Pressetørring af Parketstave
-
Simulationsmodel

Niels Kjølstad Poulsen, Mads Peter Sørensen,

Informatik og Matematisk Modellering
Bygning 321, Richard Petersens Plads,
Danmarks Tekniske Universitet
DK-2800 Kgs. Lyngby, Danmark.

Peter Pinholt, Signe Kamp Jensen,

Junckers Industrier A/S,
Værftsvej 4,
DK-4600 Køge, Danmark.

Niels Morsing

Teknologisk institut
Gregersvej, Postbox 141,
DK-2630 Tåstrup

IMM Technical Report
2004-14

8. september 2004

Resumé

Nærvrende rapport indgår som en del af det arbejde der er udført under BIPS centeret. Rapporten vedrrer modelleringsarbejdet med Junckers pressetørringsproces. Det er målet at opstille en termodynamisk og mekanisk model for parketstavene under pressetørring med henblik på at forklare og om muligt reducere sandsynligheden for revnedannelser.

Keywords : *Parketstave, trætørring, PDE modeller, FEM modeller*

1 Baggrund

Nærværende rapport dokumenterer en del af de resultater der er opnået i en af undergrupperne under BIPS centeret. Undergruppens arbejde vedrører specifikt pressetørringsprocessen og er et af de projekter der har været udført ved Junckers Industrier A/S.

BIPS centeret (Center for **B**erørirngsfri kontrol, styring og regulering af **I**ndustrielle **p**rocesser og **s**ystemer) har opnået støtte fra Erhversfremmestyrelsen og er et samarbejde mellem Force Technology, Risø (Afdelingen for Optik og Plasmaforskning), DTU (Informatik og Matematisk modellering), Banestyrelsen, Coloplas A/S, Junckers Industrier A/S og SCITEQ-Hammel A/S.

En af tørringsprocesserne der anvendes til produktion af parketstave på Junckers er pressetøring, hvori stavene efter udskæring anbringes i en presse der under høj temperatur og tryk udtørrer stavene. I den forbindelse kan der opstå forskellige uhensigtsmæssigheder. F.eks. kan der p.gr.a. forskellige omstændigheder opstå revner i nogle af parketstavene.

Det var projektets målsætning at opstille en model for tørringsprocessen for at få et indblik i de mekanismer der er dominerende og om muligt at udvirke en styrings strategi, der reducerer antallet af stave der er ramt af revner.

Modelleringsarbejdet tager i høj grad udgangspunkt i den tilgængelig litteratur. Den er desværre i en stor udstrækning rettet mod situationer, der ikke er helt dækkende for den aktuelle. Modelleringsarbejdet er desuden rettet mod mikroskopiske fænomener, mens data fortrinsvis er tilgængelig på det makriskopiske niveau.

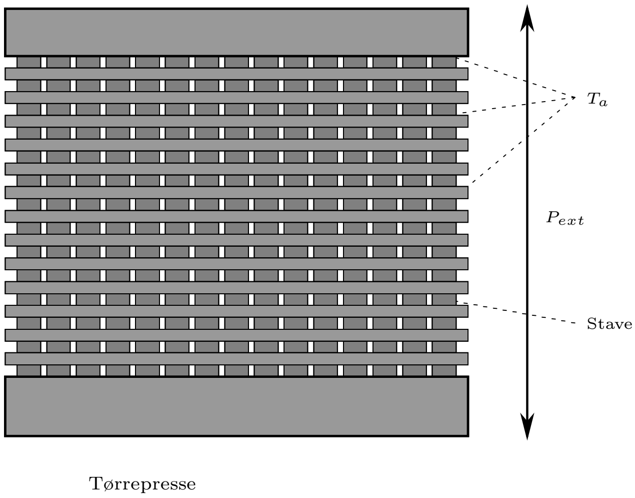
2 Introduktion

Parketstavene udskæres af frisk træ (34 x 78.5 x 639 mm) og består af vedmasse (mikroskopisk massefylde 1.5 g/cm^3), fri væske i capilarene og væske bundet til cellevæggene. En grøn (eller frisk) stav vejer 1650 g (makroskopisk massefylde ca 1.0 g/cm^3) og vægtfordelingen (vægtandele) på vedmasse, fri og bunden vske er 58 %, 20% og 22%, henholdsvis. Dette svarer til en fugtkvote (masse i forhold til tørstof) på 28.5 % og 46 % for bunden og frit vand, henholdsvis.

Staven stables i lag med mellemliggende land hvori der er bestræbt opretholdt en konstant temperatur (160 C). Pressen yder et tryk i vertikal retning svarende til 12 kg/cm^2. Ved tørringen sker der en volumen (og vægt) reduktion og trykket bevirker at volumenreduktionen hovedsageligt sker i stavenes tykkelsesretning. Dimensionerne for en tørret stav er 26 x 77 x 639 mm.

Ved tørringen sker en varmetransport ind i staven, hvorved der først sker en afkogning af fri væske og derefter ved højre temperatur en frigørelse af den bunden væske. I denne proces sker der en reduktion af stavens volumen og under visse spændings forhold kan der opstå revner (såkaldte presserevner).

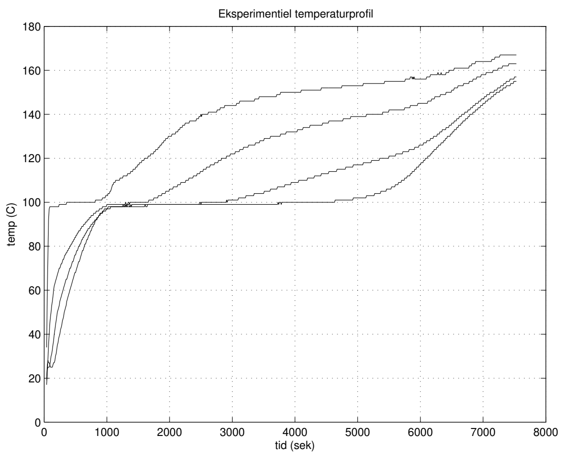
Stavene tørres i praksis ned til 2% fugtkvote.



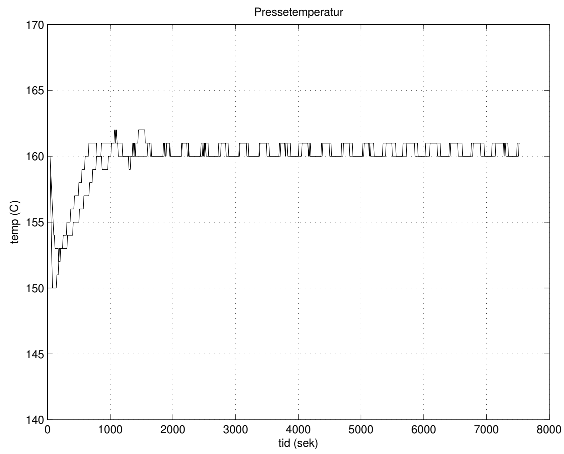
Figur 1. Principskitse for en tørrepresse.

