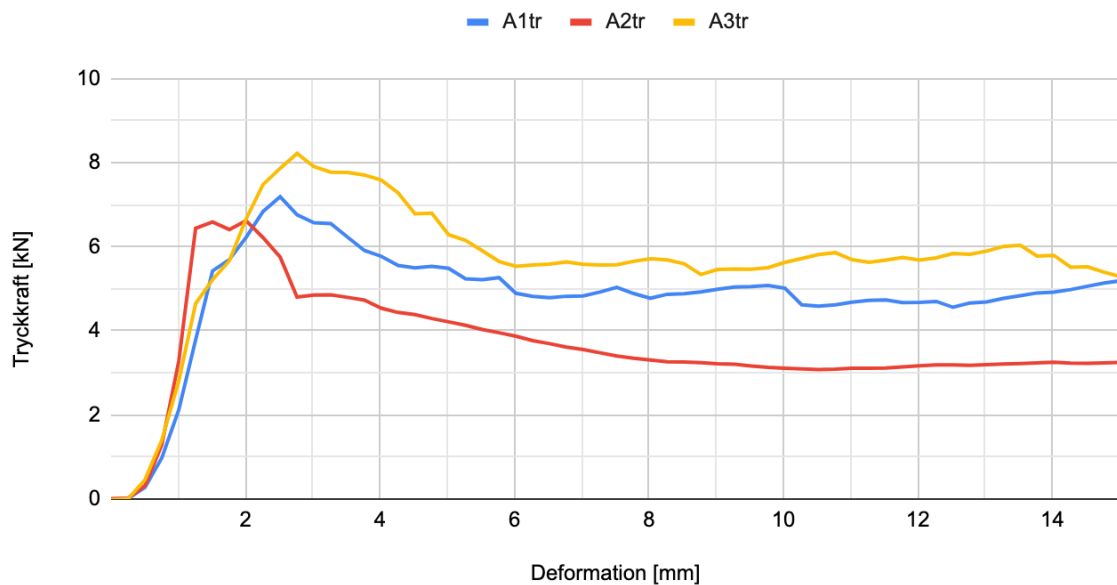


Figur 4:12 Provbit efter experiment

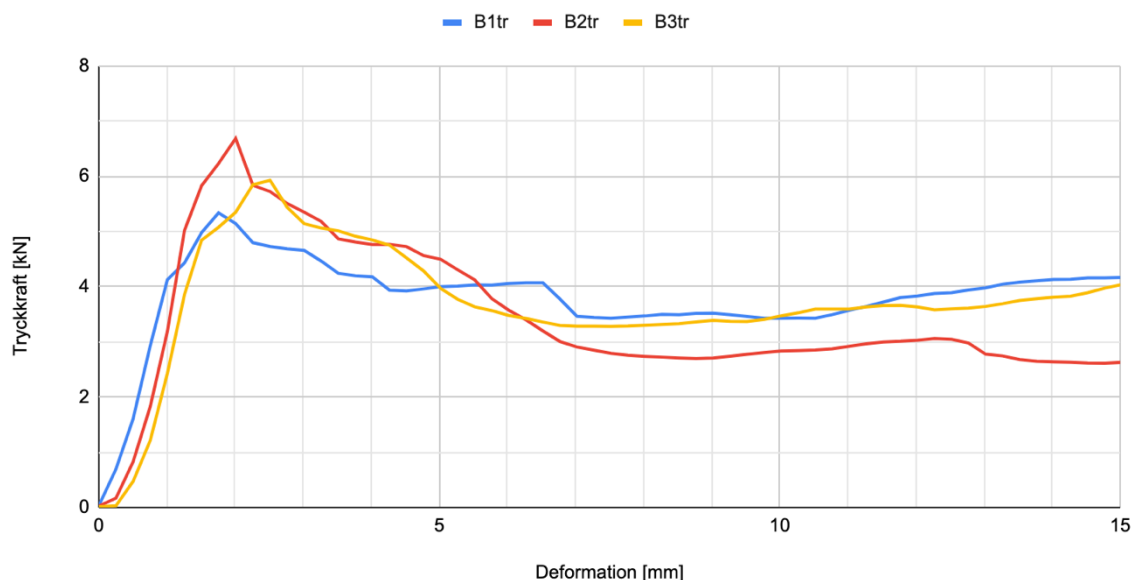


Figur 4:13 Arbetskurva som kraft mot deformation i tryckförsök. Medelvärde av 3 prover per klimat

Diagrammet visar en tydlig minskning av tryckkapaciteten vid en ökning av RF. Vid 33 % RF är medelvärdet för den maximala kraften 7,1 kN medan medelvärdet för proverna i RF 60% har minskat till ca 5,7 kN. Vid en ökning av RF till 75% minskar den maximala tryckkraften till ett medelvärde på 4,5 kN och vid RF 85% är medelvärdet för regelns tryckhållkapacitet 4 kN. Materialet har under provningarna buktat i skarvarna på pappen vilket anses vara materialets svaga punkt. Detta bidrar även till skillnader mellan proverna från samma klimat. Nedan i figur 4:14 och 4:15 presenteras diagram för samtliga provbitar i RF 33% och 60% där det visas att spridningen är relativt begränsad. I bilaga 4 redovisas även diagram för reglarna i RF 75% och 85%.

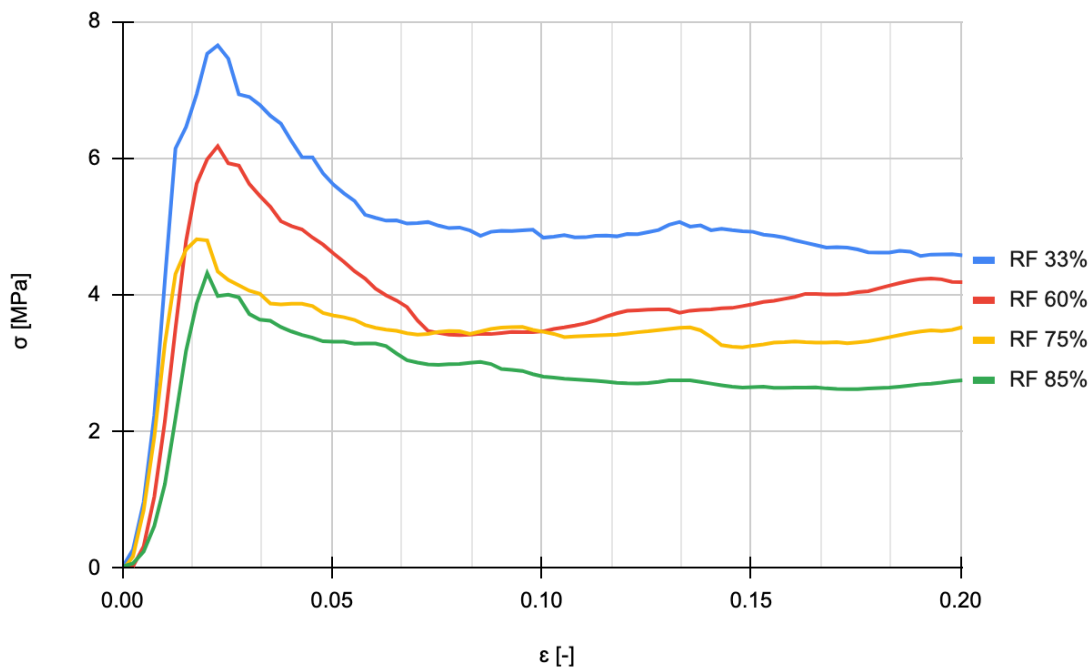


Figur 4:14 Arbetskurva för tre 100 mm pappersreglar vid RF 33%.



Figur 4:15 Arbetskurva för tre 100 mm pappersreglar vid RF 60%.

Med hjälp av mätresultat (tryckkraft och deformation) samt provernas tvärsnittsarea och längd kan även arbetskurvan plottas som spännings-töjnings-diagram så att tryckhållfastheten och styvheten i tryck kan bestämmas, se figur 4:16.



Figur 4:16 Spännings-töjningsdiagram för 100 mm långa pappersreglar i klimat med RF 33%, 60%, 75%, 85%.

Tryckhållfastheten definieras som maximala spänningen under testet och här syns det tydligt att tryckhållfastheten minskar med ökad fuktkvot för proverna. Tryckhållfastheten minskar från ca 7,5 MPa (33% RF) till ca 4,3 MPa (85%RF). Materialets elasticitetsmodul beräknas som lutningen av den linjära delen av grafen i figur 4:16, se beräkningar i bilaga 5. I tabell 4:6 redovisas värden på elasticitetsmodulen hos materialet vid olika RF.

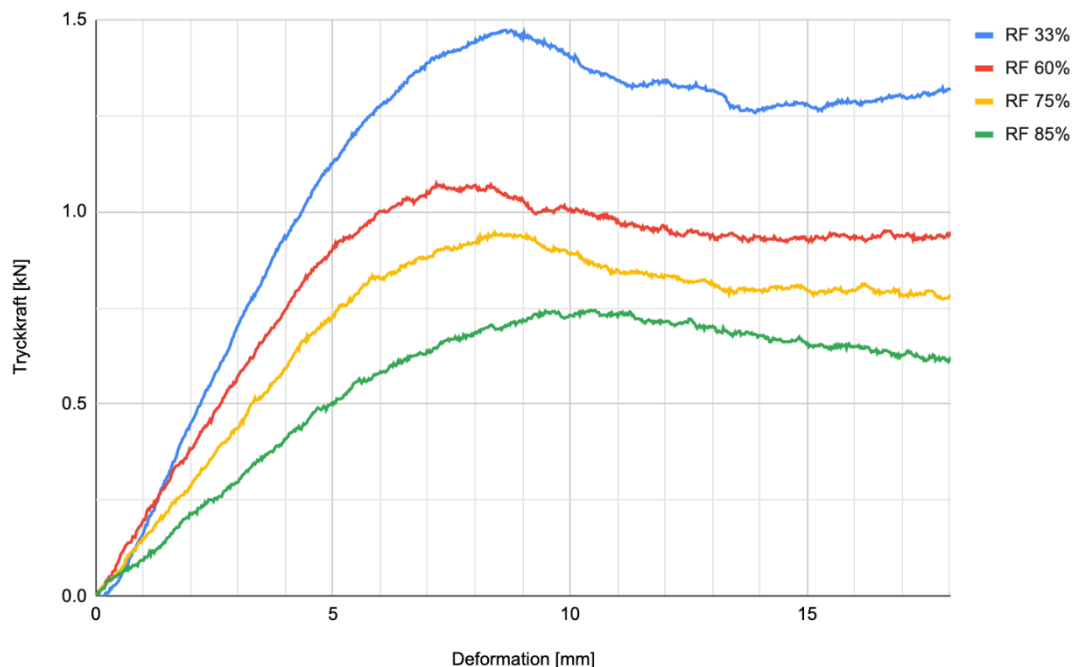
Tabell 4:6 Tryckhållfasthet och Elasticitetsmodul för pappersreglar vid RF 33%, 60%, 75%, 85%.

