

Pressetørring af parketstave

Fysisk model

Mads Peter Sørensen og Niels Kjølstad Poulsen
Informatik og Matematisk Modellering
Danmarks Tekniske Universitet
2800 Kgs. Lyngby

Signe Kamp Jensen og Peter Pinholt
Junckers Industrier AS, Værftsvej 4
4600 Køge

Niels Morsing
Teknologisk Institut, Gregersensvej, postbox 141
2630 Tåstrup

8. september 2004

IMM-teknisk rapport-2004-15

Resumé

Informatik og Matematisk Modellering (IMM), Danmarks Tekniske Universitet (DTU), har deltaget i projektet *Berøringsfri Inspektion af Industrielle Processer og Systemer* (BIPS), som blev støttet af Erhvervsfremmestyrelsen i perioden 2000 til 2003 og i samarbejde med FORCE Technology, Risø Nationale Laboratorium, BaneDanmark, Junckers Industrier, Coloplast og SciTeq. Her gøres rede for opnåede resultater i den del af projektet, som vedrører samarbejdet mellem IMM, Junckers Industrier og FORCE Technology, omhandlende pressetørring af parketstave.

Formålet har været at undersøge deformationer og spændinger i parketstave til gulve under en pressetørringsproces. Parketstavene anbringes mellem to presseplaner der leverer tryk og temperaturer over 100°C til de fugtige nyudskårne parketstave. Fugten afkoges over kort tid, ca. to timer, hvorefter stavene kan videre forarbejdes. En matematisk model er opstillet til beregning af reduktionen af parketstavens tykkelse under pressetørringen. Modellen indeholder bidrag fra

svind, viskoelastisk deformation med en simpel temperaturafhængighed og fugtafhængig elasticitet. Beregningsresultater er sammenholdt med eksperimentelle målinger og rimelig overensstemmelse er opnået. Vi har forsøgt at bestemme spændingerne i parkestavene under pressetørring, men dette har vist sig særdeles vanskeligt.

Spændinger i parketstave under pressetørring

Et af hovedprodukterne hos Junckers Industrier, Køge, er parketgulve fremstillet af bøgestave. Stavene skæres ud af relativt korte kævler og tørres i en unik pressetørringsprocess udviklet hos Junckers. De udskårne parketstave anbringes mellem presseplaner, der opvarmes til mellem 120 og 160 graders varme. Herved koges vandet af parketstavene under tryk ved typisk 1,2 MPa og tørringen sker på ca. 2 timer. Den alternative kammertørringsmetode er langt langsommere og tager mellem 14 og 21 dage.

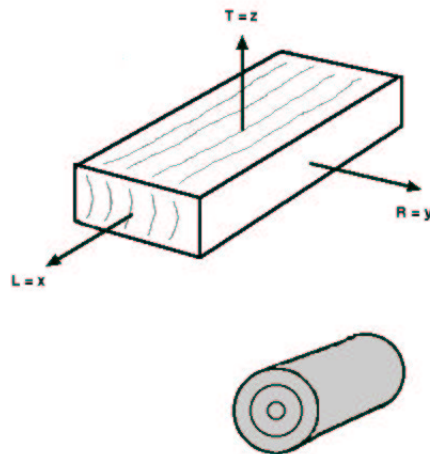
Parketstavene er skåret ud således at længderetningen af stavene er parallel med den oprindelige træstammes vækstretning. Under tørring presses stavene i en kombineret radial og tangential retning af åreringene. Vi betragter ideelle stave uden knaster m.m. De varme presseplaner koger vandet af parketstavene og vanddampene transporteres hovedsagligt i længderetningen af staven og ud af endefladerne. Stavene presses sammen og svinder fra oprindeligt 35 mm i tykkelsen til ca 28 mm efter endt pressetørring. Deformationerne i længderetningen og bredden af stavene er så små at vi kan se bort fra disse. En færdig tørret stav har en typisk bredde på 78 mm og en længde på ca. 60 cm. Stavene høvles og samles i brædder i en bredde af to parketstave.

Deformationen af de enkelte parketstave under pressetørringen er givet som en sum af flere bidrag:

- a) Ren elastisk tøjning ε_E . Dette bidrag følger en lineær Hooks lov for elastisk deformation, som resultat af en given kraftpåvirkning.
- b) Svind ε_s forårsaget af variation i fugtindholdet. Ved udtørring fjernes frit og bundet vand fra træmassen. Fjernelse af bundet vand under fiberætningspunktet giver anledning til svind af cellerne i træet.
- c) Visko-elastisk tøjning ε_v . Den viskoelastiske tøjning er en deformation, som afhænger af spændingen til tidligere tider, og er derfor en forsinket respons på spændingen.

d) Mekano-sorption ε_{ms} . Mekano-sorption er en fugt- og spændingsafhængig deformationsændring, som ved tørring leder til krypning. Opfugtes træ efter tørring og affugtes træet igen til den oprindelige fugtkvot er træets slut dimensioner varigt ændret. Typisk sker der et yderligere svind. Mekano-sorption leder derfor til hysteres.

Under pressetørring er deformationen i træets længderetning L forsvindende lille, idet svindet kompenseres af viskoelastisk og mekano-sorptiv forøgelse i L-retningen. Bredden af staven er ligeledes relativt konstant under pressetørring, hvorimod tykkelsen reduceres væsentlig p.gr.a. svind, viskoelastiske effekt og tillige mekano-sorption. Alle ovennævnte (a,b,c,d) fire deformationseffekter er fugt- og temperaturafhængige.



Figur 1: parketstav med angivelse af længderetning L, tangentialretning T og radialretningen R. Et xyz-koordinatsystem er indlagt med x-aksen parallel med L, y-aksen parallel med R og z-aksen parallel med T.

I det følgende skal vi opstille en matematisk model til beskrivelse af sammenhængen mellem spændingerne og tøjningerne i en parketstav (figur 1)

under pressetørring. Opgaven er på ingen måde simpel, idet præcise kvantitative modeller for visko-elastisk tøjning og især mekano-sorptive effekter ikke kendes. Et første simpelt forsøg er at betragte de konstitutive ligninger i 3 dimensioner, som giver en lineær sammenhæng mellem spændingerne og tøjningerne givet ved Hooks lov

$$\varepsilon_{xx} = \hat{\varepsilon}_{xx} + \frac{1}{E_x} \sigma_{xx} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_{yy} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_{zz} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \hat{\varepsilon}_{yy} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_{xx} + \frac{1}{E_y} \sigma_{yy} - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_{zz} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \hat{\varepsilon}_{zz} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_{xx} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_{yy} + \frac{1}{E_z} \sigma_{zz} \quad (3)$$

ε_{ii} er den rent elastiske tøjning i i -akseretningen, hvor $i = x, y, z$ angiver de tre rumlige akseretninger. Vi skal indlægge et koordinatsystem således at længderetningen af en stav er identisk med x -akseretningen, y -aksen er langs stavens bredde og z -aksen langs højden. $\hat{\varepsilon}_{ii}$ er summen af tøjningerne resulterende fra svind, visko-elastisk effekt og mekano-sorption i i -akseretningen. Parketstavens elastiske egenskaber er stærkt anisotrope, hvorfor der er tre forskellige elastiske moduler E_i , $i = x, y, z$. Tilsvarende for Poisson forholdende ν_{ij} med $i, j = x, y, z$. Træ er stærkt anisotrop og derfor afhænger elasticitetsmodulerne og Poisson forholdende af koordinatsystemets retning. Vi har valgt at lade x -akseretningen være parallel med L-retningen, y -akseretningen er valgt parallel med R-retningen og z -akseretningen er valgt parallel med T-retningen. Spændingen i i -akseretningen på en flade med normalvektoren n_j benævnes σ_{ij} . For forskydningsspændingerne og de tilhørende tøjninger gælder

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2G_{xy}} \sigma_{xy}, \quad \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2G_{xz}} \sigma_{xz}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2G_{yz}} \sigma_{yz}. \quad (4)$$

Poissonforholdene og elasticitets konstanterne er relaterede gennem

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{xy}}{E_x}, \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{yz}}{E_y}. \quad (5)$$

Tøjningerne er givet ved forskydningsfelterne ($v_i(x, y, z)$), $i = x, y, z$, af et punkt (x, y, z) i materialet,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

hvor $x_1=x$, $x_2=y$, $x_3=z$. For at en vilkårlig del af legemet skal være i ligevægt, må følgende sæt af partielle differentialligninger for spændingerne være opfyldt:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + p_x = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + p_y = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + p_z = 0. \quad (9)$$

p_i er en volumenkraft i i -akseretningen. De konstitutive ligninger (1-3) kan nu inverteres således at man får spændingerne udtryk ved tøjningerne. Ved at indsætte definitionen på tøjningerne i (6) samt indsætte i ligevægtsligningerne (7-9) fås et system af tre anden ordens differentialligninger for forskydningerne v_i . Disse ligninger er Naviers ligninger for elastiske medier. Komplexiteten af Naviers ligninger er ret høj, især p.gr.a. træets anisotropi med retningsbestemte elasticitetsmoduler og Poisson forhold. Dertil kommer at elasticitetsmodulerne afhænger af fugten og temperaturen i træet.

