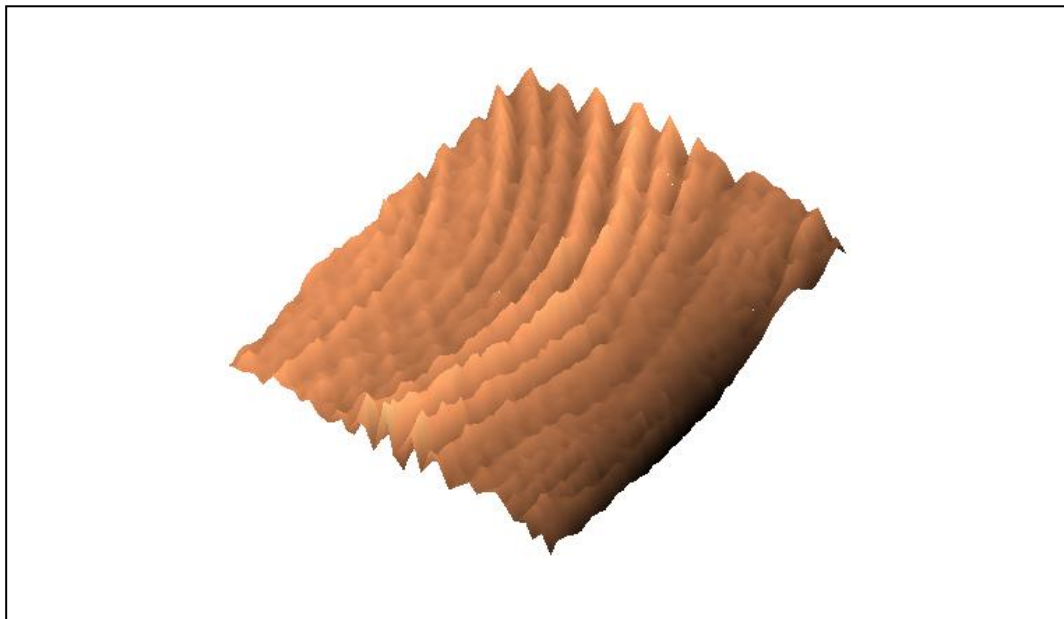




FEM-simulering av en anisotrop diffusionsmodell för fukttransport i trä

Utvärdering av modell och parametrar

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL GUSTAFSSON
CHRISTOFFER STRÖMBERG
JOHAN WINGES

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Material- och beräkningsmekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2009
Kandidatarbete 2009:01

FEM-simulering av anisotrop diffusionsmodell för fukttransport i trä

Utvärdering av modell och parametrar

Kandidatarbete i Tillämpad mekanik

KARL GUSTAFSSON

CHRISTOFFER STRÖMBERG

JOHAN WINGES

FEM-simulering av anisotrop diffusionsmodell för fukttransport i trä
Utvärdering av modell och parametrar
Kandidatarbete i Tillämpad mekanik
KARL GUSTAFSSON
CHRISTOFFER STRÖMBERG
JOHAN WINGES

© K. Gustafsson, C. Strömberg, J. Winges, 2009

Kandidatarbete 2009:01
ISSN 1654-4676
Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för Material- och beräkningsmekanik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Fukthaltsfördelning i ett träprov

Tryckeri/Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2009

Sammanfattning

I rapporten kalibreras en anisotrop diffusionsmodell för fukttransport i trä. Modellen utvärderas med avseende på parametrar och metod. Fukthalten som används som potential har visat sig vara komplex att simulera om hänsyn tas till årsringstrukturen. Detta beror på att diffusionskoefficienten bör vara hög i en årsringsdal och låg på en årsringstopp samtidigt som den bör öka med fukthalten vilket är motsägelsefullt. För att försöka lösa detta problem utreds i rapporten betydelsen av kvoten mellan tangentiell/radiell diffusionshastighet, viktning av diffusionskoefficienten med densiteten och olika typer av fuktkvotsberoende i diffusionskoefficienten. Samtliga metoder har visat sig vara fördelaktiga för bibehållande av årsringstrukturen. Dock har de också visat sig vara alldeles för svaga eller förödande för den lokala medelfukthalten.

En viktig slutsats är att fukthalten i trä inte verkar vara en optimal potential då den är beroende av densiteten. Problematiken uppstår ty vissa delar av densiteten består av trädceller medan vissa av fukt vilket medför ett komplext diffusionsförfarande då själva trädcellerna inte diffunderar.

Till rapporten hör ett användarvänligt matlab-program som simulerar diffusion i ett träprov med hjälp av finita element metoden. Programmet har möjlighet att variera flera olika parametrar, spara och ladda data, välja olika metoder för simulering etc.