3 Termodynamisk del

Den termodynamiske del af modellen består hovedsageligt af varmeledning af energi ind i træprofilen. Denne indstrømmende energi anvendes dels til temperatur stigning og dels til udtørring af træmassen. Modellen er formuleret som en mikroskopisk homogen model, mens målinger hovedsageligt kun eksisterer p makroskopisk niveau i form at temperatur målinger i forskellige segmenter samt ydere dimensioner af staven.



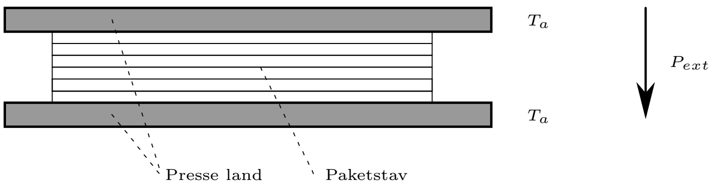
Figur 2. Temperatur variationer i positioner 3.3 mm, 6.2 mm, 11.2 mm og 16.9 mm fra overflade.



Figur 3. Presse lands temperatur variation under eksperiment.

3.1 Varme ledning

Stavene anbringes i en presse, hvor landenes temperatur er T_a. Modelleringen kan foregå efter forskellige principper. I det følgende er der anvendt en FEM metode, hvor den betragtede stav opdeles i tykkelses retningen (stav tykkelsen l) i et antal (n) segmenter, hver med en temperatur T_i.



Figur 4. Segmentvis opdelt stav i tørre presse

Den drivende kraft i forbindelse med den termodynamiske del af modellen er temperatur variationer gennem staven tykkelses retning. Anvender vi Ficks lov vil energistrømmene for element i være

$$q_{in} = \sigma\Big(T_{i-1} - T_i\Big)$$

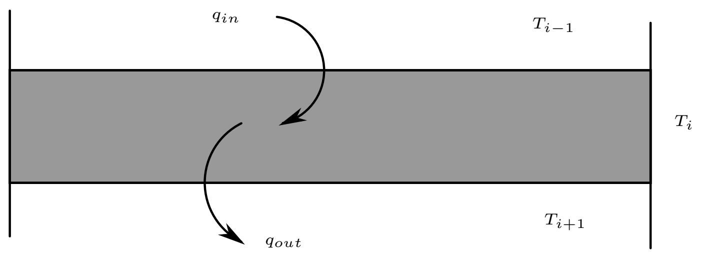
og

$$q_{out} = \sigma\Big(T_i - T_{i+1}\Big)$$

henholdsvis.

Her er σ er materialet varme ledningsevne (pr. segment). Konventionsmæssigt er $T_0 = T_a$ og $T_{n+1} = T_a$. Der antages iøvrigt ideel kontakt mellem overflader i presseplan og stav.

Den specifikke varme ledningsevne afhænger af temperatur (T_i) og fugtkvote (masse af vand i forhold til masse af tørstof, u_i, 0-100%), efter følgende udtryk



Figur 5. Energibalance i stavsegment.

([1] side 26)

$$\sigma_{spec} = a_0 + a_1 u + a_2 T + a_3 u\ T$$

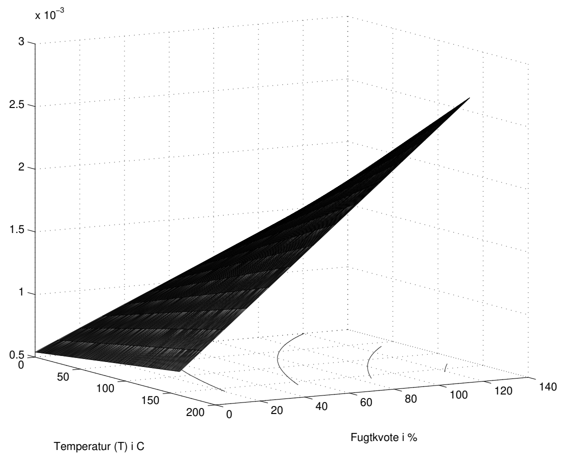
hvor temperaturen angives i °C. I denne model anvendes den totale fugtkvote (dvs. bestående af bde frit og bunden vand). For birk er konstanterne (i KCal/m/h/C, [1] side 26)

$$a_0 = 0.13297 \quad a_1 = 0.00196 \quad a_2 = 0.0002306 \quad a_3 = 0.0000112$$

For omregning (fra [1] side 26) til bøg skal disse strrelser skaleres med

$$k = 1.625\ \rho + 0.1625$$

hvor $\rho = 0.80\ g/cm^3$ for bøg. Afhængigheden er angivet i figur 6.



Figur 6. Varmeledningsevne for bøg i cal/cm/sek/C som funktion af temperatur og fugtkvote.

Et segments varmeledningsevne er relateret til den specifikke ud fra

$$\sigma = A\frac{n}{l}\sigma_{spec}$$

hvor A er stavens tværsnits areal.

Den indstrømmende energi (egentlig effekt) er

$$\dot{E}_i = q_{in} - q_{out} = \sigma\Big(T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}\Big)$$

eller mere kompakt

$$\dot{\mathbf{E}} = \sigma \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & \cdots \\ 1 & -2 & 1 & \cdots \\ 0 & 1 & -2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \mathbf{T} + \sigma \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_a$$

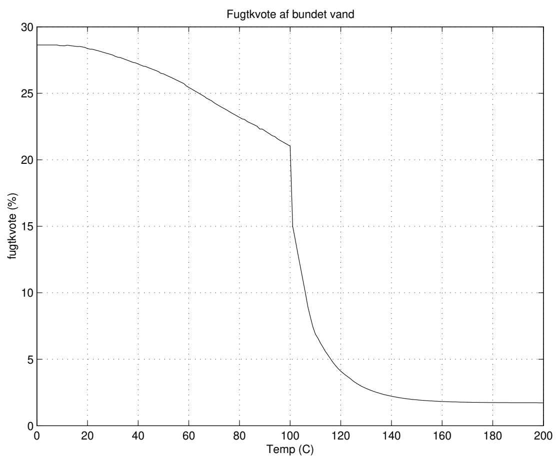
hvor $\dot{\mathbf{E}}$ og $\mathbf{T}$ er vektorer med elementer relateret til segmenterne.

3.2 Tørring

Et træemnes fugtkvote vil i et givet medie med tiden indstille sig på en stationær vrdi afhngig af den omgivende lufts temperatur og relative luftfugtighed. I forbindelse med pressetørring af parketstave er der i det følgende antaget at denne tilstand indtræder med langt mindre tidskonstanter end andre involveret i processen.

Ved pressetørring af parketstave sker der en gradvis affugtning, dvs. en frigørelse af bundet vand til frit vand, der ved temperaturer over 100 °C afkoges. Det er derfor rimeligt at antage en relativ fugtighed tæt på 100% i den omgivende luftmasse (der også er beliggende i veddets hulrum).

Der er derfor under visse betingelser, som angivet i appendix A, muligt at etablere en sammenhæng mellem fugtkvote af bunden vand (u_b) og temperatur (T) (for en udtørring proces).



Figur 7. Fugtkvoten af bundet vand som funktion af temperatur.

