Anders Rosenkilde, Sigurdur Ormarsson,
Joakim Norén, Henrik Ödeen,
Michael Fogelberg, Carl-Johan Johansson

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Fuktrelaterade deformationer i träbjälklag

SP Trätek
SP RAPPORT 2006:61

Anders Rosenkilde, Sigurdur Ormarsson,
Joakim Norén, Henrik Ödeen,
Michael Fogelberg, Carl-Johan Johansson

Fuktrelaterade deformationer i träbjälklag

Abstract

Moisture-related movements in wood and in wood-based materials in timber-framed houses can result in highly uneven floor structures that can cause serious problems for customers. The distortion problems appear to increase appreciably when floor-heating systems are employed since the heating tends to create excessively dry conditions in the floor structure. The floor structures often consist of elements made of solid timber beams and of different layers of wood-based panels and boards. Because of the complexity of this structure and of the hygro-mechanical behaviour of the wood-based materials, it is difficult to predict how such elements will behave during either natural (or forced) variation in climate.

The aim of this project is to minimize the moisture related distortion in wood-based floor structures especially with built-in floor heating. The hypothesis is that the problems will be reduced with lower moisture content, MC, in the structural timber used in the floor structure. Hence, the experiments and simulations were performed with different initial MC, in order to study its effect on the distortion behaviour.

The method used in this project includes experiments performed in individual houses during their service live, full-scale experiments in laboratory and numerical simulations. Four houses with different moisture content in the floor structure and with or without floor heating system were studied. In the laboratory, five full-scale floor elements with floor heating system and different moisture content were tested. The floor elements were also analysed by a three-dimensional finite element model. The model was used to study how the floor distortion was affected by parameters such as initial moisture content, annual ring orientation, spiral grain and shrinkage properties. The project also included a test-production of the structural timber used for the lower moisture content. The interest here was to focus on both the quality and the costs of the product. Structural timber with 18 % and 12 % MC were exposed to outdoor conditions with the aim to study the difference in water uptake and moisture related swelling. After the outdoor exposure the materials were exposed to indoor climate and the shrinkage was measured.

The project clearly showed that use of structural timber with 12 % initial MC reduced the distortion of the floor elements. Hence a moisture content of 12 % instead of 18 % gives a reduction in shrinkage by 50 %. Both the experiments and the simulations showed that the deflection of the floor elements was mainly caused by moisture related shrinkage of the particleboard.

The test-production showed that it is possible to produce extra dry structural timber without any larger technical difficulties. However, the production costs increased by 5 % due to longer time for drying and degradation caused by increased twist etc. The market price of this product is estimated to increase with approximately 15 %. The outdoor exposure showed that the structural timber with lower MC still has less shrinkage when used in indoor climate.

The project has shown that it is possible to reduce the problems with distortion in wood-based floor elements by using structural timber with 10 % - 12 % MC together with low shrinkage particle boards. Another way to solve the problems is to use more moisture stable products such as LVL, I-beams or gluelam. However, these products are 2 to 3 times more expensive

than structural timber. There is also a possibility to reduce the visual effect of the moisture related distortions by using floor materials such as carpets or using a stiff top layer that evens out the irregularities on the surface of the floor element.

Key words: Trägolvkonstruktioner, golvvärmesystem, temperature, fukt, formförändringar, simuleringar, FEM

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
SP Rapport 2006:61
ISBN 91-85533-54-8
ISSN 0284-5172

SP Swedish National Testing and Research Institute
SP Report 2006:61

Postal address:
Box 5609,
SE-114 86 STOCKHOLM, Sweden
Telephone: +46 10 516 50 00
Telefax: +46 8 411 83 35
E-mail: info@sp.se

Innehållsförteckning

Abstract 3

Förord 7

Sammanfattning 8

1. Introduktion 9

2. Experimentell metod 11

2.1 Introduktion 11

2.2 Mätningar i bjälklag med golvvärme i laboratorium 11

2.2.1 Material 11

2.2.2 Produktion 12

2.2.3 Försöksmetod 14

2.3 Mätningar i bjälklag i nyproducerade hus 16

2.3.1 Upplands Väsby 16

2.3.2 Tjörn 19

2.3.3 Hässelby 21

2.4 Utomhusexponering i Stockholm 23

2.5 Konsekvensanalys av sågverksproduktion 23

3. Experimentella resultat 25

3.1 Introduktion 25

3.2 Temperatur- och fuktutveckling i bjälklag med golvvärme 25

3.3 Deformationer i bjälklag med golvvärme 30

3.3.1 Krympning hos träbalkar 30

3.3.2 Nedböjning av bjälklaget 33

3.4 Mätningar i bjälklag i nyproducerade hus 39

3.4.1 Upplands Väsby 39

3.4.2 Tjörn 45

3.4.3 Hässelby 47

3.5 Utomhusexponering i Stockholm 50

3.6 Konsekvensanalys av sågverksproduktion 52

4. Datorsimulering 57

4.1 Simuleringsmodell 57

4.2 Geometri och märgläge 59

4.3 Temperaturdata 62

4.4 Fuktdata 63

4.5 Deformationsdata 64

5. Simuleringsresultat 65

5.1 Temperatur 65

5.2 Fukt 68

5.3 Deformationer 73

5.3.1 Krympning hos träbjälkar 73

5.3.2 Nedböjning av bjälklaget 76

5.4 Parameterstudie 78

5.4.1 Inverkan av spånskivans krympningsegenskaper på bjälklagets nedböjning 78

5.4.2 Inverkan av balkarnas E-modul på bjälklagets nedböjning 79

5.4.3 Inverkan av märgläge på bjälklagets nedböjning 80

5.4.4 Inverkan av balkarnas snedfibrighet på bjälklagets nedböjning 81

6. Förslag till lösningar 83

7. Slutsatser 85

8. Referenser 87

Förord

Föreliggande rapport presenterar resultat inom projektet ”Fuktrelaterade deformationer i träbjälklag”. Projektets huvudfinansiering har varit från Formas-BIC med en implementeringsdel som finansierats av Vinnova, Myresjöhus, Rörvik Timber, Skogsindustrierna och TMF–Svensk Trähusindustri. Projektet är ett samarbetsprojekt mellan Chalmers, SP Trätek, Myresjöhus och Rörvik Timber. Simuleringsarbetet har utförts på Chalmers, Institutionen för tillämpad mekanik och på BYG-DTU i Danmark medan det experimentella arbetet har utförts på SP Trätek. Företagen Myresjöhus och Rörvik Timber har stått för tillverkning och leverans av allt provmaterialmaterial och ställt sina produktionsanläggningar till förfogande.

Till Formas-BIC riktas ett mycket stort tack för det finansiella stödet. För det generösa stödet Vinnova, Skogsindustrierna och TMF bidrog med i projektet tackas också varmt för. Vi vill även tacka EnergiJägarna, Willa Nordic som även de givit stöd till projektet i form av material, provningsobjekt och sakkompetens.

Sammanfattning

Föreliggande projekt hade till syfte att studera fuktrelaterade rörelser i lätta träbjälklag och undersöka möjliga åtgärder för att väsentligen minska dessa rörelser. Målet för projektet var att minska förekomsten av problem som ojämna golv, svikt, knarr, skador i ytskikt av trä eller keramik och glipor mellan golv och golvlister.

Fuktrörelser i träbjälklag med konstruktionsvirke med 18 % och 12 % fuktkvot har studerats både med och utan golvvärme i fyra nyproducerade och bebodda hus, i laboratorium har fuktrelaterade formförändringar, temperaturgradienter och klimat hos fem stycken bjälklagselement med golvvärme undersökts både experimentellt och med hjälp av datorsimuleringar. Konstruktionsvirket i de fem bjälklagselementen hade fuktkvot på 12 % och 8 % samt var sorterade efter hur de var tagna ur stocken.

Mätningarna i provhusen visar att den initiala krympningen av golvbjälkarnas höjder i medeltal uppgår till 6,5 mm vid en initial fuktkvot på 18 % i bjälklaget och till 4 mm vid en initial fuktkvot på 12 %. Samtliga mätningar är utförda på golvbjälkar med en nominell höjd på 220 mm. Den årstidsvisa variationen i golvbjälkarnas höjder var kring 2 mm. Beräkningar visar att skillnaderna mellan virke med 18 % och 12 % borde ha varit större, att så inte blev fallet beror troligen på att virket med 18 % fuktkvot torkat något under produktion och transport till byggarbetsplatsen samt att de enskilda virkesstyckenas krympningsegenskaper får stor inverkan på mätresultaten och därmed ger en stor spridning.

Mätningarna på de fem bjälklagselementen med golvvärme på laboratorium visar att golvbjälkarnas höjder initialt krymper kring 3 mm vid 12 % fuktkvot och kring 2 mm vid 8 % fuktkvot. Av mätningarna framgår det också att krympningsegenskaperna skiljer sig väsentligt beroende på årsringsmönstrets utseende i virkets tvärsnitt. Virke med stående årsringar som är tagna nära centrum av stocken krymper betydligt mindre på bredden än vad virke gör som är taget längre ut i stocken där årsringarna är mer liggande. Krympningen kan vara upptill dubbelt så stor vid liggande årsringar jämfört med stående. Spridningen i mätresultaten är dock stora vilket i sin tur leder till ojämna bjälklag vid främst högre fuktkvoter. Nedböjningen av bjälklagen som var fritt upplagda med en spännvidd på 4,2 m varierade mellan 8 och 11 mm. Observera att denna nedböjning uppstod endast på grund av fuktrelaterad deformation

Simuleringsresultaten har visat relativt god överensstämmelse med experimenten. Resultaten har visat att spånskivans krympningsegenskaper har en stor inverkan på bjälklagets nedböjning. Simuleringarna har också visat att parametrar som initial fuktkvot i träbjälkarna, märgläge, snedfibrighet och träbalkarnas styvhet påverkar nedböjningen i viss mån men inte i lika mycket som spånskivans krympning gör. För att få ett formstabilt bjälklag vad gäller nedböjning bör man sträva efter att använda ett skivmaterial med mycket små fuktrelaterade rörelser.

1. Introduktion

Fuktrelaterade formförändringar av lätta träbjälklag är ett problem för byggnadsindustrin, såväl som för brukarna av fastigheterna. Problemen har uppmärksammats mest i nyproducerade hus oftast samband med att golvvärme är installerad. Trähusindustrin är i dagsläget något tveksam till golvvärme på ett vanligt träbjälklag eftersom den enligt deras erfarenheter orsakar problem som ibland leder till reklamationer. Vanligt förekommande fel [1] är ojämna golv, knarr, sprickor i tätskikt och ytskikt av trä eller keramik samt glipor mellan golv och golvsocklar. Det är dock inte uteslutande golvvärmen som är orsaken till att problemen med rörelser i bjälklagen ökat, en annan mycket viktig faktor är att bostäderna idag inte ser ut som de gjorde på 1970- och 1980-talet. I dagsläget byggs bostäder med stora öppna planlösningar, större fönsterytor och andra golvmaterial. Plastmattor i tex. våtrum är mycket förlåtande för rörelser i bjälklaget, likaså är heltäckningsmattor och andra golvmattor i vardagsrum och sovrum. De öppna planlösningarna med större ljusinsläpp gör att ojämna golv syns och upplevs tydligare. För att klara de nya förutsättningarna måste något göras för att minska rörelserna eller effekten av rörelserna. Det förekommer att hustillverkare och byggare ersätter de massiva golvbjälkarna med andra träprodukter som LVL (Kerto), lättbalkar (Swelite), fackverk eller limträ. Dessa träprodukter förbättrar funktionen betydligt [2] med minskade fuktrelaterade rörelser. Anledningen till att man inte gått över till dessa produkter helt är priset. Kostnaden för de alternativa produkterna är en faktor 2 till 3 gånger högre. Syftet med föreliggande projekt var att utreda huruvida det är möjligt att produktutveckla det vanliga konstruktionsvirket i syfte att minska de fuktrelaterade rörelserna och då till en mindre prishöjning av produkten. Målet har varit att klara en prishöjning som ej överstiger 20 % för den nya produkten. Angreppssättet för produktutvecklingen har i detta projekt varit att anpassa fuktkvoten i konstruktionsvirket till en nivå som motsvarar ett normalt jämviktsklimat i ett bjälklag. Detta för att minska rörelserna vid den initiala uttorkningen av byggnaden.

Rörviks och Myresjöhus mål och syfte med projektet var att utveckla ändamålsanpassade bjälkar till bjälklag genom att sänka fuktkvoten från 18% till 12%, detta för att minska eller helt eliminera problemet med svikt, vibrationer, golvknarr och ojämna golv, speciellt när golvvärme är installerat i husen. För att förhindra att andra produkter konkurrerar ut massivt virke i husindustrin i framtiden, så måste träproducenterna vara lyhörda för kundens krav, och utveckla produkterna och få dem mera ändamålsanpassade.

För att undersöka vilka parametrar som har störst inverkan på fuktrelaterade rörelser och formförändringar hos träbaserade bjälklagselement har både simuleringar och omfattande experimentella undersökningar utförts både i nyproducerade hus [3] och på laboratorium. Syftet med undersökningarna är att dels verifiera fuktrörelserna i vanliga träbjälklag samt jämföra dessa med bjälklag bestående av konstruktionsvirke med produktanpassad fuktkvot. Tidigare undersökningar har studerat spånskivans inverkan på fuktrelaterade deformationerna i elementbyggda träbjälklag [4]. Utförliga studier har även utförts på fuktrelaterade deformationer i stomsystem av trä [5,6]

På grund av trämaterialets anisotropi och dess komplexa hygro-mekaniska beteende är det mycket svårt att förutse hur sammansatta träkonstruktioner formförändras när de utsetts för stark klimatförändring. I projektet har ett tidigare utvecklad FE-modell används för att simulera golvbjälklagens fuktrörelser, se [7-9]. Detta är en full tredimensionell modell för simulering av transienta temperatur- och fuktflöden som i sig används för att leverera

indata till själva deformations- och spänningsanalysen. De transienta flödesmodellerna bygger på arbete presenterat i [10-12].

2. Experimentell metod

2.1 Introduktion

Experiment och provningar har utförts i riktiga hus som är bebodda och i laboratorium, detta som ett komplement till de beräkningar och simuleringar som utförts. Fullskaliga provningar ger betydligt mer än enbart de uppmätta resultaten. Provningarna är av stor betydelse för engagemanget, förståelsen och implementeringen av resultaten i industrin. De slutliga resultaten blir mycket starkare om de kan redovisas både som beräknade och uppmätta resultat.

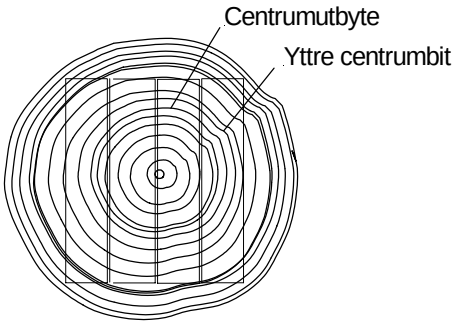
Nedan redovisas utförandet av mätningar i bjälklag med golvvärme i laboratorium, mätningar i bjälklag i två provhus med olika fuktkvoter, mätningar i bjälklag i ett hus med dokumenterat stora rörelser i stommen och mätningar i bjälklag i ett hus med golvvärme. Dessa mätningar i bjälklag kompletteras med en utomhusexponering av konstruktionsvirke för bjälklag.

2.2 Mätningar i bjälklag med golvvärme på laboratorium

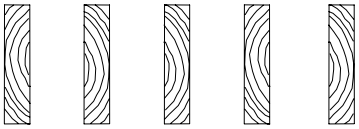
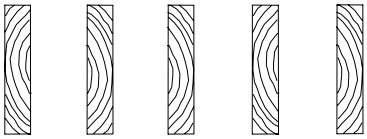
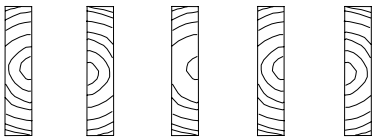
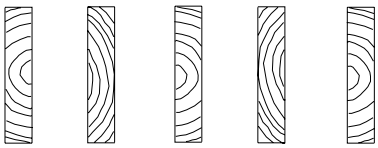
I en experimentell studie genomfördes fullskaleprov med fem golvbjälklag med trägolv och vattenburen golvvärme. Syftet med försöken var att undersöka bjälklagens fuktrelaterade deformationer under väldefinierade förhållanden både med avseende på klimat och på egenskaper hos ingående material. Syftet var också att ta fram underlag för beräkning och simulering av bjälklagen. Bjälklagselementen var specialtillverkade vid Myresjöhus anläggning i Myresjö.

2.2.1 Material

Virket till bjälklagen var konstruktionsvirke av gran, *picea abies*, och levererades från Myresjösågen (Rörvik Timber). Virket var uppdelat i två grupper med fuktkvoterna 12 % respektive 8 %. Till bjälklagen valdes virke ut med avseende på fuktkvot och sågningsmönster. För varje fuktkvotsnivå valdes, dels virke av inre centrumbitar med ”stående” årsringar, dels virke av yttre centrumbitar med ”liggande” årsringar, se figur 1. Bjälklagens sammansättning framgår av figur 2. Av figuren framgår även hur bjälkarnas märg- och splintsida är orienterade i bjälklaget. Med undantag av bjälklag B5 har bjälkarna inom varje bjälklag lika sågningsmönster. I bjälklag B5 består bjälkarna av både yttre och inre centrumbitar. I samband med tillverkningen togs densitets och fuktkvotsprover ur samtliga bjälkar.



Figur 1. Sågningsmönster i stock.

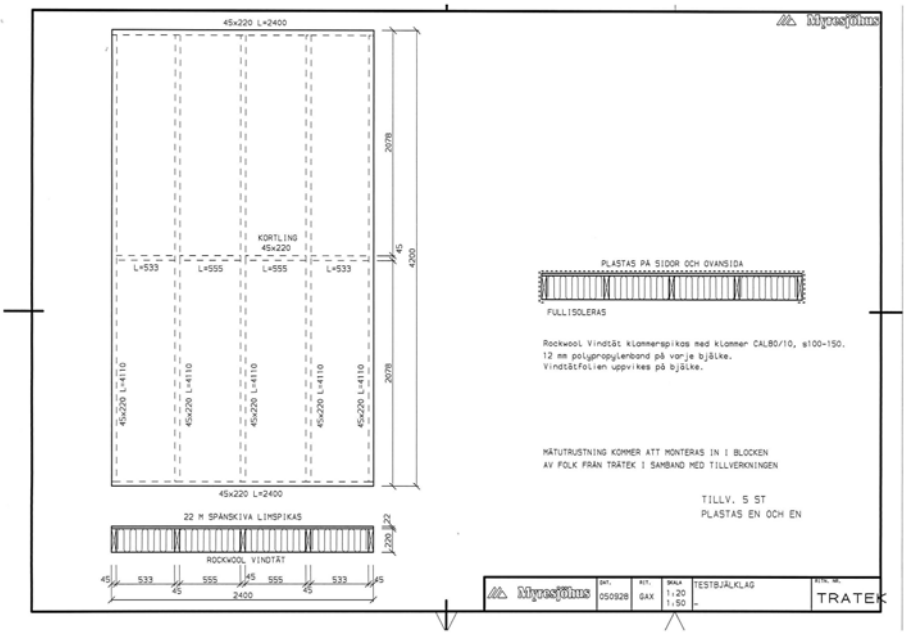
Bjälklag	Bjälkar A B C D E	
B1		Yttre centrumbitar Fuktkvot 12 %
B2		Yttre centrumbitar Fuktkvot 8 %
B3		Inre centrumbitar Fuktkvot 12 %
7B4		Inre centrumbitar Fuktkvot 8 %
B5		Yttre och inre centrumbitar Fuktkvot 12 %

Figur 2. Sågningsmönster och initial fuktkvot hos bjälkar i bjälklag B1-B5.

2.2.2 Produktion

Bjälklagen hade måtten 2,4 m x 4,2 m och bestod av en trästomme med fem bjälkar (A-E) orienterade i elementets längdriktning med en tvärgående kantbalk i varje ände, se figur 3. Mellan bjälkarna monterades kortlingar på bjälklagets halva spännvidd. Samtliga virkesstycken i bjälklaget var av konstruktionsvirke C24 med dimensionen 45 mm x 220 mm. Avståndet mellan bjälkarna var 600 mm.

Bjälklagets ovansida utgjordes av 22 mm spånskiva som spiklimmades mot bjälkarna. Utrymmet mellan bjälkarna var fullisolerat med stenull, 28 kg/m³. På bjälklagets undersida monterades en vindskyddsväv. Syftet var att utforma bjälklaget som ett kryprumsbjälklag.

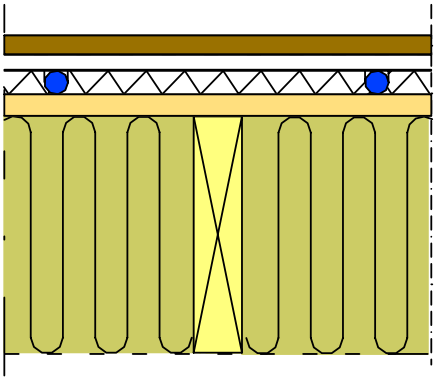


Figur 3. Bjälklagselement tillverkade på Myresjöhus.

Efter tillverkningen emballerades bjälklagselementen i plast och transporterades med lastbil till provningslaboratoriet på SP Trätek i Skellefteå. I laboratoriet placerades bjälklagselementen på två horisontella stålbalkar, se figur 4.

Figur 4. Bjälklagsprovning i laboratorium.

Ovanpå spånskivan monterades ett övergolv med ett vattenburet golvvärmesystem, golvgips och ekparkett, se figur 5. Golvvärmesystemet består av kassetter med en värmefördelande aluminiumplåt som är limmad mot en cellplastskiva (EPS). Kassetten har tjockleken 22 mm och monteras flytande på spånskivan. I kassetten finns spår i vilka rören för golvvärmen placeras. Golvvärmesystemet har levererats av EnergiJägarna AB.



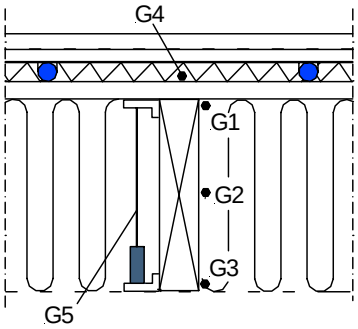
14 mm ekparkett
Stegljudsisolering, 2 mm expanderad PE
0,2 mm plastfolie
13 mm golvgips
Golvvärmesystem 20 mm
22 mm spånskiva
Bjälkar 45 mm x 220 mm c 600 mm
220 mm stenull, 28 kg/m³
PAROC Vindtät 0,3 mm spunnen PP

Figur 5. Uppbyggnad hos provbjälklag.

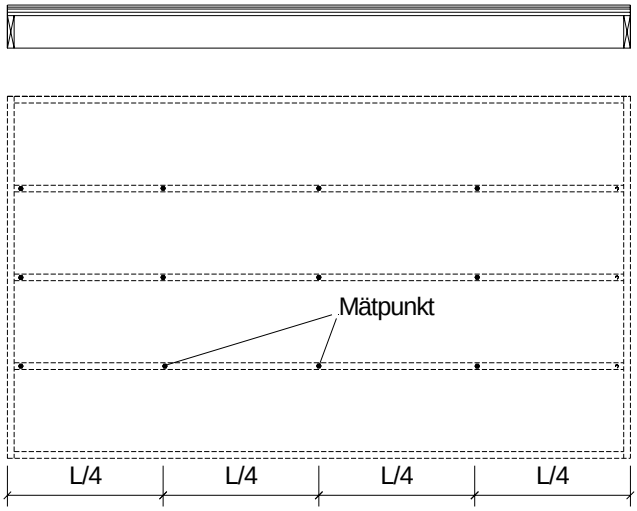
2.2.3 Försöksmetod

Givare monterades mot bjälkarna för att mäta temperatur, relativ luftfuktighet och tvärgående krympning/svällning, se figur 6. Temperatur och RF mättes i tre positioner, G1-G3, på den mittersta bjälken C i varje bjälklag. Hos bjälklag B1, B3 och B5 placerades även givare för att mäta relativ luftfuktighet och temperatur på parkettgolvets yta och 1,2 m ovanför golvet. Tvärsnittets krympning/svällning i höjdled mättes i mitten av de tre mellersta bjälkarna, B, C och D.

Nedböjningen hos bjälklaget mättes på fem positioner längs de tre mellersta bjälkarna B, C och D, se figur 7. Nedböjningen bestämdes på spånskivans ovansida genom hål i övergolvet. Mätningarna gjordes med ett avvägningsinstrument.

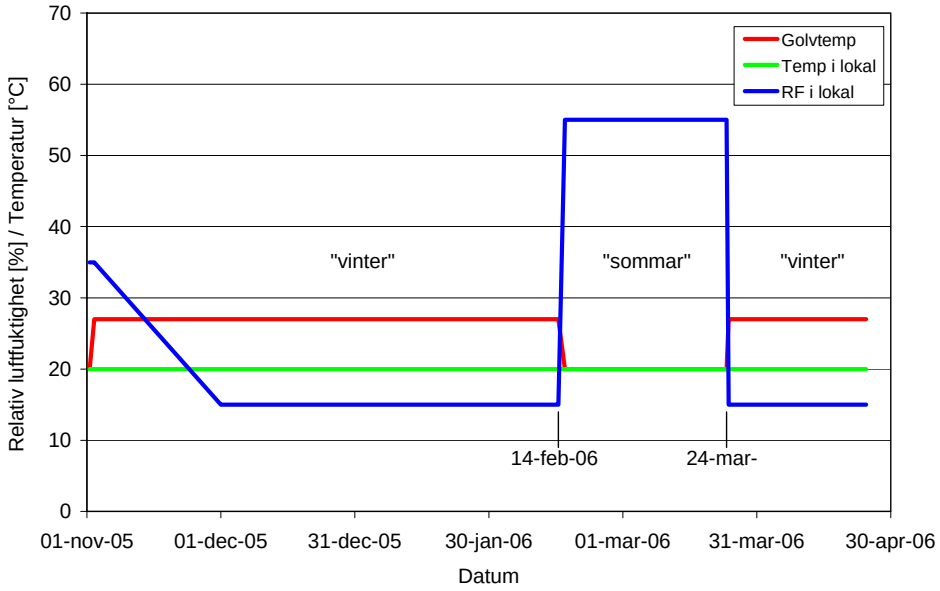


Figur 6. Placering av givare för mätning av temperatur och relativ luftfuktighet (G1-G3), temperatur på spånskiva (G4) och krympning/svällning hos bjälke (G5).



Figur 7. Mätpunkter vid bestämning av bjälklagets totala nedböjning.

Under provningen varierades klimatet i provningslokalen för att efterlikna vinter respektive sommarförhållanden, se figur 8. Temperaturen i lokalen var inledningsvis 20°C men ökades till 23°C på grund av svårigheter med att uppnå rätt temperatur på trägolvets yta. Den relativa luftfuktigheten reglerades inte under vinterperioden utan tilläts följa den naturliga variationen. Detta innebar att RF inledningsvis var ca 35 % och därefter sjönk till 15-20 %. Under sommarperioden stängdes golvvärmen av och den relativa luftfuktigheten ökades till ca 55 %. Efter sommarperioden startades golvvärmen och den relativa luftfuktigheten reglerades till 15-20 % för att efterlikna en ny vinterperiod. Målsättningen var att hålla en golvtemperatur på ca 27°C under vinterperioden och ca 20°C under sommarperioden.



Figur 8. Temperatur och klimatstyrning vid provning bjälklag.

Efter provningen med golvvärme genomfördes ett försök med bevattning av spånskivan på bjälklaget ovansida. Syftet var att undersöka hur bjälklagets nedböjning påverkades av en uppfuktning av spånskivan, t ex vid en regnskur i samband med att huset monteras på byggarbetsplatsen. Tidigare studier [4] har visat att spånskivan vid bevattning erhåller en permanent nedböjning när den torkar ut.

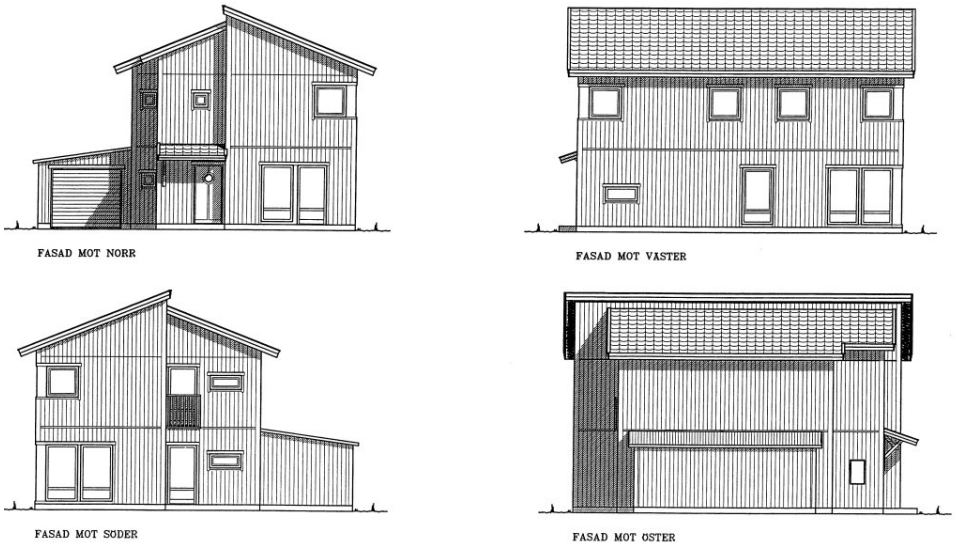
Vid försöket bevattnades varje bjälklag med 10 liter vatten så att spånskivan fick en jämn vattenfilm med tjockleken 1 mm. Bevattningen upprepades gånger per dag under två dagar. Bjälklagen fick därefter torka ut vid rådande inomhusklimat. Under försöket gjordes motsvarande mätningar som vid provningen med golvvärme. Efter avslutad provning togs densitets och fuktkvotsprover ur de tre mellersta bjälkarna i varje bjälklag.

2.3 Mätningar i bjälklag i nyproducerade hus

2.3.1 Upplands Väsby

De två husobjekt som är en del av studien är producerade vid Myresjöhus anläggning i Myresjö. Husen är tvåvånings fristående villor. Grunden i husen är uppbyggd underifrån av ett dränerande lager av makadam, cellplast, samt en betongplatta med ingjuten golvvärme. Bjälklagen i husen är uppbyggda av reglar som är 45x220 mm och torkade till 18 % respektive 12% fuktkvot, hus 18 och hus 12.

Husen är belägna i området Borgbyn i Upplands Väsby och hela området omfattar 40 grändhus med äganderätt, se typhus figur 9. Husen har genomgående parkett i båda planen och klinker i badrum och entré. Innan läggning av golvparketten på det nedre planet kopplas en värmare till systemet som låter plattan torka ut till en RF-nivå som ligger kring 90 %, så att läggning av golvparkett och plastfolie kan bli möjlig. En ventilationsspringa i golvsocklarna tillåter plattans vidare uttorkning efter golvets läggning. Uppvärmningen sker med vattenburen golvvärme i bottenplanet och på övervåningen sker uppvärmningen med el-radiatorer. Det finns även värmeåtervinning på frånluft.



Figur 9. Fasadritning A1 över typhus i Borgbyn där mätningar utfördes. Källa: Myresjöhus.

Produktionen av bjälklaget till hus 12, vilket är det hus med en fuktkvot på 12 %, skedde dagarna innan midsommarhelgen 2004. Delarna mellanlagrades i utlastningshallen vilket är ett kallager. Huset restes den 29 juni 2004, se figur 10, under en något strålande sol. Takpannorna lades på den sjunde juli, dagen innan hantverkarna tog semester. Hus 18 lastades den 22 juni och stomresning skedde den 23 juni.