Abstract

In the report an anisotropic diffusion model for moisture transport in wood will be calibrated and evaluated considering model and parameters. The moisture transport has proven to be difficult to simulate with respect to growth ring structure. This is because the diffusion coefficient ought to be high in a growth ring valley and low on a growth ring hill, at the same time it should be low close to the edge and increase with distance from the edge, which is contradictory. In an attempt to solve this issue this report evaluate the significance of different conditions for example; between tangential and radial diffusion velocity, in choice of weight of diffusion coefficient with density and different dependence on moisture content for the diffusion coefficient. All methods have proven beneficial to preserve the growth ring structure. On the other hand, they have been proven to be too weak or working on the expense of the perseverance of the growth ring structure. One conclusion is that moisture content in wood might not be the optimal potential considering that it involves the density which hasn't a well described mathematical description for the diffusion process. Because some parts of the density is moisture in the wood and other parts containing the tree cells density which should not diffuse.

The report also contains a userfriendly matlab-program which simulates the diffusion in the wood with the finite element method. The program can adjust many relevant parameters, save and load data, change between different methods for simulation and so on.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Svenska träindustrin	1
1.3	Hållbar utveckling	2
1.3.1	Träindustrins påverkan på mångfalden	2
1.3.2	Torkningsprocessens klimatpåverkan	2
1.4	Syfte	2
1.5	Problemformuleringar	3
1.5.1	Matematik med FEM	3
1.5.2	Grafiskt program i matlab	3
1.6	Avgränsningar	3
2	Teori	4
2.1	Trästruktur	4
2.1.1	Årsringarnas uppbyggnad	4
2.1.2	Trädets tvärsnitt	4
2.1.3	Definition av fuktkvot/fukthalt	5
2.1.4	Mätningmetod av fukthalt	6
2.1.5	Torkning av trä	6
2.2	Diffusion	7
2.3	Torkning av trä som ett diffusionsproblem	7
2.3.1	Förhållande mellan tangentiellt och radiellt diffusionshastighet	8
2.3.2	Diffusionskoefficienten	8
3	Metod	10
3.1	Matematisk problemlösning	10
3.1.1	Variationsformulering	11
3.1.2	Diskretisering av rummet	11
3.1.3	Diskretisering av tiden för semi-implicit metod	12
3.1.4	Implicit lösningsmetod	12
3.1.5	Modeller för fukttransport över randen	13
3.2	Programmering	14
3.2.1	Diffusionslösare baserad på FEM	14
3.2.2	Bestämning av årsringarnas vinklar	14
3.2.3	Grafisk programmering	17
4	Resultat	18
4.1	Programmet	18
4.2	Bibehållande av årsringsstrukturen	19
4.2.1	Förhållandet mellan tangentiellt och radiellt diffusionshastighet	19
4.2.2	Viktad diffusionskoefficient	19
4.2.3	Negativt exponentialfunktionsberoende hos diffusionskoefficienten	21
4.3	Övriga modeller	21
4.3.1	Semi-implicit vs implicit metod	21
4.3.2	Jämförelse för modeller på randen	22

4.3.3	Medelfukthaltens vinkelberoende	23
5	Diskussion	24
5.1	Bibehållandet av årsringsstrukturen	24
5.2	Felkällor	25
5.3	Programmet	25
6	Slutsats	27
A	Ursprunglig projektbeskrivning	30
B	Lathund för programmet	31
B.1	Filer och filstruktur	31
B.2	Användning av programmet	32
B.2.1	Processering av mätdata	32
B.2.2	Beräkning av vinkeldata	34
B.2.3	Parametrar för diffusionslösaren	36
B.2.4	Att simulera	37
B.2.5	Resultathantering	37
B.3	Om koden	38

Nomenklatur

α	Parameter för förhållande mellan radiell- och tangentiell diffusionshastighet.
β	Funktion för diffusionens beteende på randen $[kg/m^2s]$.
ω	Fukthalt: Beskriver andelen fukt i trä i likhet med fuktkvot men är dessutom beroende av mediets densitet $[kg/m^3]$.
ω_∞	Parameter för omgivningens fukthalt $[kg/m^3]$.
ρ	Densitet hos träprovet $[kg/m^3]$.
σ	Viktningsparameter för generaliserad mittpunktsmetod.
ξ	Stabilitetsparameter ($\xi = 1 - \sigma$).
b	Parameter för diffusionens hastighet på randen.
D	Diffusionskoefficient $[m^2/s]$.
m_0	Torrsvikt $[kg]$.
p_1	Parameter för global diffusionshastighet.
p_2	Parameter för diffusionens fukthaltsberoende.
u	Fuktkvot: Beskriver andelen fukt i trä, förhållande mellan virkets aktuella massa och dess torrsvikt [%].
Euler framåt/bakåt: Numeriska metoder för lösning av differentialekvationer.	
FEM: Finita ElementMetoden.	
Lokal medelfukthalt: Medelfukthalten i ett litet område av träprovet.	
Mittpunktsmetoden: Numerisk implicit metod för lösning av ordinära differentialekvationer.	