RF	Elasticitetsmodul [MPa]	σ_{\max} [MPa]
33%	782	7,5
60%	535	6,2
75%	540	4,8
85%	380	4,3

Vid en ökning av RF från 33% till 85% minskar materialets elasticitetsmodul med cirka 50%. Jämfört med trä påverkas styvheten mer i en pappersregel vid fuktiga klimat. Vid dimensionering av träkonstruktioner reduceras hållfastheten med ca 20% för delar av konstruktionen där träet har en medelfuktkvot på över 20% (Isaksson & Mårtensson, 2019). Vid 85% RF har de flesta träslag en fuktkvot på ca 18% (Svenskt trä, 2021). Träets bärförmåga och styvhet påverkas alltså mindre av en ökad RF än pappersreglarna. Däremot syns en spridning mellan proverna och för att säkerställa materialets tryckhållfasthet och elasticitetsmodul krävs mer omfattande mätningar. Diagram med arbetskurvan (last-deformation) för samtliga provbitar i klimat med RF 75% och 85% finns i bilaga 5.

4.7 Böjhållfasthet

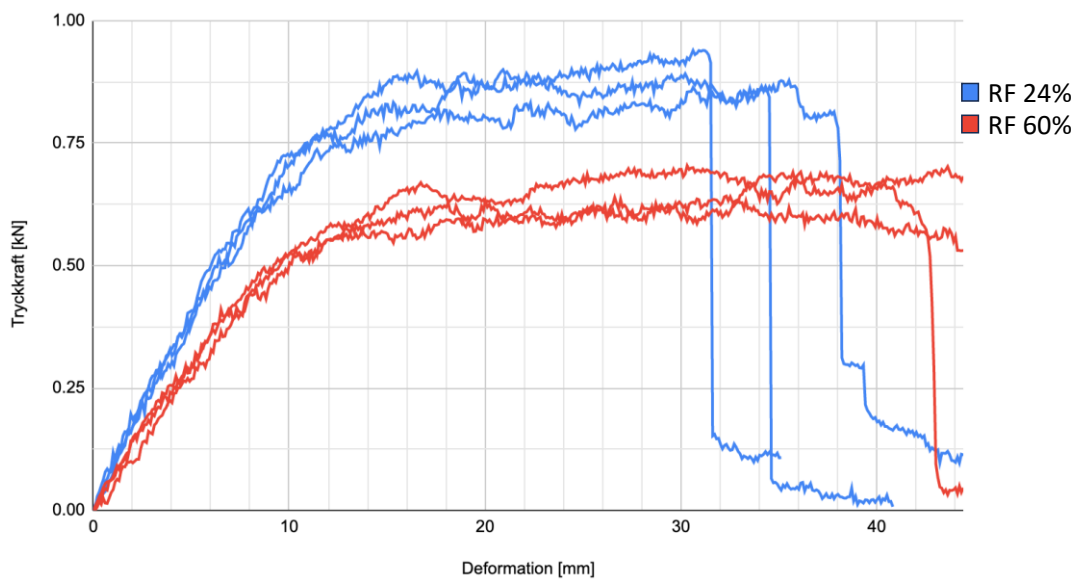
För att undersöka hur materialets böjmotstånd påverkas vid en ökad fuktkvot testades tre 480 mm balkar från vardera klimat i trepunktsböjning. Resultatet över skillnaden mellan balkarna redovisas i figur 4:17.



Figur 4:17 Arbetskurva från trepunktsböjning med 480 mm långa balkar som konditionerats i klimaten med RF 33%, 60%, 75%, 85%.

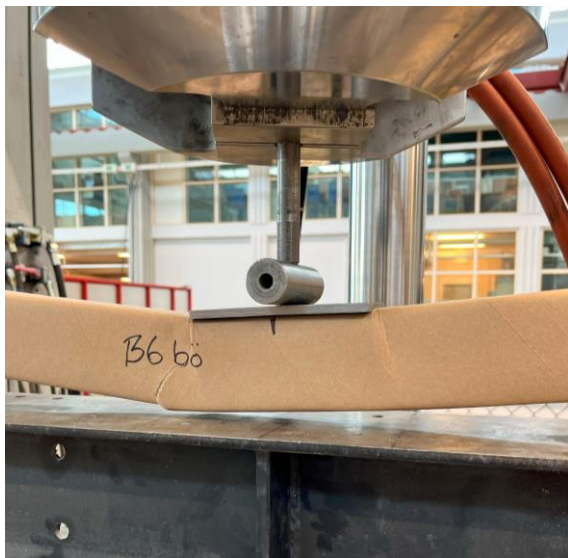
Diagrammet visar en minskning av regelns kapacitet i böjning vid en ökad RF. Vid 33 % RF är balkens medelvärde på maximal last 1,47 kN medan medelvärdet vid RF 60% har minskat till ca 1,07 kN. Vid en ökning av RF till 75% minskar den maximala lasten till ett medelvärde på 0,94 kN och vid RF 85% är medelvärdet 0,74 kN. Balkarna som konditionerats i respektive klimat har en likvärdig böjkapacitet vilket ses i en ganska låg spridning. I bilaga 6 redovisas diagram för samtliga provbitar i RF 33%, 60%, 75%, 85%.

I figur 4:18 redovisas diagram för skillnaden mellan tre 1000 mm långa balkar i jämvikt med laboratoriets RF på 24% som noga kontrollerats under lång tid, och tre 1000 mm långa balkar från klimatrummet med RF 60%.



Figur 4:18 Arbetskurva i trepunktsböjning för 1000 mm balkar som konditionerats i RF 24% och 60%.

Resultatet av experimentet visar att 1000 mm balkarna som var i jämvikt med klimatet i laboratoriet på RF 24% klarar en maximal punktlast mellan 0,8–0,9 kN. Balkarna gick till brott vid en nedböjning på 31 mm, 34 mm och 37 mm. För de tre balkarna som konditionerats i klimatrummet på 60% uppmättes maximal punktlast till 0,62–0,66 kN och en av balkarna gick till brott vid 41 mm nedböjning medan de två andra balkarna fortsatte att deformeras utan synligt brott. I figur 4:19 redovisas ett foto på en av balkarna som gick till brott. I figur 4:20 redovisas ett foto på en balk som deformerades.



Figur 4:19 Brott på 1000 mm balk vid RF 60%.



Figur 4:20 Deformation på 480mm balk vid RF 75%

I tabell 4:7 presenteras resultat av beräkningar av elasticitetsmodul och maximal spänning (böjhållfasthet) för de 480 mm långa balkarna i olika klimat. I tabell 4:8 redovisas resultat av beräkningar av elasticitetsmodul och maximal spänning för de 1000 mm långa balkarna i olika klimat. En stor felkälla i värdena observeras på grund av hur balkarna beter sig vid brott. Utförligare studier krävs för att fastställa materialets elasticitetsmodul, se beräkningar i bilaga 6.

Tabell 4:7 Elasticitetsmodul och maximal spänning för 480 mm balkar vid RF 33%, 60%, 75%, 85%.

RF	Elasticitetsmodul [MPa]	σ_{\max} [MPa]
33%	1066	20,7
60%	887	14,9
75%	717	12,7
85%	487	10,4

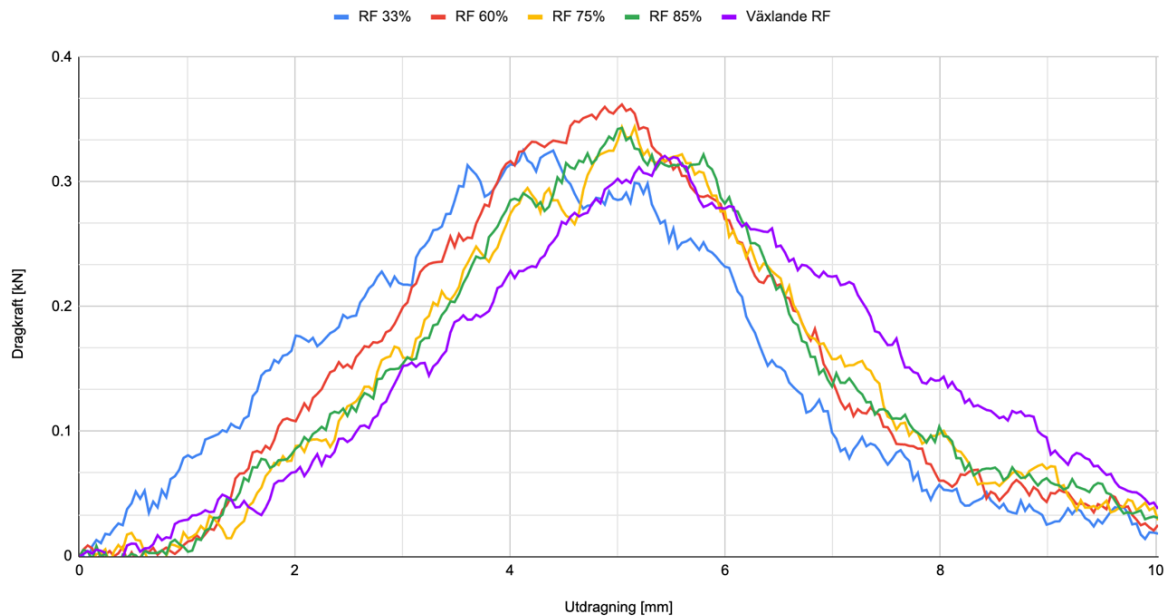
Tabell 4:8 Elasticitetsmodul och maximal spänning för 1000 mm pappersbalkar vid RF 24% och 60%.