Figur 10. Hus 12 i Upplands Väsby under uppförande, foto: Mattias Olson

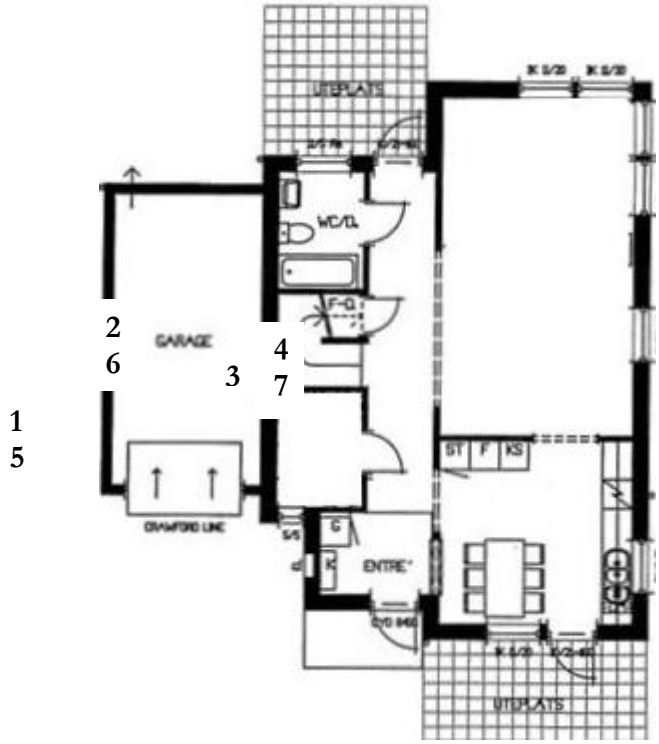
Mätningarna av klimat startade redan på fabriken 2004-06-23 i Myresjö när bjälklagen till husen var klara. Klimatet registrerades med hjälp utav små klimatloggrar typ TinyTag från Intab. Dessa registrerade klimat till dess huset var stomklart 2004-07-06 och det kompletta mätsystemet installerades. Efter stomresningen registrerades golvbjälkarnas krympning samt klimatet i bjälklagen med hjälp utav en datalogger typ AAC-2 från Intab som registrerade mätvärden varje timma. Dessa mätningar startade 2004-07-06 och avslutades 2006-10-31. Loggern var ansluten till ett GSM-modem för att möjliggöra kommunikation med loggern utan att besöka fastigheten. En utförlig beskrivning av mätsystem och givare finns i [3]. Till dataloggern var följande givartyp och antal anslutna.

- Temperaturgivare tre stycken
- Lägesgivare fyra stycken
- Luftfuktighetsgivare tre stycken

I tabell 1 nedan anges givarnas placering och märkning i de två provhusen. Placeringen är också angiven på planritningen för övre planet i figur 11.

Tabell 1. Placering och märkning av givare i hus 12 och 18: källa [10].

Hus 12 och 18 Givartyp	Placering	Givarnamn Hus 12	Givarnamn Hus 18
Läge			
Tvätt	1	L1201	L1801
Hall	2	L1202	L1802
Vardagsrum 1	3	L1203	L1803
Vardagsrum 2	4	L1204	L1804
RF/Temperatur			
Tvätt	5	RT1201	RT1801
Hall	6	RT1202	RT1802
Vardagsrum	7	RT1203	RT1803



Figur 11. Placering av givare i hus 12 och 18 enligt tabell 4: källa [3].

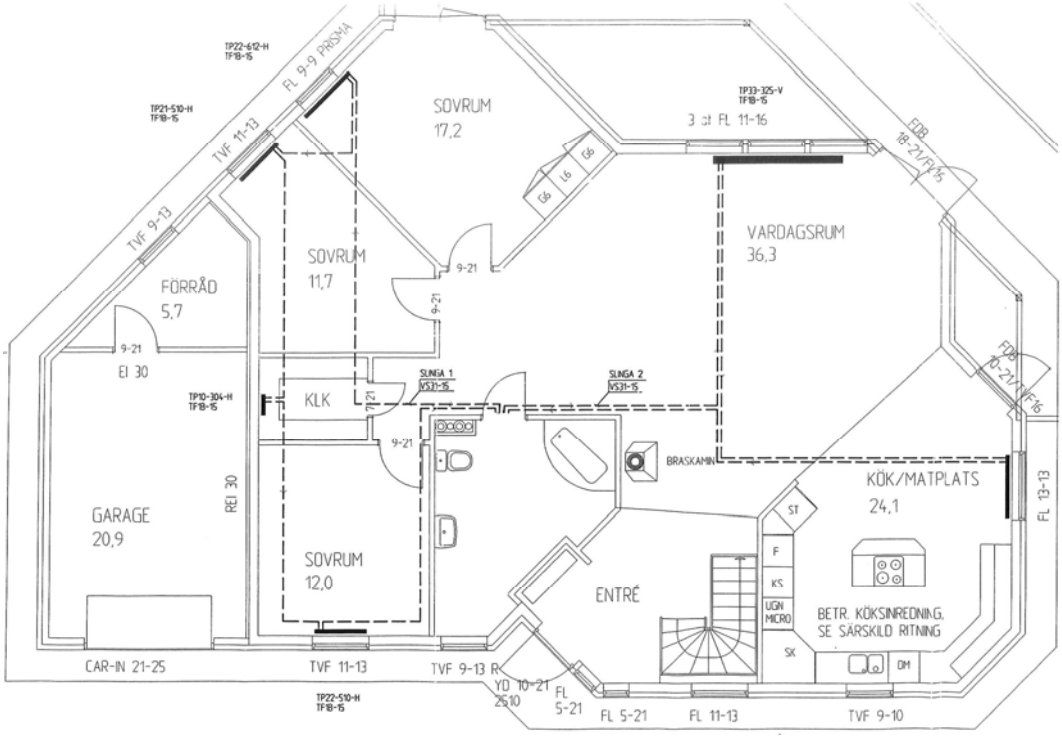
Temperatur- och luftfuktighetsgivarna är uppsatta intill bjälkarna på tre platser i varje hus, se figur 11, detta för att kunna mäta klimatet direkt intill bjälkarna. Utifrån dessa värden kan en jämviktsfuktkvot beräknas för bjälkarna. Givarna är placerade på tre platser där det kan vara intressant att studera klimatet. Den ena sitter ovan tvättstugan där också mellan-bjälklaget är fullisolerat, mellanbjälklaget är i övrigt oisolerat förutom i randzonerna längs ytterväggarna. De två andra givarna sitter dels intill trappen och dels i vardagsrummet nära ytterväggen. Mätpunkterna har valts med hänsyn till att golvbjälkarna utsetts för olika typer av belastning och klimat, i närheten av randzon, ovan tvättstuga och mitt i huset i närheten av trappen. Utplaceringen av givare ser likadan ut i båda provhusen.

Fyra stycken lägesgivare är utplacerade i varje hus. Dessa är monterade med hjälp av vinkeljärn, gängade rör, ledad infästning och gummifäste, se figur 12. Med den typen av infästning som valts fås inte riktigt hela bjälkens höjd med. Istället för 220 mm blir mäthöjden 210 ±1 mm eftersom vinkeljärn och infästningar stjäl lite av höjden. Av dessa fyra givare är två placerade i vardagsrummet på två olika virkesindivider i närheten av temperatur- och luftfuktighetsgivaren, en är placerad i det fullisolerade utrymmet ovan tvättstugan och den sista givaren sitter i närheten av trappan enligt figur 12.

Figur 12. Lägesgivare och givare för temperatur och luftfuktighet installerad i mellanbjälklaget, foto: Per Wall.

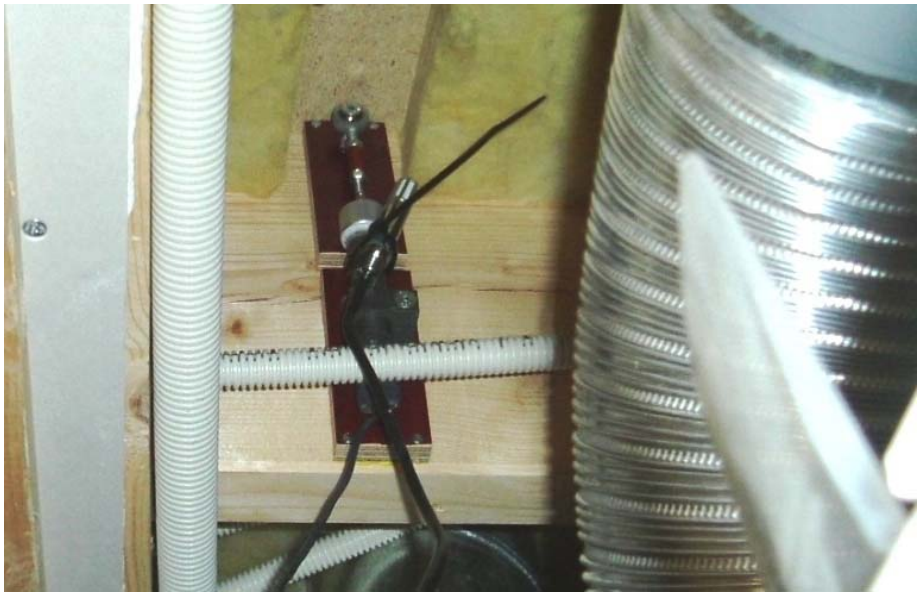
2.3.2 Tjörn

Mätningar har utförts i en villafastighet, Myggenäs 1:107, uppförd 2001 i Tjörns kommun. Huset är ursprungligen ett enplanshus som placerats ovanpå en suterrängvåning. Syftet med mätningarna var att fastställa hur bjälklaget rör sig och vilka klimatförhållanden som råder i bjälklaget. Detta mätobjekt valdes därför att det fanns uppgifter om stora problem med rörelser i mellanbjälklaget främst vid badrum och kök. Lägesgivare och givare för temperatur och relativ luftfuktighet installerades i mellanbjälklaget till badrummet. Planlösningen på entréplanet visas i figur 13 där även placeringen av lägesgivare och klimatgivare är angiven. Två mätpunkter valdes, 1 och 2.



Figur 13. Planritning på entréplanet, 1och 2, mätpunkter för klimat- och lägesgivare.

I mätpunkt 1, figur 14, installerades en lägesgivare för mätning av en golvbjälkes svällning och krympning på höjden samt en klimatgivare typ Vaisala Humitter som mäter både relativ luftfuktighet och temperatur. Vid mätpunkt 2 installerades samma typ av givare som i mätpunkt 1 dock kompletterat med en lägesgivare för att mäta rörelsen mellan en golvbjälke och en underliggande H-balk i stål, detta för att undersöka om bjälklaget lyfter från stålbalken. Samtliga givare var anslutna till en datalogger typ ACC-2 från Intab som registrerade mätvärden varje timma. Kommunikation med loggern skedde via GSM-modem för att hämta mätdata.



Figur14. Lägesgivare och klimatgivare installerade vid mätpunkt 1 i bjälklaget till badrummet.

2.3.3 Hässelby

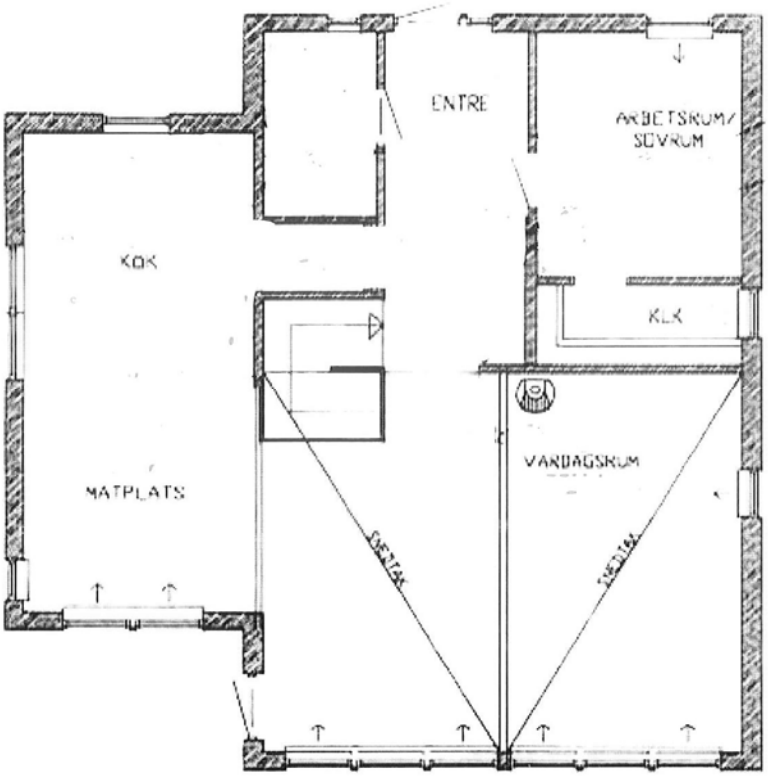
Villafastigheten i Hässelby, figur 15, är ett suterränghus med vattenburen golvvärme i bottenplattan och i mellanbjälklaget som är ett konventionellt lätt träbjälklag. Uppförandet av huset påbörjades i januari 2006 och inflyttning skedde i juli 2006. Detta mätobjekt valdes därför att hittills har inga mätningar avseende klimat och rörelser i träbjälklag utförts i hus med golvvärme. Mätningar avseende inomhusklimat och temperaturfördelningar i golvkonstruktionen har dock utförts i grannfastigheten i ett annat FoU-projekt ”Trägolv av lamelltyp på golvvärme” [13].

Figur 15. Huset i Hässelby under uppförande våren 2006.

Mätsystemet i detta hus var av samma typ som i Upplands Väsby och Tjörn. Givarna bestod här av fyra stycken lägesgivare som mäter förändringar i fyra stycken golvbjälkars höjder samt en klimatgivare som mäter relativ luftfuktighet och temperatur i mellanbjälklaget. I figur 16 visas två lägesgivare och en klimatgivare under installation av mätsystemet.

Figur 16. Lägesgivare och klimatgivare under pågående installation vid mätpunkt 1 och 2.

Lägesgivarna placerades i fyra mätpunkter i mellanbjälklaget enligt planritningen i figur 17. Lägesgivarna i Figur 16 sitter i mätpunkt 1 och 2, i mätpunkt 2 sitter även klimatgivaren.



Figur 17. Planritning för entréplanet med de fyra mätpunkterna 1 – 4 utmärkta.

2.4 Utomhusexponering i Stockholm

Utomhusexponeringen syftade till att ta fram fakta kring hur nedtorkat och normaltorkat konstruktionsvirke beter sig avseende fuktupptagning och svällning vid exponering utomhus och under en efterkommande uttorkning. Provmaterialet utgjordes av 40 stycken golvbjälkar med dimensionen 45 x 220 x 2000 mm, varav 20 stycken var torkade till 12 % och 20 stycken torkade till 18 %. Hälften av bjälkarna i varje parti placerades utomhus under bar himmel och hälften utomhus under tak skyddade mot nederbörd, se figur 18. Exponeringen pågick under två veckor i oktober/november 2006. Efter utomhusexponeringen torkades bjälkarna ut inomhus vid 20 ^{o}C och RF 40 – 50 % under ca 3 veckor. Under utomhusexponeringen och efterföljande torkning vägdes och dimensionsmättes alla bjälkar regelbundet.

Figur 18. Utomhusexponering av golvbjälkar vid SP Trätek i Stockholm.

2.5 Konsekvensanalys sågverksproduktion

Studien har utförts vid Rörvik Timber Höglandet AB, Myresjösågen och omfattat en konsekvensanalys för produktion, produktmix och produktkalkyl för produkten konstruktionsvirke C24 med dimensionen 45 x 195 mm. Syftet med studien är att utreda vilka konsekvenserna blir vid produktionen av konstruktionsvirke för bjälklag om fuktkvoten skall minskas från 18 % till 12 %. Studien omfattade provtorkningar och provsorteringar av konstruktionsvirke med både 18 % och 12 % fuktkvot.

3. Experimentella resultat

3.1 Introduktion

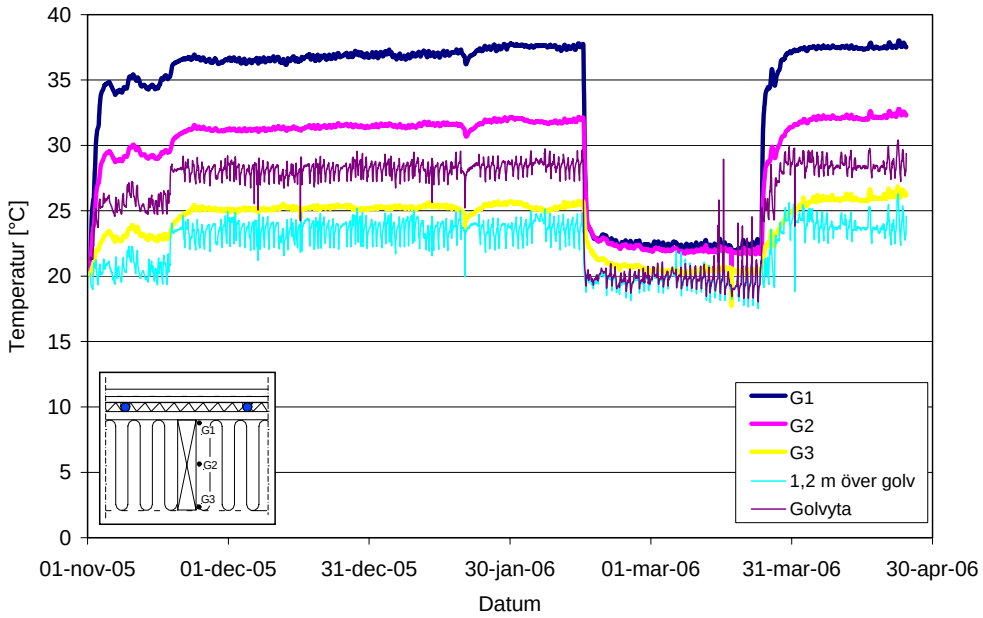
Under experimentella resultat har samtliga mätningar som genomförts inom projektet sammanställts. Dessa omfattar laboratorieförsöken med bjälklag, mätningar i nyproducerade hus, utomhusexponering av konstruktionsvirke samt en konsekvensanalys för en provsortering av torrare konstruktionsvirke.

3.2 Temperatur- och fuktutveckling i bjälklag med golvvärme

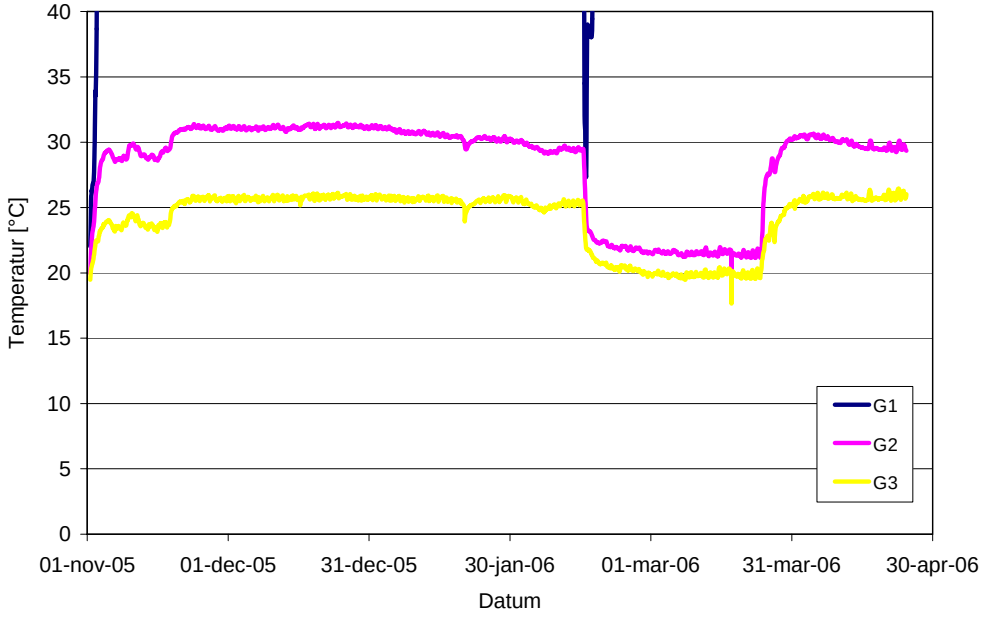
Resultaten från mätningarna på de fem bjälklagen redovisas i figur 19-43. Mätningarna omfattar 187 dagar under perioden 2005-11-01 till och med 2006-04-24.

Temperaturer uppmätta i och ovanför respektive bjälklag har sammanställts i figur 19-23. Under vinterförhållanden är temperaturen i överkant av bjälken (givare G1) något högre i bjälklag B1 och B5 än i bjälklag B3 och B4. För bjälklag 2 saknas dock data för jämförelse av temperaturen på grund av ett fel hos givare G1. Bjälklag B1 och B5 har även större temperaturskillnad mellan bjälkens över- och underkant (G1-G3) än övriga bjälklag. Som mest är denna skillnad ca 12-13°C. För bjälklag 3 och 4 är motsvarande temperaturskillnad ca 7-8°C. Den högre temperaturen hos bjälklag B1 och B5 beror främst på regleringen av golvvärmesystemet och på bjälklagens placering i lokalen. Båda dessa krävde därför högre vattentemperatur för att uppnå 27°C på parkettgolvets yta.

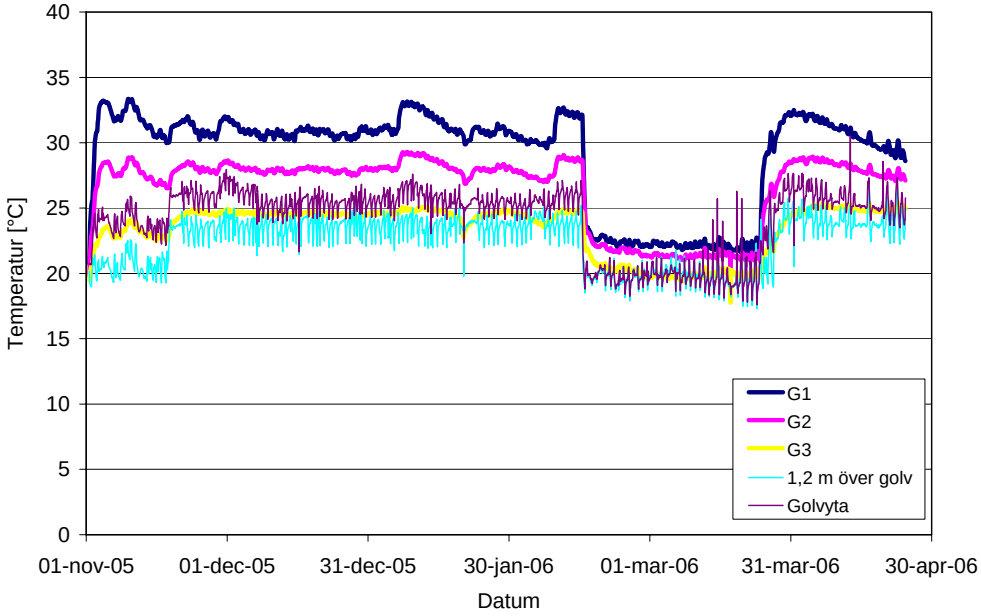
Temperaturen i lokalen och i bjälklaget påverkades vid något tillfälle av låga temperaturer utomhus t ex den 20 januari 2006. Svängningarna i temperaturen vid golv och ovanför golv beror främst på hur pannan reglerar effektbehovet vid uppvärmning. Under sommarperioden medförde solens strålning förhöjda temperaturer på golvets yta. Svängningen i temperatur beror under sommarperioden även på belysningen i lokalen.



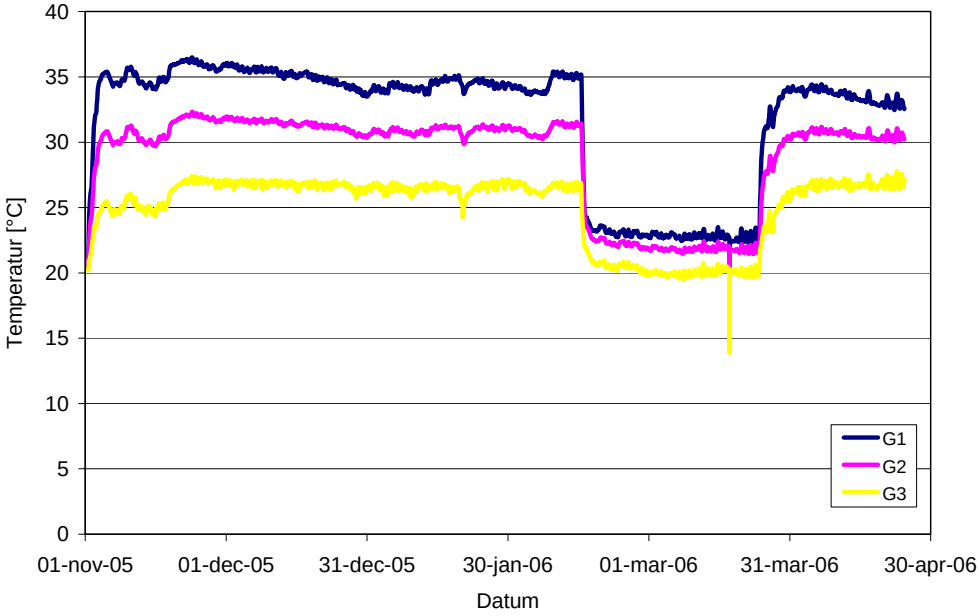
Figur 19. Temperaturer i och ovanför bjälklag B1.



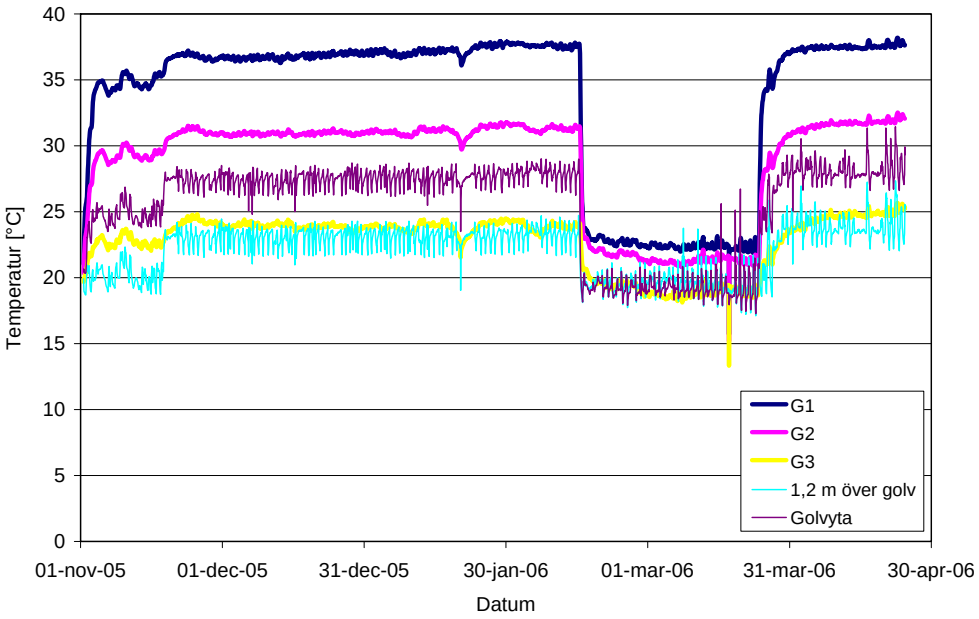
Figur 20. Temperaturer i bjälklag B2.



Figur 21. Temperaturer i bjälklag B3.



Figur 22. Temperaturer i bjälklag B4.



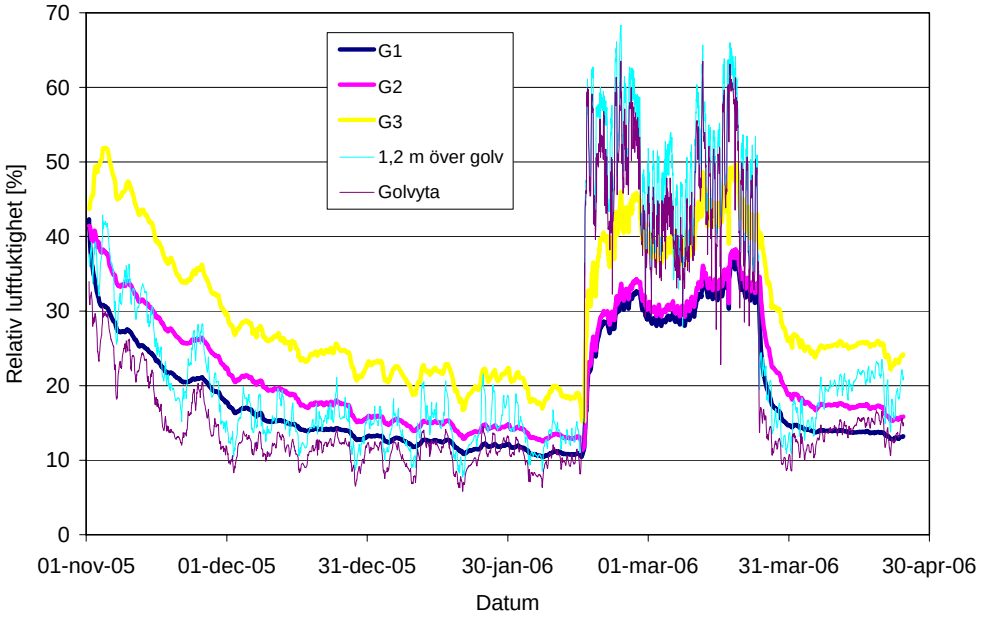
Figur 23. Temperaturer i bjälklag B5

Relativ luftfuktighet

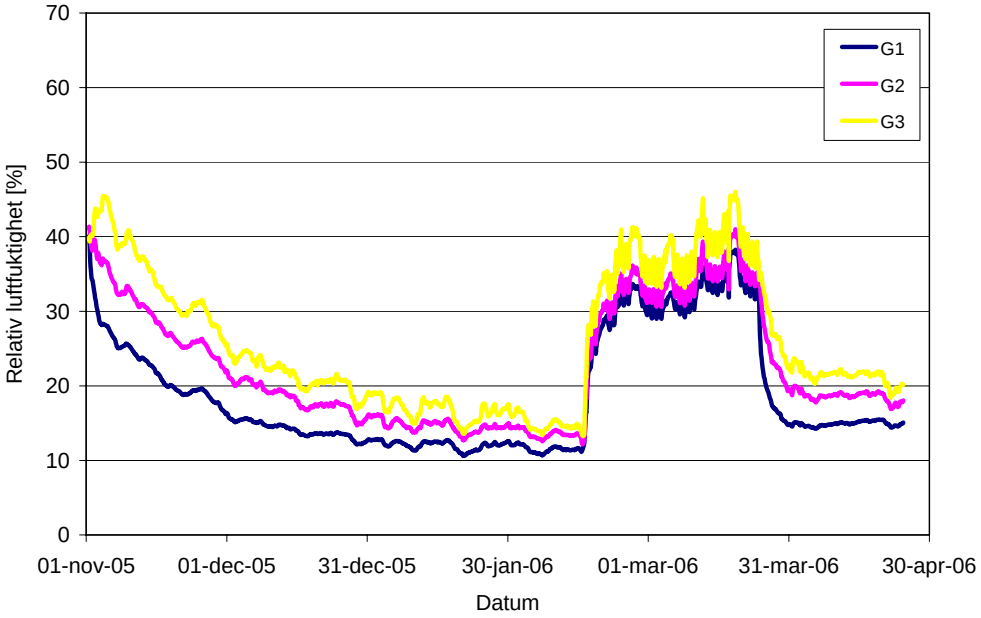
Den relativa luftfuktigheten RF i provningshallen, figur 24, 26, 28, sjönk under den inledande vinterperioden från ca 40 % till ca 10-15 % vilket är normalt vid rådande utomhusklimat med temperaturer på -20°C och lägre. Observera dock att detta klimat är betydligt torrare än RF-intervallet 30 – 60 % som föreskrivs i HusAma och av Golvbranschens riksförbund. Inne i bjälklagen, figur 24 – 28, sjönk RF under samma period på motsvaran-

de sätt men minskningen var något mindre. Med undantag för bjälklag B3 finns det en tydlig gradient hos RF över bjälkarnas tvärsnitt (G1-G3). I bjälklag B3 är det endast små skillnader i RF över bjälkens tvärsnitt. Detta beror sannolikt på att det bildats en spalt mellan isolering och bjälke som tillåter att klimatet utjämnas i höjdled.