1 Inledning

Träindustrin har en viktig roll som både kommersiell och social aktör för att behålla den status som skogsindustrin har etablerat i Sverige [1]. För att behålla och förbättra denna status är det fördelaktigt att utveckla och förbättra industriella processer och förståelse för trämaterial. Hälften av det som träindustrin producerar är torrved¹ som främst används till byggmaterial. Metoder för att simulera torkningsprocessen av virke är viktig för att minimera förlusten av tid samt spruckna/defekta träplankor [2]. Att förutspå tiden det tar för trä att torka är idag approximativ.

I en tidigare studie betraktar Danvind och Ekevad fukttransporten i splintved för granen Norway Spruce² som ett diffusionsproblem [3]. I Danvinds och Ekevads studie tas ingen hänsyn till årsringsstrukturens inverkan på diffusionskoefficienten [3]. I denna rapport vidarebehandlas data från de mätningarna som utfördes av Danvind för att utreda om diffusionsmodellen för fukthalten i trä kan förbättras om hänsyn tas till årsringstruktur. Genom undersökning av diffusionskoefficienten för torkning av splintved hos gran kan en bättre förståelse för torkningsprocessen av trädslaget erhållas. För att simulera diffusionsprocessen används finita element metoden (FEM).

1.1 Bakgrund

Defekter på torkat virke är ett problem för träindustrin då defekt torrved inte är lika attraktivt på marknaden. För att undvika defekter hos torrved kan torkningsprocessen förlängas. En lång torkningstid genererar samtidigt större kostnader vilket leder till en avvägning mellan acceptabla defekter och torkningstid. För att minimera torkningstid och defekter på virke krävs tillförlitliga metoder för att förutspå torkningstiden. Det är alltid ett mål av både ekonomiska och miljömässiga skäl att förfina processer. Denna typ av rapport är till hjälp för att förfina nuvarande metoder eller öppna upp för nya projektidéer som kan strukturera om den industriella processen.

1.2 Svenska träindustrin

I förhållande till Sveriges storlek så är landet en stor producent av virke med en bruttoavverkning³ på 90 miljoner kubikmeter skog år 2005 [4]. Träindustrin i Sverige utgör 12% av industrins totala produktionsvärde, export och sysselsättning⁴ vilket ger ett perspektiv på träindustrins inverkan på den svenska ekonomin. Produktionsvärdet från skogsindustrin är 185 miljarder kronor per år (2005) varav ungefär 50% utgörs av massa- och pappersindustrin och ungefär 35% utgörs av sågverk, trähus- och snickeriindustrin [2]. Mass- och pappersindustrin använder sig dock inte av torkat virke som sågverken, trähus- och snickeriindustrin. Med dessa siffror i åtanke inses vikten av torkningsprocesserna för fortsatt välbefinnande i Sverige.

¹16,5% är en vanlig medelfuktkvot som används då virke lämnar sågverken för transport till bygghandlare, [5]

²*Picea abies*

³Bruttoavverkningen är inte samma som virkesbrukning, då mellanstegen innehar spill.

⁴Antalet sysselsatta utav träindustrin uppgår till 72 000.

1.3 Hållbar utveckling

Hållbar utveckling är ett brett begrepp med Brundtlandskommissionens ursprungliga definition från 1987 som lyder *"En hållbar utveckling är en utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov"* [6]. Hållbar utveckling innefattar allt från ekonomi till miljö varav ekonomi diskuteras i kapitel 1.1, 1.2 och 2.1.5. Strävan efter att försöka få samma eller förbättrade möjligheter för kommande generationer är ett sätt att bevara hållbar utveckling. Genom en ökad kunskap om hur naturen beter sig kan arbetsmetoder och resurshantering förbättras vilket kan vara gynnsamt för kommande generations behov. Ökad förståelse och introducering av nya tankebanor på kända problem, som tex. diffusion av trä, kan även utveckla nya lösningar och möjligheter för andra problem.

1.3.1 Träindustrins påverkan på mångfalden

Skogsavverkning har en betydande roll för skogarnas mångfald ty döda träd och gammelskog är livsnödvändigt för vissa arter som lever i skogarna [7]. Trots att skogsägare i Sverige tar väl hand om skogen och följer skogarna från nyplantering till avverkning så försvinner de döda träden och gammelskogen vilket kan få förödande konsekvenser för mångfalden.

I framtiden så kommer förmodligen kontrasterna mellan skyddade skogar och skogar för avverkning att bli tydligare [7]. Det är viktigt att skogarna för avverkning inte får för stor plats så att de skyddade skogarna riskerar att tyna bort. För att undvika de avverkade skogarnas utbredning så finns givetvis många medel att tillgå. Ett av dem är att nyttja det virke som avverkas på ett så effektivt sätt som möjligt för att spara på resurserna. Därför är det viktigt att processer för tex. torkning sker på ett så bra sätt som möjligt så att defekt virke i största möjliga mån undviks.