Elasticitetsmodulerne og deres fugtafhængighed

I det følgende opstilles empiriske relationer for elasticitetsmodulernes afhængighed af det relative fugtindhold (fugtkvot) θ , som defineres som massen af vand m_v i et kontrolvolumen af træet divideret med massen af det absolut tørre træ i samme kontrolvolumen. Kontrolvolumet er indlagt således at det indeholder den samme træmængde før og efter tørring. Kontrolvolumet vil altså blive indskrænket svarende til svindet af træet under tørring. Der er to former for tilstedeværelse af vand i træ. Den første er vand bundet til træets cellestruktur ved hydrogenbindinger (bundet vand), og den anden er vand, som udfylder kapilare hulrum i træstrukturen (frit vand). Ved udtørring af træ forsvinder først vandet i de kapilare hulrum. Efter udtørring af de kapilare hulrum begynder det bundne vand at forsvinde. Den fugtkvot ved hvilken det kapilare vand er forsvundet og hvor der er maximal mængde bundet vand kaldes for fibermætningspunktet θ_m . Træets mekaniske egenskaber er næsten uafhængig af fugtkvoten når denne er større end fibermætningspunktet. Under fibermætningspunktet sker en betydelig ændring af de mekaniske egenskaber. I det følgende skal vi koncentrere os om ændringer i elasticitetsmodulerne som funktion af fugtkvoten under fiber-

mætningspunktet. I almindelighed vil elasticitetsmodulerne også afhænge af temperaturen.

Fibmætningspunktet afhænger af temperaturen. I Ref.[1] er fibmætningspunktet empirisk relateret til den absolute temperatur T (målt i grader Kelvin) givet ved

$$\theta_m = 0.598 - 10^{-3}T . \quad (10)$$

Ved stuetemperatur på $293^\circ K$ er fibermætningspunktet eksempelvis $\theta_m=0.305$. Typisk tørres træet til en fugtkvotepå $\theta_0=0.02$ og derfor indføres

$$X = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} . \quad (11)$$

Elasticitetsmodulerne i radiale R , tangentielle T , og længde L retninger findes af [2]

$$E_i(\theta) = \frac{E_i(\theta_0)}{1 + B_i(\theta_0)E_i(\theta_0)X} , \quad (12)$$

hvor $i = R, T, L$. For bøgetræ kan værdierne i tabel [1] bruges

$E_R(\theta_0) = 715MPa$	$B_R(\theta_0) = 1.54 \cdot 10^{-4} \frac{1}{MPa}$
$E_T(\theta_0) = 562MPa$	$B_T(\theta_0) = 0.028 \frac{1}{MPa}$
$E_L(\theta_0) = 11900MPa$	$B_L(\theta_0) = 0.21 \cdot 10^{-4} \frac{1}{MPa}$
$G_{RT}(\theta_0) = 245MPa$	$B_{RT}(\theta_0) = 5.0 \cdot 10^{-4} \frac{1}{MPa}$

Tabel 1: Elasticitetsmoduler for bøgetræ. L: Længderetning. T: Tangential retning. R: Radial retning.

Som tidligere nævnt afhænger elasticitetsmodulerne og B koefficienterne af temperaturen. Her skal vi kun betragte den temperaturafhængighed, som fremkommer via X i ligning (11). For Poisson forholdene har vi brugt værdierne $\nu_{RT}=0.31$, $\nu_{TR}=0.25$, $\nu_{RL}=\nu_{TL} = 0$. Ved pressetørring forbliver længden af parketstavene stort set uændret under hele tørreprocessen. Det er derfor nærliggende at betragte et tværsnit af en parketstav for beregning af spændingsforløb under antagelse af plan tøjningstilstand. Ved plan tøjningstilstand antages $\varepsilon_x = \varepsilon_L=0$. I dette tilfælde reduceres Naviers ligninger til et system af to koblede partielle differentilligninger for forskydningsfeltet i et to-dimensionalt tværsnit af en parketstav vinkelret

på stavens længderetning. I første skridt betragtes kun indflydelsen af de fugtafhængige anisotrope elasticitetsmoduler. Tøjninger som følge af svind, visko-elasticitet og mekan-sorbition negligeres. For den plane tøjningstilstand udtrykkes Naviers ligninger ved

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{E_x}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{E_x \nu_{yx}}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}} \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(G_{xy} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

samt

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(G_{xy} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E_y}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}} \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E_y \nu_{xy}}{1 - \nu_{yx}\nu_{xy}} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

I bestemmelsen af de fugtafhængige elasticitetsmoduler approximeres fugtindholdet i en stav til et givet tidspunkt under tørringen ved det analytiske udtryk

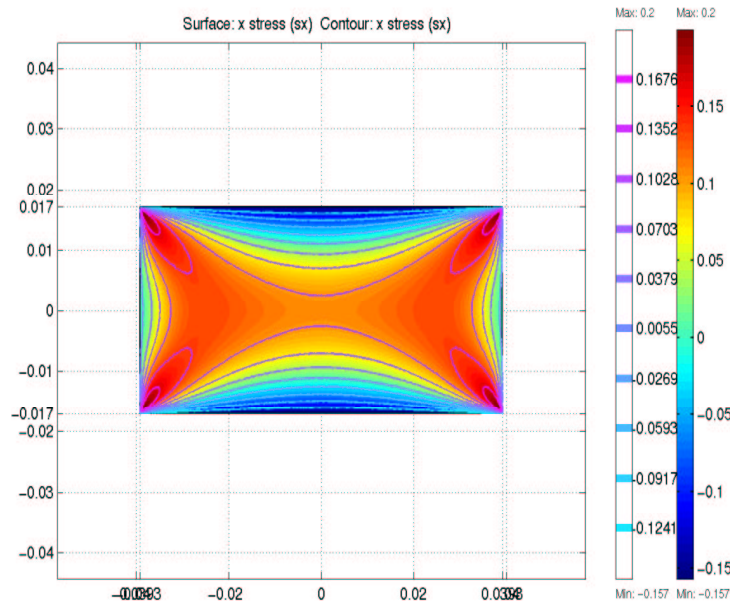
$$\theta(y) = \frac{\theta_m}{2} \left(\tanh\left(\frac{y + y_0}{w}\right) - \tanh\left(\frac{y - y_0}{w}\right) \right). \quad (15)$$

Dette betyder at den plane spændingstilstand beregnes som et øjebliks billede af tilfældet hvor fugtfronten med bredden w er positioneret ved $\pm y_0$ målt fra stavens center. Et eksempel beregnet med FEMLAB er vist i figur (2).