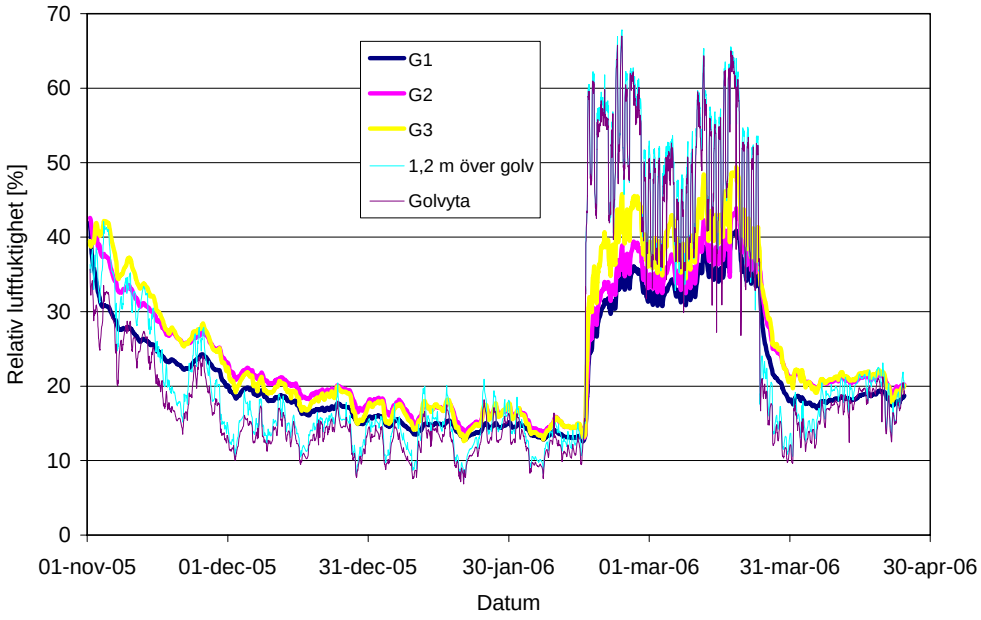
Under sommarperioden var målsättningen att uppnå en RF i lokalen av ca 60 % vilket inte var fullt möjligt pga. låga utomhustemperaturer. Under perioden varierar RF under dygnet med ca 20 %. Variationen beror främst på ventilationen av lokalen under arbetstid.



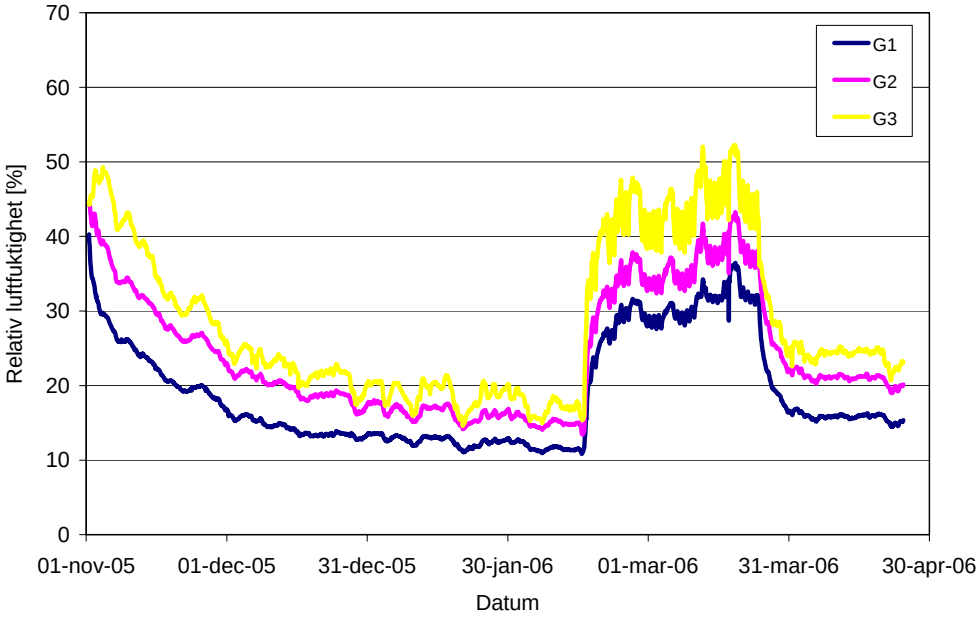
Figur 24. Relativ luftfuktighet inne i och ovanför bjälklag B1.



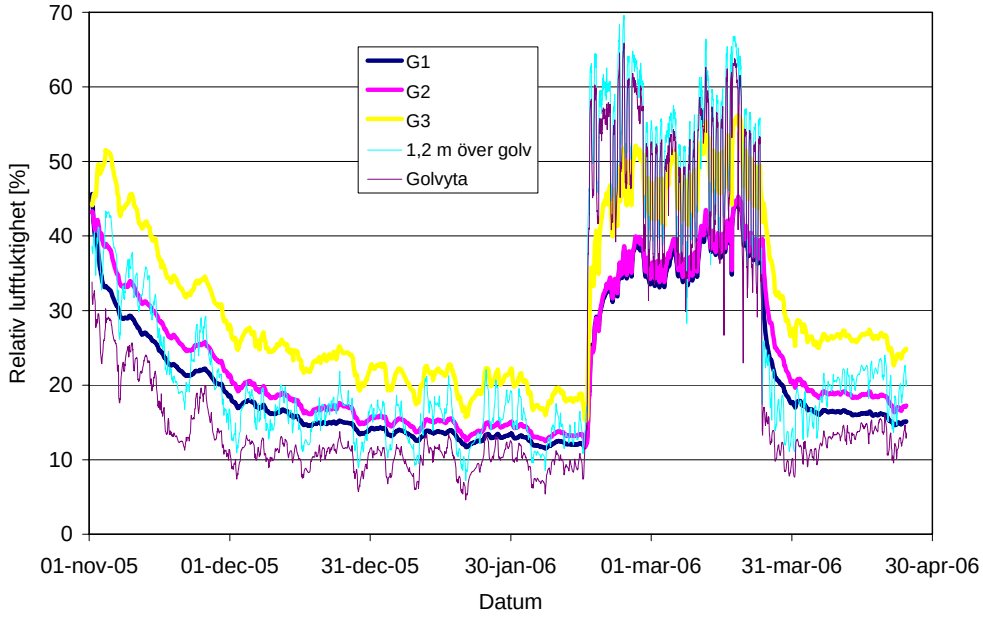
Figur 25. Relativ luftfuktighet inne i bjälklag B2.



Figur 26. Relativ luftfuktighet inne i och ovanför bjälklag B3.



Figur 27. Relativ luftfuktighet inne i bjälklag B4.

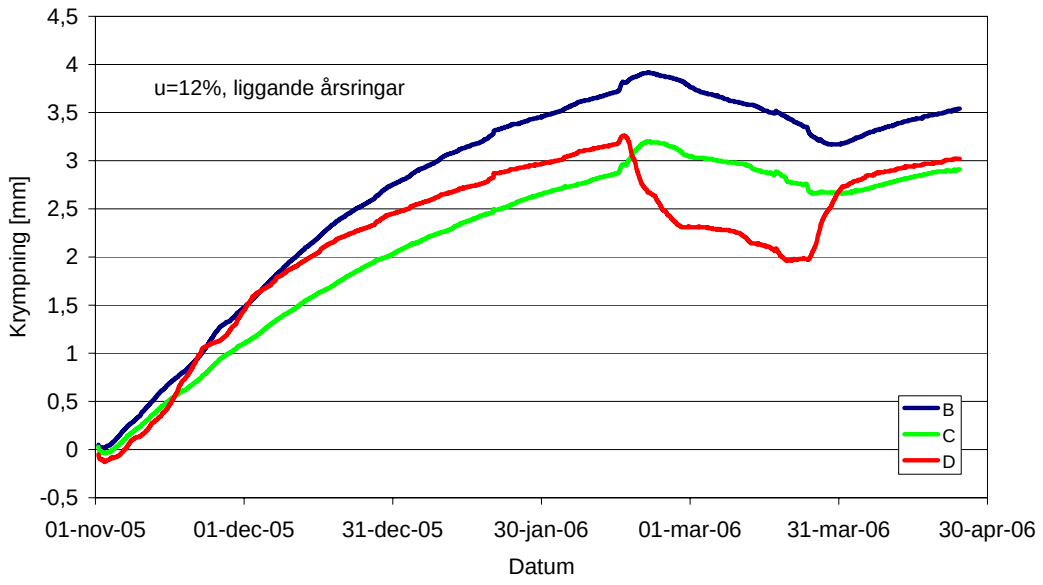


Figur 28. Relativ luftfuktighet inne i och ovanför bjälklag B5.

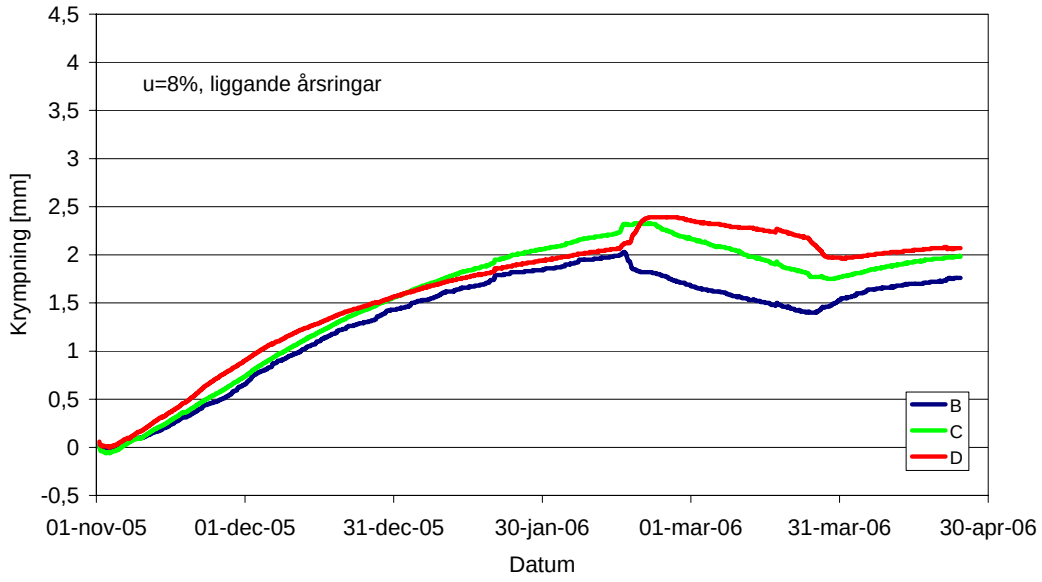
3.3 Deformationer i bjälklag med golvvärme

3.3.1 Krympning hos träbalkar

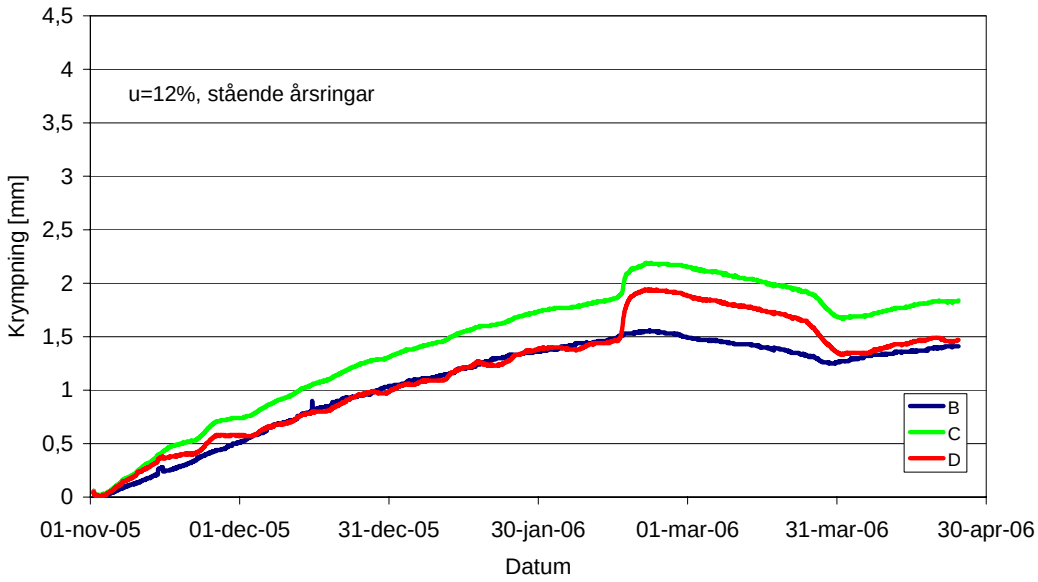
Krympning och svällning hos de tre mellersta bjälkarna B, C och D i varje bjälklag redovisas i figur 29 - 33. Av figurerna framgår att bjälkar med en initial fuktkvot av 12 %, figur 29, 31, 33, krymper mer än bjälkar med initial fuktkvot av 8 %, figur 30, 32. I slutet av den första vinterperioden har bjälkar med initial fuktkvot 12 % som mest krympt ca 4 mm på höjden. Bjälkar med initial fuktkvot 8 % har under samma period som mest krympt ca 2,5 mm. Försöken visar även att sågningsmönstret har stor betydelse för bjälkarnas krympning. Bjälkar tagna från yttre centrumbitar med liggande årsringar krymper här mer än bjälkar från inre centrumbitar med stående årsringar. Under sommarperioden som varar i 68 dagar sväller bjälkarna som mest ca 1 mm. En snabb ökning i krympningen registreras hos flera bjälkar när sommarperioden börjar. Vad som orsakar detta är dock oklart.



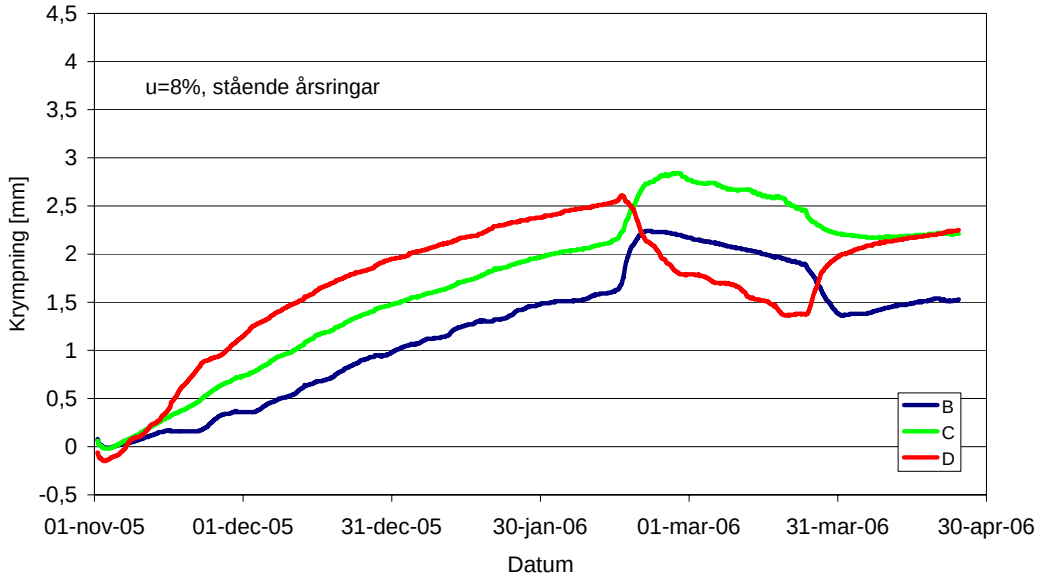
Figur 29. Krympning uppmätt i mitten av de tre mellersta bjälkarna B, C och D i bjälklag B1. Samtliga bjälkar har liggande årsringar och initial fuktkvot 12 %.



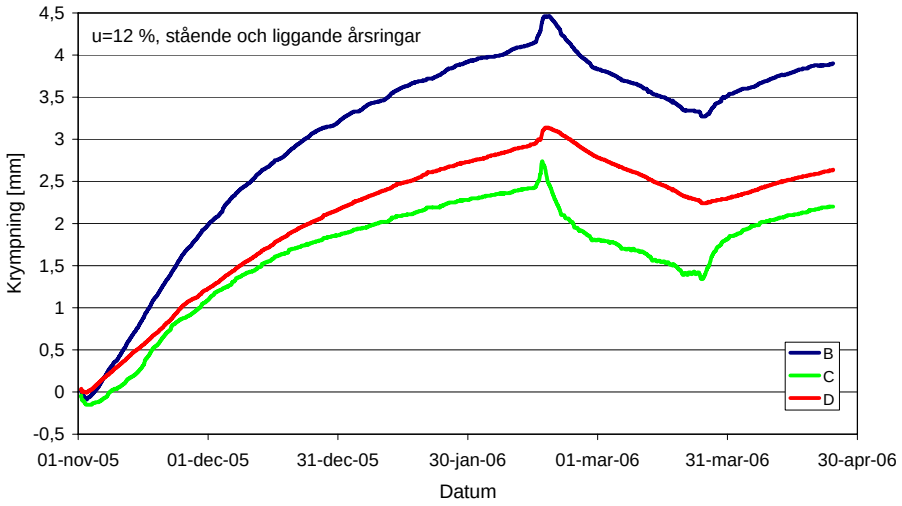
Figur 30. Krympning uppmätt i mitten av de tre mellersta bjälkarna B, C och D i bjälklag B2. Samtliga bjälkar har liggande årsringar och initial fuktkvot 8 %.



Figur 31. Krympning uppmätt i mitten av de tre mellersta bjälkarna B, C och D i bjälklag B3. Samtliga bjälkar har stående årsringar och initial fuktkvot 12 %.



Figur 32. Krympning uppmätt i mitten av de tre mellersta bjälkarna B, C och D i bjälklag B4. Samtliga bjälkar har stående årsringar och initial fuktkvot 8 %.

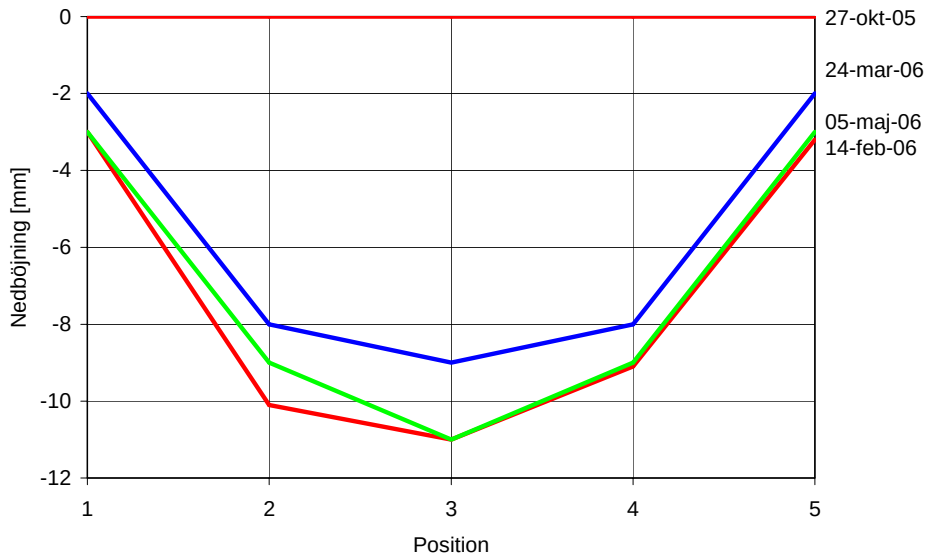


Figur 33. Krympning uppmätt i mitten av de tre mellersta bjälkarna B, C och D i bjälklag B5. Bjälke B och D har liggande årsringar och bjälke C stående årsringar. Samtliga bjälkar har initial fuktkvot 12 %.

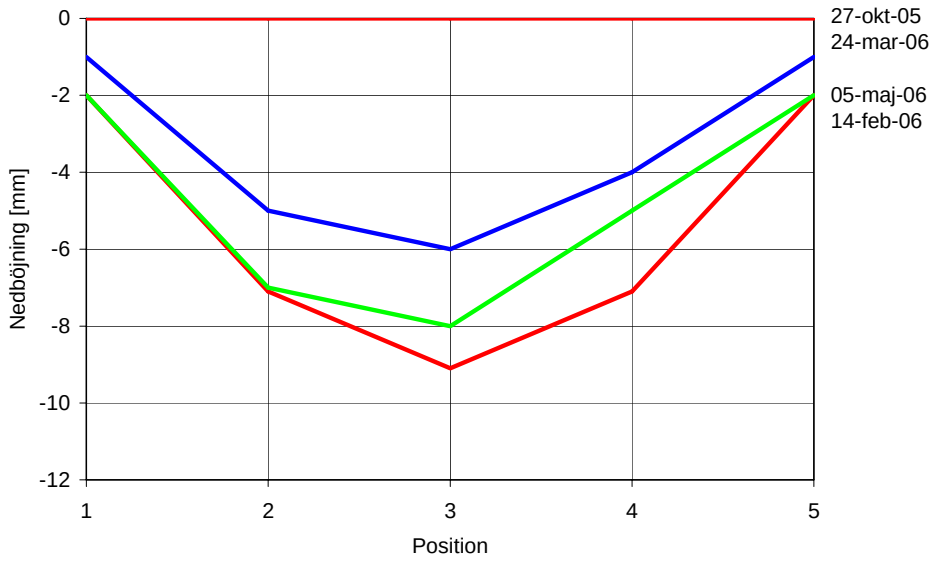
3.3.2 Nedböjning av bjälklaget

Nedböjningen i olika positioner längs den mellersta bjälken i varje bjälklag redovisas i figur 34-38. I figurerna motsvarar röda och gröna kurvor nedböjningen i slutet av de två vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurvor motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme. Datum anger mättillfälle och sammanfaller med kurvornas ordning i figuren. Horisontell röd linje motsvarar bjälklagets nedböjning innan golvvärmen slogs på. Av figurerna framgår att nedböjningen efter 76 dagars uppvärmning (röd kurva) är ca 11 mm i position 3 hos bjälklag B1 och B5. Båda dessa bjälklag hade virke med initial fuktkvot 12 %. Resultaten visar dock inget tydligt samband mellan nedböjningens storlek och initial fuktkvot hos bjälkarna. Skillnaden i nedböjning mellan bjälklagen är totalt sett liten. Krympningen hos spånskivan har sannolikt större inverkan på bjälklagets nedböjning än den längsgående krympningen i bjälkarna.

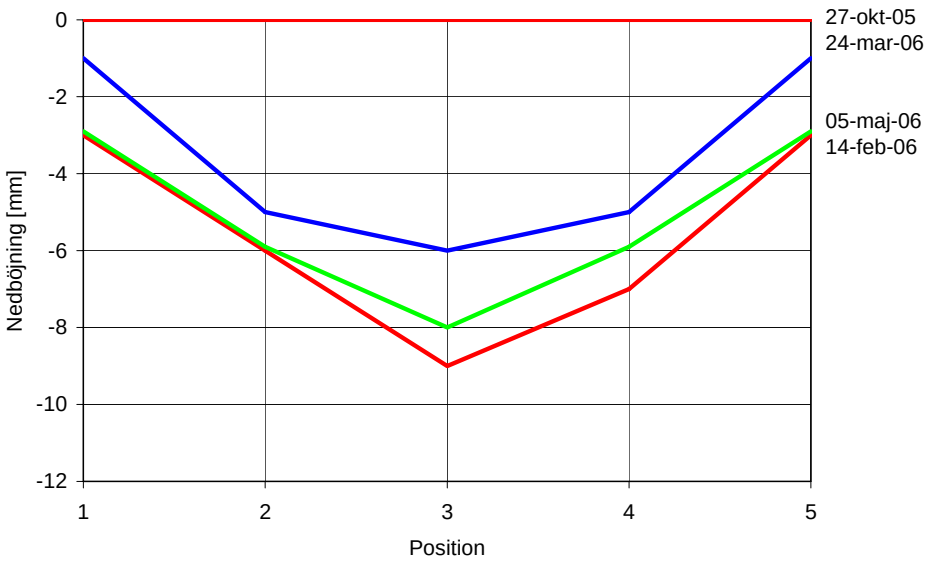
Figur 39-43 visar hur den maximala nedböjningen hos de mellersta bjälkarna (B, C, D) varierar under hela provningsperioden. För bjälklag B1, B3 och B5 ökar nedböjningen även i början av sommarperioden.



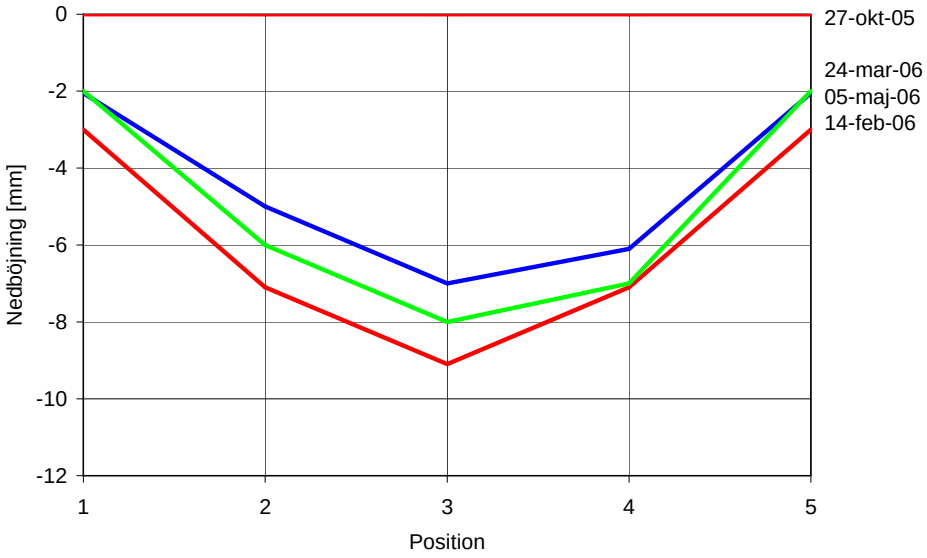
Figur 34. Nedböjningens variation längs bjälke C i bjälklag B1. Röd och grön kurva motsvarar nedböjningen i slutet av de båda vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurva motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme.



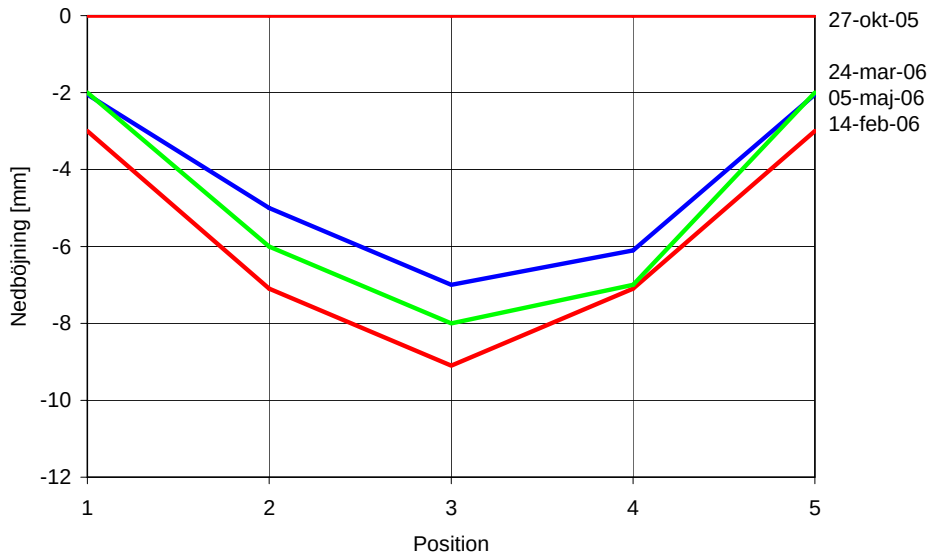
Figur 35. Nedböjningens variation längs bjälke C i bjälklag B2 och grön kurva motsvarar nedböjningen i slutet av de båda vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurva motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme.



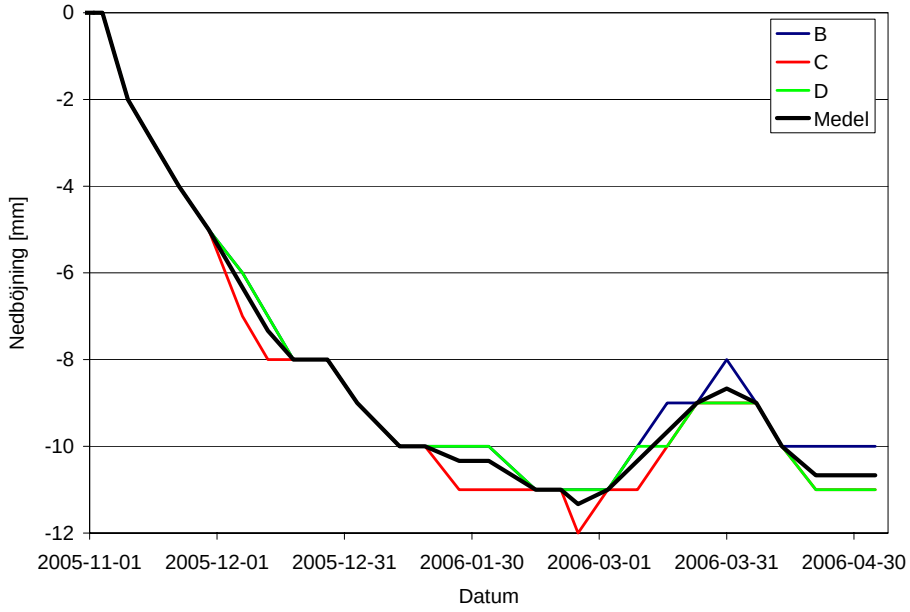
Figur 36 Nedböjningens variation längs bjälke C i bjälklag B3 och grön kurva motsvarar nedböjningen i slutet av de båda vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurva motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme.



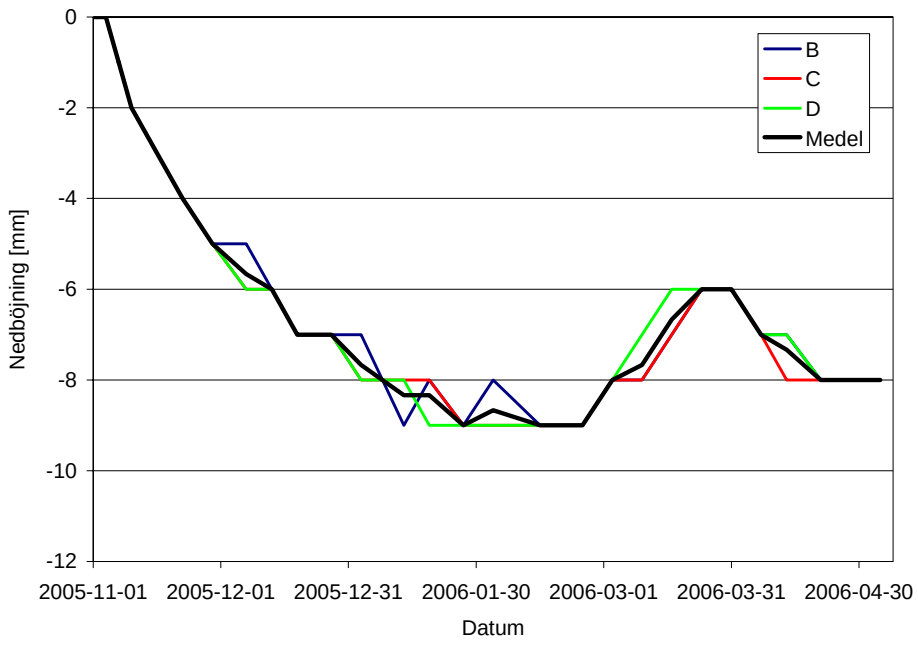
Figur 37. Nedböjningens variation längs bjälke C i bjälklag B4 och grön kurva motsvarar nedböjningen i slutet av de båda vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurva motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme.