1.3.2 Torkningsprocessens klimatpåverkan

Själva skogsavverkningen medför utsläpp av växthusgaser. För att minska skogsavverkningens negativa effekt på klimatet så krävs förfinade metoder för processen från träd till produkt [8]. En del av denna process är torkningsförfarandet då detta kräver stora klimatanläggningar med höga temperaturer och luftflöden vilket kräver energi. Med kunskap om torkningsprocessen för trä kan torkningstiderna optimeras och energi kan sparas. Även defekt virke kan undvikas i en högre grad vilket medför att mindre virke går till spillo.

1.4 Syfte

Det huvudsakliga syftet med denna rapporten är att studera en anisotrop diffusionsmodell för fukttransport i trä. För att studera diffusionsmodellen skapas en mjukvara vilket har kommit att bli en del av syftet. Mjukvarans syfte är att kalibrera och utvärdera olika parametrar och metoder för att realisera en verklighetsnära simulering. En annan del av programmets syfte är att skapa en algoritm som utifrån givna data identifierar träprovets struktur och aktuella fukthalt.

Rapporten syftar även till att ge en djupare förståelse för torkning av trä som en diffusionprocess.

1.5 Problemformuleringar

Projektet ska resultera i ett program som kalibrerar och simulerar fukttransport i en träbit tillverkad av gran som torkar i en klimatugn från en fuktkvot på ca 30% till torrved med en fuktkvot på ca 12%. Olika funktioner för diffusionskoefficient och randvillkor ska utvärderas och jämföras med mätdata. Den ursprungliga projektbeskrivningen finns att läsa i appendix A.

1.5.1 Matematik med FEM

En beprövad modell för att beskriva fukttransport i trä är diffusion som matematiskt beskrivs av en partiell differentialekvation. Ett program i matlab skapas för att lösa denna ekvation numeriskt med FEM.

1.5.2 Grafiskt program i matlab

Ett användarvänligt program med grafiskt gränssnitt ska skapas i matlab. Programmet ska ha två primära funktioner:

- Lösa fukttransport i trä som ett diffusionsproblem samt visuellt simulera förfarandet.
- Beräkna lutningen hos träprovets årsringar.

Programmet ska även kunna hantera mätdata för att ge bra begynnelsevillkor.

1.6 Avgränsningar

Som utgångspunkt för värden på parametrar görs inga experiment. Istället används tidigare experimentellt framtagna värden som utgångspunkt för kalibrering [3],[20],[21]. Programmet ska vara så användarvänligt som möjligt men kommer att kräva viss kunskap i matlab.

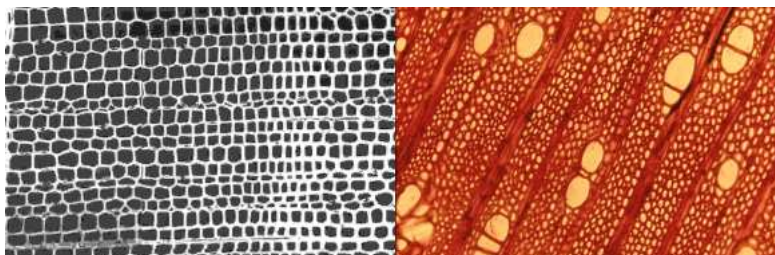
2 Teori

För att förstå torkning av trä som ett diffusionsproblem krävs viss kunskap om träs uppbyggnad, dess torkningsprocess och allmänt om diffusion. Förutom detta är det viktigt att känna till vissa begrepp som används inom området.

2.1 Trästruktur

Ett träd är uppbyggt av miljontals celler som skiljer sig i både storlek och funktion. I huvudsak delas trädceller upp i två olika typer, parenchyma- och prosenchyma. Parenchymacellernas funktion är att lagra näring. Dessa celler lever länge i förhållande till prosenchyma vars största funktion är att stödja andra celler [9].

En större andel cellväggar i trästrukturen genererar ett hårdare och tyngre virke. Detta innebär att lövträd med små celler och grupperade kärl oftast är tyngre än barrträd som har kvadratisk cellstruktur, se figur 1.



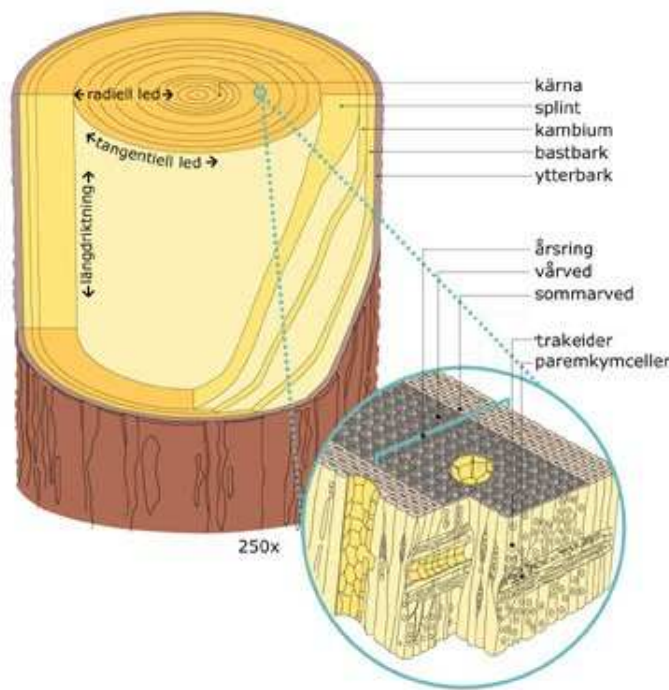
Figur 1: Vänster figur beskriver cellstrukturen hos en gran. Höger figur beskriver cellstruktur hos en lönn. Lönnens cellstruktur har gupperade kärl och är mer tätpackad än granens mer kvadratiske cellstruktur vilket medför att lönnens virke blir tyngre och hårdare än granens virke[10].