Svind eller svelning p.gr.a. fugtændringer

Under tørring af træ er der et svind, hvis størrelse er retningsbestemt, dvs. svindet er anisotropt [4]. I længderetningen L er svindet mindst, og størst i tangential retning T. Ved opfugtning svelner træet. Svindet afhænger lineært af fugtkvoten θ og for bøgetræ er svindet i de tre retninger L, R og T givet empirisk ved [4]

$$\varepsilon_L = 0.0118 - 0.0118 \frac{\theta}{\theta_m}, \quad (16)$$



Figur 2: Spændingen σ_x i et tværsnit af en parketstav, hvor kun de fugtafhængige anisotrope elasticitetskonstanter tages i betragtning. Svind, viskoelasticitet, og mekano-sorption er ikke medtaget. I ligning (15) er benyttet parameterverdierne $y_0=0.0085\text{m}$ og $w=0.0005\text{m}$. Øvrige parameterverdier er taget fra tabel 1.

$$\varepsilon_R = 0.058 - 0.058 \frac{\theta}{\theta_m}, \quad (17)$$

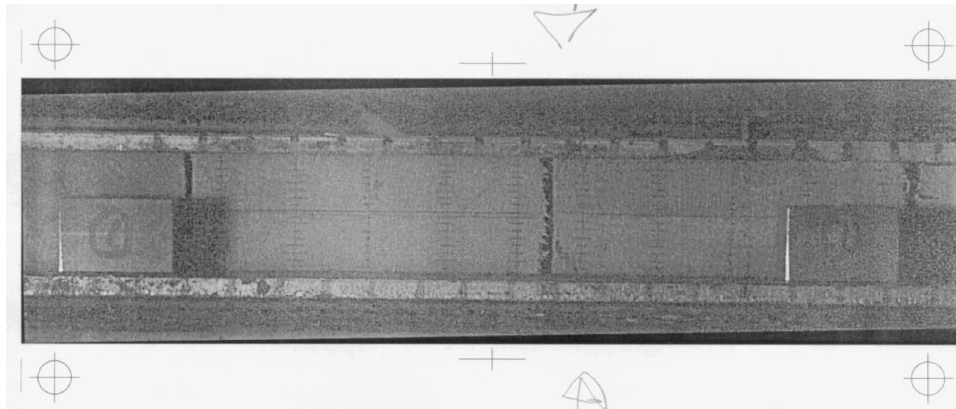
$$\varepsilon_T = 0.118 - 0.118 \frac{\theta}{\theta_m}, \quad (18)$$

hvor θ_m er fiber-mætningspunktet. I ovenstående udtryk er tøjningerne beregnet i forhold til fiber-mættet vådt træ også kaldet grønt træ. Over fiber-mætningspunktet antages der ikke at finde svind/svelning sted.

Viskoelastisk effekt

Det tidlige forløb af den totale tøjning i presseretningen er blevet fastlagt eksperimentelt. Eksperimentet blev udført på et antal stave med indtegnede ækvivalente målestreger på endefladerne. Målestregerne blev indtegnede vinkelret på et givet antal linier, der går fra stavens bund til dens top. Et eksempel er vist i figur (3), hvor et antal linier er ligeligt fordelt henover sta-

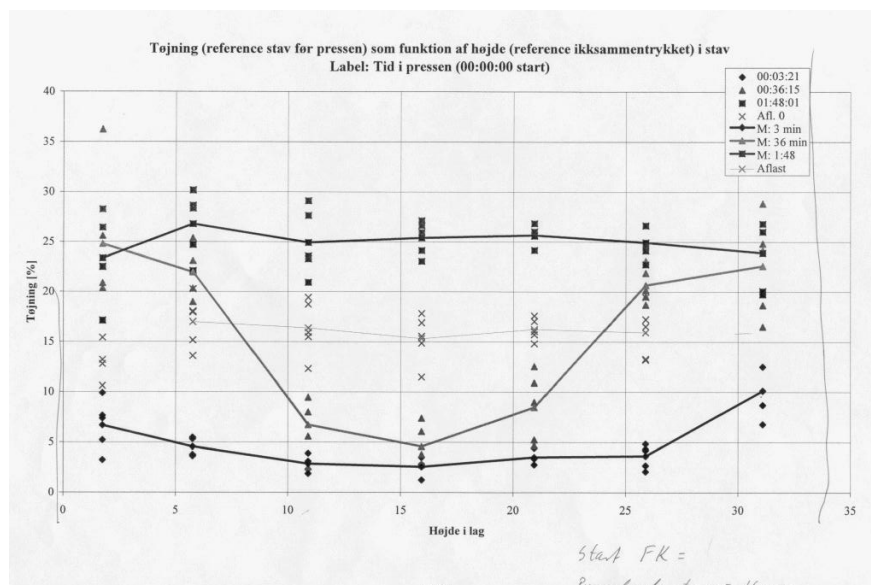
vens bredde. Stavene blev anbragt i en eksperimental presse, og ved at måle forskydningen af målestregerne under pressetørringen, kan tøjningen ε_{zz} i stavens højderetning (z -akseretningen) bestemmes. Resultatet af et pressetørringsforløb er vist i figur 4, hvor tøjning ε_{zz} er afbildet som funktion af højden (z -koordinaten). Presseplanernes temperatur var 160°C og trykket 1.2 MPa . Parketstavene blev lagt i pressen ved stuetemperaturen 20°C . Efter 3 minutter i pressen er tøjningen $\varepsilon_{zz} \sim 0.025$ midt i staven, men øges svagt til mellem 0.07 og 0.1 nærmest presseplanerne, hvor vand første koger af. Kurven for tiden 36 minutter viser en tydelig front, som bevæger sig ind mod midten. Denne front svarer til tørrefronten, der skiller vådt træmasse med lille tøjning i midten af stavene og tørt træmasse med stor tøjning tættest på presseplanerne. Efter 1 time og 48 minutter er stavene



Figur 3: Målestreger på endefladen af en parketstav.

færdigtørret og en samlet ligelig tøjning på ca. 0.25 observeres. Tages trykket af pressen (aflastning) ekspanderer stavene (krydserne i figur 4) og den samlede tøjning i højden fra grøn stav til færdigpresset stav er ca. 0.16 .

Den maximale tøjning p.gr.a. svind er på 0.058 i radial retning og 0.118 i tangential retning (ligningerne (17) og (18)). Hvis vi sammenligner svindet i radial retning og tangential retning med en tøjning på ca. 0.16 efter aflastning, ses at den eksperimentelle tøjning er noget større end ved rent svind. Vi mener derfor at presningen involverer viskoelastisk deformation, som skal adderes til svindet. I det følgende skal vi benytte en simpel én-dimensional model for den viskoelastiske effekt præsenteret i reference [5]. Strengt taget bør modellen være to-dimensional, men den viskoelastiske effekt i y -akse retningen negligeres her. Tilsvarende vil vi se bort fra mekanosorption. For viskoelastiske materialer vil tøjningen ε_v afhænge af spændingen til tidligere



Figur 4: Tøjning ε_{zz} som funktion af højde (z -koordinaten). Diamanter: Tøjningen efter 3 minutter. Trekanter: Tøjningen efter 36 minutter. Firkanter: Tøjningen efter 1 time og 48 minutter. De fuldt optrukne linier er middelværdier. Krydserne markerer den resulterende tøjning efter aflastning af stavene i pressen.

tider og denne afhængighed beskrives ved integralligningen

$$\varepsilon_v(t) = J_0\sigma(t) + \int_0^t K(t-t')\sigma(t')dt' . \quad (19)$$

Spændingen σ er lig spændingen i z -akseretningen og kan være tidsafhængig. J_0 beskriver en lineær og momentan respons på en påtrykt spænding σ . Størrelsen af den tidsforsinkede påvirkning udtrykkes ved kernen $K(t-t')$ i integralet. Kernen vil altid være en aftagende funktion af tiden og en eksponentiel afhængighed er et af de simpleste forslag til en sådan funktion. Vi antager derfor

$$K(t) = \frac{A}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) . \quad (20)$$

Parameteren τ angiver længden af tidsperioden for hvilken spændingen påvirker tøjningen og A måler størrelsen af denne påvirkning. I tilfældet med presetørring antages at en konstant spænding påtrykkes til tiden $t = 0$, dvs

$\sigma(t)=\sigma_0H(t)$, hvor H er Heavisides step funktion. Integreres ligning (19) med benyttelse af udtrykket for kernen i (20) fås

$$\varepsilon_v = J_0\sigma_0 + A\sigma(t)[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] . \quad (21)$$