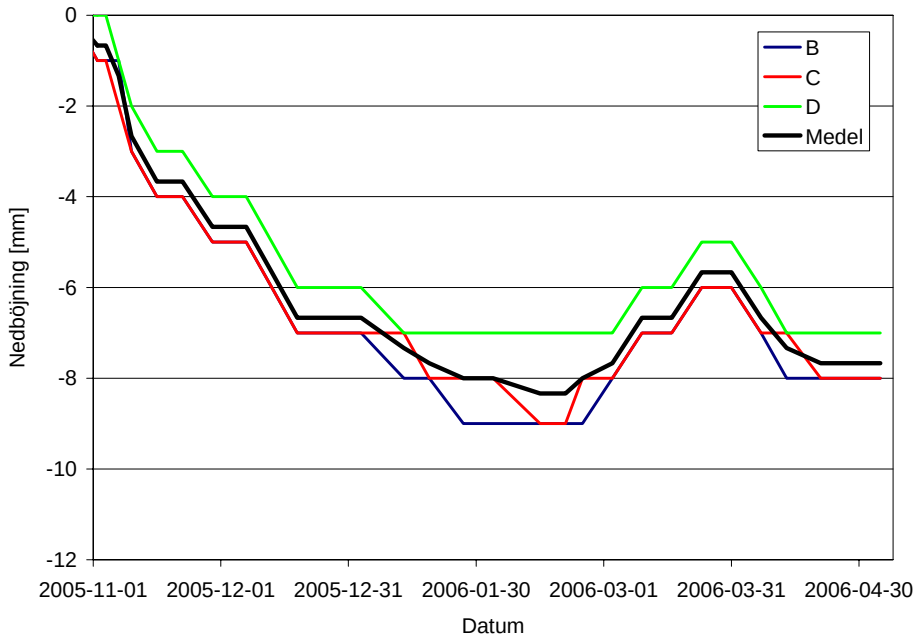
Figur 38. Nedböjningens variation längs bjälke C i bjälklag B5 och grön kurva motsvarar nedböjningen i slutet av de båda vinterperioderna med påslagen golvvärme. Blå kurva motsvarar nedböjningen i slutet av sommarperioden med avslagen golvvärme.



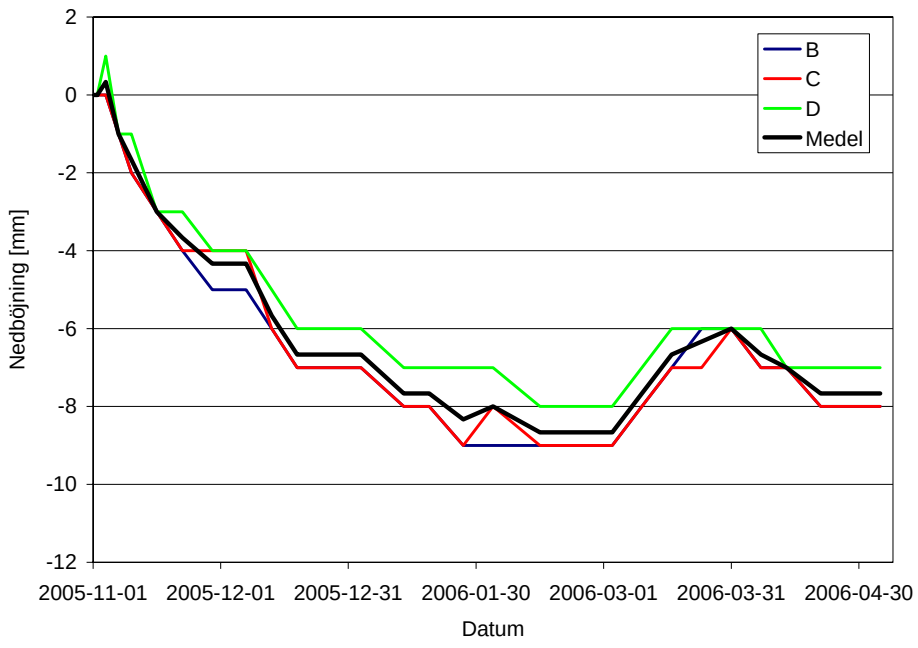
Figur 39. Maximal nedböjning i mitten av de tre mellersta bjälkarna i bjälklag B1.



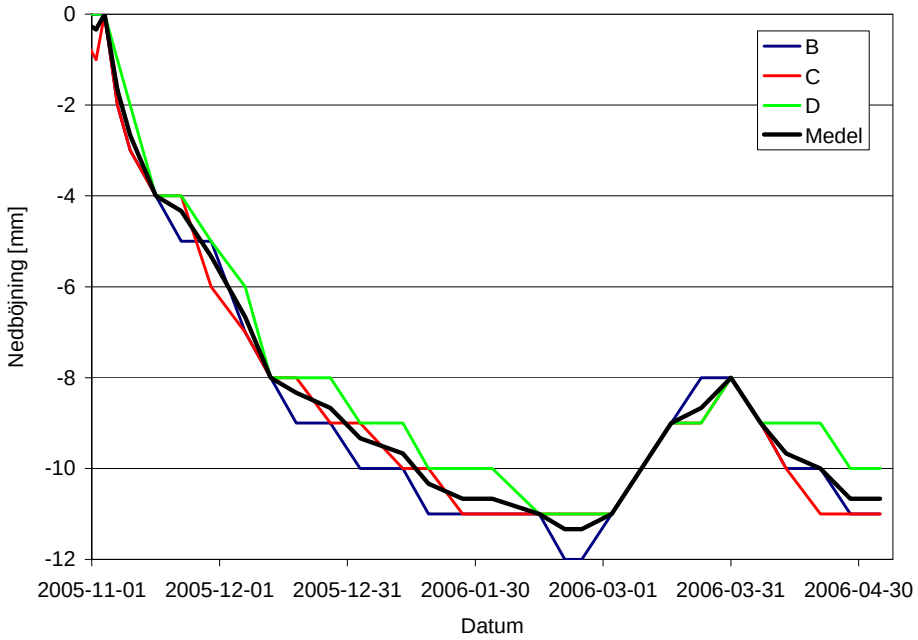
Figur 40. Maximal nedböjning i mitten av de tre mellersta bjälkarna i bjälklag B2.



Figur 41. Maximal nedböjning i mitten av de tre mellersta bjälkarna i bjälklag B3.



Figur 42. Maximal nedböjning i mitten av de tre mellersta bjälkarna i bjälklag B4



Figur 43. Maximal nedböjning i mitten av de tre mellersta bjälkarna i bjälklag B5

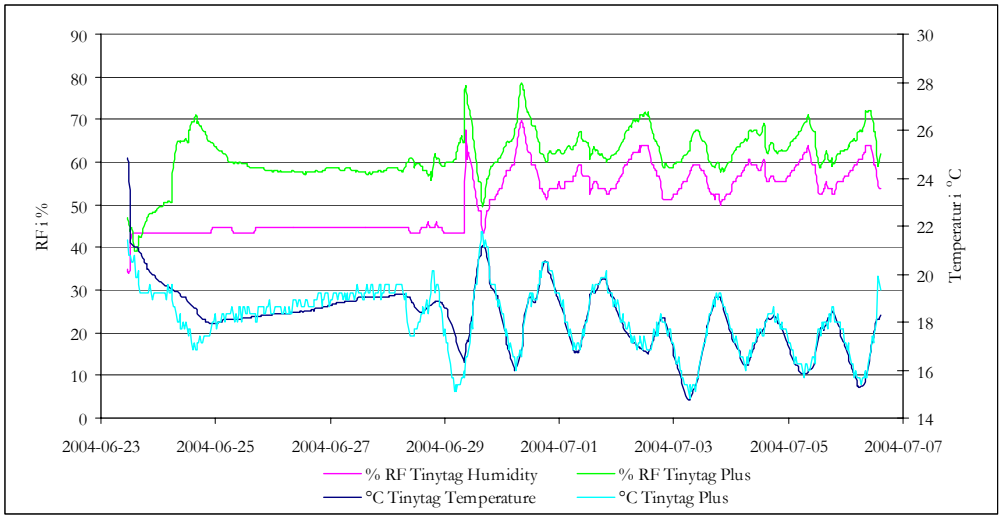
Försöken med bevattning av spånskivans ovansida medförde omgående att samtliga bjälklags nedböjning minskade med ca 4 mm. Därefter ökade den ca 1-3 mm för att sedan avstanna. Den förväntade effekten att bjälklagets nedböjning skulle bli större än den ursprungliga när spånskivan torkade efter uppfuktning uteblev dock. Orsaken är troligtvis att spånskivan var kraftigt uttorkad efter försöken med golvvärme och att uppfuktningen av ytan inte var tillräcklig utan endast gav en fuktkvot i ytskiktet som motsvarar rådande RF i omgivningen.

3.4 Mätningar i bjälklag i nyproducerade hus

Nedan följer de uppmätta resultaten från husen i Upplands Väsby, Tjörn och Hässelby.

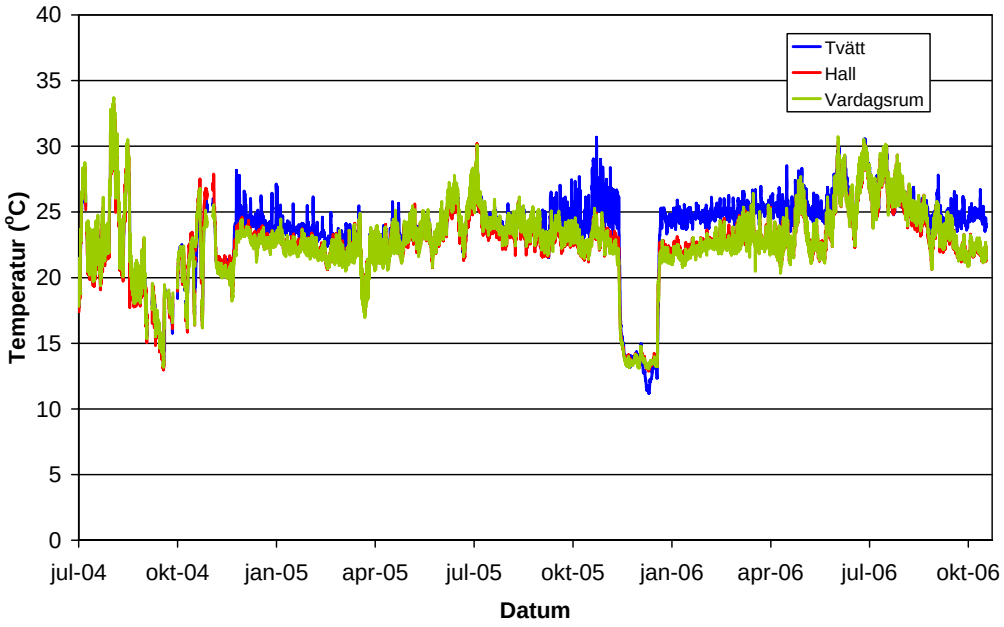
3.4.1 Upplands Väsby

Mätningarna i de två provhusen i Upplands Väsby började redan på fabriken i Myresjö när bjälklagen var klara för transport. I figur 44 nedan visas det klimat som rådde under tiden från produktion på husfabriken tills husen var stomklara i Upplands Väsby. Mätningarna visar klart att bjälklagen inte utsatts för någon uppfuktning eller extrem uttorkning under transport och byggnation. Den relativa luftfuktigheten har huvudsakligen varierat i intervallet 50 - 70 % vilket ger en jämviktsfuktkvot i intervallet 9 – 13 %. Detta medför att konstruktionsvirket som har 18 % i fuktkvot börjar torka redan i husfabriken och under hela processen fram till stomklart hus. Beräkningar med programvaran TORKSIM från SP Trätek visar att virket med 18 % fuktkvot torkar ned till ca. 16 % under den tvåveckorsperiod som visas i figur 44. Detta medför att fuktkvoten var ca. 16 % i hus 18 när loggningarna av krympningen startade. Konstruktionsvirket med 12 % fuktkvot påverkas i stort inte av klimatförhållandena under hela tillverkningsprocessen enligt beräkningar med TORKSIM. Detta medför i sin tur att konstruktionsvirket med 12 % fuktkvot inte krymper, sväller eller på något annat vis deformeras under byggprocessen. Observera dock att detta gäller denna årstid, under vinterhalvåret vet vi att den relativa luftfuktigheten är högre utomhus varför man kan förmoda att virket med 12 % fuktkvot skulle fuktas upp något vid byggnation under vinterhalvåret. Uppfuktningen kan dock reduceras betydligt om luftrörelserna kring virket reduceras genom emballering, täckning eller inbyggnad. Temperatursvängningarna mellan dag och natt syns mycket tydligt i figur 44 och svängningarna är relativt stora. Detta kan orsaka problem med kondens under byggnation framförallt om det under dagen avdunstar mycket fukt från uttorkande betong eller en fuktig trästomme. Med anledning av detta är det ofta nödvändigt att installera en avfuktare i byggnaden under tiden byggnation pågår. Uttorkning med enbart värme kan orsaka problem främst under vinterhalvåret då varm fuktig luft kondenserar på vägen ut genom byggnaden.

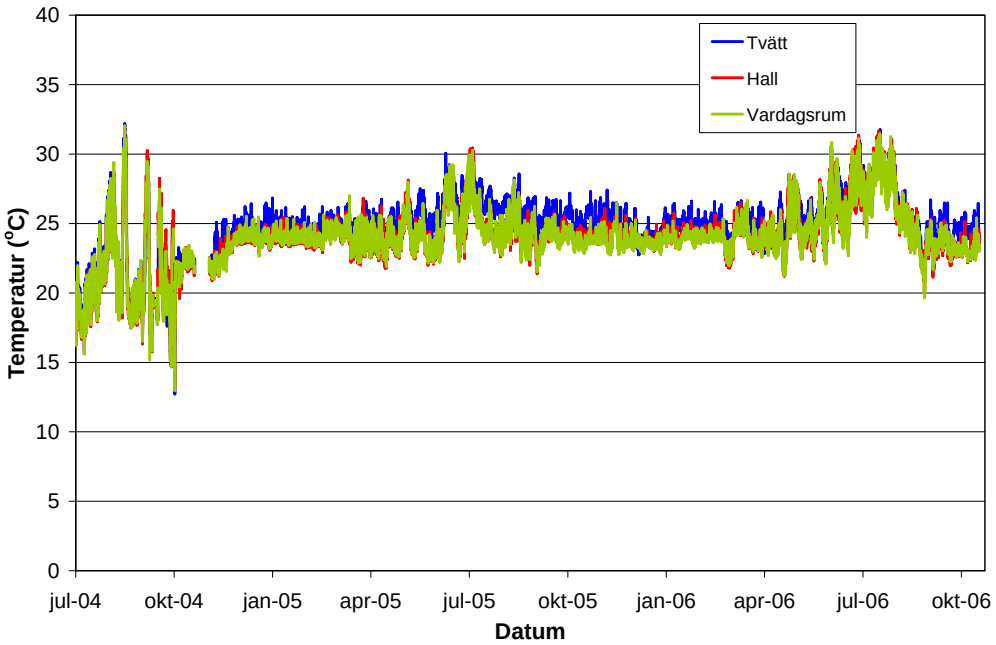


Figur 44. Registrerat klimat från produktion av bjälklagen på fabrik i Myresjö till stomklart hus 12 i Upplands Väsby. Loggningarna av klimat och svällning/ krympning startade 2004-07-07.

Figur 45 och 46 visar temperaturen i bjälklagen i hus 18 respektive 12. Ur figurerna framgår det att temperaturerna i bjälklaget varierar kraftigt under hela byggprocessen fram tills husen är klara för inflyttning. Efter inflyttning i oktober 2004 stabiliseras temperaturerna betydligt. Observera att bjälklagen i dessa hus inte är utrustade med golvvärme men trots detta ligger temperaturen i bjälklagen väl över 20 °C året runt i alla mätpunkterna. Hus 18 har en rejäl sänkning av temperaturen under en längre period under vintern 2005/2006, detta beror på att huset varit obebott med neddragen värme under denna tidsperiod.

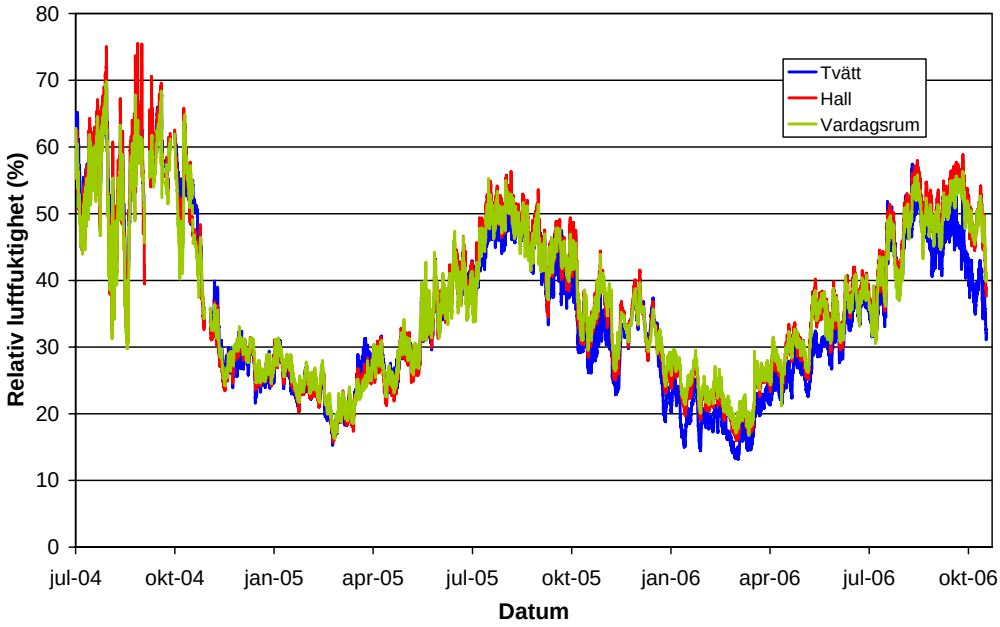


Figur 45. Temperaturer i mellanbjälklaget i hus 18.

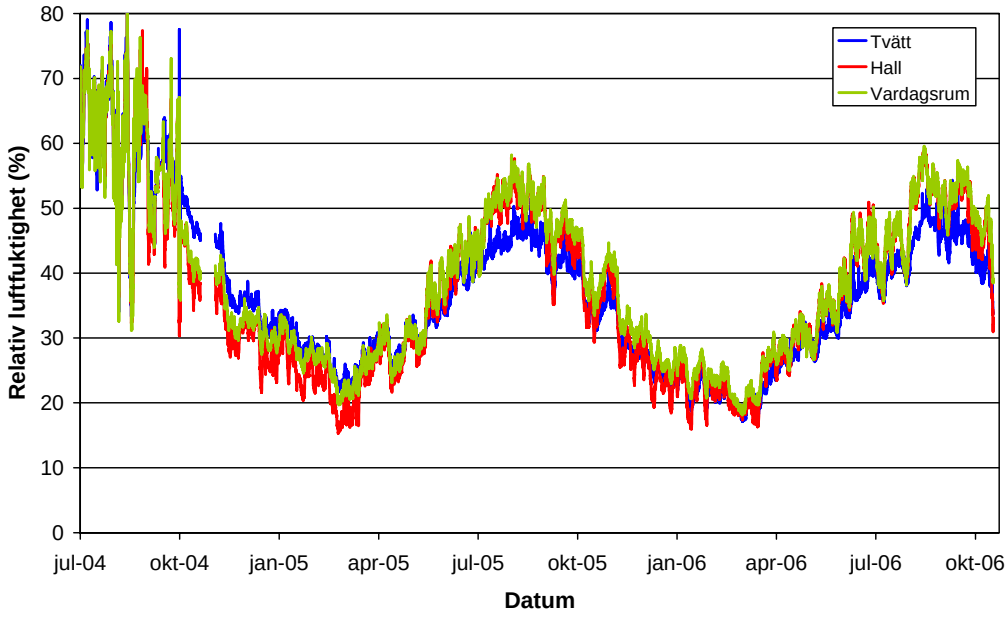


Figur 46. Temperaturer i mellanbjälklaget i hus 12.

Den relativa luftfuktigheten varierar inomhus under en årscykel med ett typiskt utseende som påminner om en sinusvåg, figur 47 och 48. Den relativt stora förändringen i luftfuktighet under en årscykel beror på en relativt stor förändring i uteluftens temperatur och fuktinnehåll. Vintertid är utomhusluften kall och kan därmed innehålla mycket litet fukt mätt i g vatten per kg torr luft även om den relativa luftfuktigheten är hög. När denna luft ventileras in i huset och värms upp resulterar det i att den relativa luftfuktigheten i luften sjunker kraftigt eftersom varm luft kan innehålla betydligt mer vatten. Den årstidsvisa svängningen i relativ luftfuktighet i både hus 18 och 12 är helt normalt för hus i denna del av landet. Denna svängning motsvarar en jämviktsfuktkvot i bjälklagen i intervallet 4 – 10 %. Notera att den relativa luftfuktigheten är något lägre den andra vintern jämfört med den första. Detta beror troligtvis på uttorkning av byggfukt som fortfarande pågår under första vintern. Erfarenhetsmässigt vet man att om det blir problem med fuktrelaterade rörelser så är problemen ofta som störst den andra vintern. Detta är tydligast då inte golvvärme är installerad, med golvvärme blir perioden för uttorkning av byggfukten i bjälklagen betydligt kortare.

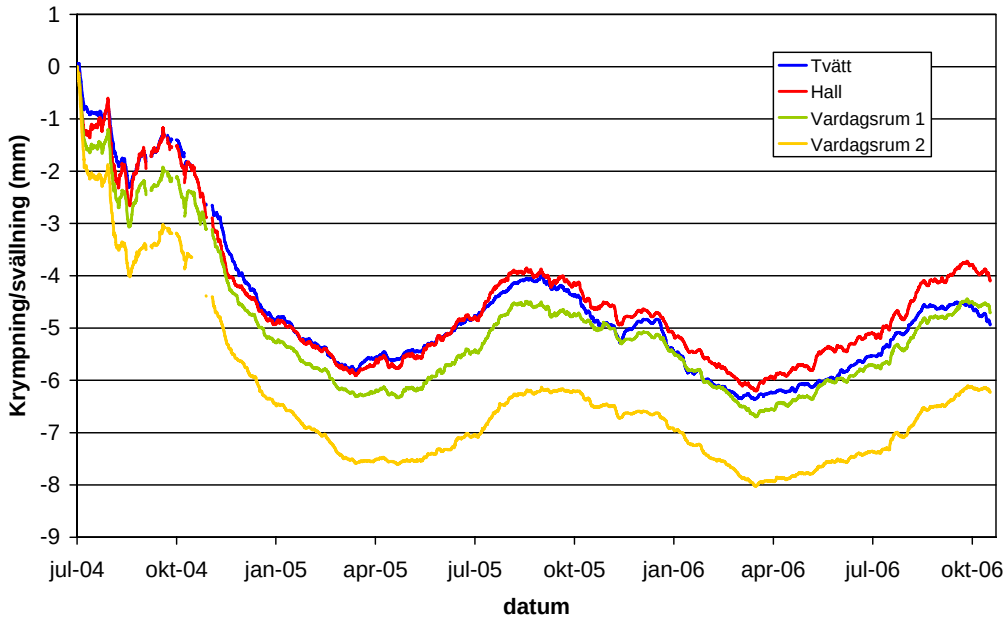


Figur 47. Relativ luftfuktighet i mellanbjälklaget i hus 18.



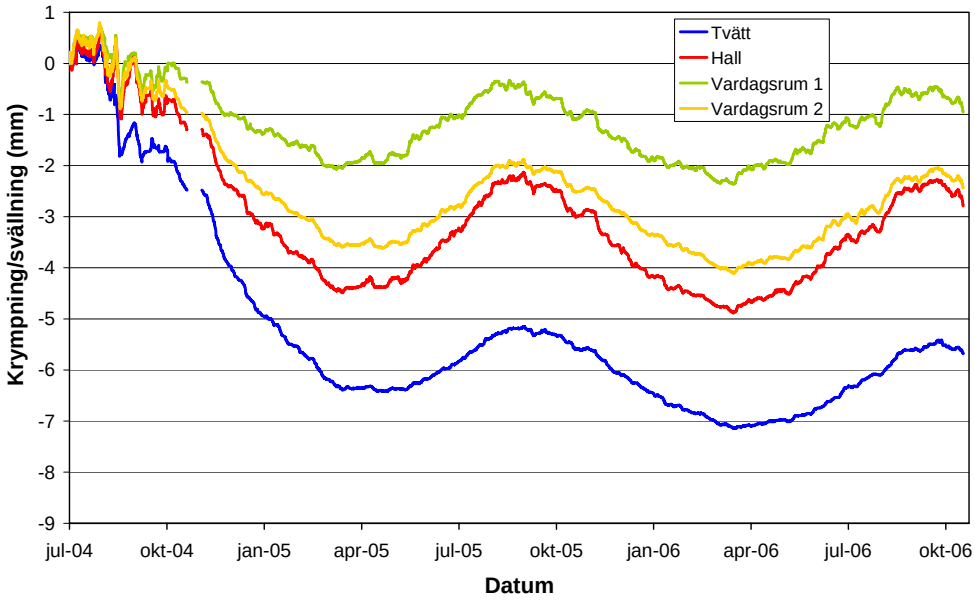
Figur 48. Relativ luftfuktighet i mellanbjälklaget i hus 12.

Med de klimat som råder inomhus och i bjälklagen förstår man att krympningen av konstruktionsvirket kommer att bli betydlig när den initiala fuktkvoten är 18 % . I figur 49 visas förändringen i golvbjälkarnas höjder i hus 18. Det framgår klart att det är den initiala krympningen som ger den största förändringen. I hus 18 är den initiala krympningen upp till 8 mm medans den årstidsberoende förändringen är mindre än 2 mm. Observera att den uppmätta initiala krympningen gäller för en startfuktkvot kring 16 % och inte 18 %. Detta beror på att virket torkat under lagring, transport och byggnation, se figur 44. Nedtorkningen från 18 % till 16 % under lagring och transport motsvarar en krympning på ca. 1 mm på höjden 220 mm på de aktuella golvbjälkarna. Spridningen i krympning beror till stor del på att virket är taget ur olika delar av stocken. De virkesstycken som är tagna nära märgen krymper minst pga. att årsringarna blir mer stående i dessa. I Figur 49 visar kurvan ”vardagsrum 2” mätningar utförda på en golvbjälke som har stor andel liggande årsringar vilket ger mer krympning. Övriga golvbjälkar i mätningen är tagna nära centrum av stocken och har mer stående årsringar.

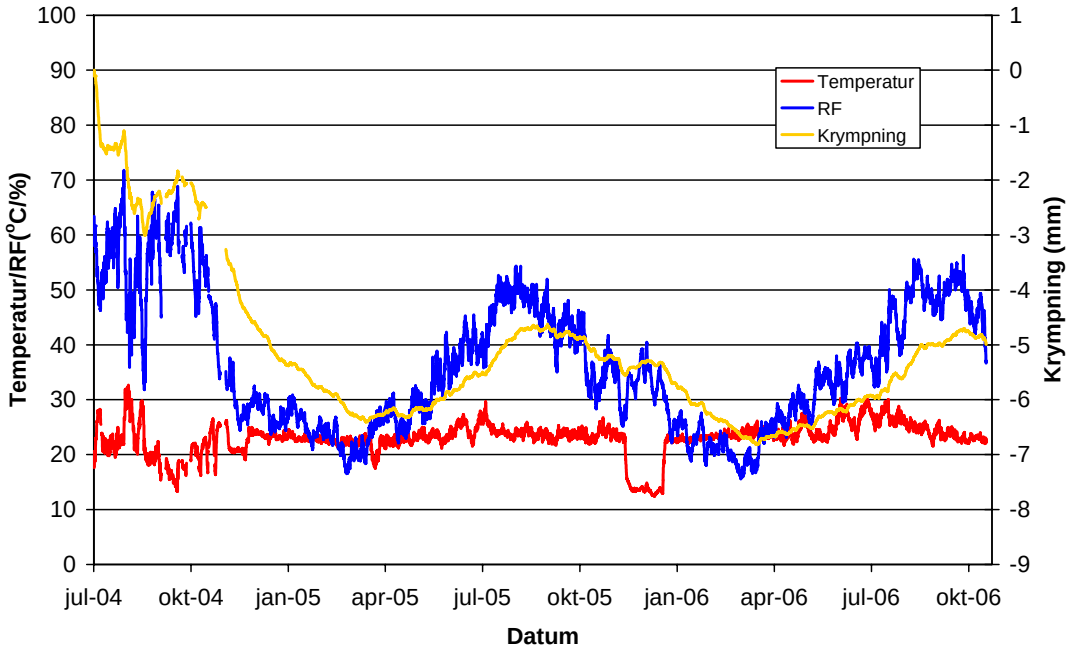


Figur 49. Krympning och svällning av golvbjälkarnas höjder i hus 18. Golvbjälkarnas nominella höjd var 220 mm.

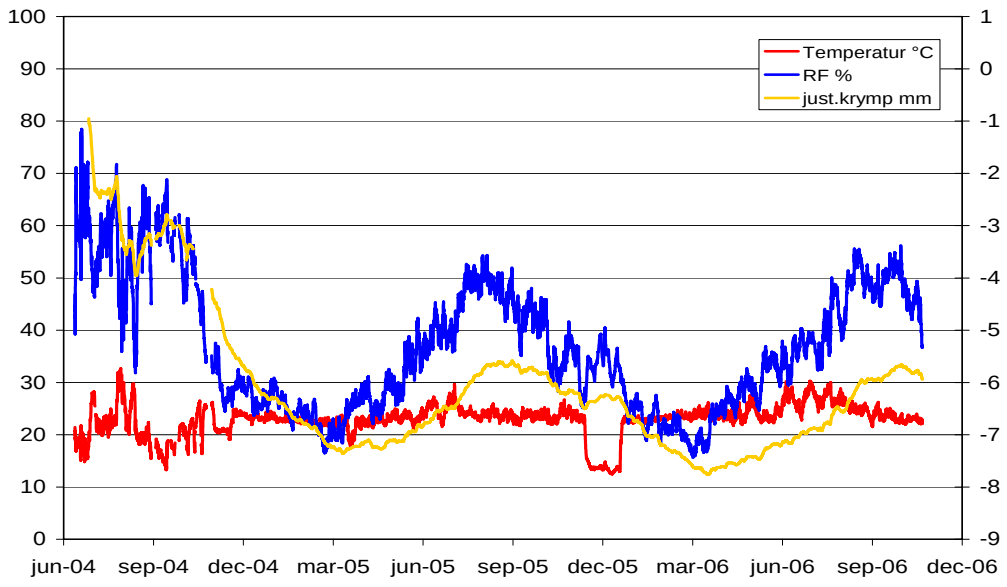
Krympningen i hus 12, figur 50, har även den en stor spridning som beror på bjälkarnas olika egenskaper. Krympningsegenskaperna hos golvbjälkarna beror på flera faktorer några av de dominerande är årsringsmönster, densitet och förekomst av tjurved. Ur figur 51 och 53 kan man konstatera att medelkrympningen för konstruktionsvirket med 18 % fuktkvot är som störst 6,8 mm och för 12 % fuktkvot är krympningen som störst 4,5 mm. Överslagsmässiga beräkningar visar att skillnaderna borde ha varit större, krympningen hos virket med 12 % borde varit hälften av krympningen för virke med 18 % fuktkvot. Orsaken till att skillnaden inte blev så stor är dels skillnaderna i de utvalda bjälkarnas årsringsmönster samt att det bjälklagen med 18 % fuktkvot torkade till ca 16 % under tillverkning, transport och byggnation, se figur 44. Beräkningar visar att medelkrympningen är 1 mm större om fuktkvoten varit 18 % istället för 16 % när loggningarna av krympningen började. Figur 52 visar justerad medelkrympning där den krympning som sker under lagring, transport och byggnation lagts till den loggade krympningen. Detta medför att den största krympningen ökar med 1 mm till 7,8 mm.