2.1.1 Årsringarnas uppbyggnad

För identifikation av trädslag kan årsringarna studeras eftersom alla trädslag har karaktäristisk struktur på årsringarna. Dessutom kan årsringar ge en antydning om i vilket klimat ett träd har växt. Årsringar består till största del av radiellt utbredda celler av typen parenchyma och kan skilja sig på så vis att cellerna har olika storlek i olika ringar [9]. Detta beror ofta på att trädet växer förhållandevis snabbt under våren då trädet kan ta emot mycket energi från solen och förhoppningsvis insupa tillräckligt med vatten från marken. En snabb tillväxt bidrar till större och längre celler vilket i sin tur ger avtryck i årsringarna, se figur 2.

2.1.2 Trädets tvärsnitt

Förutom att årsringar kan betraktas makroskopiskt i ett tvärsnitt av ett träd så kan även kärnveden, splintved och barken betraktas utan mikroskop. Kärnveden har oftast en mörkare färg och finns i mitten av trädets radiella tvärsnitt. Kärnveden består av färre levande celler jämfört med splintveden som är nästa



Figur 2: Trädets uppbyggnad och struktur i ett tvärsnitt, [11].

skikt i trädets tvärsnitt [9]. Splintveden är alltså orienterad i en disk kring kärnveden, se figur 2. Splintveden står för den största delen av transport av vätska. Egenskaper som hållbarhet, vikt, permeabilitet skiljer kärnved och splintved. Kambiumet som är trädets tillväxt del finns i ett tunt lager utanför splintveden och omsluts av bark.

2.1.3 Definition av fuktkvot/fukthalt

Fuktkvot och fukthalt är två begrepp som används inom flera områden. Tyvärr är användningen av dessa begrepp ibland inkonsekvent vilket kan bero på att både fukthalt och fuktkvot översätts till *moisture content* på engelska. I rapporten använd konvention enligt Nationalencyklopedin [12]. Fuktkvoten mäts i procent och bestäms genom att differensen mellan ett träprovs vikt och dess torrsvikt divideras med dess torrsvikt, enligt ekvation (1).

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (1)$$

Där u är fuktkvoten, m är vikten hos träprovet och m_0 är torrsvikten⁵. Fuktkvot anges i procent. Fukthalten anger mängden vatten per volymenhet [kg/m^3] och beskrivs av ekvation (2).

$$\omega = \rho \frac{u}{1 + u} \quad (2)$$

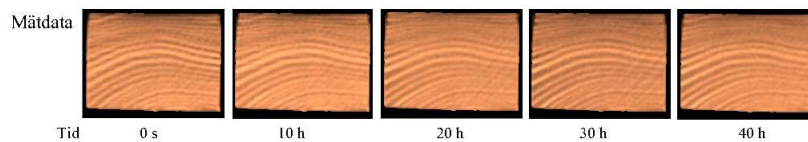
⁵"Torrsvikten bestäms genom torkning under definierade förhållanden tills vikten slutat minska"[12].

där ω är fukthalten, u är fuktkvoten och ρ är densiteten hos mediet.

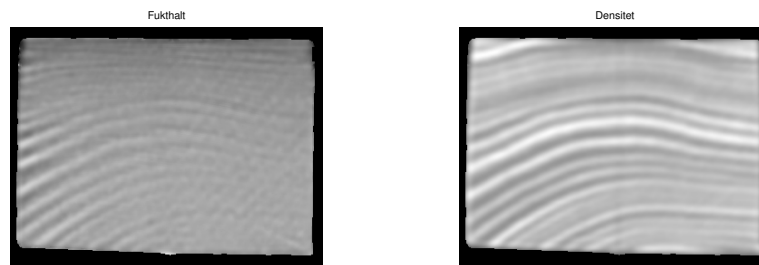
Den stora skillnaden mellan begreppen är att fukthalten är beroende av densiteten hos det medium som vätskan eller gasen propagerar i.