Til ovenstående udtryk skal herefter adderes svind af formen som i de tre empiriske formler (17-18). Da retningen af åringene afhænger af stavenes udskæring vil man typisk ikke skulle bruge enten (17) eller (18), men en kombination af disse. Denne kombination skrives på formen $\varepsilon_s = s_0 - s_0\frac{\theta}{\theta_m}$ og vi får

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_s(z, t) + \varepsilon_v(t) = s_0 - s_0\frac{\theta(z, t)}{\theta_m} + J_0\sigma_0 + A\sigma(t)[1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] . \quad (22)$$

Den totale tøjning som funktion af tiden er blevet målt i en række eksperimenter og sammenlignet med numeriske simulationer hvor ligning (22) er benyttet. Langs z -aksen, dvs. presseretningen, er tykkelsen af en stav inddelt i N diskrete lige store stykker af længden Δz . Deformationen af Δz , på sted $z_i=i\Delta z$, $i = 1, 2, \dots, N$ og til tiden t , er $\varepsilon(z_i, t)\Delta z$. Den samlede tøjning i z -akseretningen er til tiden t givet ved

$$\epsilon(t) = \sum_{i=1}^N \varepsilon(z_i, t)\Delta z . \quad (23)$$

Fugtkvoten $\theta(z, t)$ er beregnet med et computerprogram udviklet i Ref.[7] for afkogning og tørring af parketstave. Programmet er en implementering af en matematisk model for temperaturfordelingen i en parketstav. Fugtkvoten for bunden og frit vand som funktion af temperaturen beregnes i programmet under hensyntagen til afkogning ved temperaturer over $100^\circ C$.

I det følgende sammenlignes eksperimentelle resultater af parketstavenes tykkelse som funktion af tiden under pressetørringsprocessen med en modifikation af modellen i ligning (22). Eksperimenterne indikerer, at der indgår to tidskonstanter i førnævnte afhængighed og dette forhold har vi valgt at modellere ved at lade tidskonstanten $\tau=\tau(T)$ og amplituden $A=A(T)$ afhænge af temperaturen T . Temperaturafhængigheden er valgt meget simpelt og ifølge ligningerne

$$A(T) = \begin{cases} A_1 & \text{for } T < 105^\circ C \\ A_2 & \text{for } T \geq 105^\circ C \end{cases} . \quad (24)$$

samt

$$\tau(T) = \begin{cases} \tau_1 & \text{for } T < 105^0C \\ \tau_2 & \text{for } T \geq 105^0C \end{cases} \quad (25)$$

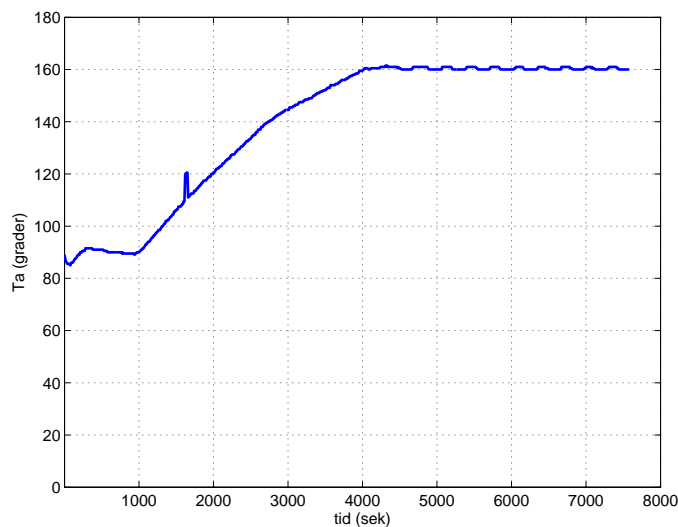
I ligning (22) sættes $J_0=1/E_i(\theta)$, hvor elasticitetsmodulet $E_i(\theta)$ er givet ved ligning (12). Vi har valgt elasticitetsmodulet i radial retning ($i=R$), men betydningen heraf er begrænset, idet bidraget fra ren elastisk deformation til den samlede tøjning er forsvindende lille. En serie af eksperimenter er blevet udført og præsenteret i figurene 6, 11, 16, 21, 26, 31 og 36 sammen med beregnede resultater fra ligningerne (22) og (23). De benyttede parameterværdier er givet i Tabel 2.

Presseforløb	σ_0	A_1	A_2	τ_1	τ_2	s_0
	MPa	-	-	sekunder	sekunder	-
90-161	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.065
100-161	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.10
120-161	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.08
130-161	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.045
140-161	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.075
150-161A	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.058
150-161B	-1.2	0.08	0.15	9000	800	0.058

Tabel 2: Tabel over parameterværdier brugt til beregning af den totale tøjning i figurene 6, 11, 16, 21, 26, 31 og 36.

Figur 5 viser temperaturforløbet af presseplanerne som funktion af tiden målt i sekunder beregnet v.hj.a. computerprogrammet præsenteret i Ref.[7]. Begyndelsestemperaturen for presseplanerne er 90^0C og sluttemperaturen er 161^0C (presseforløb 90-161). Den pludselige temperaturstigning ved 1620 sekunder er en data opsamlings eller måle fejl. Den målte reduktion af tykkelsen af parketstavene er vist i figur 6 (fuld optrukken grøn kurve) og sammenlignet med den beregnede reduktion af tykkelsen (stiplet blå kurve) fra ligningerne (22) og (23) samt parameterværdierne i Tabel 2. For de valgte parametre er der god overensstemmelse mellem eksperiment og den matematiske model. Ren svind giver anledning til en betydelig mindre tykkelsesreduktion, hvorfor det viskoelastiske bidrag er væsentlig. Parametrene i Tabel 2 er bestemt, eller rettere, valgt således, at der er opnået god overensstemmelse mellem de givne eksperimenter og den matematiske model.

Resultaterne viser, at modellen kan matche eksperimenterne ved at variere på faktoren s_0 i udtrykket for svindet ved ren affugtning uden presning. Dette betyder ikke at man ikke kunne have varieret på de øvrige parametre og opnået tilsvarende gode resultater. I hvert eksperiment er 4 stave blevet presset og den målte sammentrykning er identisk for hver måleserie af 4 stave. Det bemærkes at orienteringen af åreningene i parketstavene varierer fra stav til stav, dvs den tangentielle retning T typisk hverken er parallel med z -akse retningen eller y -akse retningen i figur 1. Tilsvarende for den radiale retning R . Det er derfor nærliggende at variere på s_0 for at opnå bedste fit til eksperimenterne.



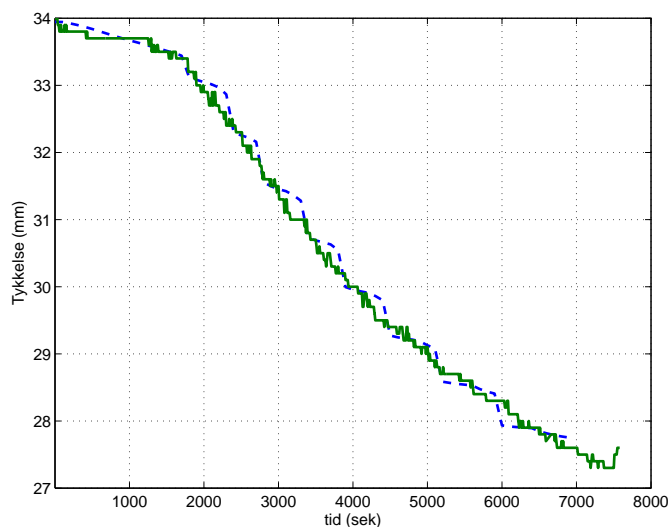
Figur 5: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 90-161.

I figurerne 7-9 er vist de tilhørende beregnede temperaturer og fugtkvoter for presseforløb 90-161, som er brugt til bestemmelse af tykkelsesreduktionen i figur 6.

Modellens nøjagtighed vurderes ved de efterfølgende forsøg. Resultaterne heraf er vist i appendiks.