RF	Elasticitetsmodul [MPa]	σ_{\max} [MPa]
24%	4433	27,7
60%	2886	20,7

Vid en ökad relativ luftfuktighet minskar balkens böjhållfasthet. Detta observeras för 480 mm balkar och 1000 mm balkarna. Samtliga av de långa balkarna gick till brott vid RF 24% medan endast en av balkarna gick till brott vid RF 60%, detta kan medföra stora felkällor och behöver undersökas närmare. Minskningen av böjhållfasthet vid ökad RF kan dock konstateras och slutsatsen dras att pappersregelns böjhållfasthet och böjstyvhet minskar i klimat med högre RF.

4.8 Utdragning av skruv

Materialets utdragshållfasthet för olika klimat testades för att undersöka hur en ökad fuktkvot påverkar infästningar i materialet. I figur 4:21 redovisas skillnaden i utdragskraft mellan provbitar som konditionerats i klimat med RF 33%, 60%, 75%, 85% samt provbitar som har växlat mellan klimaten RF 33% och 85%. För provningen används Essve boardskruv 3,9x30 mm.



Figur 4:21 Arbetskurva vid utdragsförsök för provbitar som konditionerats i RF 33%,60%,75%, 85% och provbitar som har växlat mellan RF 33% och 85%.

Diagrammet visar ingen minskning av utdragskraft vid en ökad RF. Vid 33% RF är medelvärdet för utdragningen 0,32 kN medan medelvärdet för RF 60% är 0,36 kN. Vid ökning av RF till 75% och 85% är medelvärdet av utdragskraften 0,34 kN. Provbitarna som har växlat RF mellan 33% och 85% har ett medelvärde på 0,32 kN. Till skillnad från böj- och tryckförsöken ses här alltså ingen minskning av kapacitet vid uppfuktning. En förklaring till att infästningen inte har påverkats av en ökad RF är att pappret är ett levande material som sväller vid uppfuktning. Dimensionsökningen i materialet till följd av uppfuktningen kanske kan komplettera för den minskande hållfastheten i pappret. Slutsatsen dras att pappersregelns utdragshållfasthet inte påverkas av ett klimat med högre RF, men det rekommenderas fler tester för att bekräfta detta.

I bilaga 7 redovisas diagram för samtliga provbitar i RF 33%, 60%, 75%, 85% samt provbitarna som växlat mellan 33% och 85%.

5 Generell diskussion

Wood Tubes byggregel i papper används till icke bärande innerväggar, den del av konstruktionen i en byggnad som är mest skyddad från fukt. För rum som utsätts för höga luftfuktigheter, exempelvis tvättstugor, ställs krav på vattenavvisande ytskikt. Detta ytskikt fungerar som en ångbroms och medför att reglarna i väggen inte utsätts för klimat med högre fuktighet än cirka 35% vilket inte anses vara riskfyllt för materialet. Däremot kan den relativa luftfuktigheten i bostäder uppnå 60–70% under perioder med hög ånghalt i utomhusluften. För innerväggar utan vattenavvisande ytskikt innebär det att reglarna kan befinna sig i ett klimat på cirka 50%.

I studien klimatiseras reglarna till 60% RF för att undersöka hur materialets egenskaper påverkas i inneklimat med höga luftfuktigheter under lång tid. En minskning av materialets tryckhållfasthet och böjhållfasthet och små fuktbetingande rörelser noteras. Däremot påverkas inte infästningar i materialet och ingen mikrobiell påväxt konstateras under försökstiden (3 veckor). Studien tar inte hänsyn till uttorkning vilket kan påverka materialets kapacitet och har stor betydelse vid undersökning av fuktbelastning inuti konstruktioner.

För att undersöka hur pappersreglarna påverkas som material i exempelvis utfackningsväggar krävs studier på hur materialet beter sig vid relativa luftfuktigheter kring 70%. Provbitarna klimatiseras till RF 75% för att undersöka hur materialets egenskaper förändras. En tydlig minskning i både böj- och tryckhållfasthet noteras medan infästningar i materialet inte påverkas. Ingen mikrobiell påväxt noteras på proverna vid RF 75% (under 3 veckors tid). Vid klimatet 70% RF upptar materialet fukt från omgivningen till en fuktkvot på 8,7%. Den upptagna fukten i regeln bidrar till en dimensionsökning som kan ge konsekvenser vid anslutningar i konstruktionen. För att utreda hur en dimensionsökning i materialet påverkar anslutningar i konstruktionen krävs vidare studier.

Direkt fukt påverkar däremot pappersregeln avsevärt. Pappersregeln absorberar en stor mängd vatten kapillärt genom tvärsnittet. Regeln bör därför förvaras i miljöer som är skyddade mot direkt fukt. Experiment visar att materialet är känsligt mot stora mängder fukt i direkt kontakt med materialet. Vid extrema förhållanden kan materialet uppnå fuktkvoter på 140% vilket medför att materialet tappar sin hållfasthet och löses upp. Vid mer realistiska förhållanden, exempelvis vid översvämning mot en vägg uppbyggd med pappersreglar påverkas inte materialet avsevärt. Vid 5 mm översvämning observeras fuktvandring mellan materialen där fukten transporteras med hjälp av kapillärkraft mellan materialen. Däremot observeras ingen fukttransport genom skruvhålen och ingen större försvagning hos reglarna konstateras. Det är inte säkert att det krävs ett byte av reglarna vid en översvämning.

Reglarna bör skyddas från direkt kontakt med fukt då materialet har en stor kapillaritet. När materialet är inbyggt i väggen är det skyddat av väggens skivmaterial om en plötslig översvämning sker, så länge vattnet inte läcker in i stålskenan och når reglarnas tvärsnitt. En vidare utredning kring hållfasthet vid ett växlande klimat krävs för att utreda hur regelns hållfasthet påverkas av ett växlande klimat.

Stora likheter mellan pappersregeln och trä noteras. Likt trä är pappersregeln ett hygroskopiskt material, däremot absorberar trä mer fukt hygroskopiskt än pappersregeln vilket anses bero på limmet i pappregeln som fungerar som en ångbroms i materialet. Vid

en ökad fuktkvot visar materialen på fuktbetingade rörelser, pappersregelns dimensioner ökar mest i tjockleksriktningen likt trä. Materialens bärförmåga påverkas vid ökad fuktkvot, pappersregelns hållfasthet reduceras mer än för trä. Båda materialen är organiska men i studien observerades ingen mikrobiell påväxt efter tre veckor i 85% relativ luftfuktighet. Mer omfattande studier krävs för att säkerställa pappersregelns kritiska luftfuktighet.

6 Förslag till framtida studier

Likt många nya byggmaterial som framställs på ett miljövänligt sätt finns många områden att utreda i syftet att främja utvecklingen för materialen. En del förslag på framtida studier om materialet presenteras nedan.

- **Uttorkning** – Många byggmaterial försämras i fuktiga miljöer men för att säkerställa materialets beständighet är det intressant att studera uttorkning av materialet och materialets sorptionskurva.
- **Lim** – En stor del av materialet består av lim mellan papperslagerna. För att undersöka materialets fuktbeständighet närmare krävs mer omfattande studier på limmet och hur det reagerar på fukt.
- **Bärande delar** – Studier kring hur materialet kan utvecklas för att bli en del av bärande delar är intressant för att utöka materialets användningsområde.
- **Elasticitetsmodul** – Studier för att fastställa materialets elasticitetsmodul.
- **Mögelstudier** – Materialets kritiska luftfuktighet är inte fastställt. Utförliga mögelstudier krävs för att säkerställa materialets kritiska luftfuktighet.
- **Utdragning** – Mer omfattande studier kring materialets kapacitet i infästningar är intressant, där skjivning och dragkraft beaktas.

7 Slutsats

Wood Tubes pappersreglar är liksom många organiska material känsliga mot fukt. Pappersreglarna absorberar vatten både kapillärt och hygroskopiskt. Jämfört med trä har materialet en mindre jämviktsfuktkvot vid samma relativa luftfuktighet. Vid en ökad fuktkvot i pappersreglarna sväller materialet, störst dimensionsökning sker i materialets (papprets) tjocklek och minst längs regelns (papprets) längd. Vid en ökad luftfuktighet reduceras materialets tryck- och böjhållfasthet samt styvhet i tryck och böjning, men ingen förändring av utdragshållfasthet har konstaterats. Ingen mögelpåväxt har observerats efter 3 veckor i RF 60%, 75%, 85%. Vid en simulerad översvämning konstaterades ingen synlig fuktpåverkan på reglarna.

Slutsatsen är att pappersregelns egenskaper påverkas av fukt, men inom materialets tänkta användningsområde i icke bärande innerväggar förväntas ingen försämring av materialets egenskaper. Vid användning av materialet i delar av konstruktionen med högre fuktbelastning, till exempel i utfackningsväggar eller som bärande delar i konstruktionen behöver materialets reducerade bärförmåga beaktas.