2.1.4 Mätningssmetod av fukthalt

Det finns många tekniker för mätning av fuktkvot/fukthalt. Tyvärr finns ingen universal mätapparat då alla har sina fördelar och nackdelar [13]. Mätningarna som används i denna rapport är gjorda med datortomografi under antagandet att systemet är isotermt [3], se figur 3. Mätdata innehåller fuktkvot och densitet av ett träprov under dess torkningsprocess som finns i form av ett stort antal 267×345 -matriser som visualiseras med matlab, se figur 4.



Figur 3: Bildserien beskriver fukthaltsminskningen från mätdata under ett 40 h långt tidsförlopp, i diskreta steg om 10 h, vilket motsvarar en fukthaltsminskning från 105 kg/m^3 till 72 kg/m^3 .



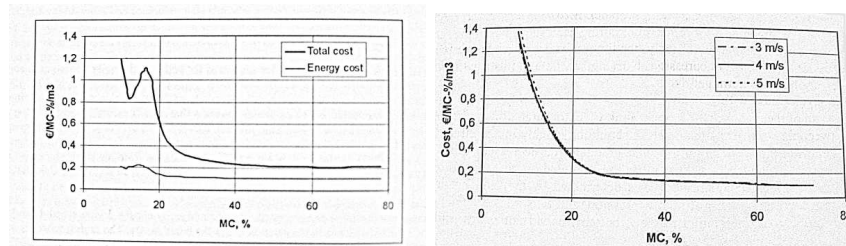
Figur 4: Exempel på bilder över mätdata som har visualiserats grafiskt med matlab.

2.1.5 Torkning av trä

Torkning av virke sker i klimatkammare där möjlighet att ställa in temperatur och luftflöde ofta finns för att optimera torkningstiden. Temperaturer för optimal torkning varierar beroende på bla. träsort och fuktkvot men temperaturer runt 80° C är vanligt i Sverige för torkning av Norway spruce dvs gran [14]. Luftflödet har inte lika stor betydelse som temperaturen men luftflöden på 3-5 m/s verkar vara lämpligast med avseende på torkningstid och energiförbrukning. Energikostnader kan minska om temperatur och luftflöde varierar med fukthalten hos träet [14], [15].

Fläktar och aggregat för att ställa in temperaturen drivs på el vilket medför att långa torkningstider medför höga energikostnader. Dock bör det nämnas

att det finns klimatkammare som har utformats för att uteslutande drivas på solenergi vilket medför att energikostnaderna inte blir lika höga [16]. Dock så är det inte bara energikostnader som spelar in i den totala kostnaden för torkning av trä utan även personalkostnader, lagring etc vilka också beror på torkningstiden. En kritisk parameter för trätorkningskostnaderna är en låg fuktkvot ty torkningsförloppet går långsammare ju lägre fuktkvot virket har. Till exempel medför en sänkning från 20 % till 15 % en mycket större inverkan på torkningstiden än en sänkning från 40 % till 35 %.



Figur 5: Den vänstra figuren beskriver den momentana energikostnaden för torkning av trä som funktion av fuktkvoten. Den högra beskriver totala momentana kostnaden för torkning av trä som funktion av fuktkvoten. Figurerna visar att kostnaden ökar radikalt när fuktkvoten börjar närma sig 25 %. Figurerna är hämtade från *Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying* [14].

Ungefär vid en medelfuktkvot på 25 % så visar mätdata att torkningsförloppet börjar gå betydligt långsammare och därmed mer ineffektivt vilket påverkar den momentana kostnaden för torkning av trä enligt figur 5. Notera att det är dessa låga fuktkvoter som behandlas i denna rapport.

2.2 Diffusion

Diffusion är en mekanism som beskriver partikelflödet från ett partikeltätt område till ett område med lägre koncentration [17]. Diffusion går att härleda ur termodynamikens andra lag som säger att ett system som inte är i jämvikt i avseende på tex tryck, temperatur eller koncentration strävar mot jämvikt [18]. Detta skapar ett nettoflöde av partiklar bort ifrån områden med hög koncentration [17]. Relation mellan flöde och koncentration beskrivs av Ficks första och andra lag [17].

2.3 Torkning av trä som ett diffusionsproblem

Vatten- och mineralflödet i träd sker i trakeider som är några mm långa och några tiotal μm i diameter för ett barrträd, vars volym består till 90-95 % av trakeider [16]. För ett levande träd är det longitudinella flödet upp mot trädkronan 12500 till 80000 gånger större än det radiella flödet för olika nordamerikanska träsorter [19]. Det radiella flödet av vätska för ett levande barrträd är försumbart vilket är intuitivt ty trädet strävar efter att transportera vätska till löven och frukten och inte till barken [19].

Då fukthalten i ett träd minskar sväller trakeidernas kanalöppningar för att vid fibermättnadspunkten sluta sig helt och då kan fukttransport i trä under

vissa förhållanden beskrivas med en diffusionsmodell [9], [16]. Fibernätningspunkten är beroende av temperatur och uppnås för gran⁶ vid en fuktkvot på 31 % vid 25° C och 23 % vid 100 ° C [16]. Kanalöppningarnas slutning förändrar förhållandet mellan longitudinellt och radiellt flöde radikalt vilket medför att det radiella flödet får en stor betydelse för torkning av trä. Emellertid finns det både vätska och vattenånga i trä som diffunderar samtidigt genom cellmembranen vilket medför ett mer komplext problem.