Konklusion

Deformationen af parketstave er modelleret ved at inkludere svind under presetørring samt viskoelastisk deformation. Resultaterne indikerer at parketstavenes viskoelastiske egenskaber ved temperaturer over ca. 100-105°C

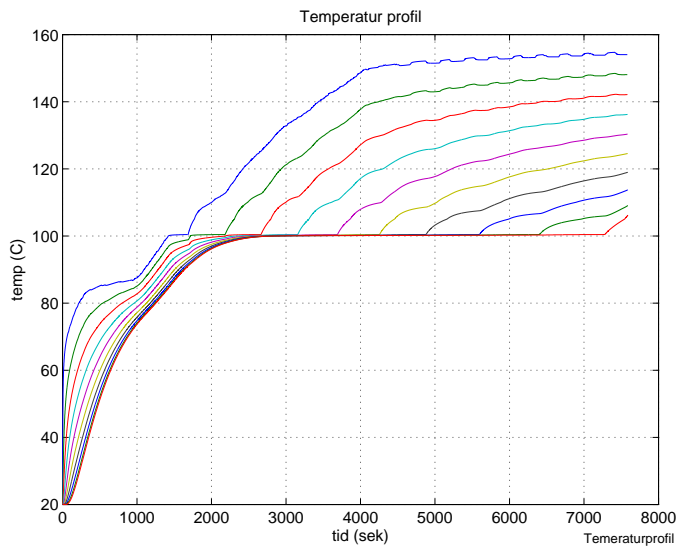


Figur 6: Presseforløb 90-161: Temperaturforløbet af den totale tykkelse for parketstavene som funktion af tiden t , beregnet af (23) (blå stippet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameterværdierne er givet i tabel 2.

er væsentlig forskellige fra de viskoelastiske egenskaber ved temperaturer under ca. $100-105^{\circ}\text{C}$. Det har været vanskeligt at etablere en to dimensional model til beregning af spændingsforløbet i en parketstav under tørreprocessen. Dette skyldes manglende præcis viden om deformationsbidragene fra viskoelasticitet og mekano-sorption.

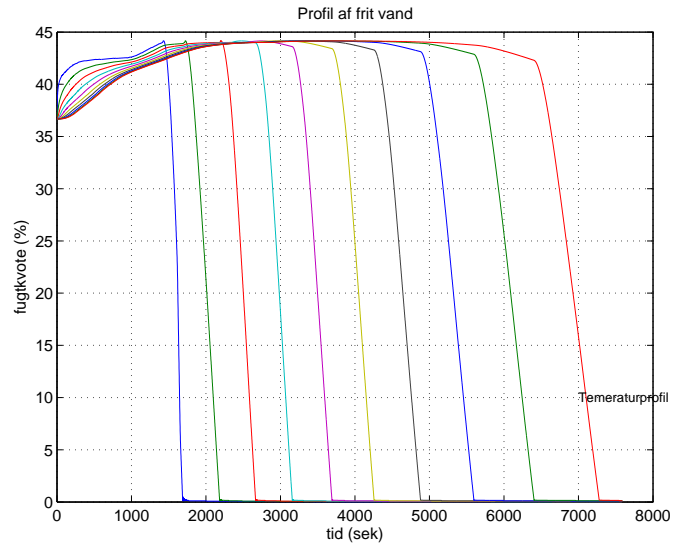
Litteratur

- [1] I.W. Turner, *A two-dimensional orthotropic model for simulating wood drying processes*, Appl. Math. Modelling, **20**, 60-81, (1996).
- [2] S.J. Kowalski and G. Musielak, *Deformations and stresses in dried wood*, Transport in Porous Media, **34**, 239-248, (1999).
- [3] H. Didriksen, J.S. Nielsen og M.W. Hansen, *Energibesparelser ved optimering af tørreprocesser gennem anvendelse af modeller og effektiv regulering*, DK-teknik Energi og Miljø, (2001).
- [4] T. Thomassen, *Træ og Træmaterialer*, Dansk Teknologisk Institut, Visoprint, (1977).

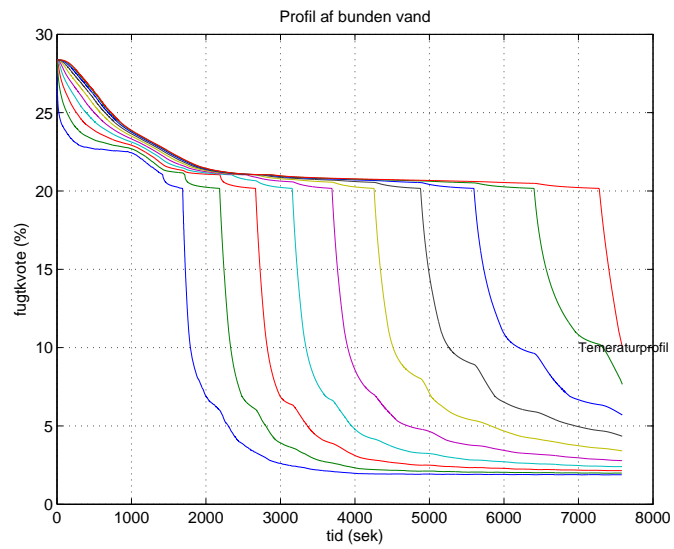


Figur 7: Presseforløb 90-161. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.

- [5] E. B. Hansen, *Sædvanlige differentiaalligninger i fysikken*, Polyteknisk Forlag, (1988).
- [6] A. Mårtensson and S. Svensson, *Stress-strain relationship of drying wood*, *Holzforschung*, **51**, 472-478,
- [7] N.K. Poulsen, M.P. Sørensen, P. Pinholt, S.K. Jensen, N. Morsing, *Pressetørring af parketstave, simulations model*, IMM-TECHNICAL REPORT-2004-14, Informatik og Matematisk Modellering, Danmarks Tekniske Universitet, (2004).
- [8] N. Morsing, *Densification of wood - The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain*, Department of Structural Engineering and Materials Technical University of Denmark. Series R no. 79, (2000).

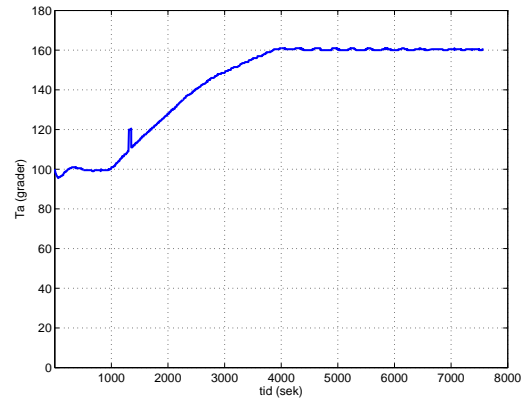


Figur 8: Presseforløb 90-161. Beregnet fugtkvotef af frit vand gennem parketstaven.

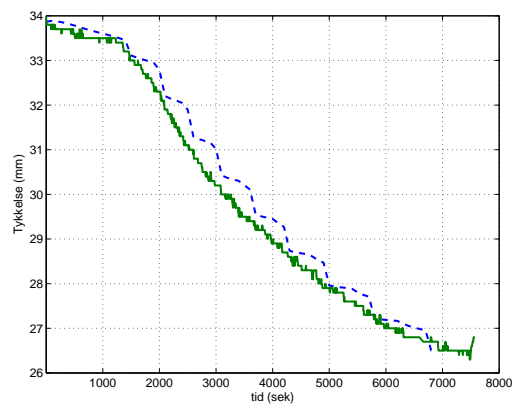


Figur 9: Presseforløb 90-161. Beregnet fugtkvotef af bunden vand gennem parketstaven.