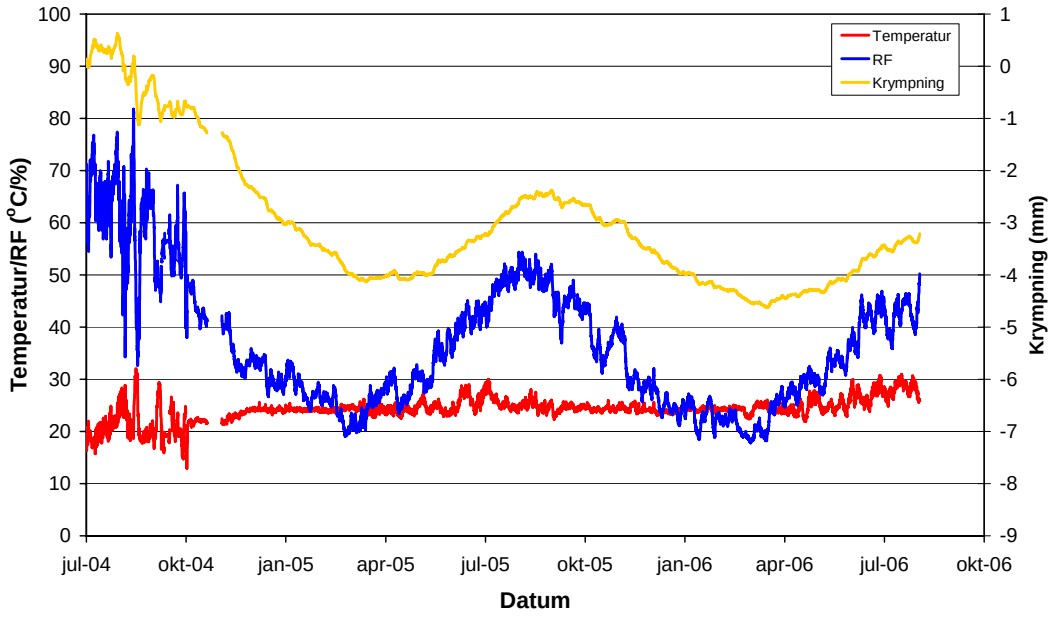
Figur 50. Krympning och svällning av golvbjälkarnas höjder i hus 12. Golvbjälkarnas nominella höjd var 220 mm.



Figur 51. Medelvärden för temperatur, relativ luftfuktighet och krympning avseende mellanbjälklaget i hus 18.



Figur 52. Medelvärden för temperatur, relativ luftfuktighet och krympning avseende mellanbjälklaget i hus 18.

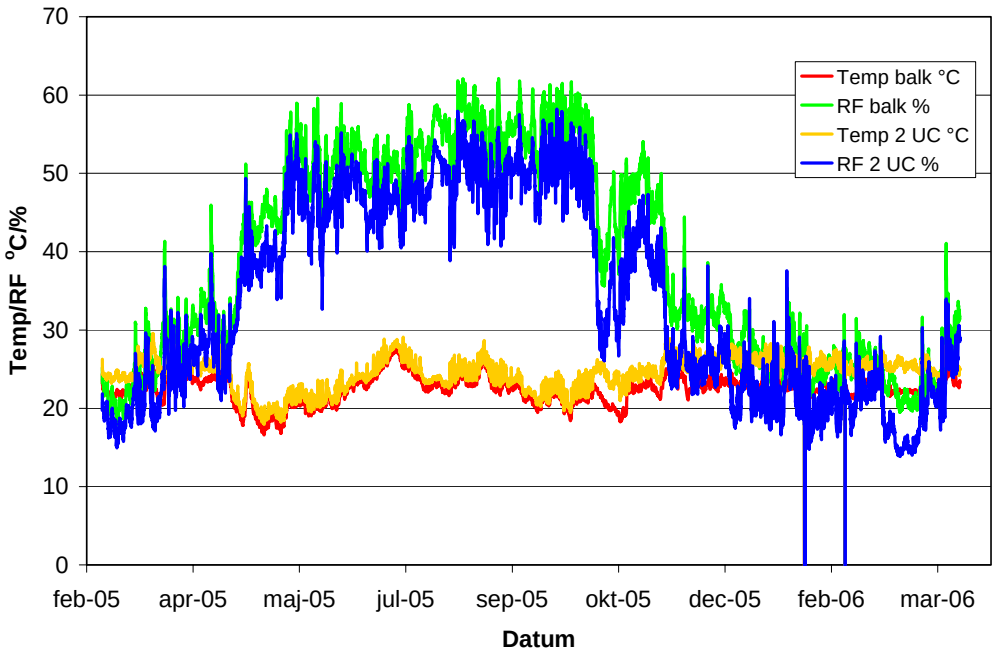


Figur 53. Medelvärden för temperatur, relativ luftfuktighet och krympning avseende mellanbjälklaget i hus 12

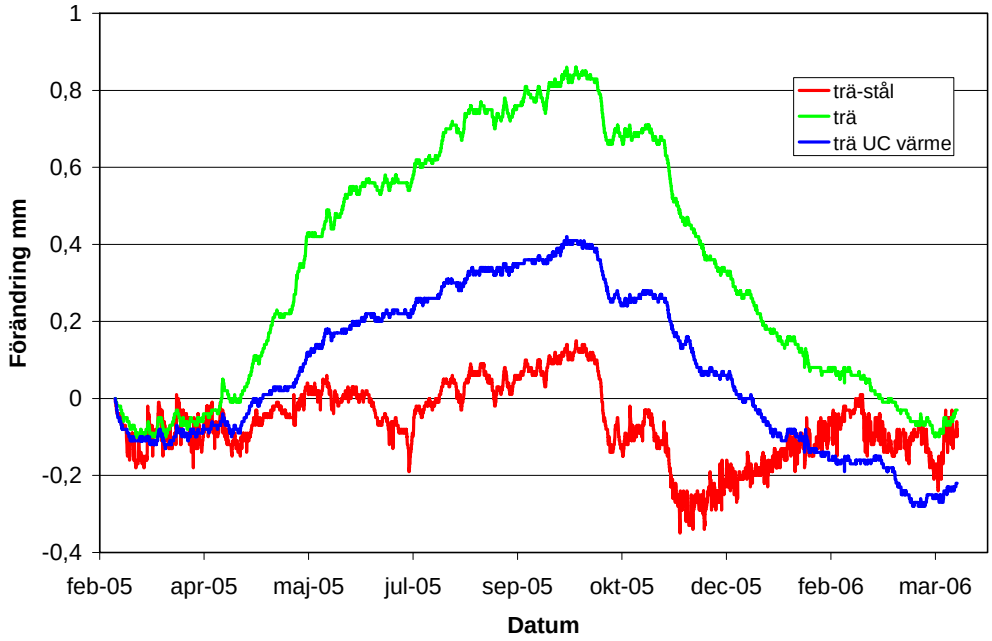
3.4.2 Tjörn

Resultaten från mätningarna i huset på Tjörn visar i figur 54 att klimatet i bjälklaget är helt normalt med en variation i relativ luftfuktighet mellan 15 och 60 %, observera att detta bjälklag endast har komfortvärme i badrummet men att den relativa luftfuktigheten ändå går ned till 15 % under senvintern. Detta stämmer relativt väl överens med mät-

ningarna i Upplands Väsby, avsnitt 3.4.1. Figur 55 visar krympning och svällning under en årscykel, värdena är här ovanligt låga vilket troligtvis beror på krympningsegenskaperna hos de provade golvbjälkarna, tidigare mätningar har visat att skillnaderna mellan olika virkesstyckens krympningsegenskaper är stor. Sammanfattningsvis kan sägas att bjälklaget i huset på Tjörn beter sig normalt. De problem som funnits i huset med stora rörelser berodde inte på rörelser i bjälklaget utan troligtvis på årstidsvisa fuktrelaterade rörelser i takstolarna. Tidigare studier [14] har visat att dessa rörelser är mer framträdande i takstolar med liten lutning vilket också är fallet i huset på Tjörn.



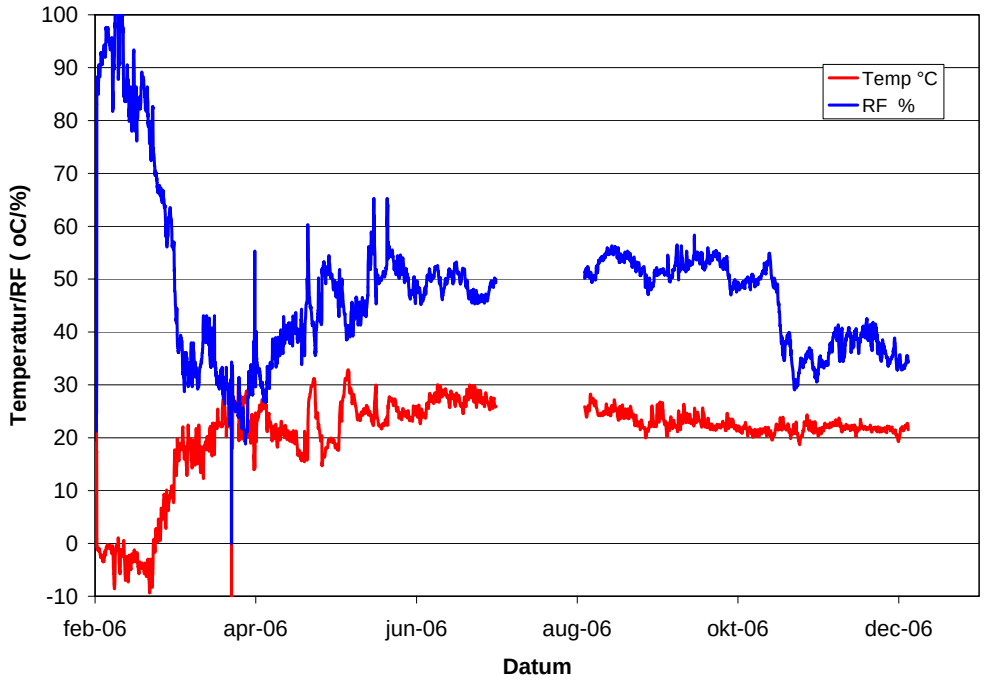
Figur 54. Registrerat klimat i bjälklaget till badrummet. Klimatet är uppmätt på två ställen, ovan tvättstuga och ovan undercentral för värmedistributionen.



Figur 55. Registrerad förändring av golvbjälkarnas höjder, mätningarna är utförda på tre ställen, på golvbjälke ovan undercentral för värme, på golvbjälke ovan tvättstuga och ovankant golvbjälke till stålbalk som bjälken vilar på.

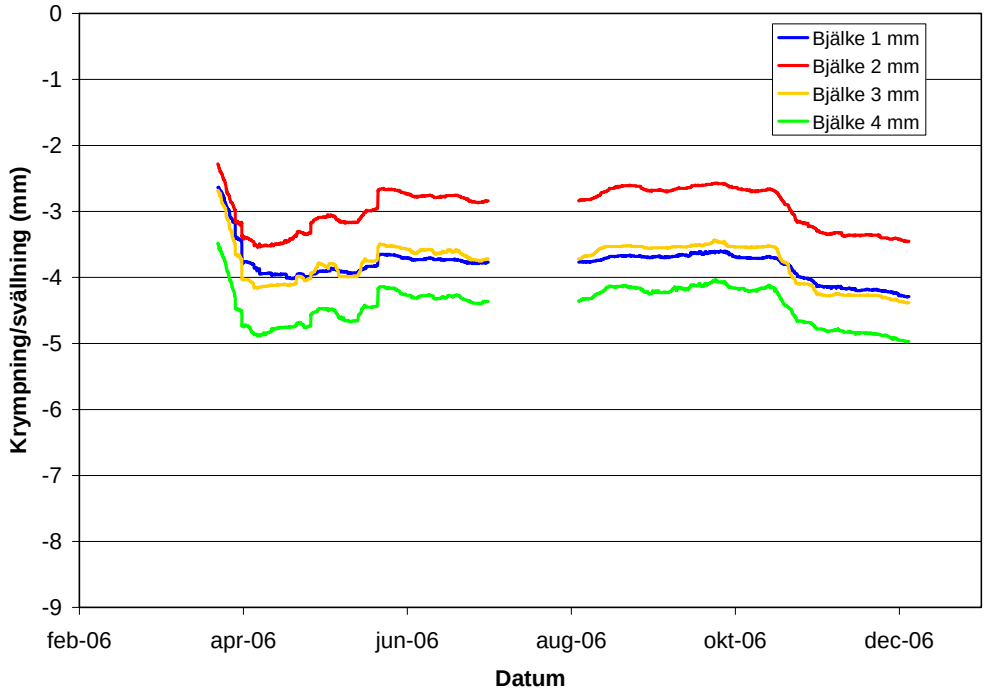
3.4.3 Hässelby

Mätningarna i Hässelby startade i februari 2006 varför vi i detta objekt inte har en hel årscykel. Mätningarna kommer dock att fortsätta i detta hus till sommaren 2008. Eftersom huset i Hässelby uppfördes under vintern 2006 har vi nu även klimatbetingelser vid byggnation under vinterhalvåret. I figur 56 kan man konstatera att den relativa luftfuktigheten i huset varit över 80 % under ca två veckor. Relativa luftfuktigheter över 75 % är kritiskt för mögelpåväxt på trä och andra nedsmutsade material, dock växer i stort inget mögel vid låga temperaturer som i detta fall. När luftfuktigheten var över 80 % var temperaturen i huset under 0 ^{o}C och när man fått tätt hus och börjar värma så sjunker den relativa luftfuktigheten direkt, man skall dock alltid beakta risken för kondens när man torkar ut ett hus under byggnation vintertid. Detta gäller särskilt om man endast använder värme för uttorkning, i många situationer är det bra att även använda en avfuktare eftersom det kan komma mycket fukt från en uttorkande betongplatta eller uppfuktad trästomme.



Figur 56. Registrerat klimat i mellanbjälklag.

Huset i Hässelby är utrustat med golvvärme i både grundplattan och mellanbjälklaget. Golvvärmen startades dock först i slutet av oktober 2006 eftersom inflyttning skedde i juli samma år. I figur 57 kan man se effekten av golvvärmen på krympningskurvorna från slutet av oktober och framåt. Krympningen av golvbjälkarna ökar med ca. 0,8 mm under de sista sju veckorna (06.10.28 – 06.12.15) av mätperioden. Denna krympning beror på nedgången i relativ luftfuktighet under samma period, se figur 56. Den initiala krympningen uppgår i medeltal till ca 4 mm vilket är förväntat. Under den första vintern kommer krympningen troligen att öka med ytterliggare 3-4 mm till en total krympning på 7-8 mm.



Figur 57. Registrerad krympning/svällning hos fyra bjälkar i mellanbjälklaget.

Grannhuset till provhuset i Hässelby som färdigställdes hösten 2005 och som i stort är samma konstruktion visar idag påtagliga tecken på rörelser i bjälklaget. I figur 58 visas ett fotografi där bjälklaget sjunkit i förhållande till golvlisten med 8 mm.

Figur 58. Glipa på 8 mm under golvsockel som uppkommit på grund av krympning i mellanbjälklaget.

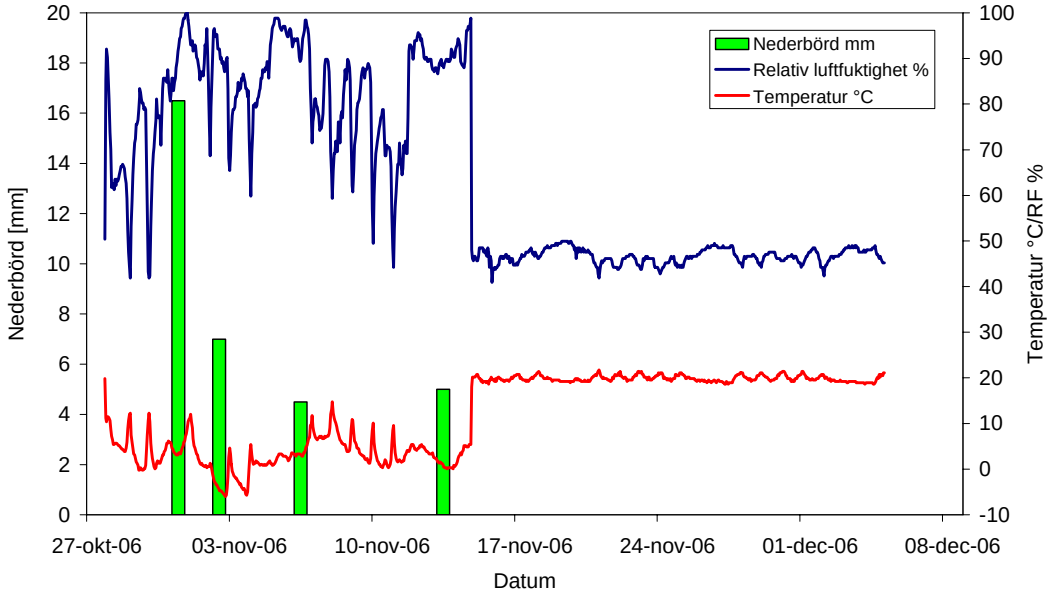
3.5 Utomhusexponering i Stockholm

Resultaten av försöket med utomhusexponering av bjälkar med efterföljande torkning inomhus redovisas i figurerna 59-61. Utomhusexponeringen pågick under 18 dagar. Bjälkarna placerades därefter inomhus för att torka vid 20°C ca 45 % relativ luftfuktighet. Uppmätt nederbörd per dygn, temperatur och relativ luftfuktighet framgår av figur 59.

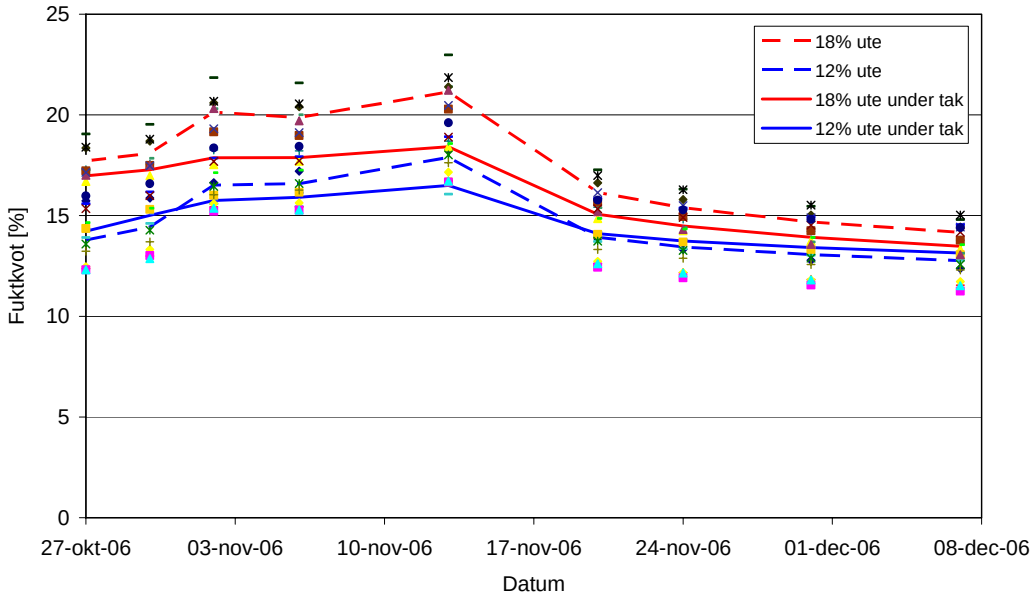
Fuktkvotens variation under utomhusexponering och torkning framgår av figur 60. Fuktkvoten i virket mättes vid start och avslut av försöket med en elektrisk fuktkvotsmätare typ Delmhorst RDM3 med ett inslagsdjup på 1/3 av virkestjockleken. Under provningen vägdes samtliga virkesstycken och fuktkvoten beräknades i efterhand. Fuktkvoten ökade mer hos reglar som utsatts för direkt nederbörd jämfört med dem som förvarats under tak. Störst ökning ca 4 % erhölls hos bjälkar med 12 % initial fuktkvot. Hos bjälkar med 18 % fuktkvot ökade fuktkvoten under samma period med ca 3,4 %. För bjälkar som förvarats under tak var motsvarande fuktkvotsökning ca 2,3 % respektive 1,5 %. Under uttorkningen inomhus vid 20°C och RF 45 % minskade fuktkvoten till de ursprungliga nivåerna vid försökets början på ca en vecka.

I figur 61 har medelsvällning/krympning hos golvbjälkarnas höjd under utomhusexponering och efterföljande torkning inomhus sammanställts. Av figuren framgår att bjälkar som utsatts för nederbörd sväller något mer än bjälkar som förvarats under tak. Skillnaden i svällning mellan bjälkarna med 12 % respektive 18 % fuktkvot är dock liten vid placering utomhus utan tak. Figuren visar att bjälkar med initial fuktkvot 12 % är mer dimensionsstabila än bjälkar med initial fuktkvot 18 %. Bjälkar med 12 % fuktkvot har efter ca 1 veckas uttorkning återgått till sin ursprungliga dimension och krymper därefter mindre än bjälkar med 18 % fuktkvot.

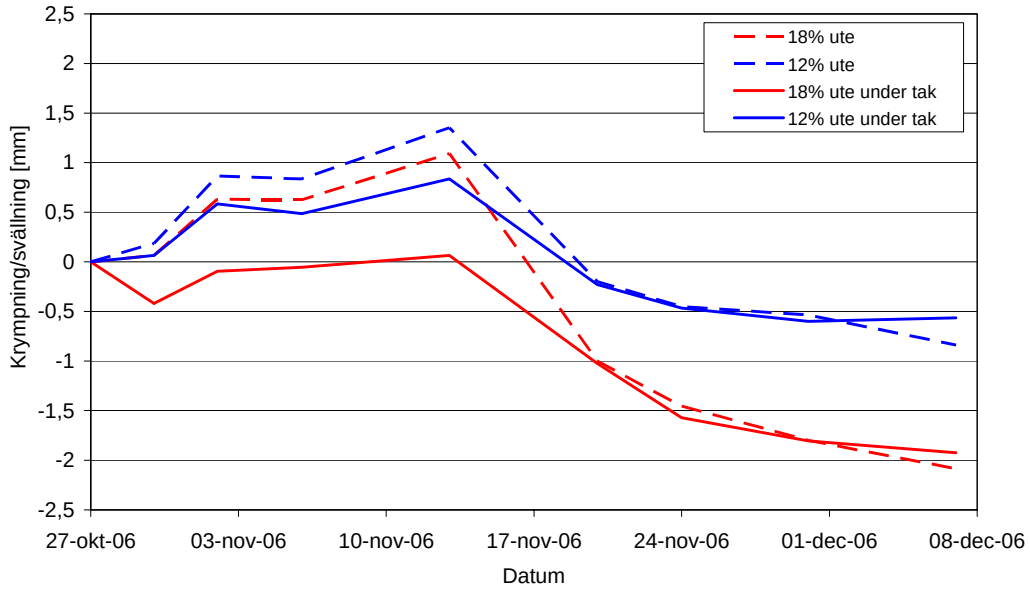
Under slutfasen av torkperioden krymper de bjälkar som utsatts för nederbörd mer än de som förvarats utomhus under tak. Detta var förväntat och beror på att bjälkarna på grund av en utvändig uppfuktning har svällt under tvång där den inre delen av tvärsnittet med lägre fuktkvot motverkar svällningen vilket resulterar i permanenta deformationer i form av kompression av ytskikten. Bjälkens tvärsnitt krymper därmed mer vid uttorkningen.



Figur 59. Nederbörd per dygn, temperatur och relativ luftfuktighet under försöket med utomhusexponering och uttorkning av bjälkar.



Figur 60. Fuktkvotens variation under utomhusexponering och efterföljande torkning vid 20°C och 45% RF.



Figur 61. Medelkrympning/svällning för golvbjälkarnas höjd

3.6 Konsekvensanalys av sågverksproduktion

Konsekvensanalysen omfattade provtorkningar och provsorteringar av konstruktionsvirke C24 45 x 195 mm samt en produktkalkyl.

Provtorkningarna genomfördes med nya torkningsscheman som ger längre torkningstider. Torkningstiden till 18 % var vid normal produktion 109 timmar. För att erhålla 12 % fuktkvot fick torkningstiden förlängas med ca 30 timmar. De nya torkningsschemana utvecklades med hjälp utav programvaran TORKSIM från SP Trätek.

Provsorteringarna utfördes både visuellt och maskinellt och resultaten mellan de två sorteringsmetoderna jämfördes. Nedan redovisas resultaten från den visuella sorteringen.

Visuellt sorterat

Provsortering genomfördes ur två strölagda virkespartier av dimensionen 47 x 200 mm gran, omfattande ca 400 plankor vardera. Det ena partiet normaltorkat till 18 % medelfuktkvot det andra nedtorkat till 12 % medelfuktkvot. Sorteringen utfördes enligt de sorteringsregler som gäller för konstruktionsvirke SS 23 01 20. Godkända plankor märktes för att kunna identifieras efter genomförd maskinella sorteringen. Avsikten med provsorteringen var i första hand att verifiera hur de geometriska formfelen, i första hand skevheten, förändras vid nedtorkning och hur de påverkar utfallet vid sortering till konstruktionsvirke T2-C24. I andra hand för att jämföra utfallet mellan visuell och maskinell hållfasthetssortering (DynaGrade). Resultatet av den visuella sorteringen redovisas i tabell 2 och 3 nedan.

Tabell 2. Resultat visuell sortering, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 18 %, medelbreddmått 203,5 mm.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	203	51.5
Övrig kvalitet	175	44.4
Skevhet	13	3.3
Urlägg	3	0.8
TOTALT	394	100.0

Tabell 3. Resultat visuell sortering, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 12 %, medelbreddmått 202 mm.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	157	40.3
Övrig kvalitet	195	50.0
Skevhet	29	7.4
Urlägg	9	2.3
TOTALT	390	100.0

Breddråmåttet är detsamma i båda partierna (209 mm) och ligger över det breddråmått som normalt tillämpas (207 mm), vilket förklarar övermåttet på det normaltorkade virket. Dimensionsförändringen vid nedtorkning till 12 % blev inte den som vi befarat. Vissa bitar hade breddmått ner till 198 mm.

Raden ”Skevhet” i tabellerna ovan representerar de plankor som på grund av skevhet inte klarat gränsen för T2-C24. Raden ”Övrig kvalitet” representerar de plankor som inte klarat gränsen för T2-C24 på grund av andra virkesfel. Skillnaden i utfall på T2-C24 mellan partierna beror till största delen på slumpmässig kvalitetsvariation i provpartierna och till mindre del på ökad skevhet vid nedtorkning, en ökning med 4.1 %.

Någon konditionering av de nedtorkade virkespaketen hade inte gjorts av den anledningen att provpartiet för 12 % körts fram genom omtorkning. Konditionering skulle med största säkerhet resulterat i ett lägre antal skeva plankor i detta parti.

Slutsatsen blir att nedtorkning av virke till 12 % medför en ökad nedklassning med i storleksordning 4 % orsakad av ökad skevhet. Till detta kommer en volymförlust då torkmånstillägget måste ökas för att hålla samma marginal som nu används. Partiet nedtorkat visade överlag en tendens till ökad skevhet dock ej i farozonen för nedklassning.

Jämförelse maskinellt och visuellt sorterat

Det provparti som sorterades visuellt 2005-04-28 kördes genom den maskinella hållfasthetssorteringen 2005-07-28 och sorteringsjämförelse gjordes 2005-08-10. Resultaten av den visuella och maskinella sorteringen av provpartiet sammanfattas i tabell 4 – 7.

Tabell 4. Visuellt sorterat, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 18 %.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	203	51.5
Övrig kvalitet	191	48.5

Tabell 5. Visuellt sorterat, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 12 %.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	157	40.3
Övrig kvalitet	233	59.7

Tabell 6. Maskinellt sorterat, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 18 %.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	335	87,2
Övrig kvalitet	49	12,8

Tabell 7. Maskinellt sorterat, gran 47 x 200 mm, fuktkvot 12 %.

Kvalitet	**Antal st**	**Antal %**
T2-C24	337	88,0
Övrig kvalitet	46	12,0

Efterföljande kontroll av sorteringsutfallet i jämförelse med den visuella sorteringen visar att utfallet T2-C24 ökar markant och att kantkvistförekomst i betydligt mindre grad påverkar utfallet vid maskinsortering. Vi konstaterade också att flera av de bitar som godkänts vid visuell sortering hade hamnat i ”övrig kvalitet” vid maskinsorteringen. (Totalt 30 st plankor i de båda paketen med ”övrig kvalitet”.)

Sammanfattningsvis kan sägas att man inte ska jämföra visuellt och maskinellt sorterat virke eftersom de inte bygger på samma sorteringsprinciper. Klart är dock att det blir utseendemässigt två helt olika produkter. Värdeutfallet vid maskinsortering ökar med ca 10 % vid den prisskillnad som idag råder mellan övrigt konstruktionsvirke och T2-C24 vid ovanstående utfallsförändring.

Sammanfattningsvis kan sägas att konsekvensen av införandet en ny produkt på sågverket är att produktmixen ökar och svårigheter uppstår i hanteringen av två sortiment vars slutprodukt endast skiljer sig åt i fuktkvot (normaltorkat 18 %, nedtorkat 12 %) men som i produktionen ska sågas med olika torkmånstillägg. Vid nedtorkning till 12 % blir råvaruförbrukningen 2,4 % större för att hålla samma dimensionsmått som motsvarande 18 % -iga produkt. Detta gör att produkterna måste sågas mot förutbestämda ändamål i annat fall får man välja att alltid såga med det större torkmånstillägget vilket innebär volymförluster på den 18 % -iga produkten. Logistiskt bör hanteringen av ytterligare produkter inte innebära några större kostnader det gäller bara att hålla den 12 % -iga produkten väl skyddad för återfuktning under mellanlagring efter torkning och i färdiglager (undvika långa lagringstider).

Produktkalkylen för den 12 % -iga produkten påverkas också av en högre utsorteringsprocent pga. ökad skevhet som har ett klart samband med den lägre fuktkvoten. Resultatet visar på en ökning av den utsorterade andelen med 4 % och en tendens till generellt ökad skevhet i det 12 % -iga provpartiet.

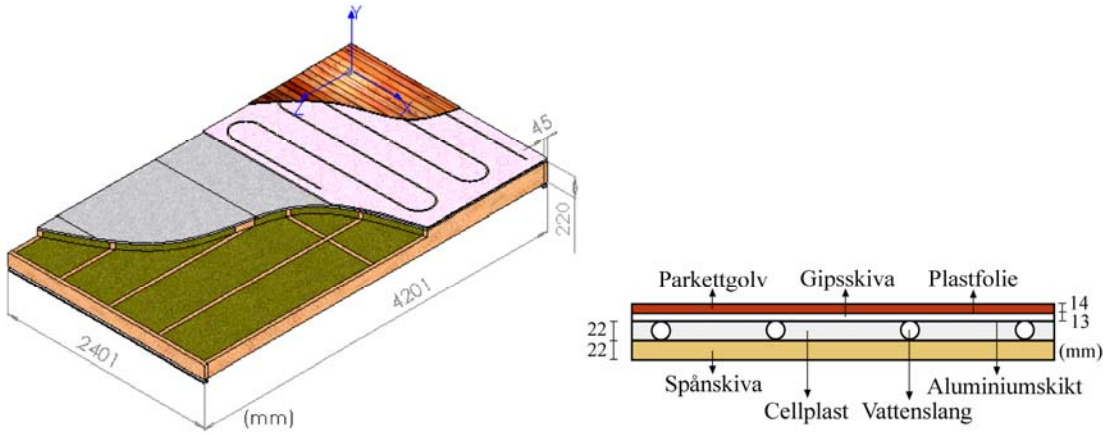
Den ökade produktionskostnaden för att framställa golvreglar 45x195 mm, kvalitet och fuktkvot 12 % blir med hänsyn till ovanstående faktorer följande:

Torkkostnad	20 kr/m^3
Ökad utsortering	10 kr/m^3 (vid en prisdifferens på 200 kr/m^3 till närmaste kvalité)
Ökad råvaruvolym	23 kr/m^3
Totalt	53 kr/m^3

Produktionskostnaden ökar alltså med ca 50 kr/m^3 exklusive extra kostnader för hantering, emballering och lagring. Observera att den ökade produktionskostnaden inte är detsamma som hur mycket den nedtorkade produkten kommer att höjas med i pris. Varje sågverk har sina egna förutsättningar för att genomföra denna nedtorkning på ett rationellt sätt. Dessutom krävs det relativt stora volymer för att det skall vara ekonomiskt möjligt att genomföra på grund av omställningskostnader. Troligen hamnar en realistisk prishöjning kring 250 – 350 kr/m^3 när produktion och försäljning av det nedtorkade konstruktionsvirket kommer igång.