Ved tørring frigørres jvf. figur 7 bunden vand. Lad os derfor i det følgende anvende størrelsen

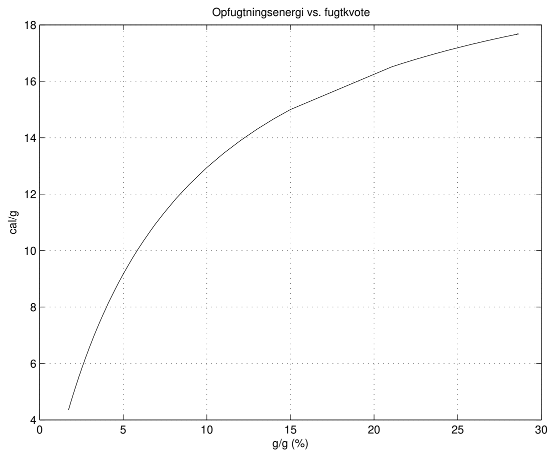
$$\bar{u_b} = -\frac{\partial u_b}{\partial T}$$

der er et udtryk for reduktionen af fugtkvoten af bunden vand ved temperatur stigninger.

Ved opfugtning af træ frigøres energi. Nedenstående udtrykker (se [2] side 202) energien der frigøres ved opfugtning til en given fugtkvote (i %)

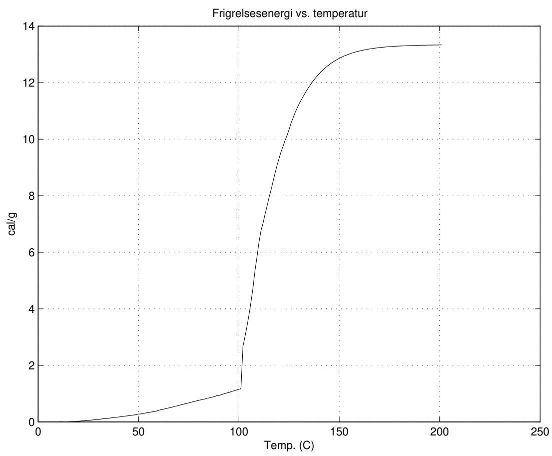
$$h = 22\frac{u_b}{7 + u_b} \qquad (cal/g)$$

Dette er grafisk repræsenteret i figur 8.



Figur 8. Opfugtningsenergi er den energimængde der frigøres ved opfugtning til end given fugtkvote.

Tilsvarende skal der tilføres energi for at frigøre bundet vand. Energimængden modsvarende opfugtningsenergien. Ud fra sammenhængen mellem temperatur og fugtkvote af bunden vand (figur 7) og sammenhængen mellem fugtkvote og opfugtningsenergi (figur 8), kan man bestemme frigørelses energien ved en temperatur stigning, se figur 9.



Figur 9. Akkumuleret frigørelsesenergi vs. temperaturen i et tørringsforlb.

Til temperaturstigning kræves også et energibidrag

$$\bar{h} = -\frac{\partial h}{\partial u_b}\frac{\partial u_b}{\partial T}$$

som er relateret til frigørelsesenergien. Dette kan langs udtørringsbanen ækvivaleres med en adderet varmefylde.

3.3 Opvarmning

Ved opvarning sker der et energiforbrug til temperaturstigning i tørstof (ved) og vand (bunden såvel som fri). For tørstof er den specifikke varmefylde temperaturafhængig

$$c_t = 0.266 + 0.00116 \;\; T \qquad (cal/g/^{\circ}\mathcal{C})$$

hvor konstanterne er fra [2] side 245. For bunden og fri vand regnes varmefylden ens, dvs. $c_w = 1 \;\; (cal/g/^{\circ}\mathcal{C})$. Udtrykt lidt anderledes (jvf. [2] side 246) regnes den specifikke varmefylde for grønt træ som en rent additiv effekt bestående af tørt træ og fugt (frit og bunden vand).

3.4 Afkogning

I udgangspunktet vil en (grøn) parketstavs masse (i gennemsnit 1650 g) være fordelt på tørstof (m_t), bundet vand (m_b) og frit vand (m_f). Indfør for nemheds skyld størrelserne:

$$m_w = m_b + m_f \qquad m = m_t + m_w$$

En statistisk analyse af et stort antal stave afslører at fugtkvoten i grnne stave i gennemsnit er 0.745, dvs.

$$u = \frac{m_w}{m_t} = 0.745$$

Tørstofandelen udgr derfor

$$\frac{m_t}{m_t + m_w} = \frac{1}{1+u} = 0.573$$

eller mere direkte (i gennemsnitstal)

$$m_t = 945.5 \;\; g$$

Ved 15 °C (udgangstemperaturen) er fibermætningspunktet ca. 28.5, hvorved (i gennemsnitsvrdier)

$$m_f = 434.7 \;\; g \qquad m_b = 269.9 \;\; g$$

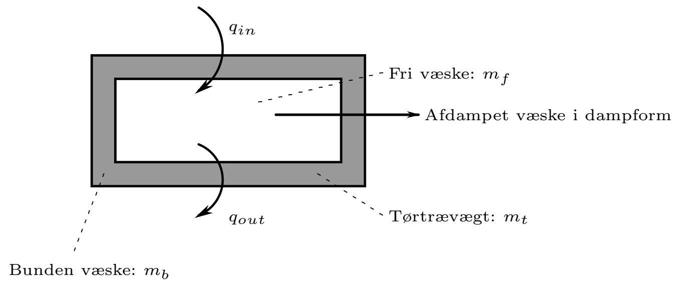
Den frie vandmasse (og den bundne efter at være frigjort) afkoges under forbrug af energi svarende til den latente varmefylde (fordampningsvarme) for vand

$$\lambda = 538.9 \;\; (cal/g)$$

Ved afkogning af fri væske vil den indadgående energistrøm (i et stavsegment):

$$\dot{E}_i = q_{in} - q_{out} = \sigma\Big(T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}\Big)$$

blive anvendt dels til temperatur stigning og dels til frigørelse og afkogning af vand (forudsat at temperaturen er tilstrækkelig høj og der er vand tilstede).

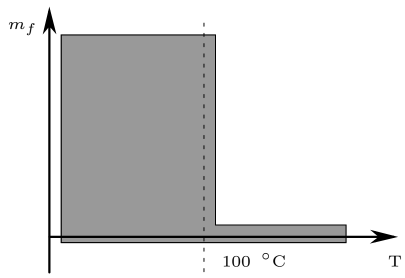


Figur 10. En sektion består af frit væske og tørt træ materiale. Bunden væske i celle væge er (endnu) ikke inkluderet direkte i model.

Lad $\gamma(T_i, m_f(i))$ angive den del af energistrømmen ind i stavsegment i, der anvendes til temperaturstigning. Ud fra en betragtning om perfekte homogene forhold vil γ have en variation som følger

$$\gamma = \begin{cases} 1 & \text{for} \quad T_i < T_k \\ 0 & \text{for} \quad T_i > T_k, \quad m_f(i) > 0 \\ 1 & \text{for} \quad T_i > T_k, \quad m_f(i) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

eller som forsøgt illustreret i figur 11.