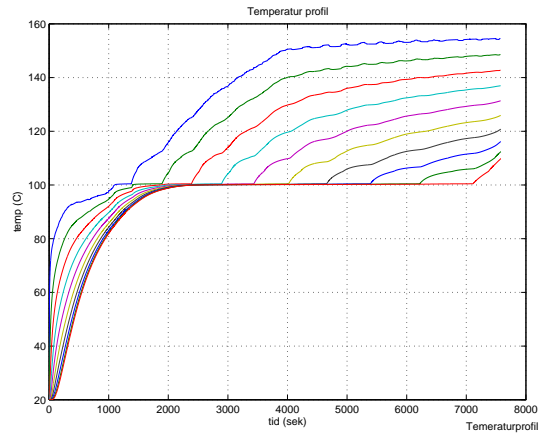
Appendiks



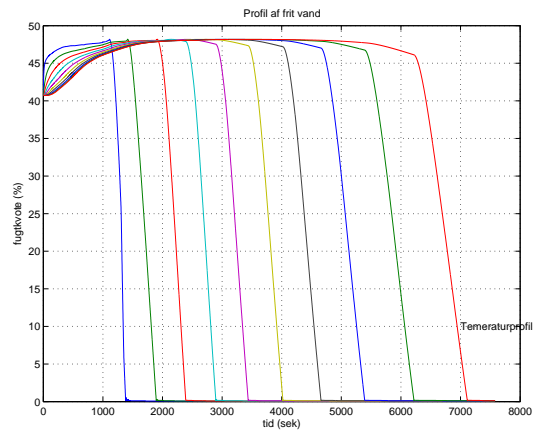
Figur 10: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 100-161.



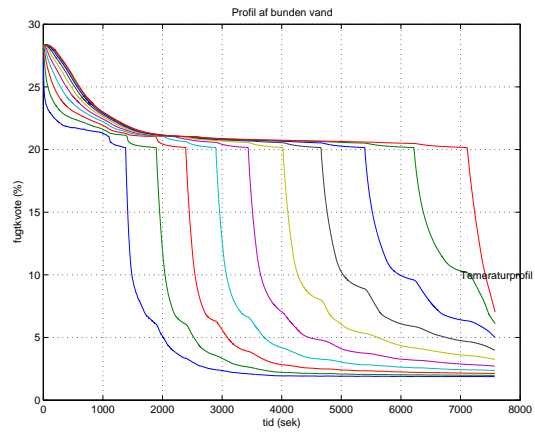
Figur 11: Presseforløb 100-161: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiplet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameterværdierne er givet i tabel 2.



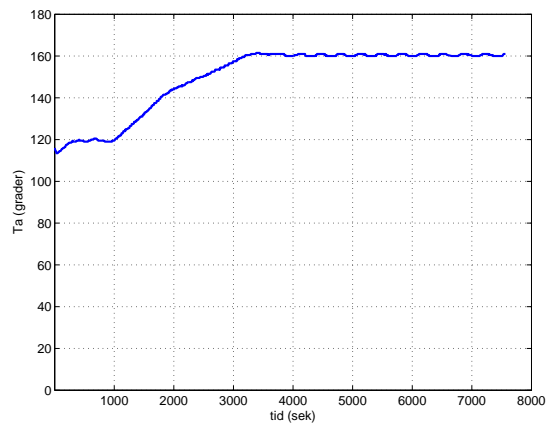
Figur 12: Presseforløb 100-161. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



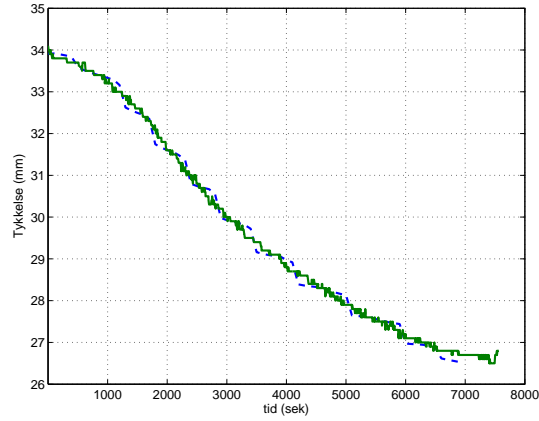
Figur 13: Presseforløb 100-161. Beregnet fugtkvæb af frit vand gennem parketstaven.



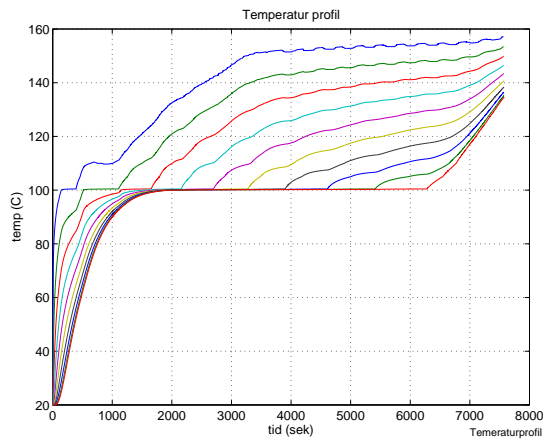
Figur 14: Presseforløb 100-161. Beregnet fugtkvotef af bunden vand gennem parketstaven.



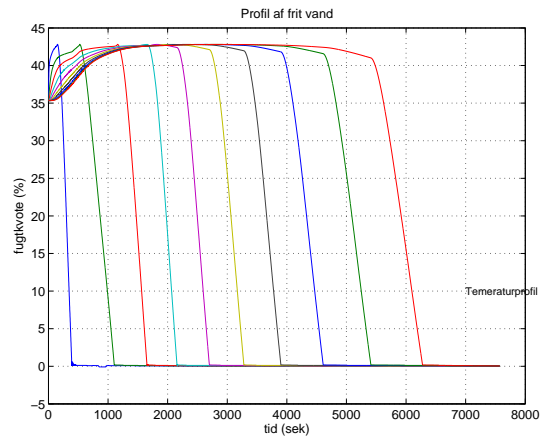
Figur 15: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 120-161.



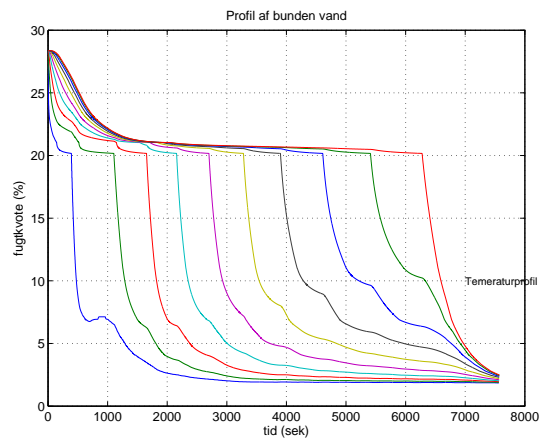
Figur 16: Presseforløb 120-161: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af en parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiptet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameterverdierne er givet i tabel 2.



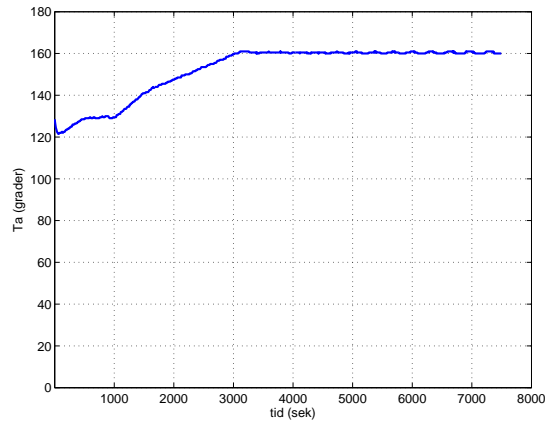
Figur 17: Presseforløb 120-161. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



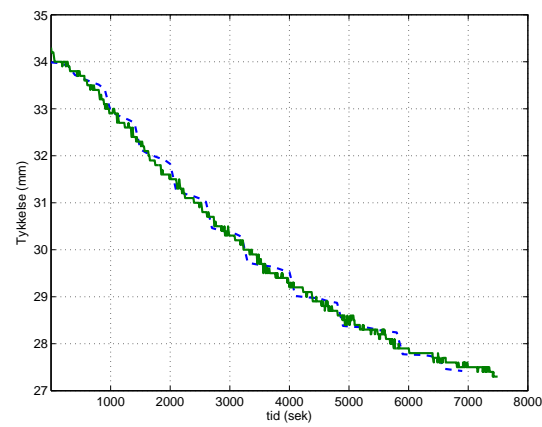
Figur 18: Presseforløb 120-161. Beregnet fugtkvot af frit vand gennem parketstaven.