För ett isolerat system beskrivs diffusion av Ficks första lag. Ett isolerat system är förvisso inte intressant i en torkningsprocess då syftet är att diffundera ut vätska ur trä. Ficks andra lag beskriver däremot diffusion i ett generellt icke-isolerat system vilket är mer lämpligt för att beskriva torkning av trä, se ekvation (4).

2.3.1 Förhållande mellan tangentiellt och radiellt diffusionshastighet

Förhållandet mellan diffusionens radiella och tangentiella hastighet med avseende på årsringarna ökar med stigande temperatur hos den omgivning där träprovet torkas [20]. Alltså är diffusionskoefficientens radiella komponent mer känslig för en temperaturökning jämfört med den tangentiella komponenten. Fotsig och Tchagang jämför i *Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions* [20] förhållandet mellan tre olika temperaturer 30° C, 35° C resp. 40° C vilket ger ett förhållande mellan radiella och tangentiell komponenterna för diffusionskoefficienten enligt 1.17:1, 1.40:1 resp. 1.76:1. Förhållandena är experimentellt framtagna för ett lövträd⁷ men det är möjligt att liknande förhållanden gäller för barrträd. I Sehlstedt-Perssons *Properties of solid wood: responses to drying and heat treatment* [21] erhålls ett förhållande mellan radiell och tangentiell diffusionskoefficient på 1.8:1 för ett tallträd vid en temperatur på 31° C. Fotsings, Tchagangs [20] tillsammans med Sehlstedt-Perssons [21] resultat motiverar ett förhållande mellan de radiella och tangentiella komponenterna kring 2:1 för torkningstemperaturer runt 60° C för gransläktet.

Det är på sin plats att nämna att en bräda är mycket längre i den longitudinella riktningen än i dess radiella/tangentiella riktning vilket medför att diffusionshastigheten i radiell- och tangentiellriktning är viktigare än den longitudinella diffusionshastigheten för torkning av trä.

2.3.2 Diffusionskoefficienten

Danvind och Ekevads resultat i *Local water vapor diffusion coefficient when drying Norway spruce sapwood* [3] tyder på att diffusionskoefficienten kan approximeras med en växande exponentialfunktion av fuktkvoten. Med detta resultat samt vetskap om att tangentiell och radiell diffusionshastighet skiljer sig så kan diffusionskoefficienten beskrivas enligt ekvation (3). Dock finns det inga entydiga värden för diffusionskoefficienten eftersom den är beroende av olika förhållanden hos omgivningen och inre egenskaper hos materialet [3].

$$\mathbb{D} = \mathbb{A}(\theta)^T \begin{pmatrix} ae^{b\omega} & 0 \\ 0 & \alpha ae^{b\omega} \end{pmatrix} \mathbb{A}(\theta) \quad (3)$$

⁶*Picea sitchensis*, även kallat *norway spruce*

⁷*Terminalia superba*

Där a och b är konstanter, α är parameter för kvoten mellan radiell och tangentiell diffusion och $\mathbb{A}(\theta)$ är rotationsmatris beroende på årsringarnas orientering. $\mathbb{A}(\theta)$ roterar matrisen så att diffusionskoefficienten blir lokalt ortotropt med avseende årsringarnas vinkel.

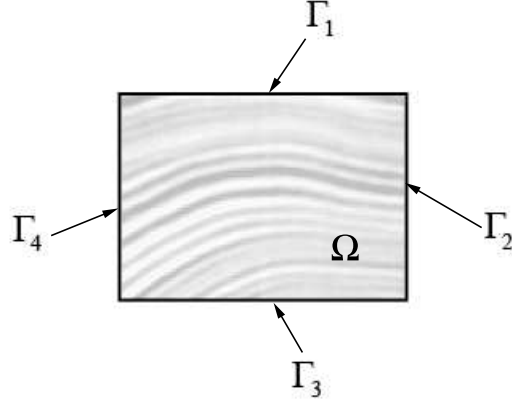
3 Metod

För att verifiera och styrka modellens tillförlitlighet analyseras mätdata, från vilken startvärden samt verifiering av torkningsmodellen kan göras. För att realisera en simulering av torkningsprocessen för trä som ett diffusionsproblem används en 2-dimensionell finit elementmetod samt en algoritm som beräknar lutningen hos årsringarna.

Ett program med grafiskt gränssnitt som körs i matlab har skapats för att enkelt ställa in parametervärden och för att utvärdera modellen, se Appendix B.