4. Datorsimulering

Ett golvvärmebjälklag besår av många delkomponenter (trä, spånskivor, isolering, cellplast osv) med mycket olika materialegenskaper. Detta gör att det är svårt att uppskatta hur sådana element deformeras när det utsätts för kraftiga temperatur- och fuktändringar. För att illustrera bjälklagets uppbyggnad visar Figur 62 dess huvud-dimensioner, olika snitt igenom bjälklagets delkomponenter och ett tvärsnitt genom golvvärmesystemet. På grund av bjälklagets komplexa struktur har analysen utförts med hjälp av en tredimensionell datormodell som har vidareutvecklas i projektet, se [7-9]. Modellen kan användas för att undersöka hur olika parametrar kan påverka bjälklagets formförändringar när det utsätts för klimatvariation. Eftersom golvvärme-systemet ligger fritt ovan på spånskivan påverkar det inte bjälklagets styvhet i någon stor omfattning. Därför har det inte tagits med i modellen mer än att det har använts för att definiera temperaturrandvillkoret på spånskivans ovansida. I följande avsnitt beskrivs simuleringens olika delar samt det materialdata som har använts i simuleringarna.



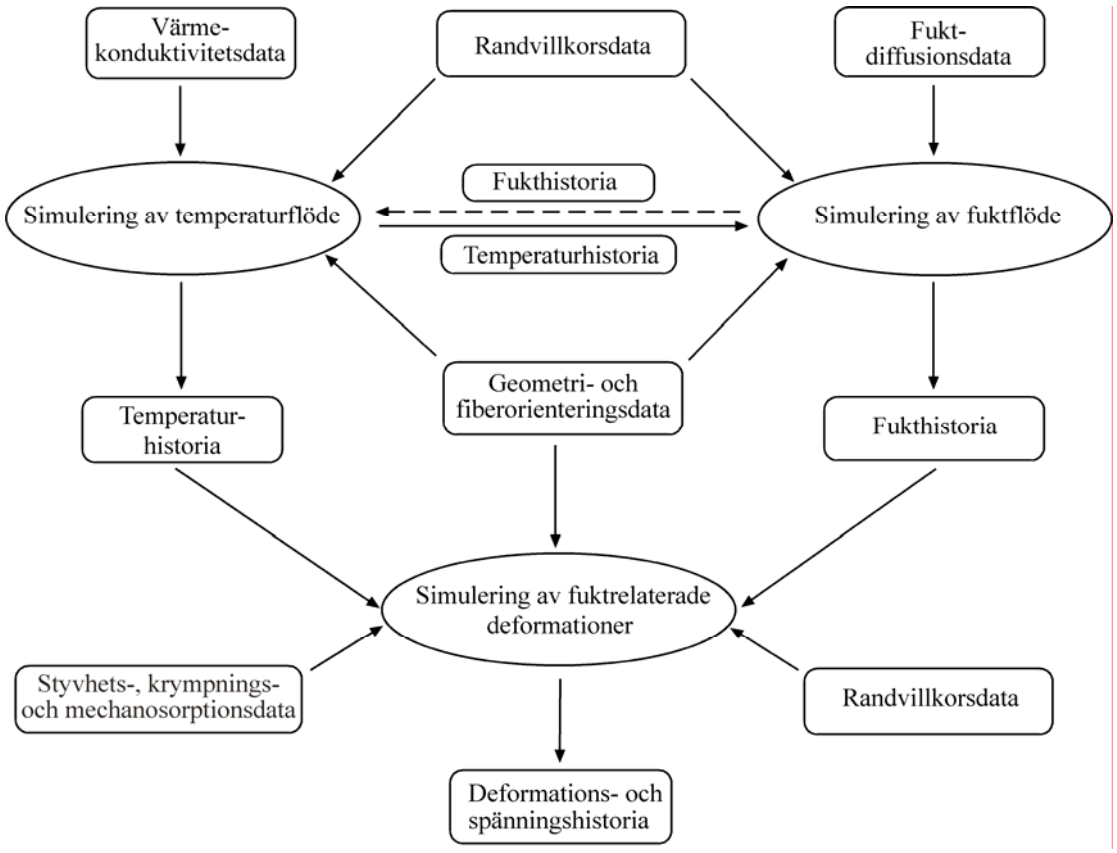
Figur 62. Bjälklagets geometristrukturer.

4.1 Simuleringsmodell

Den simuleringsmodell som presenteras här består av tre individuella modeller, d v s en modell för transient temperaturflöde, en modell för transient fuktflöde och en modell för beräkning av fuktrelaterade deformationer och spänningar. I figur 63 illustreras hur en sådan simuleringsmodell är uppbyggd. För att hela modellen skall fungera bra måste alla modelldelarna och tillhörande indatafält kopplas ihop på ett bra sätt. Fukt- och temperatursimuleringarna är kopplade på sådant sätt att den beräknade temperaturhistorien används som inputfällt till fuktsimuleringen för att temperaturberoende diffusionsdata skall kunna bestämmas. På samma sätt kan den beräknade fukthistorien användas som indatafällt till temperaturanalysen för bestämning av fuktberoende värmekonduktivitetsdata. För att bestämma fukt- och temperaturberoende materialegenskaper i deformations- och spänningsanalysen kan både fukt- och temperaturfältet användas som inputdata till deformationsmodellen. Data som beskriver den yttre fukt- och temperaturbelastningen baseras på uppmätt RF- och temperaturhistoria för golvärmesystemet och det omgivande rumsklimatet i försökshallen. Geometri, initial fuktkvot och träbalkarnas fiberorientering baseras också på uppmätta värden i projektet. All ytterligare inputdata baseras i första hand på

publicerat data för trä, spånskivor och isoleringsmaterial, se t ex [4, 7 och 16]. Beskrivning av materialdata är en mycket viktig del i modelleringsarbetet eftersom det beskriver hur materialets styvhets-, krympnings- och mekanosorptionsegenskaper varierar med fukt och temperatur. För trämaterialet är det också viktigt att beskriva hur materialegenskaperna varierar med läget i stocken samt hur själva träfibrerna är orienterade i träbalkarna. Här beaktas hur fibrerna är lagrade i årsringar och att de växer mer eller mindre i spiral inom respektive årsring. Hur snedfibrigheten varierar från märg till bark är en viktig information för att uppnå en bra simulering av vridning. Hur balkarna är sågade ur stocken är en annan viktig information eftersom både variation i materialdata, snedfibrighet och årsringskrökning påverkar fuktrelaterade deformationer i hög grad. Sågning som resulterar i att märgen inte är parallell med den sågade varan beaktas också i modellen. I deformationsmodellen har antagits full kontakt mellan spånskivor och träbalkar eftersom de är spiklimmade ihop.

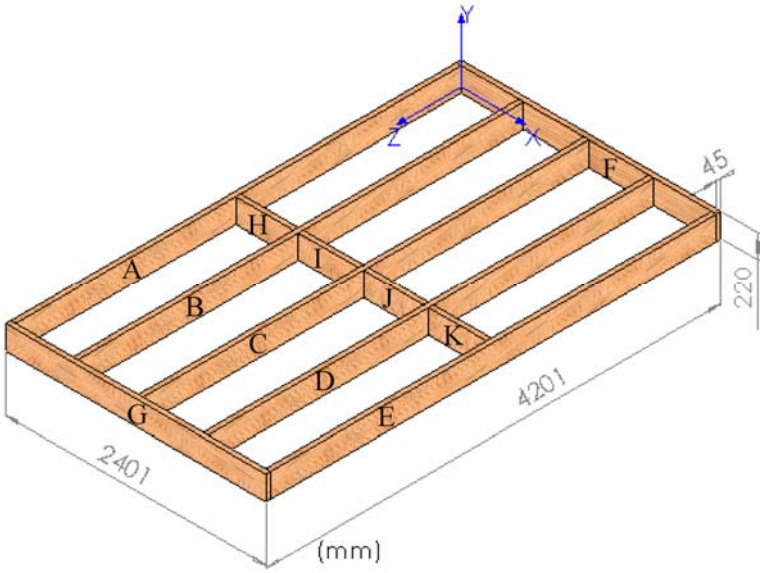
Om man har en bra kunskap om alla de indatafält som presenterades ovan kan man utföra en simulering som beskriver hur träbaserade konstruktionselement deformeras när de utsätts för klimatvariation. I detta projekt används modellen i första hand för att analysera formförändringar hos träbjälklag med golvvärme. Syftet är att studera hur olika parametrar påverkar formstabiliteten hos bjälklaget.



Figur 63. Delkomponenter hos den FE-modell som använts för att simulera formförändringar hos träbaserade bjälklagselement med golvvärme och varierande inomhusklimat.

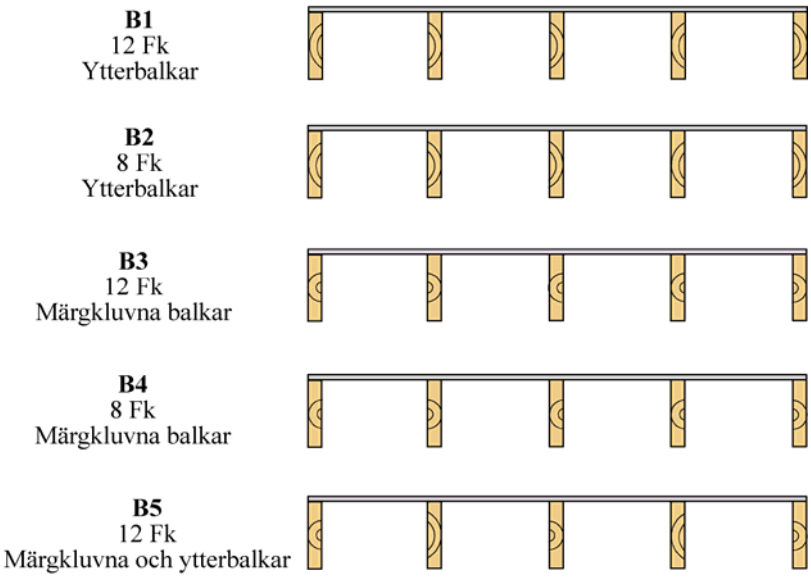
4.2 Geometri och märgläge

Baserat på bjälkslagets uppmätta geometri har en geometrisk modell gjorts i Abaqus CAE, se [17]. Träbalkstommen består av fem längsgående huvudbalkar (A-E), två tvärbalkar (F, G) vid bjälklagets ändar och fyra kortlingar (H-K). Figur 64 visar balkarnas läge och dimensioner i stommen. Som har nämnts tidigare ingår det fem bjälklag i undersökningen. Det som skiljer bjälklagen åt är att balkarna har olika märgläge och initial fuktkvot, se figur 65.



Figur 64. Träbjälkarnas numrering i bjälklagsstommen.

För att mäta upp träbjälkarnas märgkoordinater fotograferades bjälktvärsnitten för alla bjälklagen, se [16]. Som exempel visas i figur 66 tvärsnittsfoton på några av huvudbjälkarna A-E. Foton visar tydligt hur olika sågningsmönstren kan vara fast man försöker såga balkarna så lika som möjligt.



Figur 65. Sågningsmönster och initial fuktkvot för bjälklagselement B1 – B5.

Figur 66. Exempel av bjälktvärsnitt för uppmätning av märgläge.

.

I tabell 8 – 12 visas märgkoordinater för alla träbjälkar som ingår i de fem bjälklags-element som studeras (B1 – B5). Koordinatsystemet som används visas figur 4.3.

Tabell 8: Märgkoordinater för alla träbalkar i bjälklag B1.

Golv-element B1						
	x	y	z	x	y	z
A	0.070	0.111	4.156	0.077	0.104	0.045
B	0.541	0.105	4.156	0.516	0.116	0.045
C	1.261	0.104	4.156	1.290	0.111	0.045
D	1.860	0.101	4.156	1.866	0.071	0.045
E	2.288	0.107	4.156	2.307	0.072	0.045
F	0.0	0.120	0.072	2.401	0.120	0.092
G	0.0	0.110	4.122	2.401	0.120	4.114
H	0.578	0.110	2.153	0.045	0.110	2.153
I	1.178	0.110	2.153	0.623	0.110	2.153
J	1.778	0.110	2.153	1.223	0.110	2.153
K	2.356	0.110	2.048	1.823	0.110	2.048

Tabell 9: Märgkoordinater för alla träbjälkar i bjälklag B2.

Golv-element B2						
	x	y	z	x	y	z
A	-0.051	0.119	0.045	0.022	0.117	4.156
B	0.667	0.079	0.045	0.667	0.078	4.156
C	1.159	0.109	0.045	1.156	0.096	4.156
D	1.741	0.100	0.045	1.683	0.058	4.156
E	2.442	0.111	0.045	2.430	0.092	4.156
F	2.401	0.149	0.107	0.0	0.110	0.115
G	2.401	0.110	4.122	0.0	0.120	4.132
H	0.045	0.110	2.143	0.578	0.110	2.143
I	0.623	0.110	2.163	1.178	0.110	2.163
J	1.223	0.110	2.153	1.778	0.110	2.153
K	1.823	0.100	2.036	2.356	0.100	2.036

Tabell 10: Märgkoordinater för alla träbjälkar i bjälklag B3.

Golv-element B3						
	x	y	z	x	y	z
A	0.057	0.105	4.156	0.028	0.146	0.045
B	0.581	0.104	4.156	0.615	0.096	0.045
C	1.217	0.093	4.156	1.195	0.114	0.045
D	1.827	0.106	4.156	1.782	0.129	0.045
E	2.346	0.098	4.156	2.399	0.113	0.045
F	0.0	0.110	0.040	2.401	0.110	0.045
G	0.0	0.110	4.201	2.401	0.110	4.186
H	0.578	0.110	2.081	0.045	0.110	2.081
I	1.178	0.110	2.083	0.623	0.110	2.083
J	1.778	0.110	2.085	1.223	0.110	2.085
K	2.356	0.110	2.079	1.823	0.110	2.079

Tabell 11: Märgkoordinater för alla träbjälkar i bjälklag B4.

Golv-element B4						
	x	y	z	x	y	z
A	0.090	0.107	4.156	0.061	0.105	0.045
B	0.554	0.099	4.156	0.538	0.110	0.045
C	1.219	0.118	4.156	1.218	0.133	0.045
D	1.836	0.102	4.156	1.857	0.114	0.045
E	2.351	0.114	4.156	2.342	0.086	0.045
F	0.0	0.120	0.045	2.401	0.130	0.035
G	0.0	0.125	4.171	2.401	0.125	4.166
H	0.578	0.100	2.088	0.045	0.100	2.088
I	1.178	0.110	2.128	0.623	0.110	2.128
J	1.778	0.105	2.155	1.223	0.105	2.155
K	2.356	0.100	2.123	1.823	0.100	2.123

Tabell 12: Märgkoordinater för alla träbjälkar i bjälklag B5.

Golv-element B5						
	x	y	z	x	y	z
A	0.016	0.108	4.156	0.058	0.112	0.045
B	0.532	0.112	4.156	0.548	0.112	0.045
C	1.210	0.088	4.156	1.191	0.057	0.045
D	1.859	0.100	4.156	1.884	0.110	0.045
E	2.343	0.103	4.156	2.345	0.081	0.045
F	0.0	0.130 -	-0.030	2.401	0.110	-0.023
G	0.0	0.110	4.126	2.401	0.120	4.131
H	0.578	0.110	2.058	0.045	0.110	2.058
I	1.178	0.110	2.048	0.623	0.110	2.048
J	1.778	0.110	2.048	1.223	0.110	2.048
K	2.356	0.110	2.058	1.823	0.110	2.058

De delar som ingår i simuleringsmodellen är träbjälkarna, isoleringsmaterialet mellan balkarna och spånskivan som är spiklimmad på stommens ovansida. I följande avsnitt beskrivs materialdata som använts för dessa material.

4.3 Temperaturdata

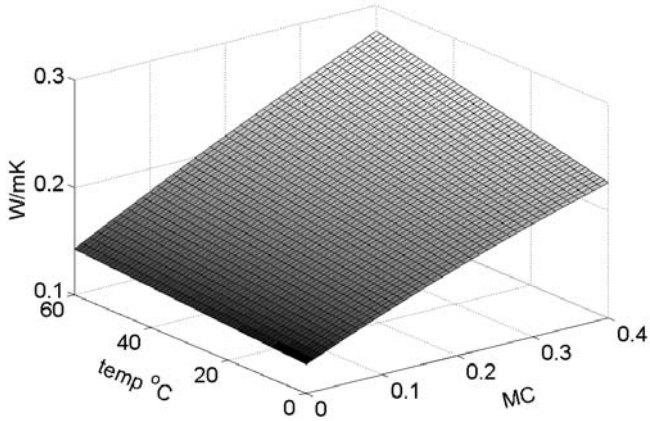
Materialdata som temperatur konduktivitet och värmekapacitet beror generellt både på materialets temperatur- and fuktkvotsnivå. Men inom det fukt- och temperaturintervall som studerats här varierar dessa egenskaper relativt lite.

Trämaterial:
Materialet trä betraktas här som ett ortotropt material vad gäller dess termiska egenskaper. Det betyder att materialet har olika konduktivitet i de tre huvudriktningarna *l, r* och *t*. Baserat på [17] har ekvationer 1 och 2 används för att beskriva hur värmekonduktiviteten och värmekapaciteten varierar med fukt och temperatur.

$$\textit{Värmek.}\begin{cases} K_{wr} = K_{wt} = (0.129 - 0.049M)\left(1 + (2.05 + 4M)10^{-3}T\right)(0.986 + 2.695M) \\ K_{wl} = 2K_{wr} \quad [W/mK] \end{cases} \quad (1)$$

$$\textit{Värmekapacitet}: \quad c_w = \frac{\rho_{w0}}{\rho_w}(1113 + 4.85T + 4184M) \quad [J/kgK] \quad (2)$$

För att illustrera hur värmekonduktivitetsegenskaperna varierar med fukt och temperatur visas det grafiskt i figur 67 för den radiella materialkoefficienten. Resultaten visar att konduktiviteten ökar med ökad temperatur och fuktkvot.



Figur 67. Fukt- och temperaturinverkan på konduktiviteten i radiell riktning.

Isolerings- och spånskivsmaterial:

Både isolerings- och spånskivmaterialet antas vara isotropt material vad gäller materialets konduktivitetsegenskaper. De har också antagits vara konstant inom de fukt- och temperaturintervaller som behandlas här. Följande listas de konstanter som använts för materialens konduktivitet *K*, värmekapaciteten *c* och densitet ρ. Värdena baseras på publicerat data i [15] and [16].

$$\left.\begin{cases} \text{Värmekonduktivitet}: K_i = 0.036 \ \ [W/mK] \\ \text{Värmekapacitet}: c_i = 750 \ \ [J/kgK] \\ \text{Densitet}: \rho_i = 100 \ \ [kg/m^3] \end{cases}\right\} \text{Isolering}$$

$$\left.\begin{cases} \text{Värmekonduktivitet}: K_p = 0.14 \ \ [W/mK] \\ \text{Värmekapacitet}: c_p = 2700 \ \ [J/kgK] \\ \text{Densitet}: \rho_p = 718 \ \ [kg/m^3] \end{cases}\right\} \text{Spånskiva}$$

4.4 Fuktdata

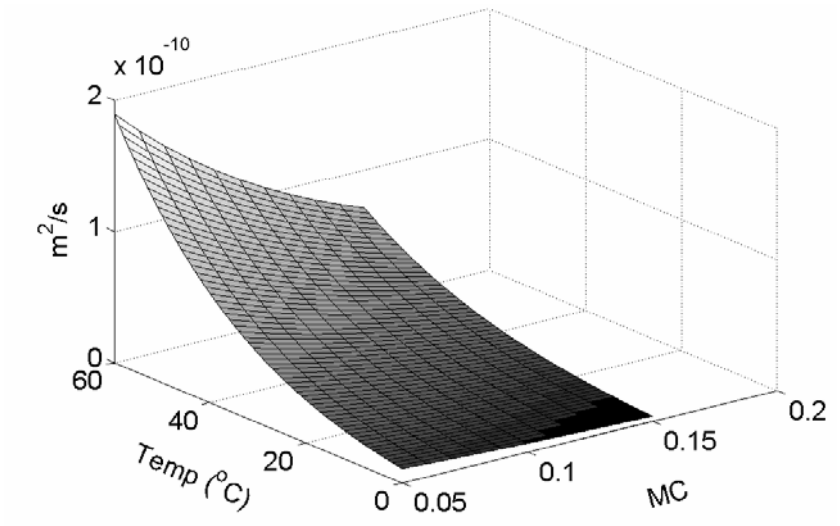
Det är välkänt att diffusionsegenskaper för trä varierar med både temperatur- och fuktnivån i materialet. Det finns också relativt stor spridning i de resultat som presenterats i olika litteraturer. I fuktmodellen tas hänsyn till trämaterialets fukt och temperaturberoende medan för isolerings- och spånskivmaterialet har det antagits att diffusionsegenskaperna är konstanta inom det klimatintervall som behandlas.

Trämaterial:
För att beskriva hur diffusionsegenskaperna i trä varierar med fukt och temperatur har ekvationer (3) – (5) använts, se [19]. Figur 68 visar exempel hur den longitudinella diffusionskoefficienten varierar med fukt och temperatur.

$$\text{Tangentiell}: \quad D_{wt} = \exp[-9{,}9 - 9{,}8M - (4300/T_k)] \tag{3}$$

$$\text{Radiell}: \quad D_{wr} = 2D_{wt} \tag{4}$$

$$\text{Longitudinell}: D_{wl} = 2{,}5D_{wt} \tag{5}$$



Figur 68. Fukt- och temperaturvariation hos longitudinell diffusionskoefficient. Isolerings- och spånskivsmaterial:

Både isolerings- och spånskivmaterialet har antagits ha isotropa diffusionegenskaper och vara oberoende av fukt och temperatur inom det intervall som studeras här. Diffusionkoefficienten för spånskivan har satts till $D_p = 2 \cdot 10^{-10} \left[m^2/s\right]$ och till $D_{iso} = 400 \cdot 10^{-10} \left[m^2/s\right]$ för isoleringen. Värdena baseras till viss mån på experimentella resultat presenterade i [20] och [21]. Den diffusionskoefficient som används här för isoleringen skall representera både fuktflöde i hålrummen och diffusion i själva fiber-materialet.

4.5 Deformationsdata

I deformationsmodellen är det materialets fuktändring som är den potential som driver fram produktens deformation. Utöver det påverkas materialegenskaper som elasticitetsmodul, krympnings- och mechanosorptionsparametrar av både fukt- och temperaturnivån i materialet.

Trämaterial:

Den materialmodellen som används är en hygromekanisk ortotrop modell som innehåller elastiska-, krympnings- och mechanosorptionstöjningar. Material-egenskaper som styvhet, krympning och snedfibrighet betraktas i denna modell som inhomogena egenskaper i tvärsnittsplanet. De antas variera från märgen och ut mot barken enligt ekvationer presenterade i [7]. Hur styvhets-, och mechanosorptionsparametrar varierar med fukt och temperatur baseras också på experimentella data i [7].

Isolerings- och spånskivsmaterial:

I fukt- och temperaturanalyserna var både spånskivan och isoleringen betraktad som isotropa material. Här i deformationssimuleringen betraktas spånskivan som ortotrop vad gäller elasticitetsmodul och isotrop vad gäller krympningsegenskaper. Den materialriktning som betecknas med $\parallel$, är spånskivans produktionsriktning medan de andra riktningarna betecknade med $\perp$ riktar vinkelrätt mot produktionsriktningen. Isoleringen betraktas som ett isotropt material med en extremt låg styvhet eftersom den skall inte påverka deformationsresultatet alls. Anledningen till att isoleringen är med i denna modell är att elementnätet måste vara det samma för alla tre modellerna eftersom deformationsmodellen använder sig av fukt- och temperaturresultat från de andra modellerna. De materialparametrar som använts för spånskivan visas i tabell 13. Dessa styvhets- och krympningsparametrar baseras på experimentella data presenterade i [15] och [21]

Tabll 13: Materialegenskaper för spånskivan.

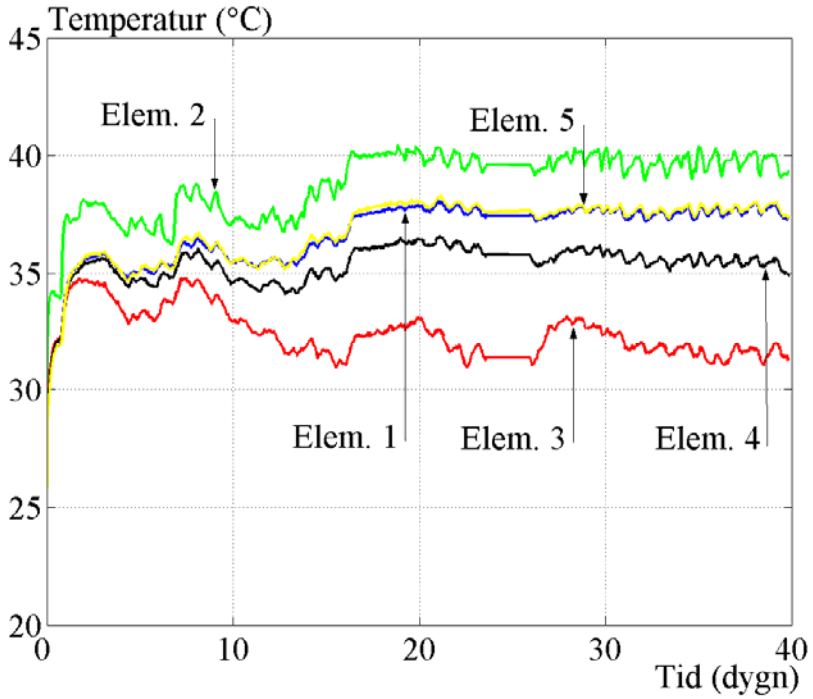
E-modul [MPa]	$E_{p\perp} = 2700$	$E_{p\perp} = 2700$	$E_{p\parallel} = 3000$
Krympningskoefficienter	$\alpha_{p\perp} = 0.04$	$\alpha_{p\perp} = 0.04$	$\alpha_{p\parallel} = 0.04$

5. Simuleringsresultat

För att studera hur olika parametrar påverkar fuktrelaterade deformationer hos bjälklagen har elementen simulerats med en tredimensionell finit elementmodell. Simuleringsresultaten har verifierats mot de experimentella resultaten som har presenteras i kapitel 3. En mindre parameterstudie har också utförts för att studera hur parametrar som snedfibrighet, märgläge, E-modul och krympningsparametrar påverkar bjälklagselementens formstabilitet. Generellt är det mycket svårt att förutsäga hur de olika parametrarna skulle påverka formstabiliteten hos bjälklagen. I följande avsnitt presenteras temperatur- fukt- och deformationsresultat för alla fem bjälklagselementen (B1 – B5) som studeras.

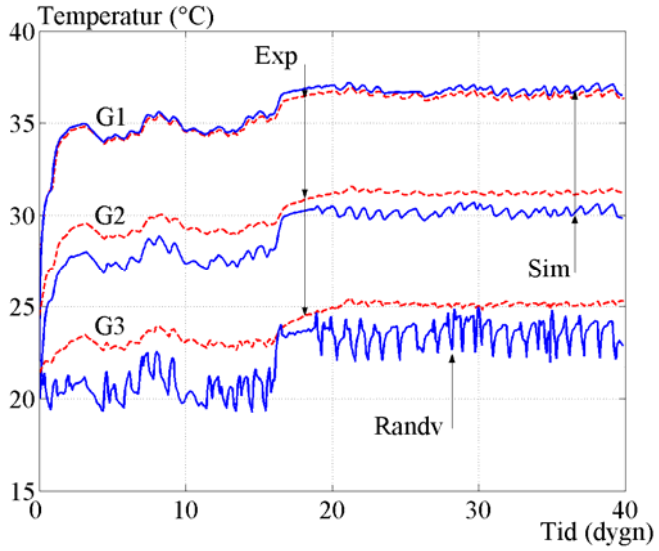
5.1 Temperatur

Den initiala temperaturen i bjälklagselementen var satt till 20ºC för alla materialen. För att bestämma randvillkor på grund av golvvärmesystemet har temperaturen på spånskivans ovansida mäts upp (mätpunkt G4 i figur 6). Figur 69 visar temperaturutvecklingen under första 40 dygnen för alla fem bjälklagselementen. Resultaten visar att temperaturen stiger fort under första dygnet när golvvärmen släpps på och att den varierar till en viss del under hela experimentettiden. Det visar sig också att temperaturen varierar mellan de olika elementen fast de har samma golvvärmesystem. Efter 40 dygn har element B3 till exempel 8 graders lägre temperatur än element B2. Det skall också noteras att temperaturgivarna G4 visade 3 grader lägre värden jämfört med de givare som användes för att mäta upp temperaturen in i själva elementen (mätpunkter G1 – G3 i figur 6). Alla temperaturkurvorna i figur 69 har därför höjds om 3 grader för att få överensstämmelse med de andra experimentala resultaten.

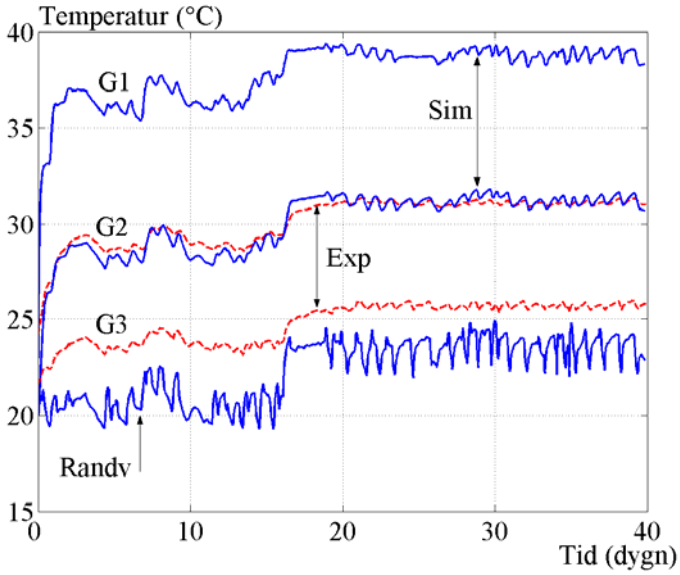


Figur 69. Uppmätt temperatur på spånskivans ovansida för element B1-B5.