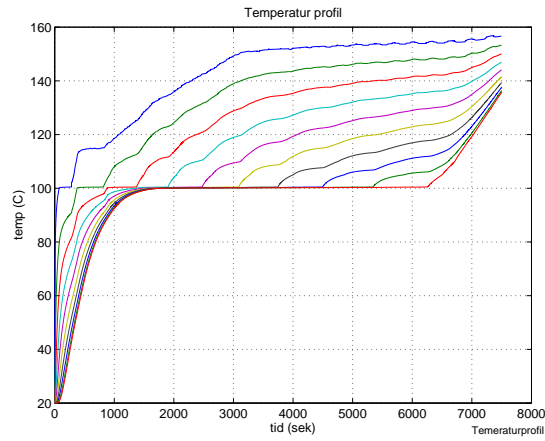
Figur 19: Presseforløb 120-161. Beregnet fugtkvot af bunden vand gennem parketstaven.



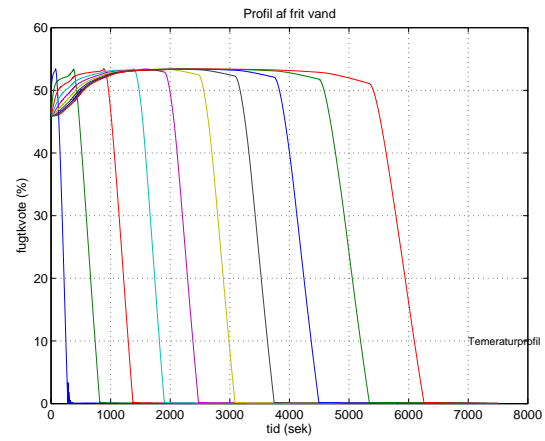
Figur 20: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 130-161.



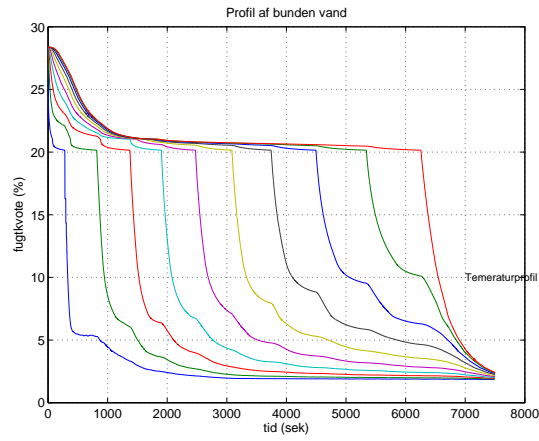
Figur 21: Presseforløb 130-161: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiplet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameter værdierne er givet i tabel 2.



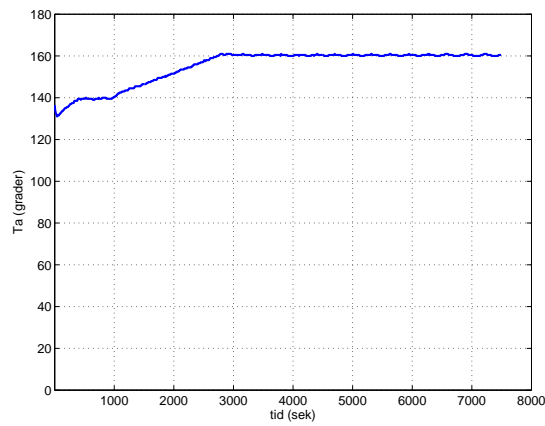
Figur 22: Presseforløb 130-161. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



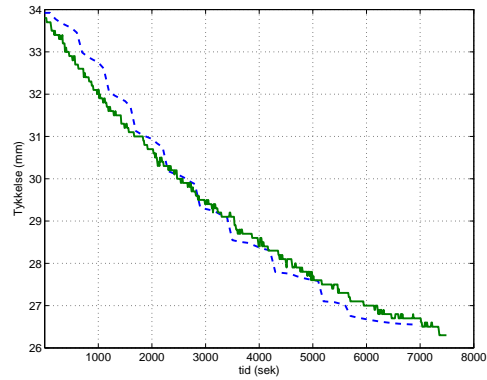
Figur 23: Presseforløb 130-161. Beregnet fugtkvate af frit vand gennem parketstaven.



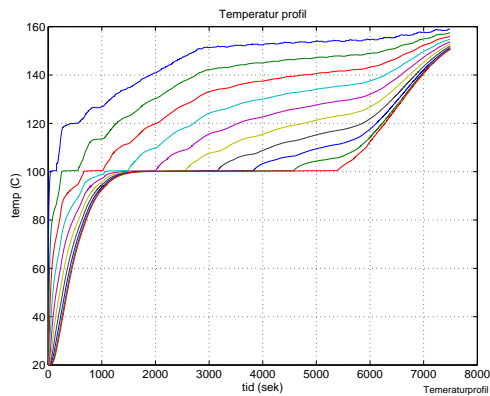
Figur 24: Presseforløb 130-161. Beregnet fugtkvotef af bunden vand gennem parketstaven.



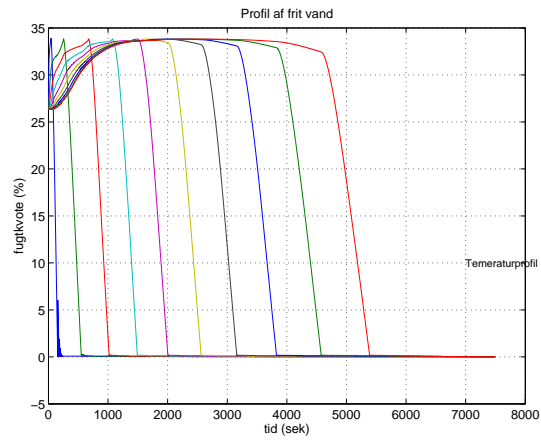
Figur 25: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 140-161.



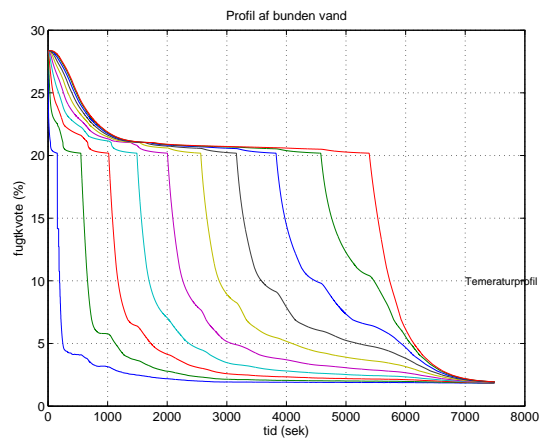
Figur 26: Presseforløb 140-161: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiplede linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukket linie). Parameterverdierne er givet i tabel 2.



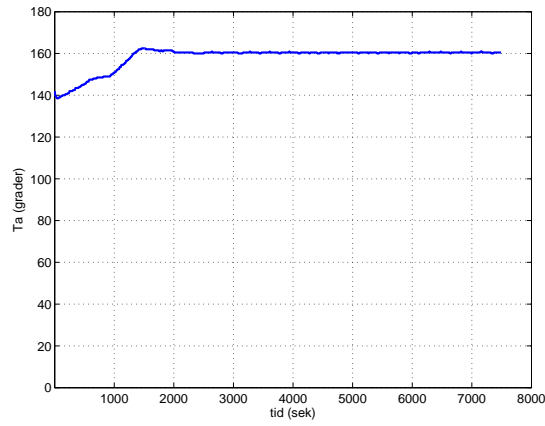
Figur 27: Presseforløb 140-161. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



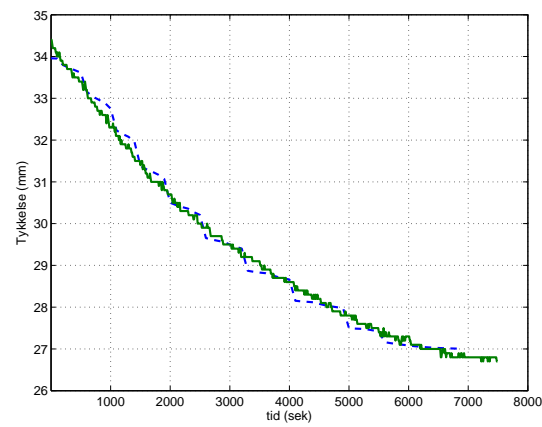
Figur 28: Presseforløb 140-161. Beregnet fugtkvot af frit vand gennem parketstaven.