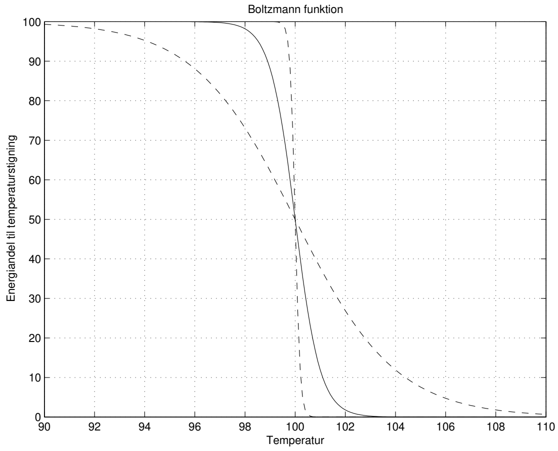


Figur 11. Andelen, γ, af den indstrømmende energi der under perfekte homogene forhold anvendes til temperaturstigning er 1 i det skraverede område.

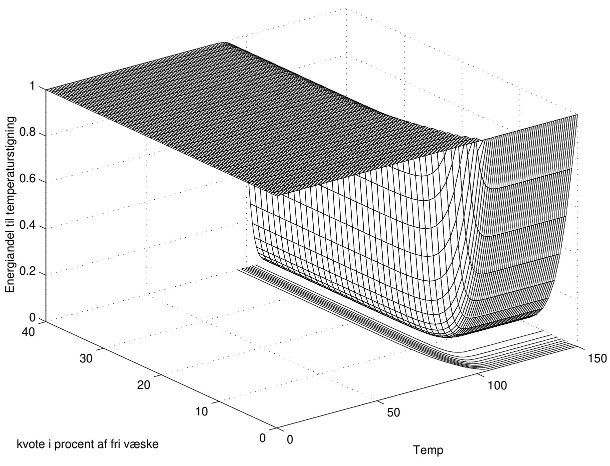
For at håndtere de inhomogene fænomener er det mske mere realistisk at modellere overgangen mere blødt, f.eks. efter

$$\gamma(T) = \frac{1}{1 + e^{k(T-100)}}$$

for temperaturafhængighedens vedkommenede. Skiftet fra temperaturstigning til kogning er vist i figur 12 mens den totale γ (eller dens afhængighed af T og m_f) er angivet i figur 13.



Figur 12. Blød overgang mellem temperaturstigning og afkogning for $k = 2$ (optrukken) samt for $k = 0.5$ og $k = 10$ (stiplet). Værdien $k = 2$ er anvendt i den senere angivne simulationer.



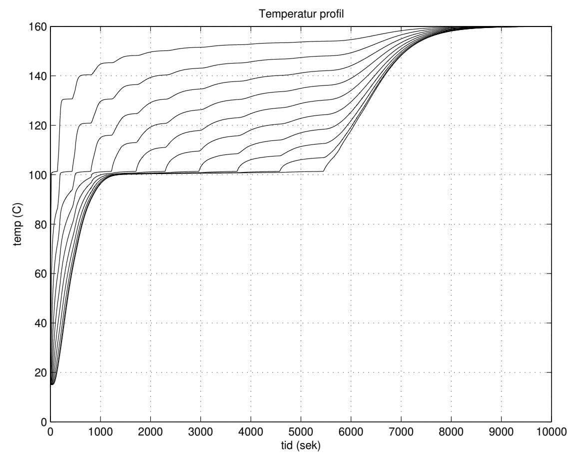
Figur 13. Energiandel, γ, til temperaturstigning som funktion af T og m_f (for $k = 2$).

Afdampet vand indgår i denne modellering kun i form af et omgivende medie med en luftfugtighed på 100%.

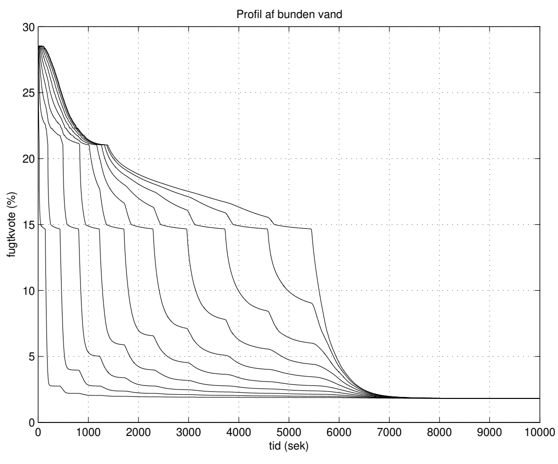
Den (i segment nummer i) indstrømmende energi bliver for en vis del (γ_i) anvendt til temperaturstigning (herunder regnes som tidligere nævnt frigørelse af bunden vædske)

$$\Big(m_t(i)c_t + m_f(i)c_f + m_b(i)c_b + m_t\bar{h}_i\Big)\dot{T}_i = \gamma_i\dot{E}_i$$

og $(1-\gamma_i)$ til afkogning af væske. Her er (som angivet tidligere) m, m_f og m_b massen af henholdsvis tørt træ, fri vske og bunden væske. c_t, c_f og c_b er deres respektive varmekapaciteter (i et stavsegment). Yderligere angiver $\gamma_i(T_i, m_f(i))$ den del af den indstrømmende energi der anvendes til temperatur stigning.

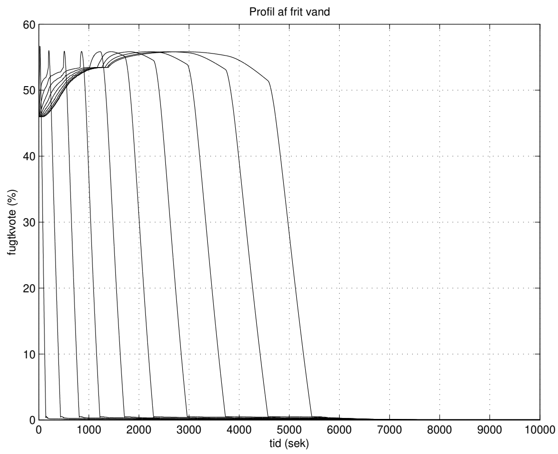


Figur 14. Temperaturforløb i center af 20 ens segmenter.



Figur 15. Forløbet af fugtkvoten relateret til bunden vand.

En temperaturstigning er både forbundet med en varmeakkumulering og en frigørelse af bunden vand jvf. figur 7. I denne modellering, hvor der er fokuseret på en udtørrignsproces, er der anvendt et algebraisk bånd mellem to af



Figur 16. Forløbet af fugtkvoten relateret til frit vand.