8 Referenslista

- Andersson, T. (2006). *A small deformation model for elasto-plastic behavior of paper and paperboard*. [Doktorsavhandling, Lund Universitet].
<https://www.solid.lth.se/fileadmin/hallfasthetslara/utbildning/examensarbete/TFHF5115.pdf>
- Arfvissson, J., Harderup, L.E., & Samuel, I. (2017). *Fukthandboken* (Upplaga 4.). AB Svenska Byggtjänst.
- Avfall Sverige. (2022). *Materialåtervinning*. <https://tinyurl.se/702>
- Bagge, H., Johansson, D. (2019). *Hygrotermiska förhållanden i inomhusluften*. SBUF 12538. <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/850a0517-6dec-4e6b-858b-2ddf4ddfc58f/FinalReport/SBUF%2012538%20Slutrapport%20Hygrotermiska%20f%C3%B6rh%C3%A5llanden%20i%20inomhusluften.pdf>
- Ban S. (2013, Maj). *Emergency shelters made from paper* [Video file]. TED Conferences.
https://www.ted.com/talks/shigeru_ban_emergency_shelters_made_from_paper
- Boverket (2018). *Hållbart byggande med minskad klimatpåverkan*. Boverket.
<https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2018/hallbart-byggande-med-minskad-klimatpaverkan.pdf>
- Boverket (2010). *Teknisk status i den svenska bebyggelsen*. Boverket.
<https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2011/betst-teknisk-status.pdf>
- Boverkets byggregler* (BFS 2014:3). Boverket.
https://www.boverket.se/contentassets/a9a584aa0e564c8998d079d752f6b76d/konsoliderad_bbr_2011-6.pdf
- Boverket. (2023). *Högst tillåtna fukttillstånd*. Boverket.
<https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/regler-om-byggande/boverkets-byggregler/fuksakerhet/hogsta-tillatna-fukttillstand/>
- Burström, P.G. & Nilvér, K. (2019). *Byggnadsmaterial: tillverkning, egenskaper och användning*. (Tredje upplagan). Lund: Studentlitteratur.
- Eckhart, R. (2021). *Recyclability of cartonboard and carton*. [Graz University].
<https://www.procarton.com/wp-content/uploads/2022/01/25-Loops-Study-English-v3.pdf>
- Hedenblad, G. (1987). *Inverkan av temperaturen på RF hos mättade saltlösningar*.
- Hubbe, M. A. (2007). *Water and papermaking 1. Fresh water components* (Serie serienummer). North Carolina State University. (PDF) ^{Water} [and papermaking 1. Fresh water components \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net/publication/266211111)

Isaksson, T., & Mårtensson, A. (2019). *Byggkonstruktion Regel och Formelsamling*. (4:2). Studentlitteratur AB.

Johansson, P., Samuelson, I., Ekstrand-Tobin, A., Mjörnell, K., Sandberg, P I., Sikander, E. (2005). *Kritiskt fukttillstånd för mikrobiell tillväxt på byggmaterial – Kunskapsammanfattning*. Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut. (SP Rapport 2005:11). <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962303/FULLTEXT01.pdf>

Kristersson, M., Halldin- Ankarberg, E., Rosengren, Å., Lantz, C., Hansson, E. (2017). *Plast och papper i kontakt med livsmedel*. Livsmedelsverket. <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/publikationsdatabas/rapporter/2017/2017-nr-17-del-1-plast-och-papper-i-kontakt-med-liv-riskhantering.pdf>

Kungliga tekniska högskolan. Institutionen för fiber- och polymerteknologi (2005). *The Ljungberg textbook Paper physics*. Stockholm

Magnusson, M. (2020). *Framställning av utrustning för inspänd torkning av pappersark*. Karlstad universitet. <http://kau.diva-portal.org/smash/get/diva2:1445091/FULLTEXT01.pdf>
Använder hennes källor,

Pallin S., Johansson P., Hagentoft C. (2011). *Stochastic modeling of moisture supply in dwellings based on moisture production and moisture buffering capacity*. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology. [P_1221.pdf \(aivc.org\)](#)

Palmer J., Orme M., Pane G., Ridley I., Davies M., Oreszczyn T., Lowe R. (2009). *Investigation of Ventilation Effectiveness BD2523*. Communities and Local Government Publications. https://www.researchgate.net/publication/332703776_Investigation_of_Ventilation_Effectiveness

Pandy, K. K. (1998). *A Study of Chemical Structure of Soft and Hardwood and Wood Polymers by FTIR Spectroscopy*. [A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy - Pandey - 1999 - Journal of Applied Polymer Science - Wiley Online Library](#)

Polygon. (u.å). *Fukttransport*. <https://www.polygongroup.com/sv-SE/Nyheter/fukttransport/>

Saint Gobain., (2023). *Gyproc Handbok 10 – system för lättbyggnadsteknik*. https://www.gyproc.se/sites/gypsum.nordic.master/files/gyproc-site/document-files/Handbok_SE/Handbok10_v2/HB10_FUKT.pdf

Sandin, K. (2010). *Praktisk byggnadsfysik*. (Upplaga 1:10). Studentlitteratur, Lund.

Scallan, A. M. (1977). *The accommodation of water within pulp fibres*. [Fibre–Water Interactions in Paper-Making \(ncsu.edu\)](#)

Shigeru Ban Architects (1986). *Alvar Aalto Echibition*. Shigeru Ban Architects. http://www.shigerubanarchitects.com/works/1986_alvar-aalto/index.html

Shigeru Ban Architects (1995). *Paper House*. Shigeru Ban Architects. http://www.shigerubanarchitects.com/works/1995_paper_house/index.html

SkogsSverige. (2021). *Papperstillverkning*. <https://www.skogssverige.se/papper/fakta-om-papper-och-massa/massa-och-papperstillverkning/papperstillverkning>

SCB. (2022). *Återvinning av förpackningar i Sverige*. Statiska myndigheten <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/atervinning-av-forpackningar-i-sverige/>

Svenskt trä (2021). *Fukt och belastning*. [Fukt och belastning - TräGuiden \(traguiden.se\)](https://www.traguiden.se)

Svenskt trä (2021). *Mikroorganismer* <https://www.traguiden.se/om-tra/material-et-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/bestandighet1/mikroorganismer1/>

SWT paper. (u.å). *Förvarningsråd för papper och kartong*. <https://swtpaper.se/sv/custom-made-paperboard/forvaringsrad-for-papper-och-kartong/>

United Nations Development Programme. (2022). <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/>

Wood Tube (2022). *Montageguide för wood tube reglar*. https://wood-tube.com/wp-content/uploads/2022/10/Wood-Tube-montageguide_20220613_compressed.pdf

Wood Tube. (2023). *Träfibers resa från skog till pappersregel*. <https://wood-tube.com/sv/hallbarhet/>

Yik. F. W. H., Sat P. S. K., Niu J. L. (2004). *Moisture Generation trough Chinese Household Activities*. Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1420326X04040909>

9 Bilagor

Bilaga 1 Ånghalt mellan skikt i yttervägg

d = Tjocklek	[m]
λ = Värmekonduktivitet.	[W/mK]
R = Värmemotstånd	[m ² K/W]
T = Temperatur	[°C]
ΔT = Temperaturskillnad	[°C]
Z = Ångmotstånd	[s/m]
v = Ånghalt	[g/m ³]
Δv = Skillnad i ånghalt	[g/m ³]
v_s = Mättnadsånghalt	[g/m ³]

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{W/mK}]$$

$$\Delta T = \frac{R}{\Sigma R} (T_i - T_u) \quad [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta v = \frac{Z}{\Sigma Z} (v_i - v_u) \quad [\text{g/m}^3]$$

$$RF = \frac{v}{v_s} \quad [-]$$

Tabell 9:1 Glaserberäkning av ånghalt mellan skikt i yttervägg, Lund, i februari. Klimatdata och materialegenskaper är hämtat från Fukthandboken (Arfvidson et al., 2017) och beräkningsmodellen är hämtad ur Praktisk byggnadsfysik (Sandin., 2010).

Tabell 9:1 Glaserberäkning av ånghalt mellan skikt i yttervägg, Lund februari.

Skikt	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ΔT [°C]	T [°C]	v_s [g/m ³]	Z [s/m]	Δv [g/m ³]	v [g/m ³]	RF [-]
					2.2	5.64			4.96	0.88
Utsida			0.04	0.078						
					2.28	5.68			4.96	0.87
Fasad skiva	0.05	0.03	1.67	3.26			2564.10	0.0009		
					5.54	7.03			4.96	0.71
Min ull + papp	0.195	0.037	5.27	10.30			10000	0.0036		
									4.97	0.37
Ångspärr	-	-	-	-	-	-	3000000	1.0780		
					15.84	13.47			6.046	0.36
Min ull+ Papp	0.07	0.037	1.89	3.70			3590	0.0013		
					19.53	16.79			6.047	0.35
Gips	0.013	0.12	0.11	0.21			2700	0.001		

					19.75	17.08			6.048	0.35
Inne			0.13	0.25						
					20	17.28			6.048	0.35
Summa			9.11				3018853			
							.846			

Tabell 9:2 Glaserberäkning av ånghalt mellan skikt i yttervägg, Karlstad i januari. Klimatdata och materialegenskaper är hämtat från Fukthandboken (Arfvidson et al., 2017) och beräkningsmodellen är hämtad ur Praktisk byggnadsfysik (Sandin., 2010).

Tabell 9:2 Glaserberäkning av ånghalt mellan skikt i yttervägg, Karlstad januari.

	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	ΔT [°C]	T [°C]	v_s [g/m ³]	Z [s/m]	Δv [g/m ³]	v [g/m ³]	RF
					-3.5	3.67			3.3397	0.91
			0.04							
				0.109						
Utsida					-3.4	3.3			4.9632	1.504
Fasad skiva	0.05	0.03	1.667				2564.1	0.002	3.342	0.711
				4.557						
Min ull + papp	0.195	0.037	5.27		1.2	4.7	10000	0.009	3.351	0.274
				14.41						
Ångspärr							3000000	2.691	6.042	0.364
					15.6	12.22				
Min ull+ Papp	0.07	0.037	1.892	5.173			3589.74	0.003	6.046	0.358
					20.7	16.59				
Gips	0.013	0.12	0.108	0.296			2700	0.002	6.048	0.35
					21	16.88				
Inne			0.13	0.355	21.4					
					20	17.28			6.048	0.35
Summa			9.107				3018854			

Bilaga 2 Ånghalt mellan skikt i innervägg

Tabell 9:3 Klimatdata för Lund, april.