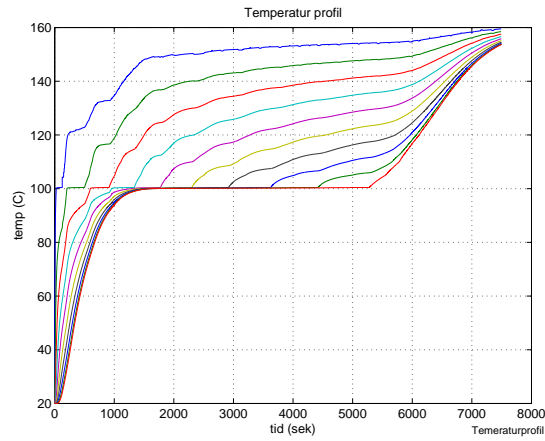
Figur 29: Presseforløb 140-161. Beregnet fugtkvot af bunden vand gennem parketstaven.



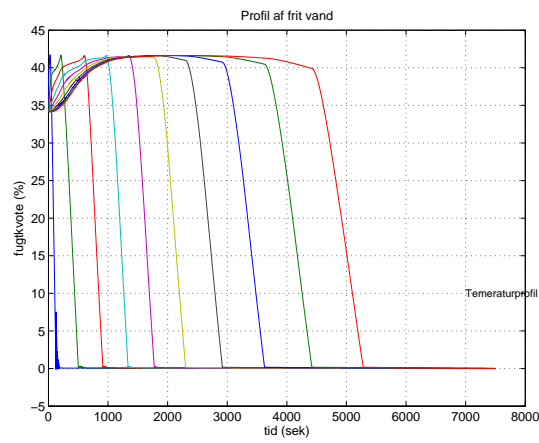
Figur 30: Presseplanernens temperatur for Presseforløb 150-161A.



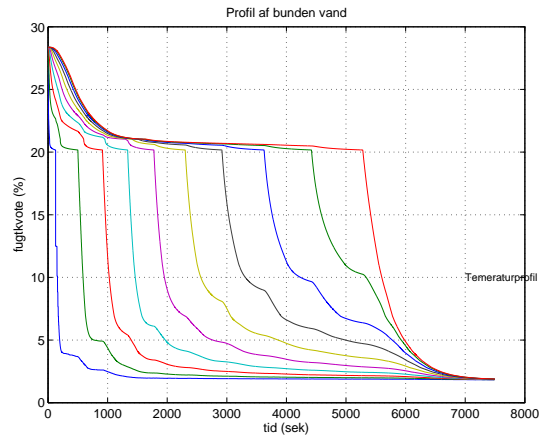
Figur 31: Presseforløb 150-161A: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiptet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameterverdierne er givet i tabel 2.



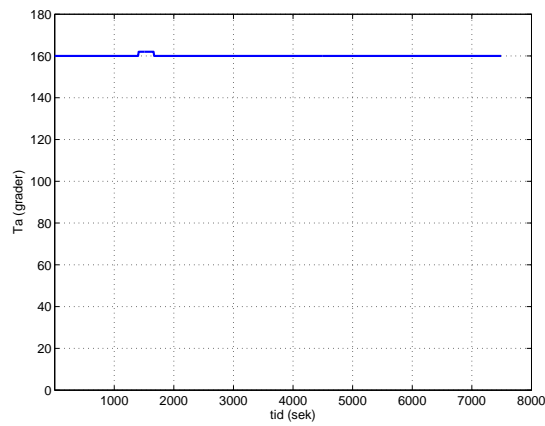
Figur 32: Presseforløb 150-161A. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



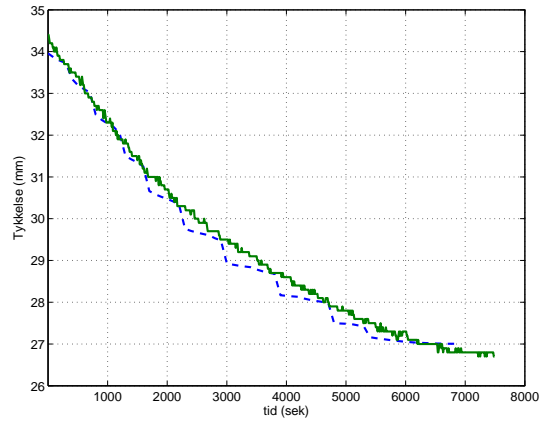
Figur 33: Presseforløb 150-161A. Beregnet fugtkvate af frit vand gennem parketstaven.



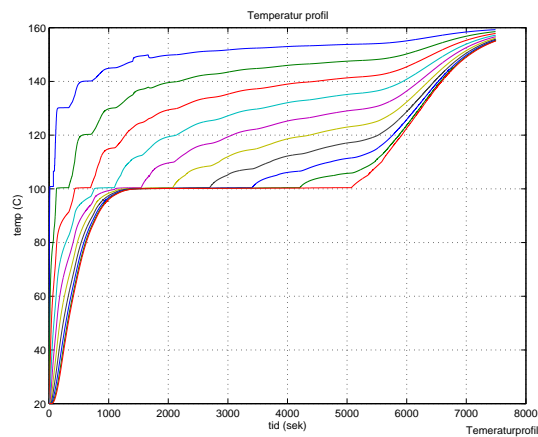
Figur 34: Presseforløb 150-161A. Beregnet fugtvote af bunden vand gennem parketstaven.



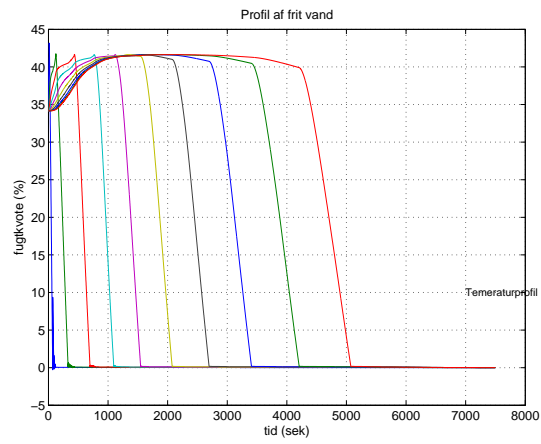
Figur 35: Presseplanernes temperatur for Presseforløb 150-161B.



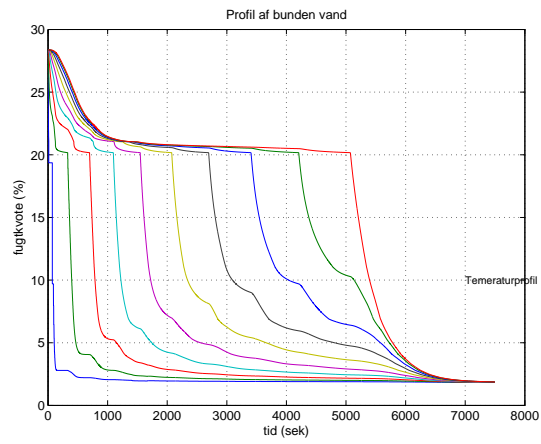
Figur 36: Presseforløb 150-161B: Temperaturforløbet af den totale tykkelse af parketstavene som funktion af tiden t beregnet af ligning (23) (blå stiptet linie) og sammenlignet med eksperimentelle data (grøn fuldt optrukken linie). Parameterverdierne er givet i tabel 2.



Figur 37: Presseforløb 150-161B. Beregnet temperaturprofil gennem parketstaven.



Figur 38: Presseforløb 150-161B. Beregnet fugtkvate af frit vand gennem parketstaven.



Figur 39: Presseforløb 150-161B. Beregnet fugtkvate af bunden vand gennem parketstaven.