(segmenternes) tilstande, T og m_b

$$\dot{m}_b(i) = -m_t \bar{u}_b(i) \dot{T}$$

Den sidste tilstand er givet ved massebalancen:

$$\dot{m}_f(i) = -\frac{\dot{E}_i}{\lambda}(1-\gamma_i) - \dot{m}_b(i)$$

Ovenstående sæt af differentialligninger kan også bringes på en kompakt form

$$\dot{\mathbf{E}} = \sigma \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & \cdots \\ 1 & -2 & 1 & \cdots \\ 0 & 1 & -2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \mathbf{T} + \sigma \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_a$$

hvor

$$\left(\mathbf{m_t} c_t + \mathbf{m_f} c_f + \mathbf{m_b} c_b + \mathbf{m_t} \star \bar{\mathbf{h}}\right) \star \dot{\mathbf{T}} = \gamma \star \dot{\mathbf{E}}$$

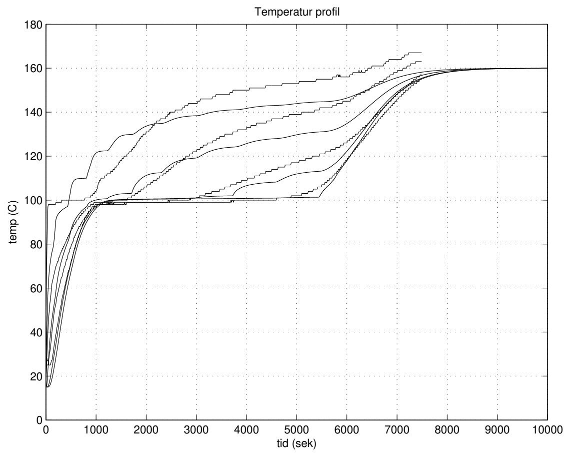
$$\dot{\mathbf{m}}_b(i) = -\mathbf{m}_t * \bar{\mathbf{u}}_i * \dot{\mathbf{T}}$$

og

$$\dot{\mathbf{m}}_\mathbf{f} = -\frac{\dot{\mathbf{E}}}{\lambda} * (1-\gamma) - \dot{\mathbf{m}}_\mathbf{b}$$

Bemærk at $*$ er en elementvis multiplikation mellem vektorer (svarende til matlab operatoren `.*`) og at λ er vands fordampningvarme.

I figur 17 er temperaturene beregnet i samme positioner som anvendt under experimentielle betingelser. Modellen forklarer til en vis grad de observerede variationer. Det bemærkes, at presselandets temperatur (anvendt som T_a i simulationen) jvf. figur 3 maksimalt er 160 °C. Der er må derfor skyldes sensoren at temperaturene i figur 17 kommer op over 160 °C.



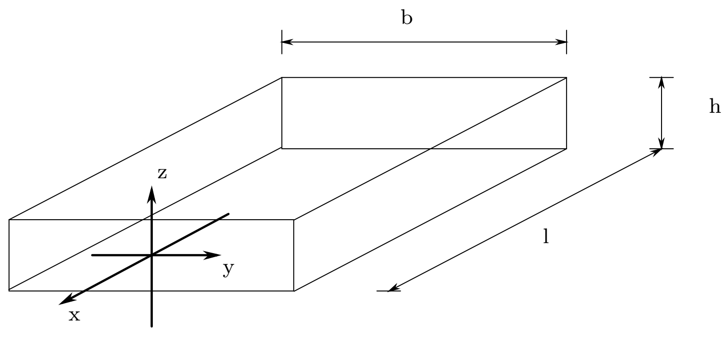
Figur 17. Experimentielle og simulerede temperaturer i positioner 3.3 mm, 6.2 mm, 11.2 mm og 16.9 mm fra overflader. Sammenlign med figur 2.

4 Mekanisk del

Den mekaniske del er en relativ grov model, hvis mål er at give en fænomelogisk beskrivelse af de krfter der forårsager revnedannelser med mere.

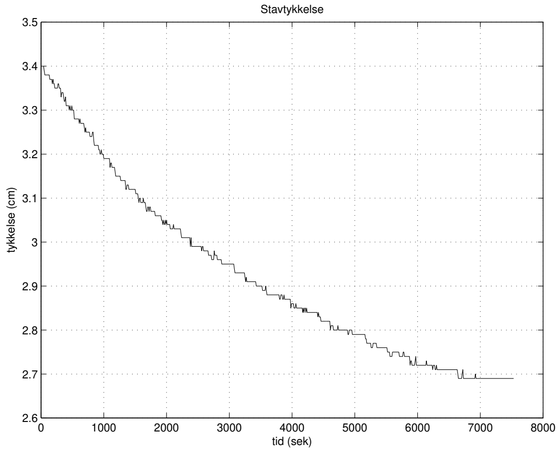
Ved pressetørring (i Junckers proces) udsættes parketstavene for et tryk (12 kg/cm^3) i vertikal retning. Dette sker dels for sikre en god termodynamisk kontakt, men også for at bevare en formstabilitet i horisontal retning, dvs. i tvær- og længderetningen.

Ved udtørring sker der en inhomogen sammentrækning på grund af svind. Dette svind modsvares af en deformation, der (i denne model) dels kan være elastisk og dels være plastisk. Den plastiske deformation er her medtaget som et aggregat for en lang række fenomener der ikke her er redegjort for i detaljer.



Figur 18. Retningskonventionerne for en parketstav

På det makroskopiske plan kan det konstateres at en grøn stav med dimensionerne (hxbxl) 34 x 78.5 x 639 mm efter pressetørring er reduskeret til dimensionerne 26 x 77 x 639 mm. Dvs. en forsvindende ændring i lngderetningen, mens tykkelsen (h) er kraftigt redukseret (25 %). Den relativt bevarede bredde forklares oftest med en plastisk deformation i tykkelsesretningen (reduktion) og i bredderetningen (udvidelse).



Figur 19. Tidsmæssig variation af stavtykkelse under eksperimentielle betingelser.

4.1 Fugtsvind

Det er en velkendt sag at træ udvider sig ved opfugtning. Tilsvarende vil træ sammentrkkes ved udtrørring. Denne effekt antages i det flgende at vre linært afhngig af fugtkvoten (af bunden vand) og er strkt retningafhngig. Fra [2] side 207 kan udvidelseskoeficienterne i radier og tangential retningerne er henholdsvis:

$$\alpha_r = 0.17 \, \frac{\%}{\%} \qquad\qquad \alpha_t = 0.32 \, \frac{\%}{\%}$$

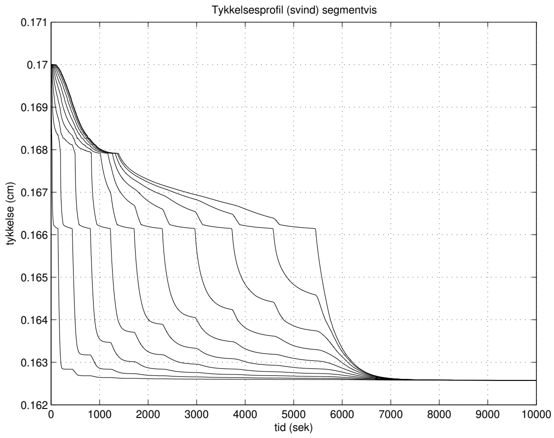
mens udvidelseskoeficienten i længderetningen er forsvindende. Udvidelseskoeficienterne, α_z og α_y, i henholdsvis vertikal og horisontal retning er således sammenvægtet af α_r og α_t afhngig af udskæringens placering i trstrukturen. I det følgende er der anvendt det simple tilfælde $\alpha_z = \alpha_r$ og $\alpha_y = \alpha_t$.

For hver segment kan der indføres et frit svind (udtørringssvind som segmenterne kunne udsættes for, hvis de var frie og ikke udsat for plastisk eller anden deformation), der for den horisontale retning er en ren regneteknisk størrelse, idet dette svind aldrig kan realiseres (idet en stav kun regneteknisk er opdelt i segmenter).