Lund, april		Referens
Temperatur (T)	7,7°C	1
Relativ luftfuktighet (RF)	77%	1
Ånghalt utomhus (v_u)	0,00625 kg/m ³	1
Volym (V)	25m ³	-
Luftomsättning (n)	0,504 oms/h	2
Fuktproduktion tvätt (G_1)	0,3 kg/h	3

- 1) Arfvidsson et al., 2017.
- 2) Boverkets byggregler [BBR], 2011
- 3) Pallin et al., 2011

Nedan ekvation används vid beräkning av inneklimatet vid en fuktproduktion på 300 g/h (Sandin, 2010).

$$v_i = v_u + \frac{G}{n \cdot V} (1 - e^{-nt})$$

Där:

v_i = ånghalt inomhus	[g/m ³]
v_u = ånghalt utomhus	[g/m ³]
G = fuktproduktion	[g/h]
n = luftomsättning	[oms/h]
V = volym	[m ³]
T = tid	[h]

Volym för rum med fuktproduktion 300 g/h och fuktillskott 2,8 g/m³.

$$V = \frac{G}{n \cdot v} (1 - e^{-n \cdot t}) = \frac{0,3}{0,504 \cdot 0,0028} (1 - e^{-0,504 \cdot 1}) = 84,2 \text{ m}^3$$

Ånghalt inomhus och relativ luftfuktighet vid fuktproduktion 300 g/h.

$$G = \frac{300 \text{ g}}{\text{h}}$$

$$v_i = v_u + \frac{G}{n \cdot V} (1 - e^{-nt}) = 0,00625 + \frac{0,3}{0,504 \cdot 25} (1 - e^{-0,504 \cdot 1}) = \frac{0,01567 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

$$RF = \frac{v_i}{v_s} = \frac{15,67}{17,28} = 0,907 \approx 91\%$$

Ånghalt inomhus och relativ luftfuktighet vid fuktproduktion 700 g/h.

$$G = 700 \frac{\text{g}}{\text{h}}$$

$$v_i = v_u + \frac{G}{n \cdot V} (1 - e^{-nt}) = 0,00625 + \frac{0,7}{0,504 \cdot 25} (1 - e^{-0,504 \cdot 1}) = 0,02824 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$RF = \frac{v_i}{v_s} = \frac{28,24}{17,28} = 1,63 \approx 100\%$$

Beräkning av ånghalt mellan skikt.

$$\begin{aligned}
 Z &= \text{ångmotstånd} && [\text{s/m}] \\
 v &= \text{ånghalt} && [\text{g/m}^3] \\
 \Delta v &= \text{skillnad i ånghalt} && [\text{g/m}^3] \\
 v_s &= \text{mättnadsånghalt} && [\text{g/m}^3]
 \end{aligned}$$

$$\Delta v = \frac{Z}{\Sigma Z} (v_1 - v_2) \quad [\text{g/m}^3]$$

$$RF = \frac{v}{v_s} \quad [-]$$

Resultaten för de olika väggarna presenteras i Tabell 9:4-9:10 där beräkningen görs för en väggtyp med vattenavvisande ytskikt och en väggtyp med vanlig tapet.

Tabell 9:4 Fukt i innervägg mellan tvättrum och vardagsrum med innervägg uppbyggd med 1 lagars gips och tapet. RF 70%.

Tapet					
RF 70%	Z [s/m]	Δv [g/m ³]	v [g/m ³]	vs [g/m ³]	RF [-]
Tvättrum			12.096	17.28	0.700
Tapet	1000	0.864	11.232		0.650
Gips	2700	2.333	8.899		0.515
Regel					
Gips	2700	2.333	6.566		0.380
Tapet	1000	0.864	5.702		0.33
Vardagsrum			5.702		
Summa	7400				

Tabell 9:5 Fukt i innervägg mellan tvättrum och vardagsrum med innervägg uppbyggd med 1 lagars gips och vattenavvisande färg. RF 70%.

Vattenavvisande färg					
RF 70%	Z [s/m]	Δv [g/m ³]	v [g/m ³]	vs [g/m ³]	RF [-]
Tvättrum			12.096	17.28	0.700
Färg	90000	5.969	6.127		0.355
Gips	2700	0.179	5.948		0.344
Regel					
Gips	2700	0.179	5.769		0.334
Tapet	1000	0.066	5.702		0.33
Vardagsrum			5.702		
Summa	96400				

Tabell 9:6 Fukt i innervegg mellom tvättrum og vardagsrum med innervegg oppbygd med 1 lagers gips og tapet. RF 91%, fuktproduksjon 300g/h. Lund, april.

Tapet					
RF 91%					
G=300g/h	Z [s/m]	Δ v [g/m³]	v [g/m³]	vs [g/m³]	RF [-]
Tvättrum			15.67	17.28	0.907
Tapet	1000	1.347	14.323		0.829
Gips	2700	3.637	10.686		0.618
Regel					
Gips	2700	3.637	7.049		0.408
Tapet	1000	1.347	5.702		0.33
Vardagsrum			5.702		
Summa	7400				

Tabell 9:7 Fukt i innervegg mellom tvättrum og vardagsrum med innervegg oppbygd med 1 lagers gips og vattenavvisende färg. RF 91%, fuktproduksjon 300 g/h. Lund, april.

Vattenavvisande färg					
RF 91%					
G=300g/h	Z [s/m]	Δ v [g/m³]	v [g/m³]	vs [g/m³]	RF [-]
Tvättrum			15.67	17.28	0.907
Färg	90000	9.306	6.364		0.368
Gips	2700	0.279	6.085		0.352
Regel					
Gips	2700	0.279	5.806		0.336
Tapet	1000	0.103	5.702		0.33
Vadagsrum			5.702		
Summa	96400				

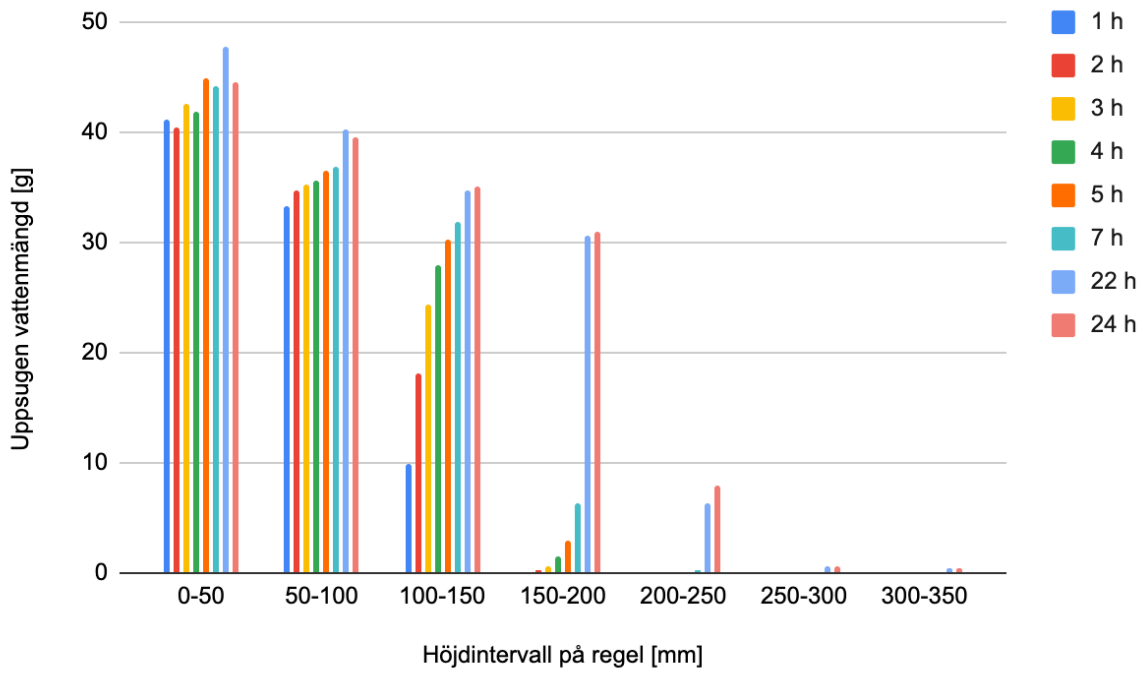
Tabell 9:8 Fukt i innervegg mellom tvättrum og vardagsrum med innervegg oppbygd med 1 lagers gips og tapet. RF 100%, fuktproduksjon 700 g/h.

Tapet					
RF 100% G= 700 g/h	Z [s/m]	Δv [g/m³]	v [g/m³]	vs [g/m³]	RF [-]
Tvättrum			17.28	17.28	1.000
Tapet	1000	1.565	15.715		0.909
Gips	2700	4.224	11.491		0.665
Regel					
Gips	2700	4.224	7.267		0.421
Tapet	1000	1.565	5.702		0.33
Vardagsrum			5.702		
Summa	7400				

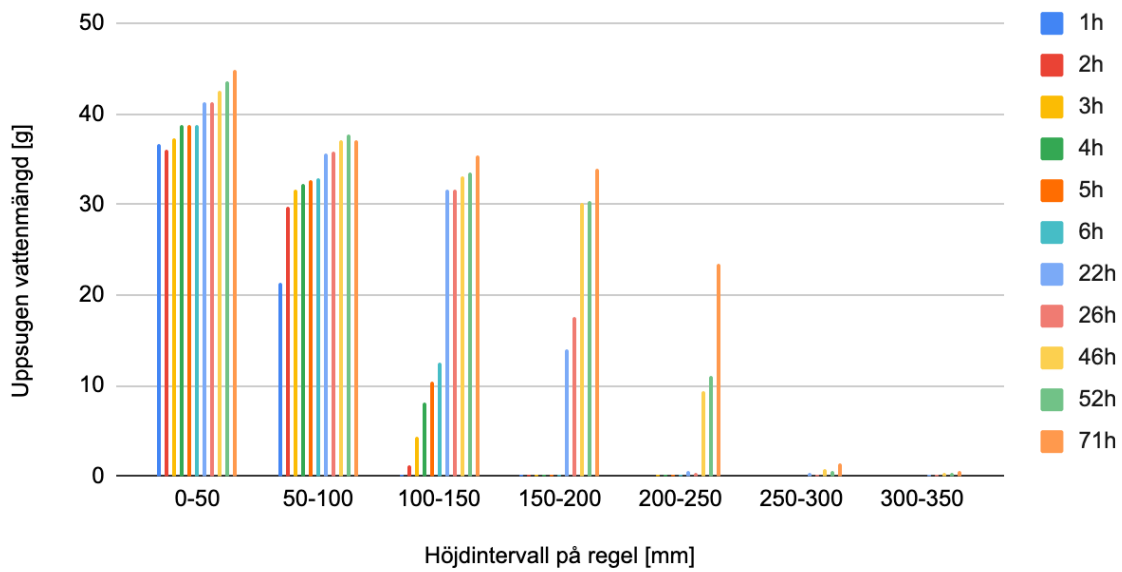
Tabell 9:9 Fukt i innervegg mellom tvättrum og vardagsrum med innervegg oppbygd med 1 lagers gips og vattenavvisende färg. RF 100%, fuktproduksjon 700 g/h.