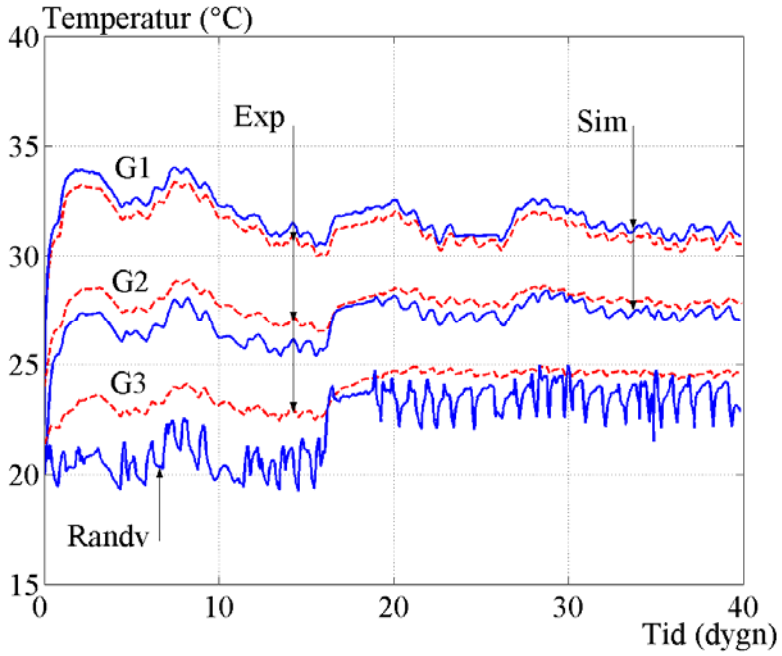
För att visa hur temperaturen i bjälklagselementen utvecklas under försökstiden presenteras både experimentella och numeriska temperaturresultat i figurerna 70-74. Resultaten visar hur temperaturen utvecklas i mätpunkter G1-G3 och inne i experimenthallen under de första 40 dygnen. För mätpunkter G1 och G2 överensstämmer med numeriska och uppmätta resultat relativt bra förutom i element B4 där de experimentella resultaten för mätpunkt G2 verkar höga jämfört med resultaten för de andra bjälklagen. För mätpunkt G1 i element B2 presenteras enbart simulerings resultat eftersom de experimentella mätresultaten saknas på grund av en trasig givare. Randvillkoret som används för elementernas undersidor och kanter visar betydligt större variation än de experimentella resultaten i mätpunkt G3. Detta har resulterat i att modellen visar större variation i till exempel mätpunkt G2 medan den globala kurvformen stämmer relativt bra.



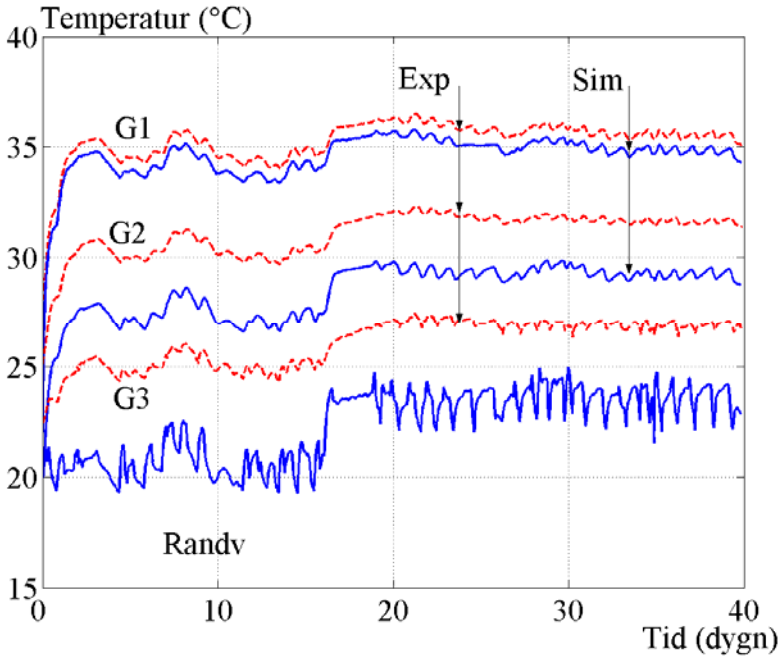
Figur 70. Temperaturvariation i mätpunkterna G1-G3 samt i experimenthallen (randvillkor) för element B1.



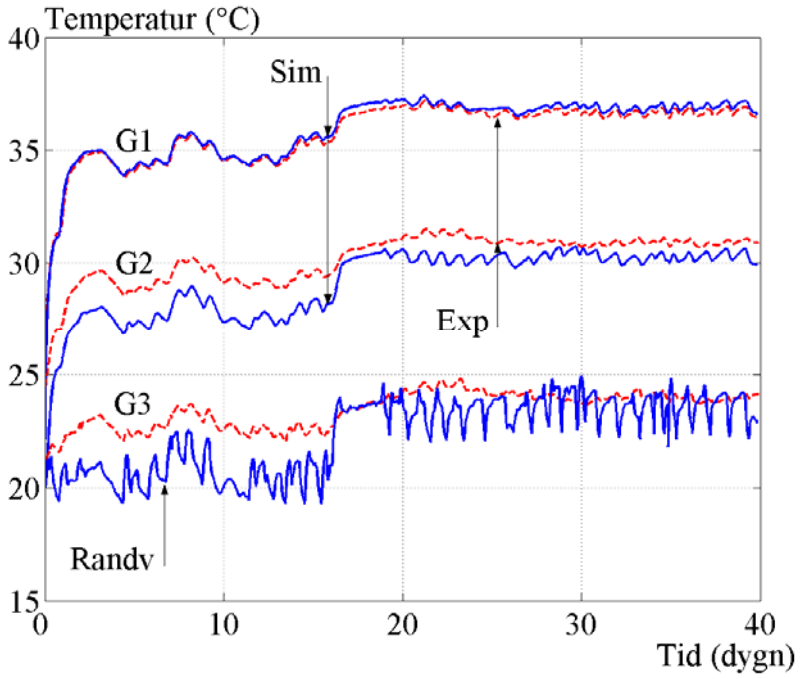
Figur 71. Temperaturvariation i mätpunkterna G1-G3 samt i experimenthallen (randvillkor) för element B2.



Figur 72. Temperaturvariation i mätpunkterna G1-G3 samt i experimenthallen (rand-villkor) för element B3.



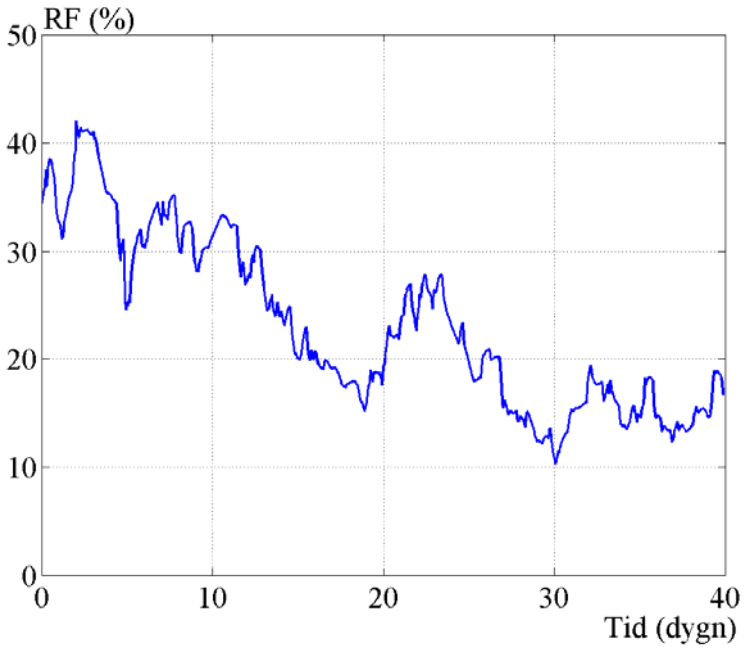
Figur 73. Temperaturvariation i mätpunkter G1-G3 samt i experimenthallen (rand-villkor) för element B4.



Figur 74. Temperaturvariation i mätpunkter G1-G3 samt i experimenthallen (randvillkor) för element B5.

5.2 Fukt

För att definiera bjälklagens fuktrandvillkor har den relativa fuktigheten (RF) mäts upp nära elementernas ytor. Figur 75 visar hur den uppmätta RF-halten varierar med experimenttiden. Resultaten visar en stark lokal variation samtidigt som RF-halten minskar från ca 35 % när till ca 15 % under de här 40 dygnen.



Figur 74. Uppmätt RF-variation i omgivningen nära bjälklagen.

Eftersom fuktkvotsgradienten i materialet används som den drivande potentialen i våra simuleringar måste själva fuktkvoten användas som föreskrivna randvärden i stället för RF-halten. Baserat på uppmätt RF- och temperaturdata har fuktkvotsvariationen för bjälklagen beräknas med hjälp av ekvationer för jämviktsfuktkvot (6)-(11), se [22]. Figur 76 visar hur fuktkvoten varierar med RF och temperatur enligt ekvation (11). Resultaten visar tydligt att jämviktsfuktkvoten påverkas mer av ändring i fukt än temperatur.

$$W = 349 + 1{,}29 \times T + 0{,}0135 \times T^2 \tag{6}$$

$$K = 0{,}8105 + 0{,}000736 \times T - 0{,}00000273 \times T^2 \tag{7}$$

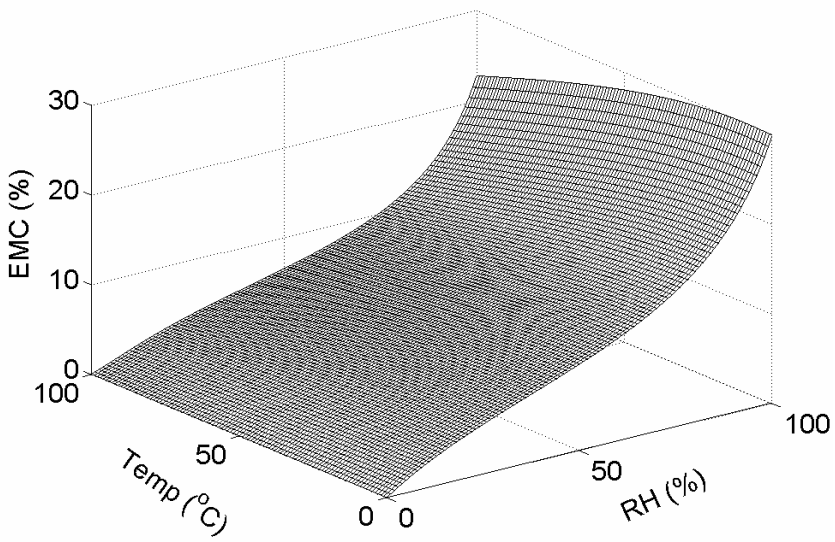
$$K_1 = 6{,}27 - 0{,}00938 \times T - 0{,}0000935 \times T^2 \tag{8}$$

$$K_2 = 1{,}91 + 0{,}0407 \times T - 0{,}0000904 \times T^2 \tag{9}$$

$$h = \frac{RH}{100} \tag{10}$$

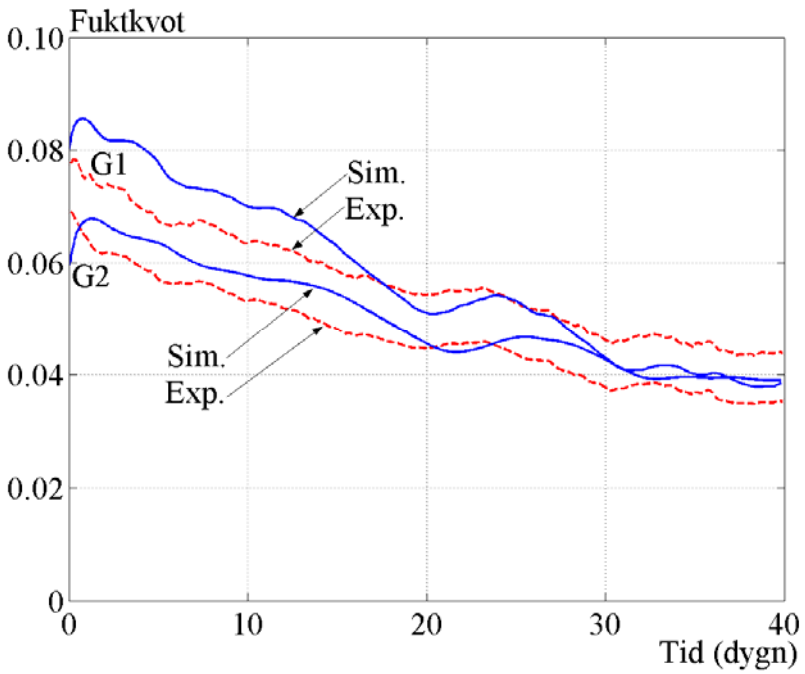
$$MC = \frac{1800}{W} \times \left[\frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1 Kh + 2K_1 K_2 K^2 h^2}{1 + K_1 Kh + K_1 K_2 K^2 h^2} \right] \tag{11}$$

Bjälklagets undersida och kanter betraktas i simuleringen som fria ytor vad gäller fuktflöde medan ovansidan av elementen antas vara stängd på grund av den tunna aluminiumplåten som finns ovanpå cellplasten. I figur 77 visas den fuktkvotsvariation som använts som randvillkor på de fria ytorna. Resultaten visar att randfuktkvoten går från 7 % till cirka 4 % samtidigt som den har relativt stor lokal variation. Den initiala fuktkvoten i själva materialen har satts till 8 % för spånskivan och 6 % för stenullsisoleringen. Fuktkvoten i isoleringen skall representera ett medelvärde av fuktkvoten i materialets hålrum och i själva fibermaterialet. För trämaterialet har initiala fuktkvoten satts till 12 % respektive 8 % för de olika bjälklagen enligt figur 65. På samma sätt som för temperaturen har den relativa luftfuktigheten (RF) mäts upp i mätpunkter G1, G2 och G3. För att jämföra simuleringarna med de experimentella resultaten har de uppmätta RF-värden omräknats till fuktkvotsvärden med ekvation (11). Här bör det noteras att den relativa luftfuktigheten som har mätts upp är den RF som finns i isoleringens hålrummen alldeles intill träbalkarna men inte den RF som står i jämvikt med träytans fuktkvot. I figurer 78-82. visas hur fuktkvoten varierar i mätpunkter G1 och G2 under första 40 dygnen. Resultaten visar en relativt bra överensstämmelse mellan experiment och simuleringar. För element B2 förekommer den största skillnaden i fuktkvot d v s på ca en procent. Simuleringarna visar större lokala variationer än de experimentella resultaten gör medan medellutningen är relativt bra. För element B1, B3 och B5 visar simuleringarna till exempel uppfuktning i början på undersökningen. Detta beror till stor del på de olika initiala fuktkvoterna som använts i simuleringen, d v s 12 % för trä, 8 % för spånskiva och 6 % för isolering. Isoleringen fuktas därför upp i början eftersom de andra materialen är fuktigare.

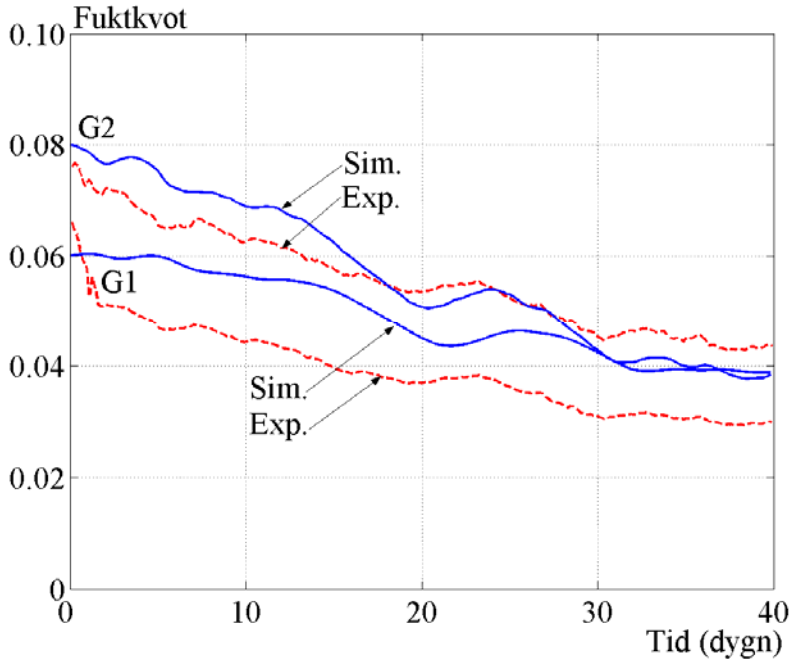


Figur 76. Inverkan av fukt och temperatur på jämviktsfuktkvot i trä, ekvation (11).

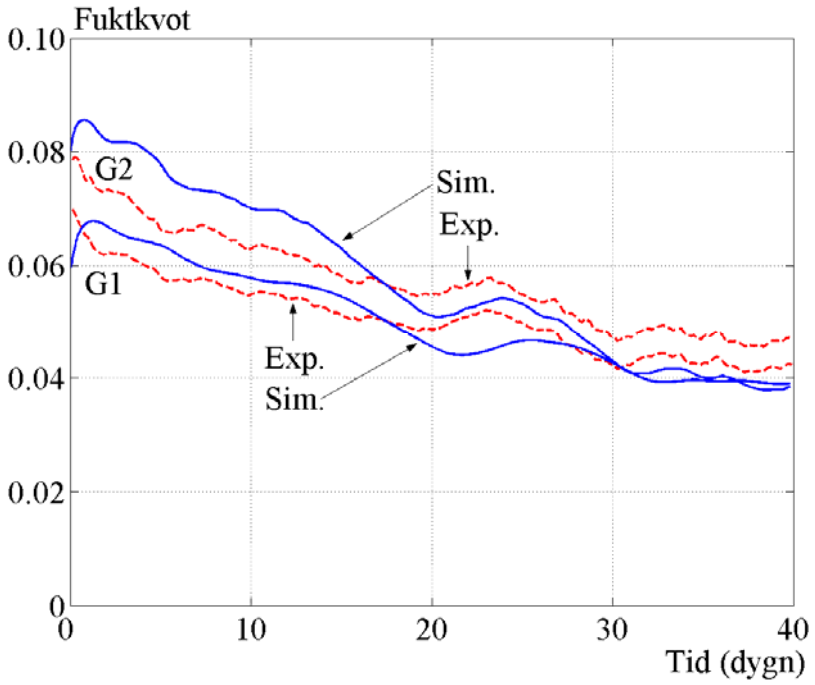
Figur 77. Fuktkvotsrandvillkor på elementernas under- och kantsidor.



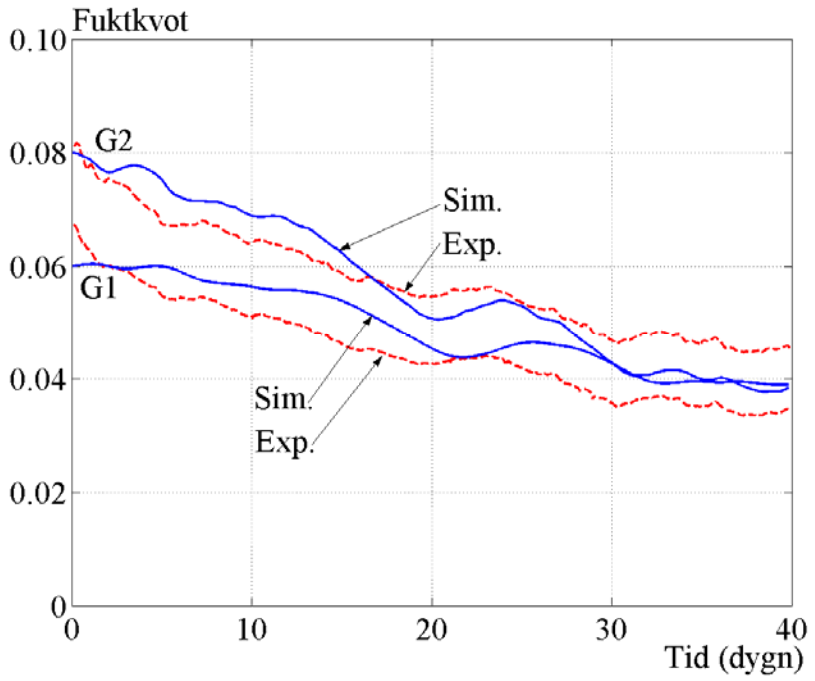
Figur 78. Fuktkvotsvariation i element B1, mätpunkt G1 och G2.



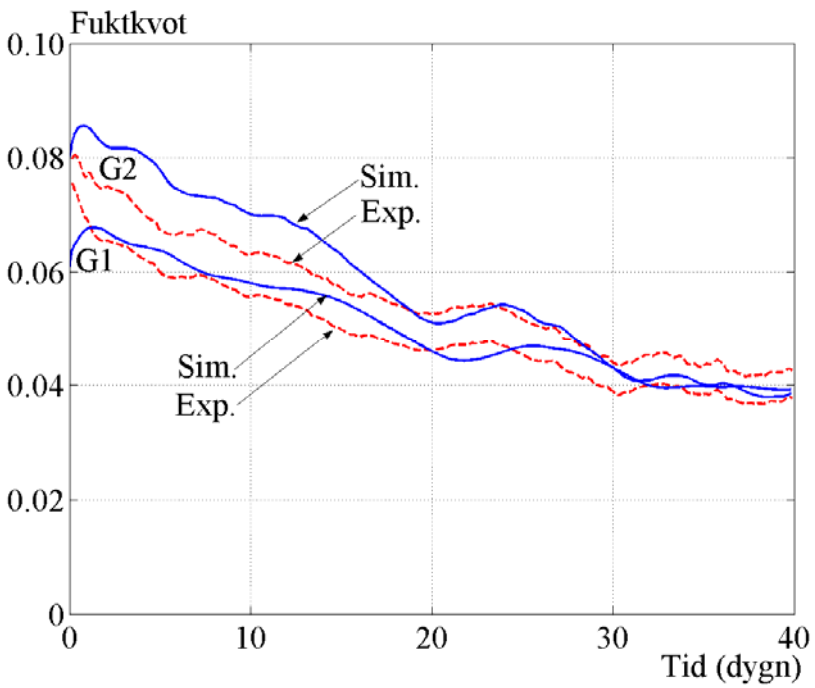
Figur 79. Fuktkvotsvariation i element B2, mätpunkt G1 och G2.



Figur 80. Fuktkvotsvariation i element B3, mätpunkt G1 och G2.



Figur 81. Fuktkvotsvariation i element B4, mätpunkt G1 och G2.



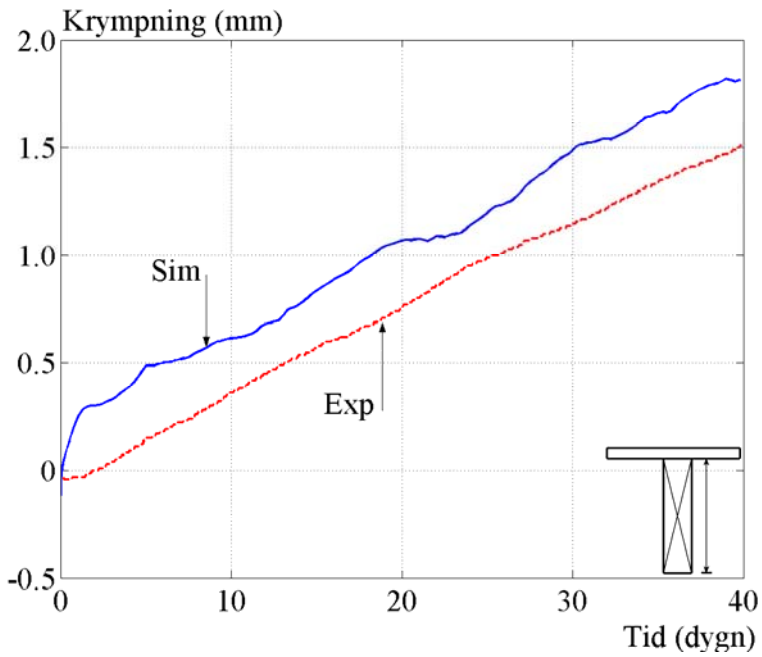
Figur 82. Fuktkvotsvariation i element B5, mätpunkt G1 och G2.

5.3 Deformationer

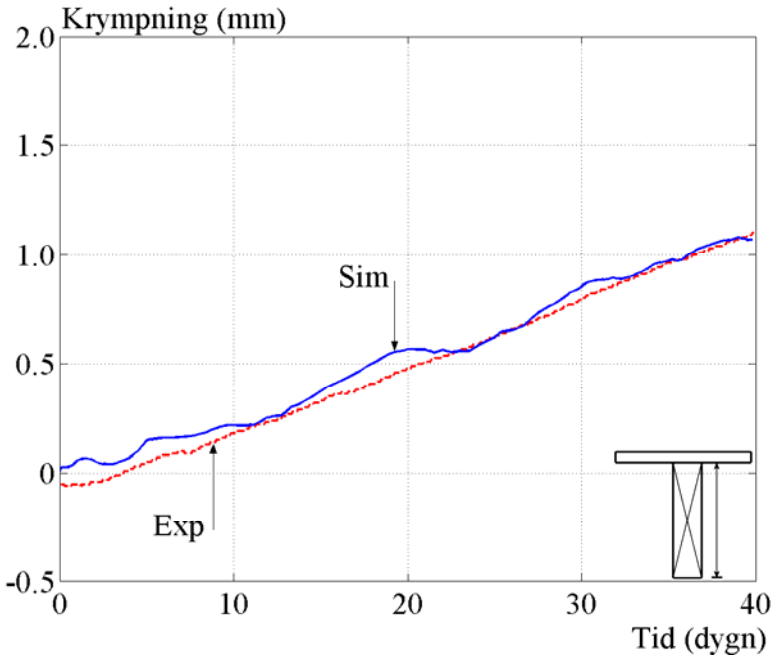
I deformationssimuleringen har bjälklagen antas vara fritt upplagd enligt figur 62. Full koppling har antagits mellan spånskivans undersida och trästommen samt mellan tvärbjälkar och längsgående bjälkar. Fukt- och temperaturdata från fältsimuleringarna har använts som indata till denna modell för att driva fram de fuktrelaterade deformationerna.

5.3.1 Krympning hos träbjälkar

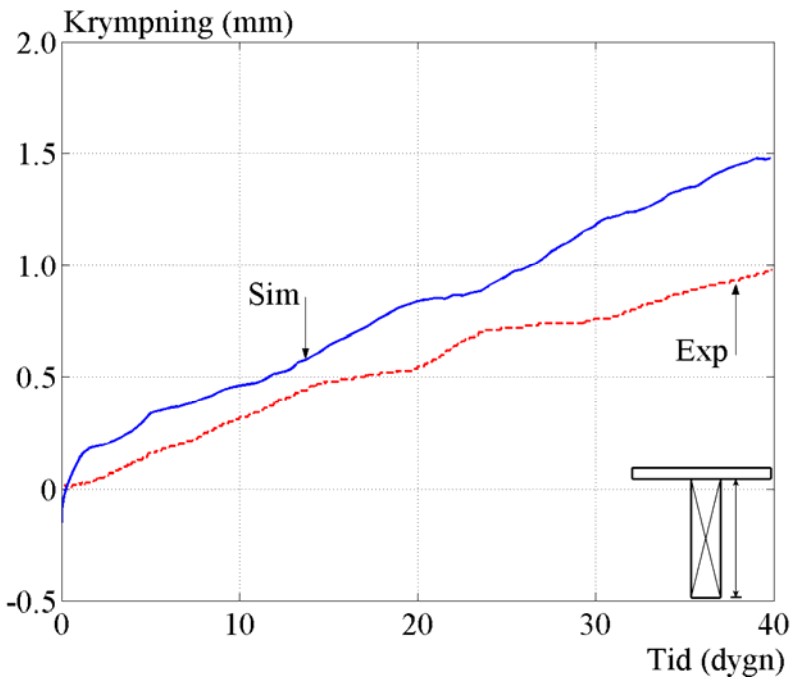
För att studera hur bjälkarnas krympning utvecklats under experimenttiden har dess krympning i höjdled uppmätts. Figurer 83-87 visar både simulerings- och försöksresultat för centrumbalkarna i alla fem bjälklagen under första 40 dygnen. För bjälklag B2 och B4 (initial fuktkvot på 8 %) visar resultaten god överensstämmelse mellan simuleringar och experiment medan resultaten för de andra bjälklagen (initial fuktkvot på 12 %) inte överensstämmer lika bra. Simuleringarna visar generellt mer olinjär respons än de experimentella resultaten gör samtidigt som de visar större krympningar för 12 % bjälklagen. Vad detta beror på är svårt att veta men en orsak kan vara en viss osäkerhet i den initiala fuktkvoten. Det bör också noteras att materialparametrar för krympning, diffusion, styvhet osv. har hämtats från litteraturen istället för att mätas upp för varje bjälklag. Detta ökar självklart risken för att storleken inte alltid stämmer mellan simuleringarna och experimenten medan det globala deformationsbeteendet fångas upp av modellen.



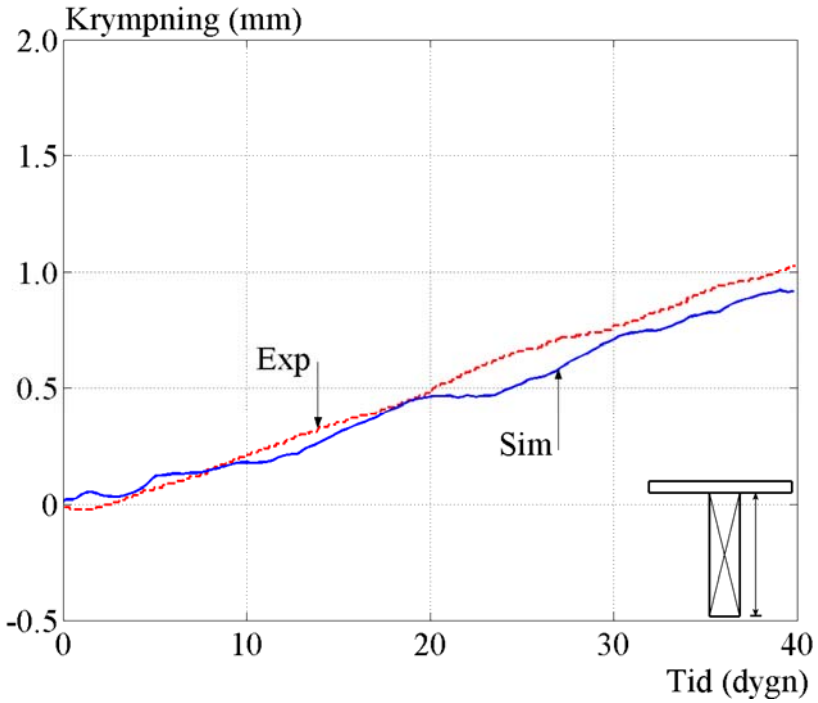
Figur 83. Höjdkrympning för centrumbalken i bjälklag B1.



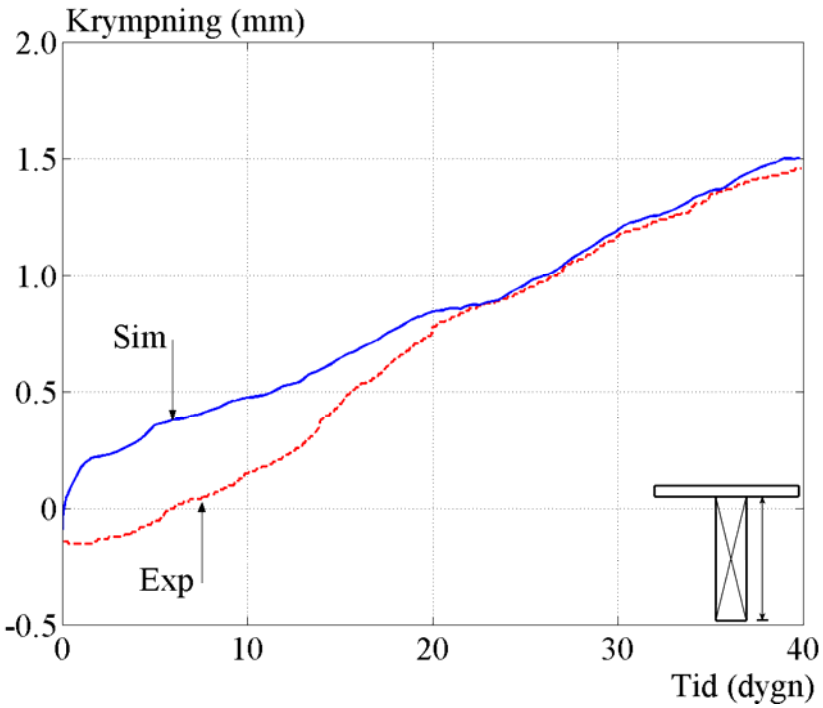
Figur 84. Höjdkrympning för centrumbalken i bjälklag B2.



Figur 85. Höjdkrympning för centrumbalken i bjälklag B3.