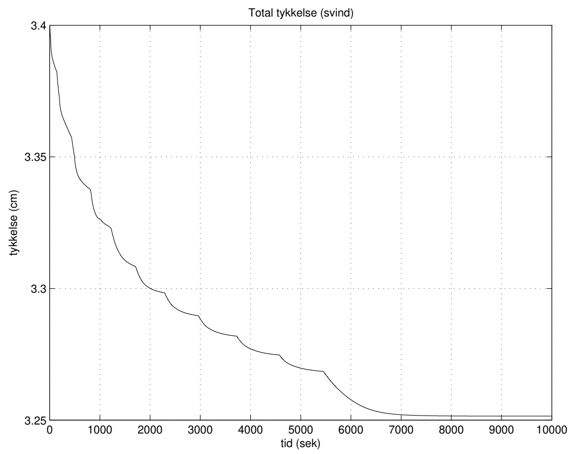
$$z_i = \frac{1 + \alpha_z u_b(i)}{1 + \alpha_z \underline{u}_b} \, \underline{z}_i \qquad\qquad y_i = \frac{1 + \alpha_y u_b(i)}{1 + \alpha_y \underline{u}_b} \, \underline{y}_i$$

Her er $\underline{u}_b$ og $\underline{z}(i)$ sammenhørende (begyndelses) værdier for fugtkvote og (segmentvis) tykkelse. Tilsvarende for $\underline{u}_b$ og $\underline{y}(i)$ i bredde retningen.

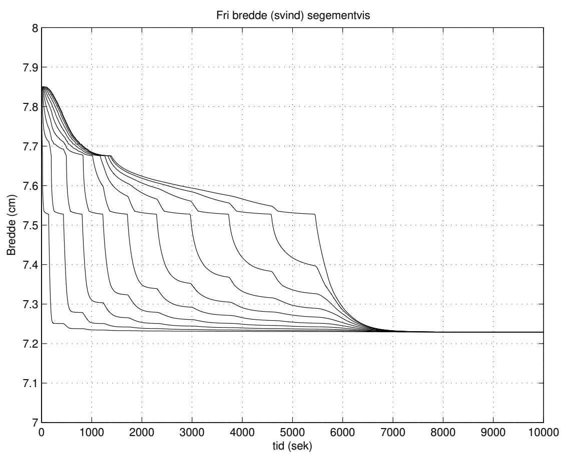
En simpel sammenligning mellem figurene 19 og 21 viser, at kun en lille del af tykkelsesreduktionen skyldes frit fugtsvind. Lad derfor $\tilde{z}(i)$ og $\tilde{y}(i)$ i det følgende betegne den (segmentvise) plastiske deformation af de enkelte segmenter i bredde retningen og i tykkelses retningen, henholdsvis.



Figur 20. Fugtsvind (segmentvis) i tykkelses retningen (vertikal retning).



Figur 21. Fugtsvind (total) i tykkelses retningen (vertikal retning).



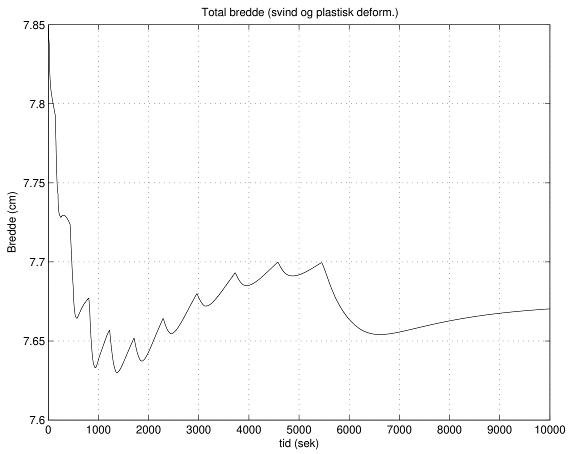
Figur 22. Fri svind i horisontal retning (bredde retningen).

4.2 Elastisk deformation

Der vil være en elastisk deformation i både vertikal og i horisontal retning. Den elastiske deformation i vertikal retning vil være forårsaget af den ptrykte spænding fra presse landene, mens inhomogen tørrring vil bevirke en spænding i horisontal retning.

Det antages at bredden af en parketstav, b, er konstant i vertikal retning. Denne antagelse er formodentlig kun gradvist opfyldt. Den segmentvise frie bredde er resultatet af fugtsvind og af en plastisk deformation og kan beregnes til

$$l_i = y_i + \tilde{y}_i$$



Figur 23. Aktuel bredde som funktion af tiden.

De enkelte segmenter vil (for at opfylde ovennævnte antagelse om konstant bredde) have en elastisk deformation af størrelsen

$$\Delta l_i = l_i - b$$

hvilket vil sige at segmenterne påvirkes af en kraft af størrelsen

$$F_i = A_i \sigma_i \qquad \sigma_i = E_i \frac{\Delta l_i}{l_i}$$

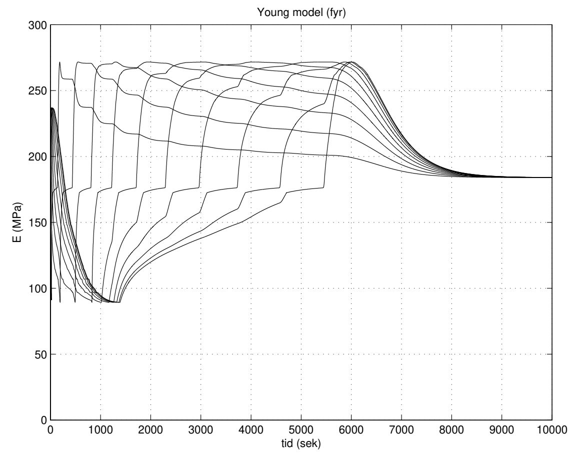
hvor E_i er Youngs modul og A_i er segmenternes tværsnitsareal (i længderetningen). Youngs modul antages at vre liner i temperatur og fugt, hvor sammenhængen

$$E_i = 630 - 14.3 u_b(i) - 3(T_i - 20)$$

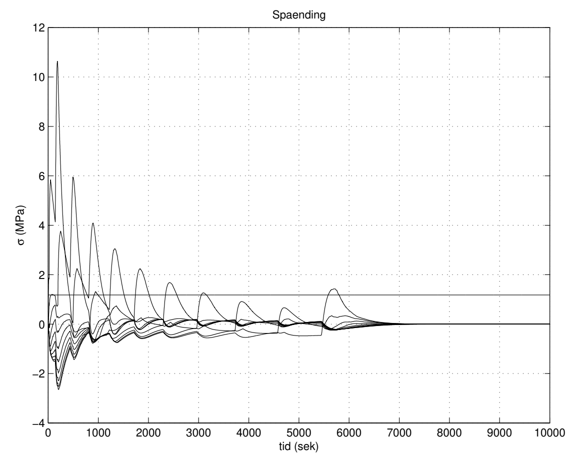
kan findes i [1] side 33.

Spændingen, σ_i, der er interessant i sammenhng med revnedannelser er plottet i figur 25.

$$b \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i E_i}{l_i} = \sum_{i=1}^{n} A_i E_i$$



Figur 24. Youngs modul som funktion af tiden.