Vattenavvisande färg					
RF 100% G= 700 g/h	Z [s/m]	Δv [g/m³]	v [g/m³]	vs [g/m³]	RF [-]
Tvättrum			17.28	17.28	1.000
Färg	90000	10.809	6.471		0.374
Gips	2700	0.324	6.147		0.356
Regel					
Gips	2700	0.324	5.822		0.337
Tapet	1000	0.120	5.702		0.33
Vadagsrum			5.702		
Summa	96400				

Bilaga 3 Kapillärsugning



Figur 9:1 Resultat över vattenupptagning i varje 50mm provbit i den staplade regeln B vid vattenhöjd 45 mm



Figur 9:2 Vattenupptagning i varje 50 mm provbit i den staplade regeln D vid 5 mm vattenbad.

Bilaga 4 Mögelobservation



Figur 9:3 Mögelobservation materialyta datum: 3/5, provbit c10mö. RF 75%



Figur 9:4 Mögelobservation materialyta datum: 11/5, provbit c10mö. RF 75%.



Figur 9:5 Mögelobservation tvärsnitt, datum: 3/5 2023, provbit c2mö. RF 75%



Figur 9:6 Mögelobservation tvärsnitt, datum: 11/5, provbit c2mö. RF 75%

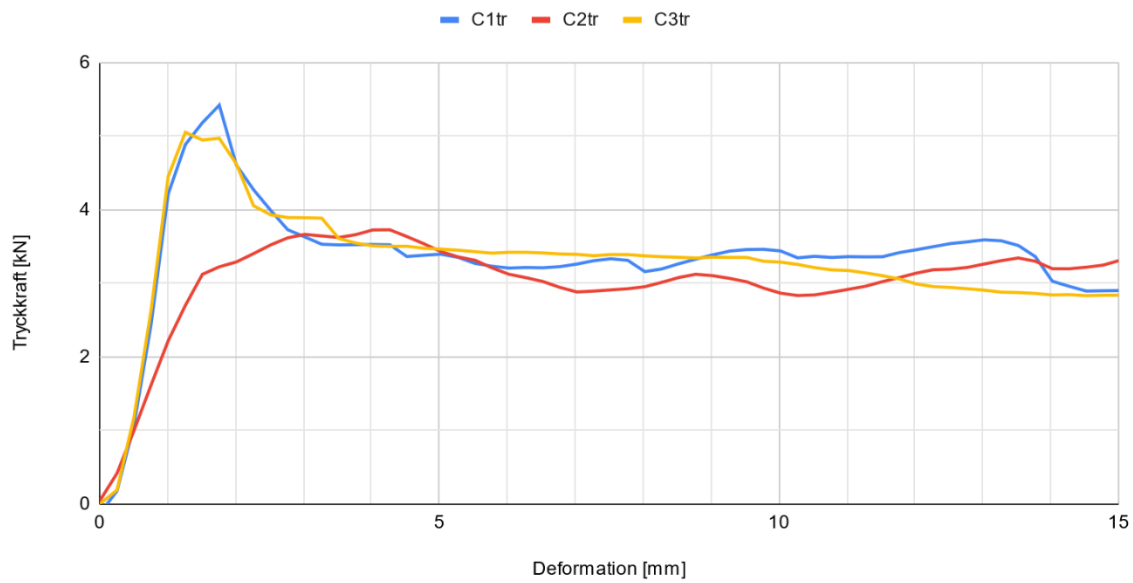


Figur 9:7 Mögelobservation datum: 3/5, provbit D1mö. RF 85%.

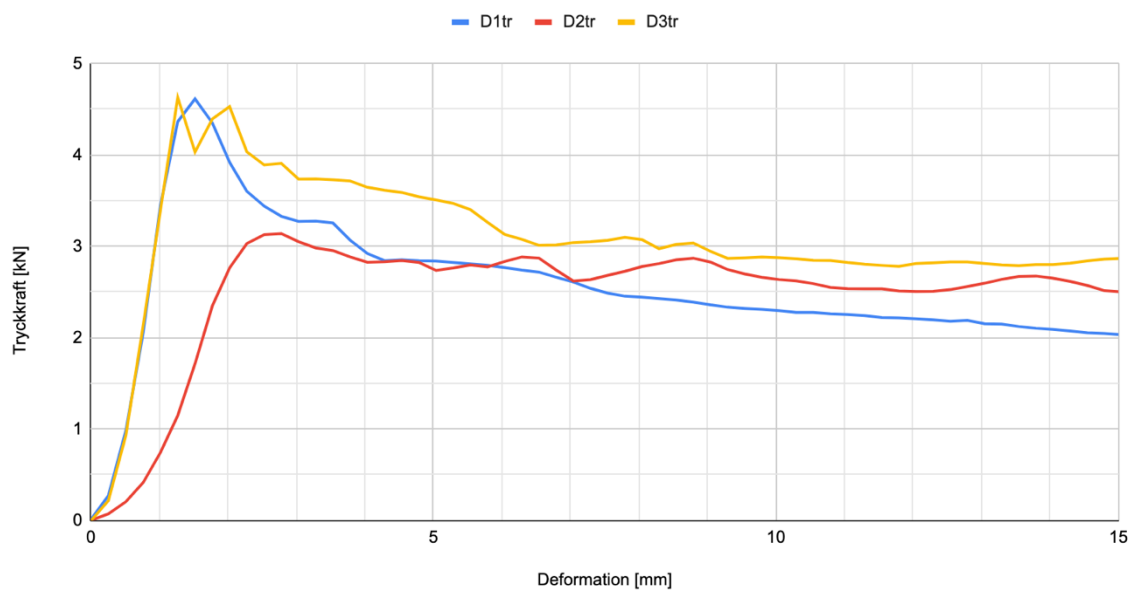


Figur 9:8 Mögelobservation datum: 11/5, provbit D1mö. RF 85%.

Bilaga 5 Tryckförsök



Figur 9:9 Tryckförsök för tre 100 mm pappersreglar som har konditionerats vid RF 75%.



Figur 9:10 Tryckförsök för tre 100 mm pappersreglar som har konditionerats vid RF 85%.

E = Elasticitetsmodul	[MPa]
F = Tryckkraft	[N]
L = Längd	[m]
$A_{\text{Tvärsnitt}}$ = Tvärsnittsarea	[mm ²]
ΔL = Längdutvidning	[m]
σ = Spänning	[MPa]
ε = Töjning	[-]

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{Tvärsnitt}}} \quad [\text{MPa}]$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [-]$$

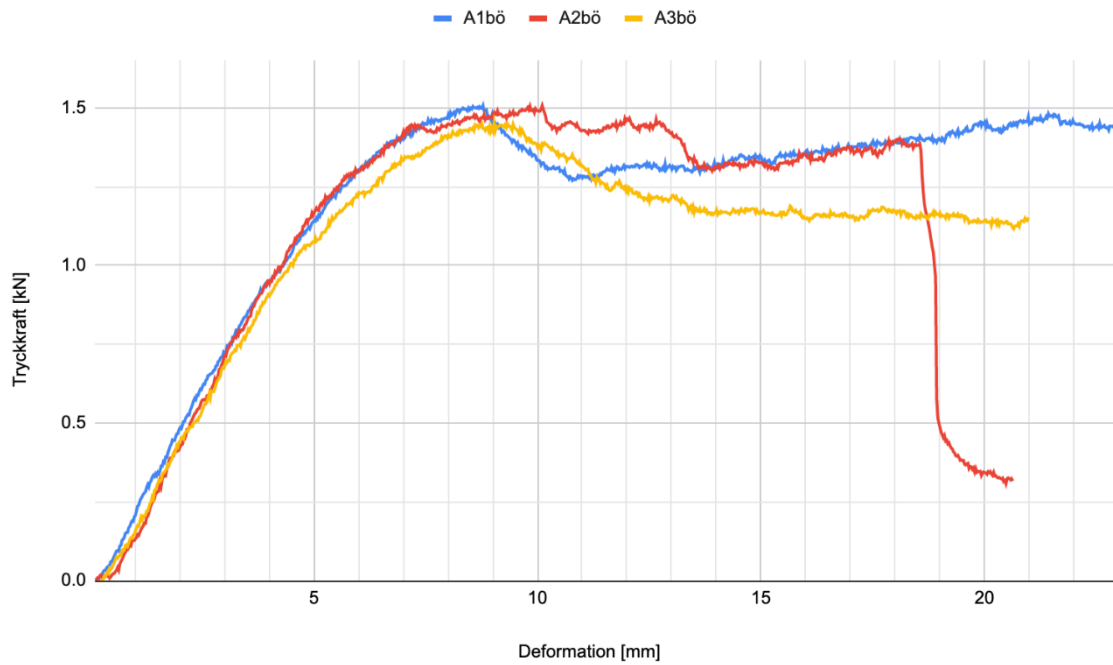
Två punkter valdes ut på den linjära delen av figur 4:17 och elasticitetsmodulen beräknades enligt:

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad [\text{MPa}]$$

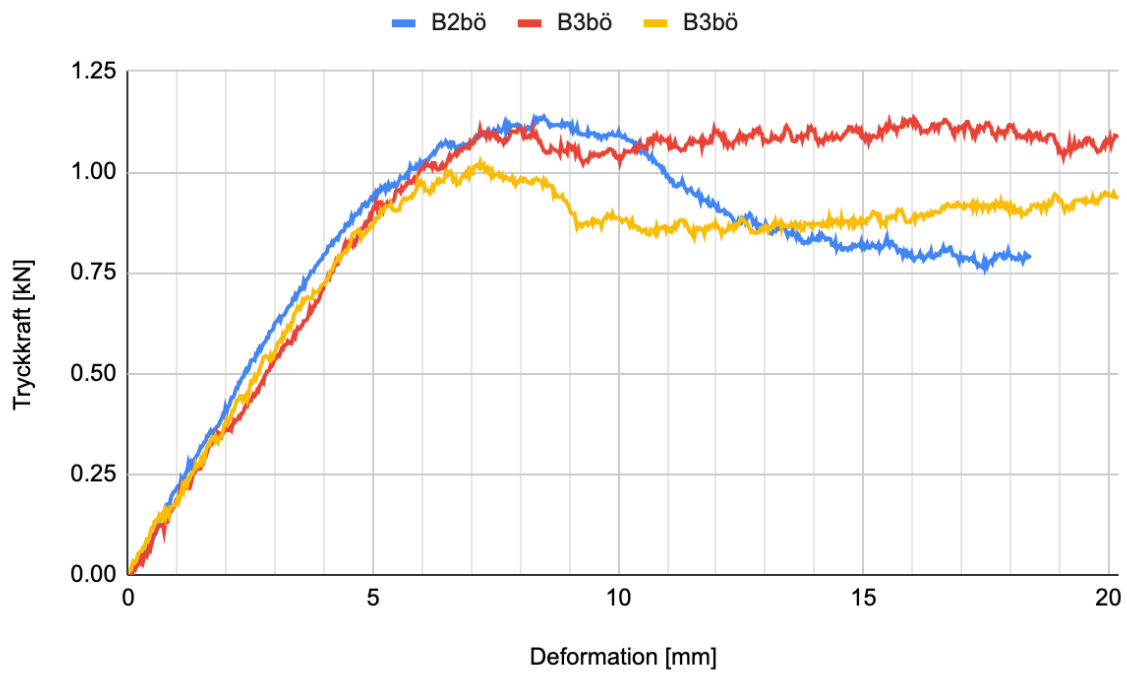
Resultaten presenteras i tabell 4:6.

..

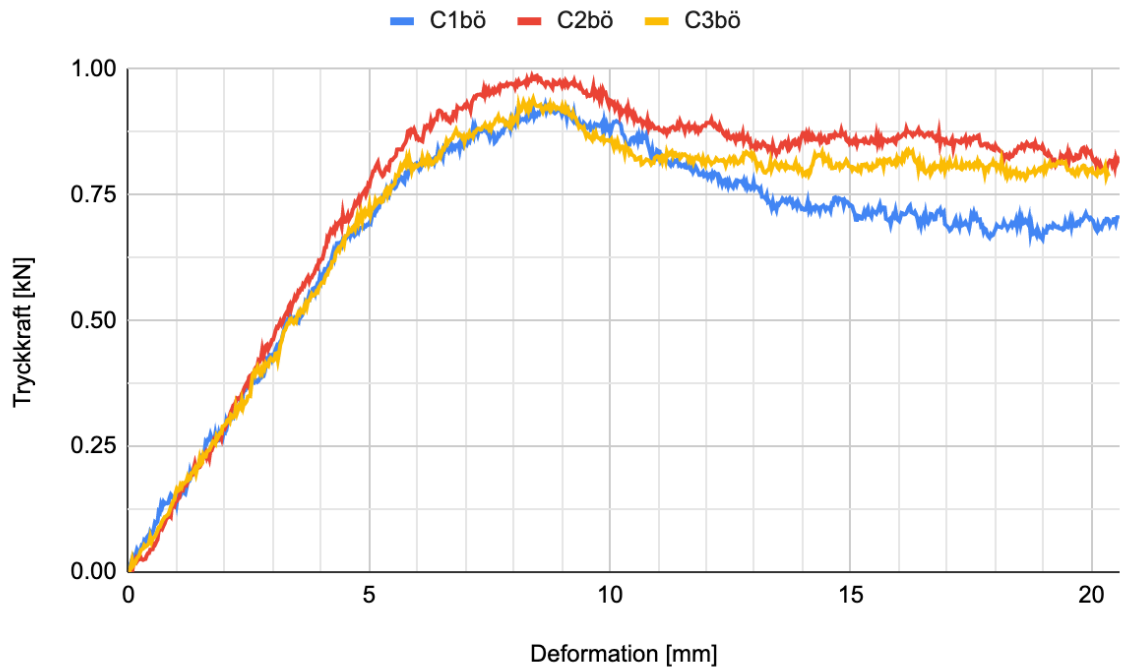
Bilaga 6 Böjförsök



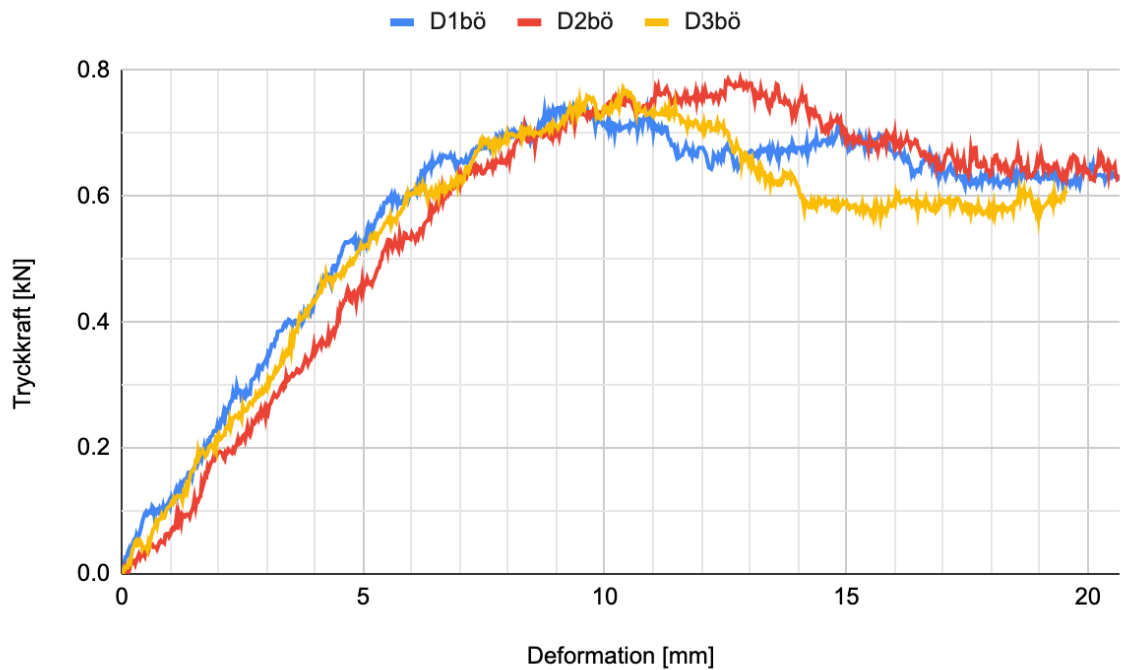
Figur 9:11 Böjning av 480 mm balk som har konditionerats i RF 33%



Figur 9:12 Böjning av 480 mm balk som har konditionerats i RF 60%.



Figur 9:13 Böjning av 480 mm balk som har konditionerats i RF 75%.



Figur 9:14 Böjning av 480 mm balk som har konditionerats i RF 85%.

Beräkning av maximal spänning.

F = Tryckkraft	[N]
M = Moment	[MPa]
L = Längd	[mm]
W = Böjmotstånd	[mm ³]
σ = Spänning	[MPa]

$$M = \frac{F \cdot L}{4} \quad [\text{Nm}]$$

$$W = \frac{b_{\text{ut.mått}} \cdot h_{\text{ut.mått}}^2}{6} - \frac{b_{\text{in.mått}} \cdot h_{\text{in.mått}}^2}{6} \quad [10^3 \text{m}^3]$$

$$\sigma_{\text{Max}} = \frac{M}{W} \quad [\text{MPa}]$$

Resultaten presenteras i tabell 4:7 och 4:8.

Beräkning av elasticitetsmodul.

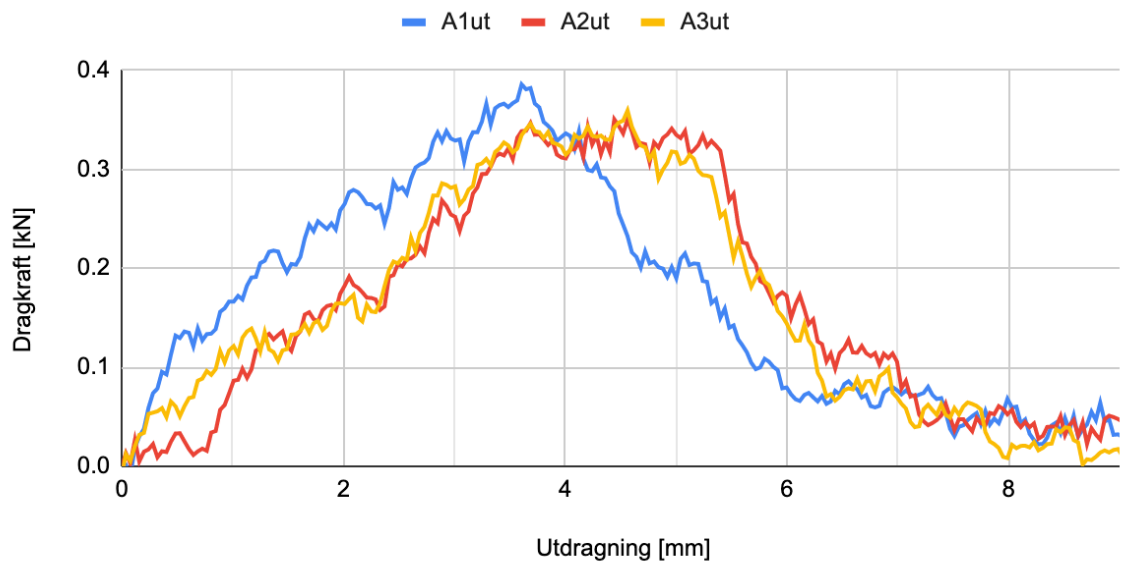
E = Elasticitetsmodul	[MPa]
F = Tryckkraft	[N]
v = Utböjning	[mm]
L = Längd	[mm]
I = Tröghetsmoment	[mm ⁴]

$$I = \frac{b_{\text{ut.mått}} \cdot h_{\text{ut.mått}}^3}{12} - \frac{b_{\text{in.mått}} \cdot h_{\text{in.mått}}^3}{12} \quad [\text{mm}^4]$$