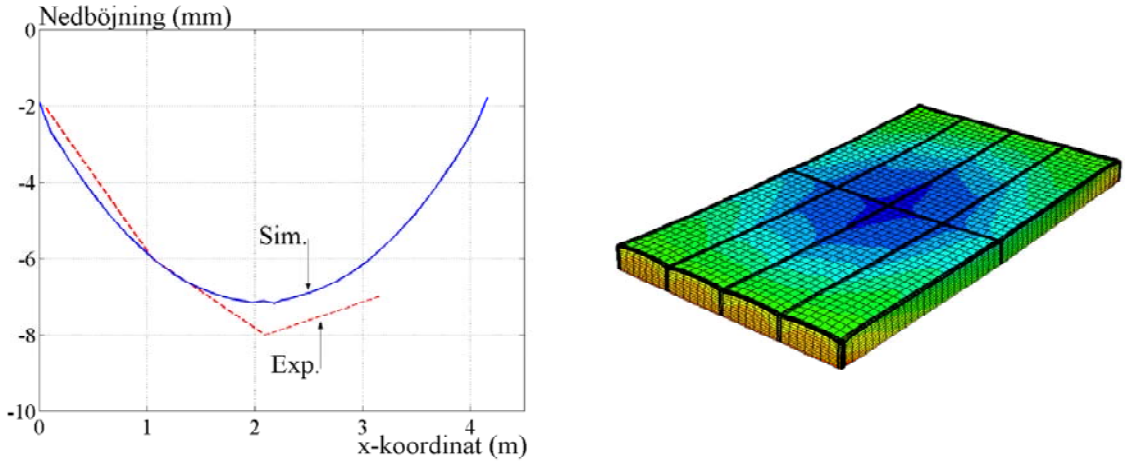
Figur 86. Höjdkrympning för centrumbalken i bjälklag B4.



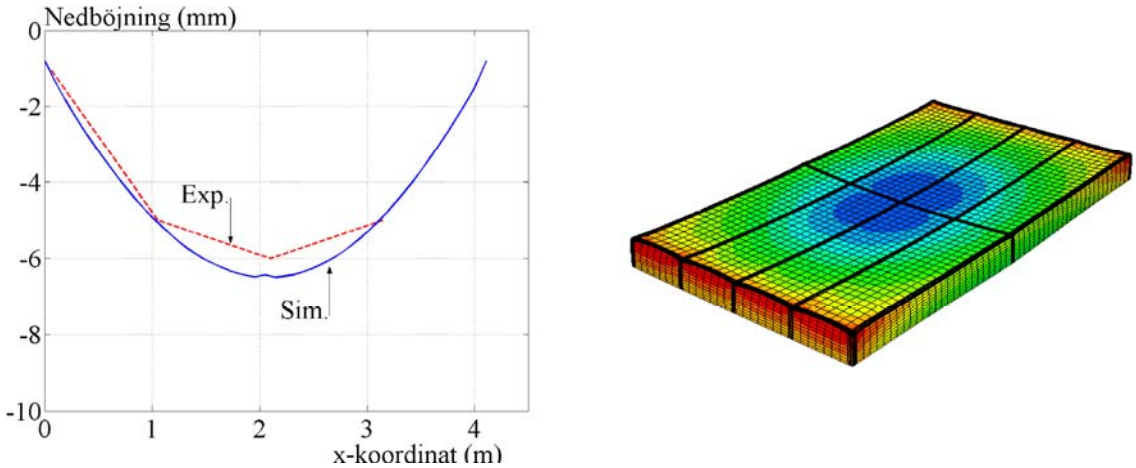
Figur 87. Höjdkrympning för centrumbalken i bjälklag B5.

5.3.2 Nedböjning

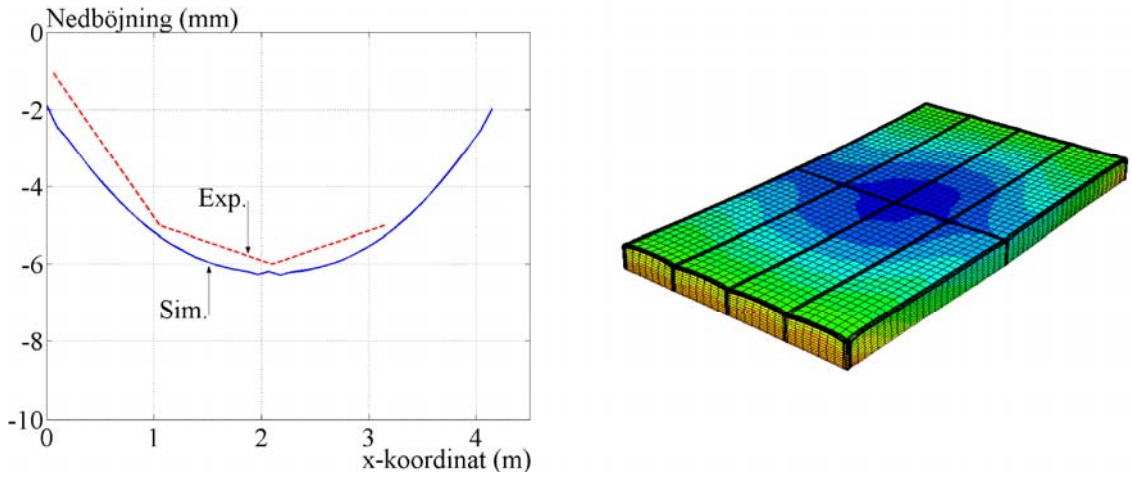
För att undersöka bjälklagens nedböjning har de simulerade nedböjningarna jämförts med de experimentella resultaten. Figur 88-92 visar kurvor som representerar nedböjningen längs bjälklagens centralbalkar efter att de har utsatts för 40 dygns klimatvariation och golvvärme. De experimentella resultaten visar raka linjer mellan fem experimentpunkter längs bjälken medan för simuleringen visas en mjuk kurva som representerar nedböjning i alla noder längs hela bjälken. Resultaten visar relativ god överensstämmelse mellan simuleringarna och experimenten. Den förskjutning som finns vid balkarnas ändar beror av träbalkarnas krympning och att nedböjningen har mätts upp på bjälklagets ovansida. Orsaken till att nedböjningen hos bjälklag B4 och B5 är mindre här än den nedböjning som presenterades i [23] är att den spiralväxtsfunktion som användes där var $\theta = 4+40r$ i stället för $\theta = 4-40r$. Den funktion som används här anses representera snedfibrigheten hos svensk gran och furu på ett bra sätt. I deformationsbilderna till höger i figurerna har alla förskjutningar förstoras med faktor 10. Färgen representerar den vertikala förskjutningen där den blåa färgen visar största nedböjningen. Färgresultaten visar att bjälklagen deformeras till en viss del olika. För vissa är nedböjningen ganska symmetrisk runt centerbalken medan för andra (t ex element B2) har man en liten excentricitet i deformationsbilden. Hur stor denna excentricitet blir beror på hur osymmetriska huvudbalkarna är vad gäller sågningsmönstret.



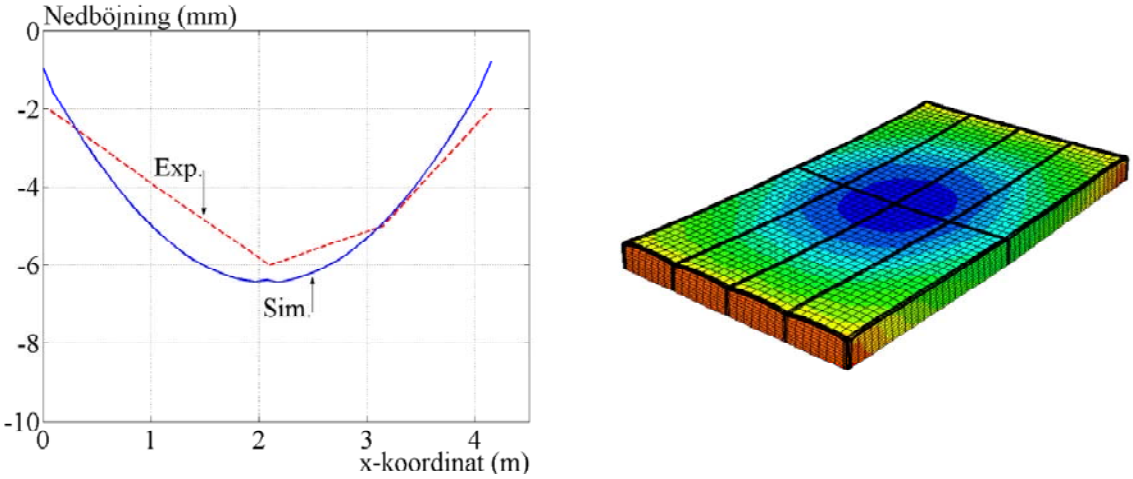
Figur 88. Nedböjning hos centrumbalken i bjälklag B1 efter 40 dygn.



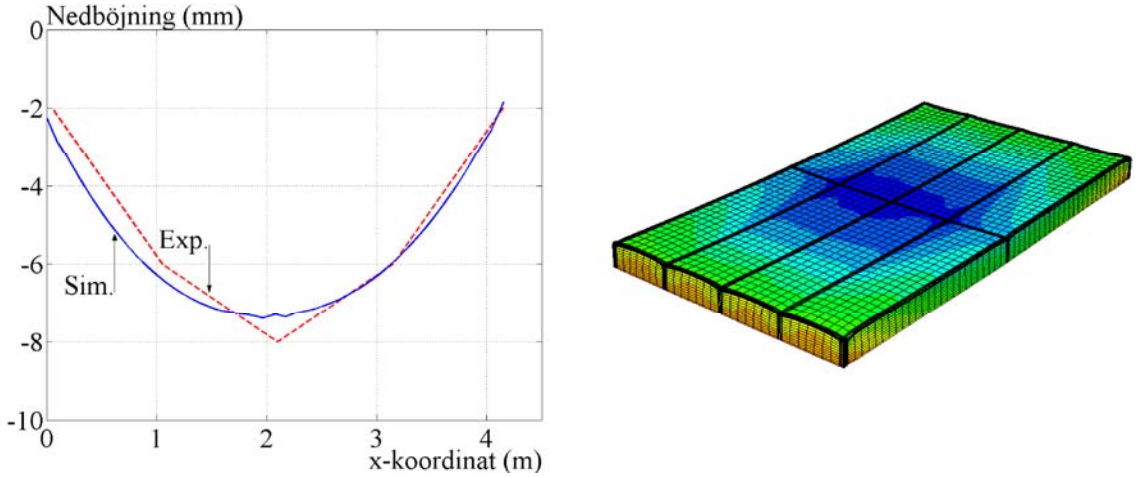
Figur 89. Nedböjning hos centrumbalken i bjälklag B2 efter 40 dygn.



Figur 90. Nedböjning hos centrumbalken i bjälklag B3 efter 40 dygn.



Figur 91. Nedböjning hos centrumbalken i bjälklag B4 efter 40 dygn.



Figur 92. Nedböjning hos centrumbalken i bjälklag B5 efter 40 dygn.

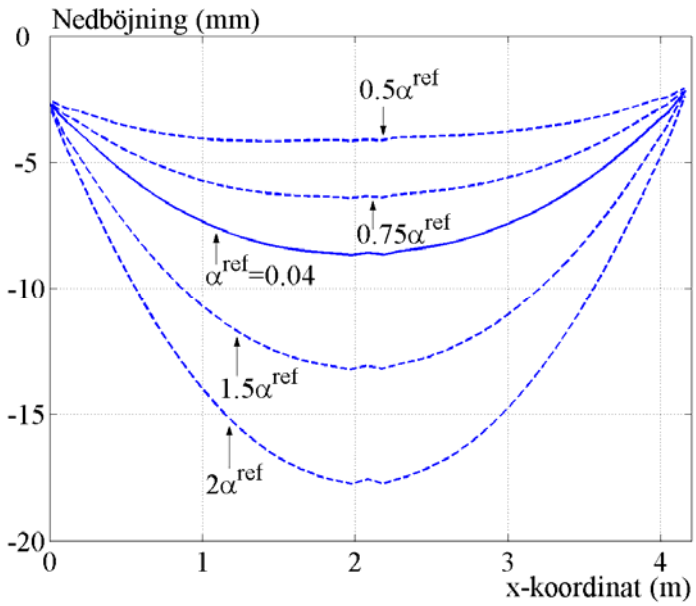
5.4 Parameterstudie

Som nämnts tidigare är det svårt att veta hur olika egenskaper och yttre parametrar påverkar formstabiliteten hos bjälklagselementen när de utsätts för klimatförändringar. För att undersöka detta har en mindre parameterstudie utförts där man varierar olika parametrar och tittar på hur det påverkar bjälklagets nedböjning

5.4.1 Inverkan av spånskivans krympningsegenskaper på bjälklagets nedböjning

Eftersom spånskivan är spiklimmad ovanpå själva träbalkstommen kommer spånskivans krympning att påverka bjälklagets nedböjning i stor grad. Den tenderar att böja ner bjälklaget eftersom den krymper betydligt mer än själva träbalkarna gör. För att studera spånskivans inverkan på nedböjningen har ett antal simuleringar utförts för spånskivor med olika krympningsegenskaper. Figur 93 visar hur nedböjningen hos bjälklagets centrumbalk påverkas av det att ändra spånskivans krympningskoefficient från 0.02 – 0.08. Resultaten visar tydligt att spånskivans krympningsegenskaper styr bjälklagets nedböjning i

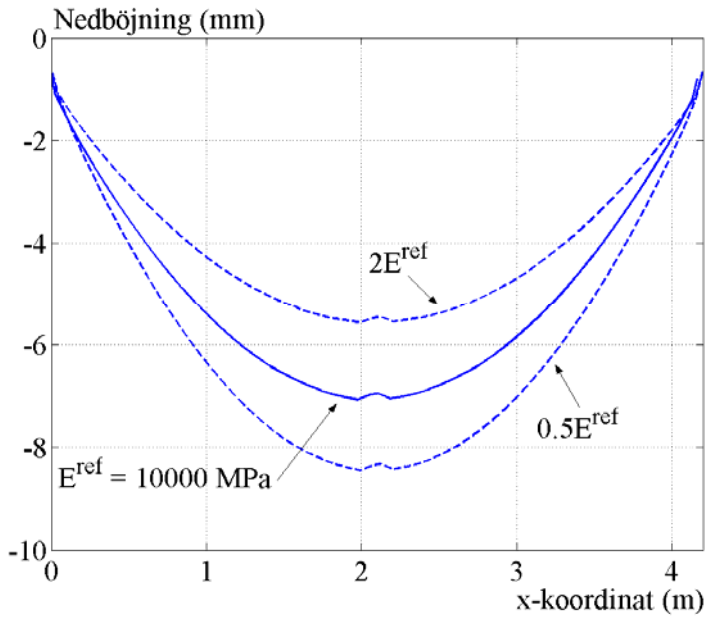
mycket stor utsträckning. I bjälklag av den typen bör man nog använda spånskivor med så liten krympningstendens som möjligt. Man skulle också kunna utföra en mer eftergivlig fog mellan spånskivan och träbalkstommen. Detta kan i för sig leda till andra problem som knarr och ett vekare bjälklagselement.



Figur 93. Inverkan av spånskivans krympningskoefficient på bjälklagets nedböjning

5.4.2 Inverkan av balkarnas E-modul på bjälklagets nedböjning

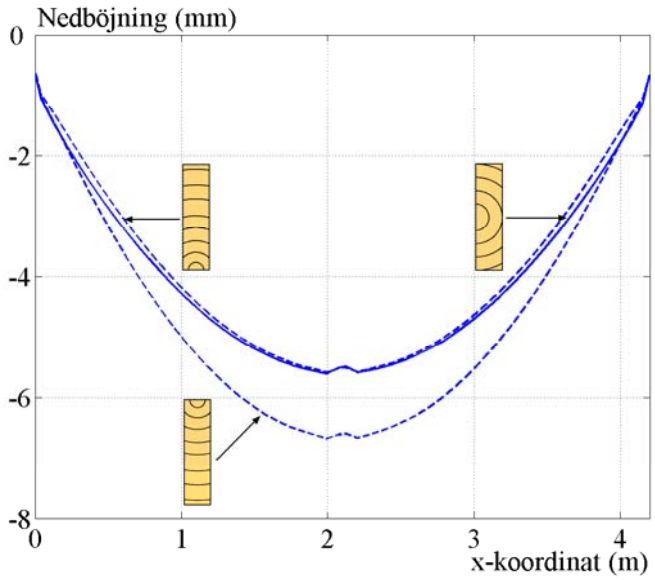
För att undersöka hur balkarnas E-modul påverkar bjälklagens nedböjning har tre stycken bjälklag simulerats. För referensbjälklaget har E-modulen hos alla huvud- och kantbalkar satts till 10000 MPa medan för de andra två har E-modulen hos samma balkar fördubblats respektive halverats. Figur 94 visar centrumbalkens nedböjning för dessa tre bjälklag. Resultaten visar tydligt att nedböjningen påverkas till en viss del av balkarnas styvhet. Styvare bjälklag får mindre nedböjning medan bjälklag med balkar med låg styvhet får större nedböjning.



Figur 94. Inverkan av träbalkarnas E-modul på bjälklagets nedböjning.

5.4.3 Inverkan av märgläge på bjälklagets nedböjning

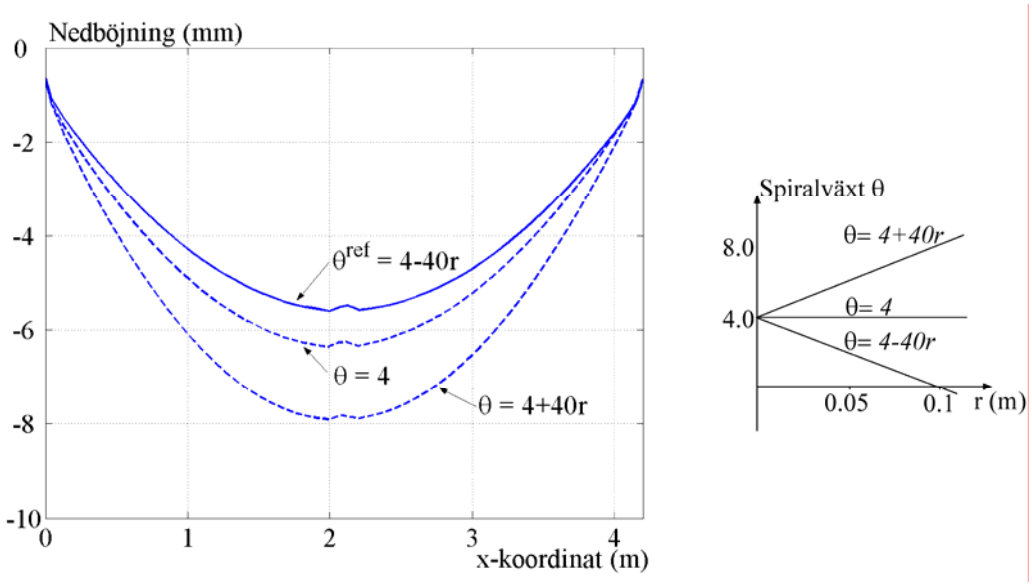
Träbalkarnas märgläge är en parameter som kan vara svårt att förutse hur den påverkar bjälklagets nedböjning under klimatvariation. Det kan också vara svårt att få det sågningsmönster man önskar eftersom stockarna har så olika dimensioner samtidigt som flexibiliteten i sågverksproduktionen kan vara begränsad. För att undersöka hur märgläget påverkar bjälklagets nedböjning har tre stycken bjälklag med olika sågningsmönster simulerats. Figur 95 visar nedböjningen för bjälklagens centrumbalkar där referensbjälklaget består av märgkluvna bjälkar och de andra bjälklagen består av balkar med märgen placerat på balkarnas över- och undersida. Resultaten visar att bjälklagen med märgkluvna balkar och med märgen placerad på undersidan resulterar i samma nedböjning medan bjälklaget med märgen på undersidan ger en större nedböjning. Här bör noteras att E-modulen antas variera linjärt från märgen och ut mot barken enligt $E_l = 9700 + 10000r$. Den slutsats man kan dra är att bjälklagets nedböjning inte är speciellt känsligt för en mindre variation i märgläge.



Figur 95. Inverkan av träbalkarnas märgläge på bjälklagets nedböjning.

5.4.4 Inverkan av balkarnas snedfibrighet på bjälklagets nedböjning

Snedfibrigheten hos virke pga spiralväxten i trästockar är en parameter som kan ha stor inverkan på formstabilitet hos sågat virke och sammanlimmade träprodukter när de utsätts för klimatvariationer. För att undersöka hur den påverkar nedböjningen hos bjälklagen har tre bjälklag med olika snedfibrighet balkar analyserats. Referensbjälklaget innehåller balkar från stock med spiralväxtfunktion θ=4-40r (r i m). Denna funktion anses representera medelsnedfibrighet hos svensk gran mycket bra. De andra funktionerna representerar mer extrema fall för t ex frodvuxna eller hårt belastade träd. Resultaten i figur 96 visar att bjälklagets nedböjning ökar med ökad snedfibrighet. Men medan snedfibrigheten varierar som en fallande funktion från märgen till bark verkar den inte påverka nedböjningen i någon stor omfattning.



Figur 96. Inverkan av träbalkarnas snedfibrighet på bjälklagets nedböjning.

6. Förslag till lösningar

En naturlig lösning på problemet med stora fuktrelaterade rörelser i träbjälklag är att använda torrare konstruktionsvirke. Redan vid en fuktkvot kring 12 % halveras krympningen av golvbjälkarnas höjdmått. En tekniskt och ekonomiskt lämplig fuktkvotsnivå torde vara 10 – 12 %. Lägre fuktkvotsnivåer blir svåra att bibehålla under normala produktionsbetingelser och skulle därför ställa betydligt större krav på fuktskydd.

En sortering med syfte att minska spridningen i krympningsegenskaper är tekniskt möjlig att genomföra. Det enklaste är att sortera efter läge i stocken, det vill säga tagen nära centrum eller längre ut mot stockens periferi. Det är även möjligt att sortera efter vikt för att därmed ta bort extremt tunga och lätta virkesstycken. Dessa extremer skiljer sig oftast avsevärt i krympning.

Ett annat sätt att minska problemen med fuktrelaterade rörelser är att anpassa bjälklagskonstruktionen inklusive ytskikten till de rörelser som normalt uppträder. I t.ex. ett våtrum skulle det kunna innebära att tätskikt och ytskikt görs flexibla med t.ex. en plastmatta. Alternativt kan ett styvt fribärande övergolv användas t ex. i form av en armerad pågjutning.

Simuleringarna visar att den globala nedböjningen av ett bjälklagselement kan minskas betydligt genom att använda ett skivmaterial med betydligt mindre fuktrelaterade rörelser än den konventionella golvspånskivan. Tänkbara material kan vara OSB, plywood, modifierad spånskiva och cementbaserade skivmaterial.

Det används redan idag produkter med betydligt mindre fuktrelaterade rörelser som ersätter konstruktionsvirket i bjälklagselementen. Exempel på sådana produkter är LVL (Kerto), lättbalkar (Swelite), fackverk och limträ. Dessa produkter är särskilt lämpliga i kombination med golvvärme och vid särskilda krav på plana golv.

7. Slutsatser

Projektet har klart visat att de fuktrelaterade rörelserna i träbjälklag kan minskas väsentligt om konstruktionsvirkets fuktkvot produktanpassas till 10 – 12 % fuktkvot. Mätningar och beräkningar visar att golvbjälkarnas initiala krympning under första året i stort halveras genom att använda bjälklagsvirke med 12 % fuktkvot istället för 18 % fuktkvot. Dock är det en relativt stor spridning i virkesstyckenas krympningsegenskaper. Detta beror främst på årsringarnas orientering i virkets tvärsnitt. Virke taget närmast centrum av stocken med till stor del stående årsringar har mindre krympning än virke taget längre ut från stockens centrum, detta beror på trämaterialets skillnader i krympning i de olika huvudriktningarna.

Konsekvensanalysen visar vid produktion och sorteringar att det är fulltmöjligt utan några större tillverkningstekniska problem att tillverka konstruktions virke med 12 % fuktkvot. Nedtorkning medför ökade produktionskostnader främst på grund av längre torkningstid, ökad utsortering pga. skevhet, ökad råvaruvolym, ökade hanteringskostnader och övriga omställningskostnader. Den totala merkostnaden på slutprodukten för kunden torde ligga kring 250 – 350 kr/m³.

Utomhusexponeringen av konstruktionsvirke med 18 % och 12 % fuktkvot visar klart att virket med 12 % fuktkvot ger mindre totala fuktrelaterade rörelser även efter en exponering utomhus med hög relativ luftfuktighet och tidvis regn och snö.

Försöken med de fem bjälklagen i laboratorium visade förhållandevis stor nedböjning av hela bjälklagselementet på grund av fuktrelaterade deformationer. Simuleringarna visar att nedböjningen till största del beror på spånskivans krympningsegenskaper. Vidare har simuleringarna också visat att parametrar som balkarnas böjstyvhet, snedfibrighet och märgläge påverkar bjälklagets nedböjning men inte lika mycket som spånskivans krympning.

Golvvärmens inverkan på golvbjälkarnas krympning under en årscykel är ungefär densamma som för ett mellanbjälklag utan golvvärme. Golvvärmen ger ett något torrare klimat i bjälklaget, skillnaden är dock relativt liten och ger endast ca 1 % lägre fuktkvot vintertid. Denna skillnad i fuktkvot ger en ökad krympning på ca 0,5 mm på en golvbjälke med höjden 220 mm. Golvvärmen medför dock att hela bjälklaget torkar betydligt snabbare vilket gör att rörelserna upplevs som större. Golvvärmen bedöms dock ha en större inverkan på spånskivan som kan krympa betydligt endast på grund av golvvärmen.

8. Referenslista

[1] Harrysson, C. 1992: Deformationer i elementbyggda träbjälklag i småhus. Trätek Rapport L 9103009.

[2] Hameury, S. 2002: Serviceability in medium-rise multi-storey timber frame buildings. Diploma work ENSAM Frankrike, SP Borås

[3] Olson, M. och P.Wall 2004: Fuktrelaterade deformationer i mellanbjälklag. Examensarbete KTH Byggvetenskap TRITA-BYMA 2004:5E

[4] Johansson, C-J. 1990: Ojämna golv i elementbyggda bjälklag med spånskivor på träreglar. SP Byggnadsteknik Borås, SP Rapport1990:42

[5] Jönsson, J. 2005: Moisture induced stresses in timber structures. Lund Institute of Technology, Dep. Of structural Engineering Report TVBK-1031

[6] Jordow, N. och Enocksson, P. 1996: Fuktrörelser och deformationer i stomsystem av trä. Lund Institute of Technology, Dep. Of structural Engineering Rapport nr 5079

[7] Ormarsson, S. 1999: Numerical Analysis of Moisture-Related Distortion in Sawn Timber, Doctoral Thesis, Publ 99:7, Chalmers University of Technology, Dep. of Structural Mech. Göteborg, Sweden.

[8] Ormarsson, S. Dahlblom, O., Petersson, H. 2000. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation. Part 3: Influence of annual ring orientation. Wood Science and Technology, 34:207-219.

[9] Ormarsson, S. Lindemann, J. Eriksson, J. Dahlblom O. and Petersson H. 2004: Computational Tool for Analysing Drying Distortion in Laminated Engineering Products of Wood, *In COST Action E15: Advances in Drying of wood*, Greece, April 22-24.

[10] Ormarsson, S. Petersson, S. and Dahlblom, O. 2002: Finite Element Simulations of Moisture Transport and Moisture Related Warping in Wooden Products, 10 pp, In *Fifth World Congress on Computational Mechanics,* Vienna, Austria, July 7-12.

[11] Eriksson, J. 2005; Moisture Transport and Moisture-Induced Distortions in Timber - an Experimental and Numerical Study. Doctoral Thesis, Publ 2340, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Göteborg, Sweden, 2005.

[12] Eriksson, J. Ormarsson, S. and Petersson, H. 2006: Finite- Element Analysis of Coupled Nonlinear Heat and Moisture Transfer in Wood. Numerical Heat Transfer – Part A - Applications, 50: 851-864.

[13] Kjellberg,A. 2006: Lamellparkett på golvvärme. Examensarbete KTH Byggvetenskap TRITA-BYMA 2005:3E

[14] Mjøs, N. och Ellingsrud, O. 1982: Oppbøjning av takstoler. Meddelelse nr 63. Norsk Treteknisk Institutt.

[15] Spånskivor 1988. Träteknikcentrum / Svenska spånskiveföreningen, Sweden.

[16] Burström, P. G. 2001: Byggnadsmaterial, Uppbyggnad tillverkning och egenskaper. Studentlitteratur, Lund, Sweden, pp 546.

[17] Moberg, K. 2006: Moisture-related distortions in wood-based floor structures with encased heating system. Master's Thesis, Publ 2006:34, Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics, Göteborg, Sweden.

[18] Olek, W. Weres, J. and Gusenda, R. 2003: Effects of thermal conductivity data on accuracy of modeling heat transfer in wood. Holzforschung 57: 317-325..

[19] Perré, P. and Turner, I. W. 1999: A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer 42:4501-4521.

[20] Hagentoft, C-E. 2001: Introduction to building physics. Studentlitteratur. Lund University, Sweden, 422 p.

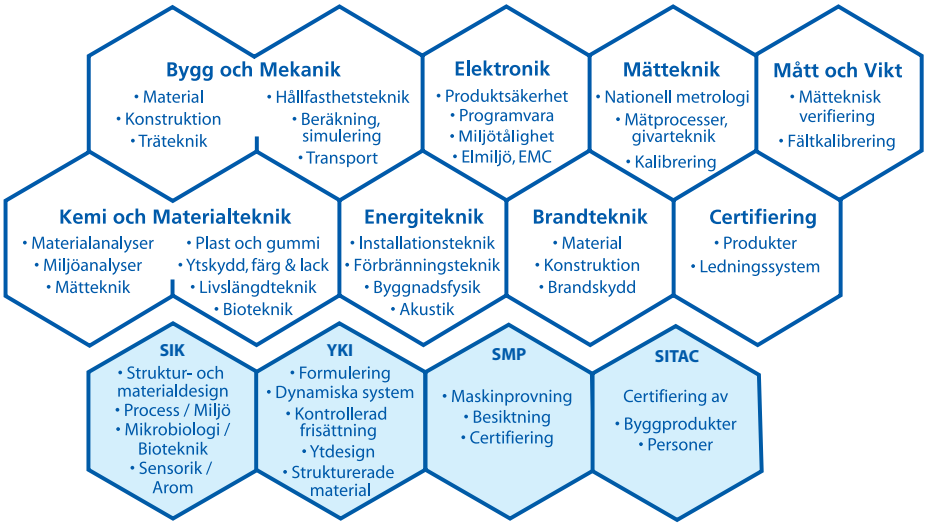
[21] Koponen, H. 1984: Dependence of moisture diffusion coefficients of wood and wooden panels on moisture content and wood properties. *Paperi ja Puu*, Laboratory of Mechanical Wood Technology, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 6p.

[22] Wood Handbook. Wood as an engineering material. Technical Report 113, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.

[23] Ormarsson, S. Rosenkilde, A. Norén, J. and Johansson, C. J. Moisture-related distortions in wood-based floor structures – Numerical simulation and experimental validation. *In WCTE 2006: 9th World Conference on Timber Engineering*, Portland, OR, USA, August 6-10 2006

[24]

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut utvecklar och förmedlar teknik för näringslivets utveckling och konkurrenskraft och för säkerhet, hållbar tillväxt och god miljö i samhället. Vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling. Vår forskning sker i nära samverkan med högskola, universitet och internationella kolleger. Vi är ca 850 medarbetare som bygger våra tjänster på kompetens, effektivitet, opartiskhet och internationell acceptans.



SP är organiserat i åtta tekniska enheter och fyra dotterbolag.

SP Trätek
SP RAPPORT 2006:61
ISBN 91-85533-54-8
ISSN 0284-5172

SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Box 857
501 15 BORÅS
Telefon: 033-16 50 00, Telefax: 033-13 55 02
E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

A Member of
United Competence