Figur 25. Spænding som funktion af tiden.

4.3 Plastisk deformation

Hvis udtørringssvind var den eneste effekt, der bestemte en parketstav dimensioner, ville en grøn stav med dimensionerne 34 x 78.5 x 639 mm ved (ideel) udtørring (til 0 %) blive til en stav med dimensionerne 32 x 71.4 x 639 mm. Imidlertid har den resulterende stav dimensionerne 26 x 77 x 639 mm. Der må følgelig være andre effekter, der i det flgende under et betegnes som plastisk deformation og modelles med en yderst simpel første ordens model. Af ovenstående overvejelser kan det konstateres, at der ikke eksisterer volumenbevarelse og at der under disse eksperimentielle omstændigheder sker en sammenpresning.

Den pastiske deformation i vertikal retning modelleres med følgende model:

$$\dot{\tilde{z}}_i = -\kappa_i \Big[k(\sigma_0 + \sigma_i) - z_i \Big]$$

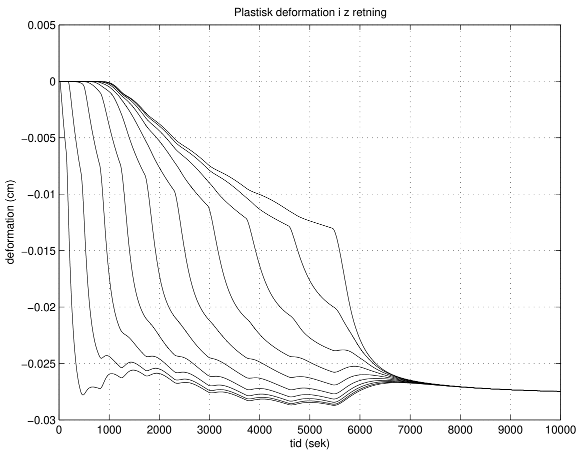
hvor

$$\kappa = \frac{\frac{1}{2}(1 + tgh((T_i - 100)/5)}{\tau}$$

og

$$\tau = 1700\ sek. \qquad\qquad k = 2.35\ 10^{-8}\quad (cm/Pa)$$

Det bemærkes, at de fundne konstanter er fundet ud fra sammenligning med makroskolpiske målinger og at κ er en invers tidkonstant med et aktiveringsområde omkring 100 °C.

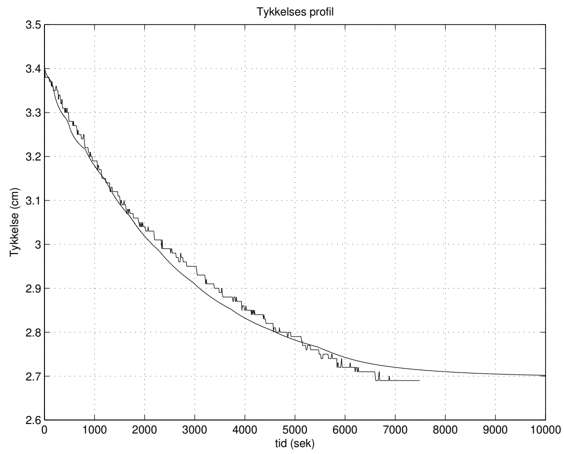


Figur 26. Plastisk deformation i vertikal retning for hvor af de 20 segmenter.

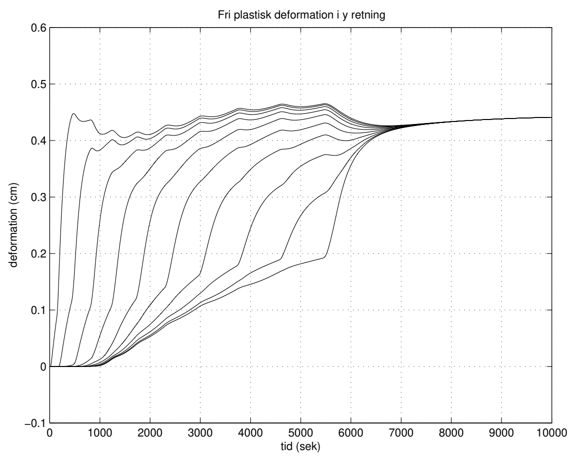
Sammenholdes den plastiske deformation og svindet med den totale tykkelse opnås kurverne, der er angivet i figur 27.

Den plastiske deformation i vertikal retning (bredderetningen) er her modelleret ud fra en volumenbeværelse korrigeret for den føromtalte sammentrykning. Dvs. der anvendes følgende simple model

$$\tilde{y}_i = -\frac{y_i}{z_i + \tilde{z}_i}\beta\ \tilde{z}_i$$



Figur 27. Total tykkelsesvariation som funktion af tiden.



Figur 28. Plastisk deformation i horisontal retning.

$$\beta = 0.33$$

Den plastiske deformation indgår sammen med (fugt) svindet til bestemmelse af den aktuelle bredde som er angivet i figur 23.

5 Konklusion

I denne rapport er der udviklet en simpel model for en del af pressetørringsprocessen som den udfres ved Junckers Industrier A/S. Modellen er for en vis del fremkommet ved at sammensætte forskellige elementer beskrevet i litteraturen. Andre dele af modellen er bygget ud fra tillæmpninger af modeller der ikke kan sige at være dkkende for den faktiske situation i pressetørringen. Dette er specielt tilfældet for temperaturer over 100 °C og tryk.

Ved sammenligning med eksperimentielle data kan man se, at den opnåede model har en rimelig forklaringgrad på det termodynamiske omrde. For den mekaniske er det ikke helt så positivt. Den simple mekaniske model indeholder et lille antal parametre, som relativt let kan kalibreres så modellen har en fornuftig overenstemmelse med de makroskopiske målinger. Derimod er de simulerede spændinger (se figur 25) for store i forhold til forventede.

Litteratur

[1] Helge Didriksen, Jan Sandvig Nielsen, and Mogens Weel Hansen. Energibesparelse ved optimering af tørreprocesser gennem anvendelse af modeller og effektiv regulering. Technical report, dk-teknik energi og miljø, 2001.

[2] Franz F.P. Kollmann and Wilfred A. Côte. *Principles of Wood Science and Technology*. Springer-Verlag, 1968.

[3] Mads Peter Srensen, Niels Kjlstad Poulsen, Signe Kamp Jensen, Peter Pinholt, and Niels Morsing. Pressetrring and parketstave - fysisk model. Technical Report 2004-15, Informatics and Mathematical Modelling (IMM), The Technical University of Denmark, 2004.

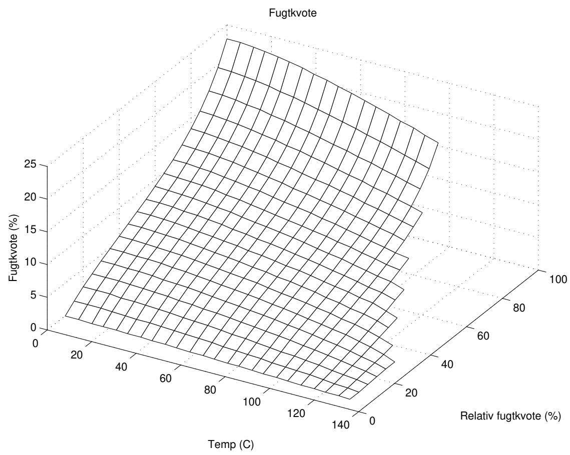
[4] Nardi tabel 1.