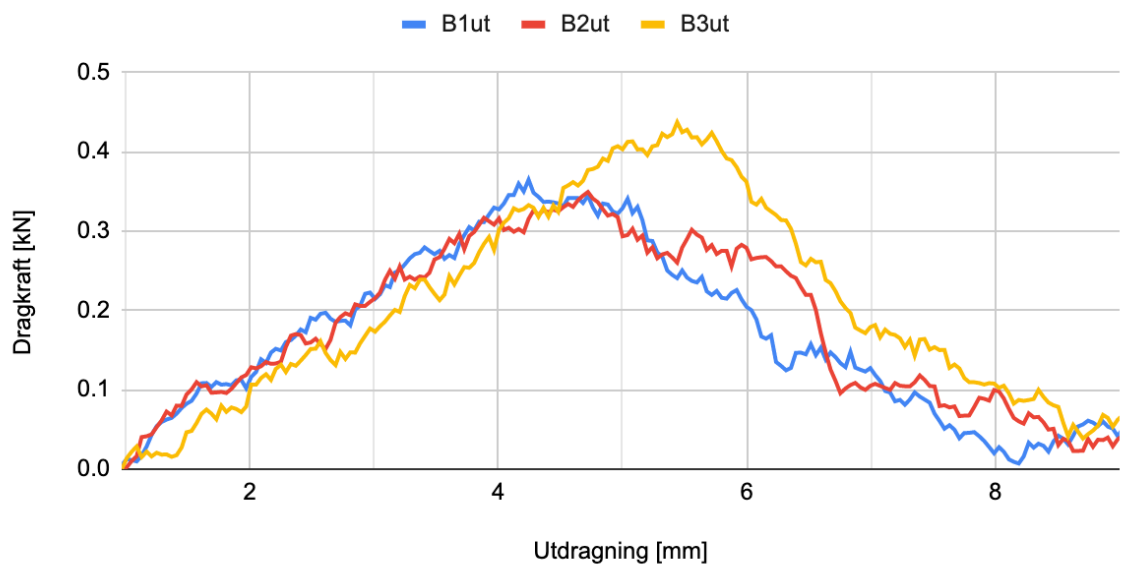
$$E = \frac{F \cdot L^3}{v \cdot I \cdot 48} \quad [\text{MPa}]$$

Resultaten presenteras i tabell 4:7 och 4:8.

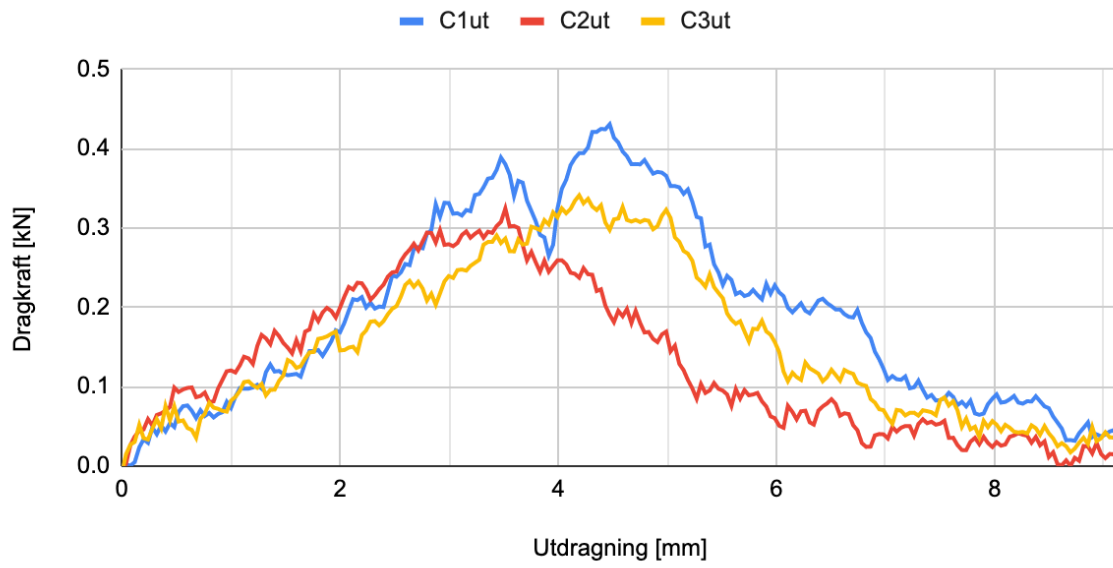
Bilaga 7 Utdragsförsök



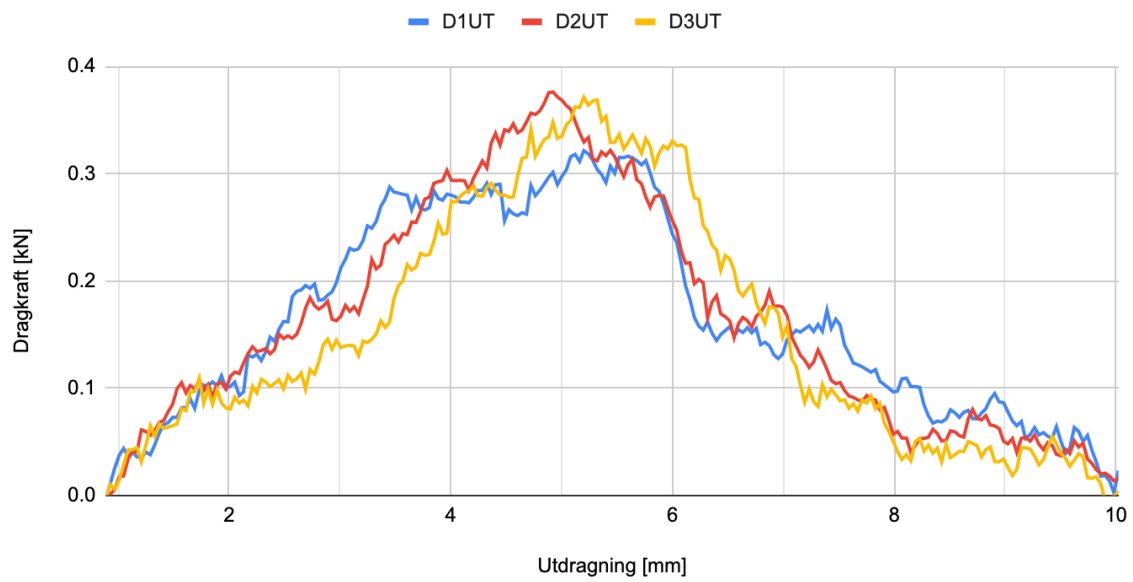
Figur 9:15 Utdragskapacitet för provbitar som har konditionerats i RF 33%.



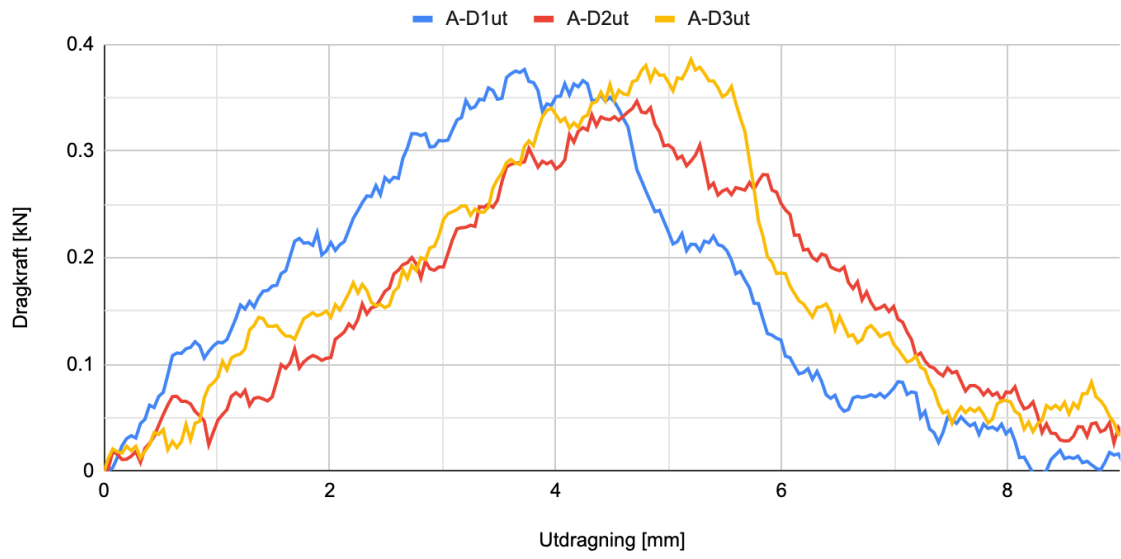
Figur 9:16 Utdragskapacitet för provbitar som har konditionerats i RF 60%.



Figur 9:17 Utdragskapacitet för provbitar som har konditionerats i RF 75%.



Figur 9:18 Utdragskapacitet för provbitar som har konditionerats i RF 85%.



Figur 9:19 Utdragkapacitet för provbitar som har konditionerats i växlande klimat mellan 33% och 85%