[5] Nardi tabel 2.

[6] Thomas Thomassen. *Træ og Træmaterialer*. Teknologisk institut, 1995.

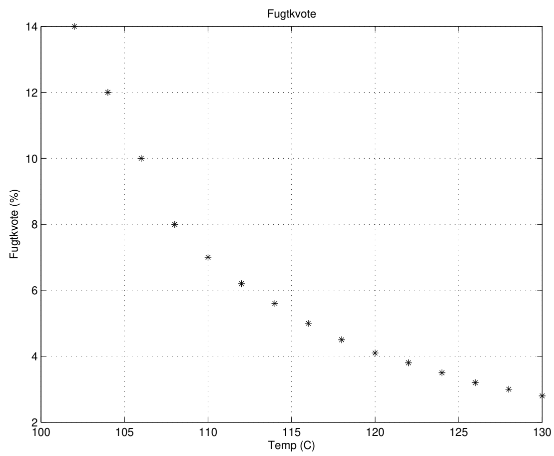
A Ligevægtsfugtighed

Anbringes et emne af træ i et givet luftmedie vil træets fugtkvote med tiden nrme sig en stationær vrdi. Den stationære fugtkvote for tr afhnger af temperaturen og den relative luftfugtighed af den omgivende luftmasse. Denne afhængighed er dokumenteret i litteraturen. Det anvendte datamateriale er stykket sammen fra 3 kilder: [1] (side 29), [4] og [5]. Størstedelen er fra [1] mens fugtkvoter for 98 % fugtkvote og temperaturer under 100 ^oC er fra [4]. Data fra [1] er angivet i figur 29.



Figur 29. Fugtprofil fra [1]

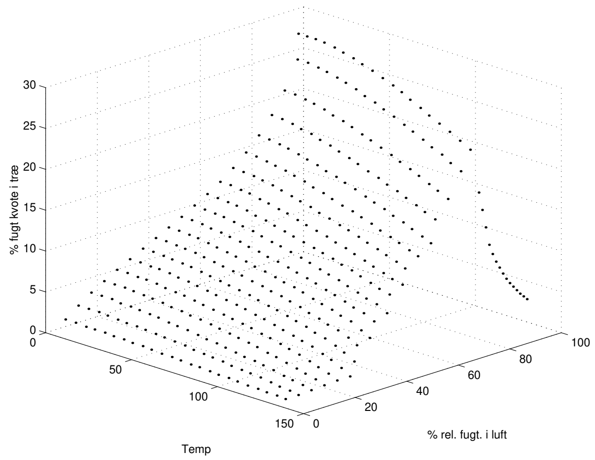
Data for luftfugtigheder på 100 % og temperaturer over 100 ^oC stammer fra [5] og er angivet i figur 30.



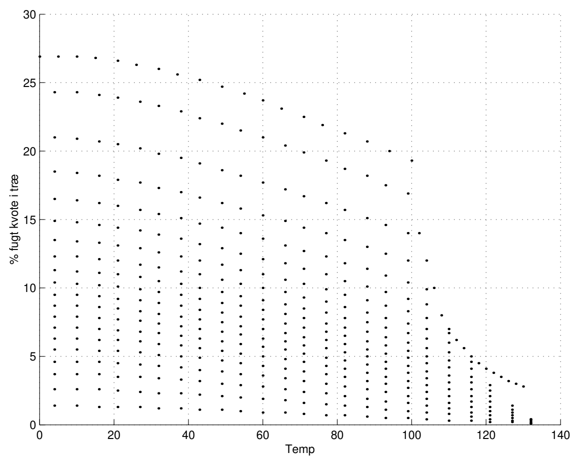
Figur 30. Fugtprofil fra [5]

Det samlede datamateriale ses i figurene 31-33, hvor også fugtkvoterne for 98 % relativ luftfugtighed er angivet (fra [4]).

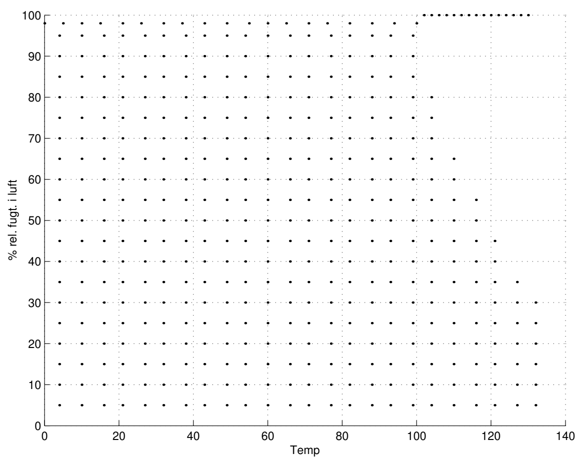
Ved pressetørring antages det i det flgende at de tidskonstanter, hvorefter fugt-



Figur 31. Fugtprofil set skråt fra højre

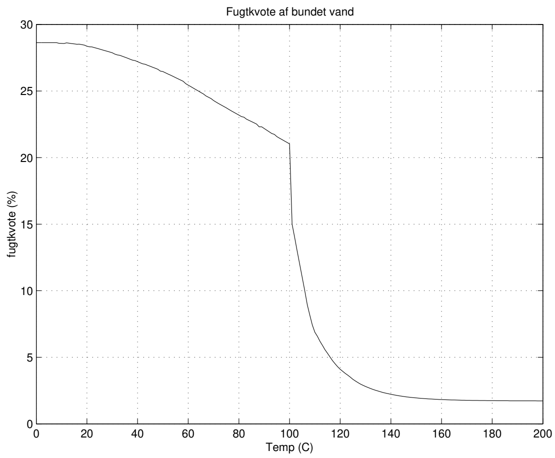


Figur 32. Fugtprofil set langs luftfugtighedsaksen



Figur 33. Fugtprofil set ovenfra

kvoten nærmer den stationre værdi, er forsvindende sammenlignet med de øvrige tidskonstanter (for opvarmning mm.). Det vil sige, at der i det følgende arbejdes med en algebraik sammenhæng mellem temperatur, relativ luftfugtighed og fugtkvote i tr. Det antages yderligere at den omgivende luftmasse er mættet, dvs. har en relativ luftfugtighed på 100 %, under hele tørringsforlbet. Denne antagelse er kun rimelig, hvis temperaturen i træet er voksende. I så fald kan fugtkvoten af bundet vand og dennes afhængighed af temperaturen bestemmes som isotermerne for 100 % luftfugtighed (se figur 34).



Figur 34. Fugtkvoten af bundet vand

Det bemærkes, at fugtkvoten (ved 100 % relativ luftfugtighed) som funktion af temperaturen er fundet ved kvadratisk extrapolation ud fra de angivne data. For temperaturer over 130 ^{o}C (max grænsen for data i [5]) er der anvendt exponentiel extrapolation.