3.1 Matematisk problemlösning

Diffusion beskriver en vätskas eller en gas spontana flöde i ett medium. Problemet beskrivs av Ficks andra lag för diffusion i ett godtyckligt system. En matematisk problemformulering ges i ekvation (4), Ficks andra lag med variabel diffusionskonstant. På randen gäller Robin villkor samt Neumann villkor som beskrivs av ekvation (4) respektive (5). Området Ω är ett rektangulärt tvärsnitt av ett träprov enligt figur 6. Randen beskrivs av $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$.



Figur 6: Området Ω samt randen $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$ som används för simuleringar fukttransporten i träprovet med FEM.

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \nabla \cdot (D(r, \omega) \nabla \omega) = 0 \quad (4)$$

$$(D \nabla \omega) \cdot n = -\beta(\omega - \omega_\infty) \quad \text{på } \Gamma_1 \quad (5)$$

$$(D \nabla \omega) \cdot n = 0 \quad \text{på } \Gamma_0 = \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4 \quad (6)$$

$D(r, \omega)$ är läges- och fuktkvotsberoende diffusionskoefficient enligt ekvationen 3, n är normalen, $\beta(\omega)$ är koefficient för normalderivatan, r är diffusionskoefficientens lägesberoende av rummet och ω_∞ är omgivningens fukthalt.

3.1.1 Variationsformulering

Ekvation (4) multipliceras med en funktion $v \in V_0$ och integreras över området Ω .

$$\int_{\Omega} \dot{\omega} v dr - \int_{\Omega} \nabla \cdot (D(r, \omega) \nabla \omega) v dr = 0 \quad \forall v \in V_0 \quad (7)$$

Där V_0 är rummet av alla kontinuerliga funktioner $v(r, t)$ i Ω på intervallet $[0, T]$ med styckvis kontinuerlig derivata på intervallet $[0, T]$ och villkoret $v(r, 0) = v(r, T) = 0$. Greens I används:

$$\int_{\Omega} \dot{\omega} v dr + \int_{\Omega} (\nabla v)^T (D(r, \omega) \nabla \omega) dr - \int_{\Gamma} (D \nabla \omega) \cdot n v dr = 0 \quad \forall v \in V_0 \quad (8)$$

Randen består, som beskrivs av ekvationerna (5) och (6), av två olika randvillkor vilket medför att integralen över randen kan separeras enligt ekvation (9).

$$\int_{\Gamma} (D \nabla \omega) \cdot n v dr = \int_{\Gamma_0} (D \nabla \omega) \cdot n v dr + \int_{\Gamma_1} (D \nabla \omega) \cdot n v dr \quad \forall v \in V_0 \quad (9)$$

Hitta $\omega : \omega \in V_0$. Neumannvillkor (6) och Robinvillkor (5) in i ekv (9) ger:

$$\int_{\Omega} \dot{\omega} v dr + \int_{\Omega} (\nabla v)^T D(r, \omega) \nabla \omega dr + \int_{\Gamma_1} \beta \omega v dr - \int_{\Gamma_1} \beta \omega_{\infty} v dr = 0 \quad \forall v \in V_0 \quad (10)$$

Där β är konstant eller $\beta : \beta = \beta(\omega)$. Ekvationen (10) är variationsformuleringen av ekvation (4).

3.1.2 Diskretisering av rummet

Rums- och tidsvariablerna separeras och diskretiseras enligt Galerkins metod med styckvis kontinuerliga linjära basfunktioner:

$$\omega(r, t) \approx \omega_h(r, t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(r) W_i(t) \quad (11)$$

där ϕ_i är basfunktioner. Vidare ansätts $v = \phi_k(x)$ där $k = 1, 2, 3, \dots, N$ vilket tillsammans med ekvationerna (10) och (11) ger ekvation (12).

$$\begin{aligned} \sum_i^N \left[\dot{W}_i(t) \int_{\Omega} \phi_i \phi_k dr + W_i(t) \int_{\Omega} D(r, \omega_h) \nabla \phi_i \nabla \phi_k dr + W_i(t) \int_{\Gamma} \beta(\omega_h) \phi_i \phi_k dr \right] \\ = \int_{\Gamma} \beta(\omega_h) \omega_{\infty} \phi_k dr \end{aligned} \quad (12)$$

Massmatrisen beskrivs av $\mathbb{M} = \sum_{\Omega} \phi_i \phi_k dr$ och styvhetsmatrisen beskrivs av $\mathbb{S} = \sum_{\Omega} \int D(r, \omega_h) \nabla \phi_i \nabla \phi_k dr$. Vidare kan $\sum_{\Gamma} \int \beta(\omega_h) \phi_i \phi_k dr$ och $\int_{\Gamma} \beta(\omega_h) \omega_{\infty} \phi_k dr$ skrivas som en matris respektive en vektorer, kalla dem $\mathbb{B}$ respektive $\mathbf{g}$.

$$\mathbb{M}\dot{\mathbf{W}}(t) + \mathbb{S}(\omega_h)\mathbf{W}(t) + \mathbb{B}(\omega_h)\mathbf{W}(t) = \mathbf{g}(\omega_h) \quad (13)$$

3.1.3 Diskretisering av tiden för semi-implicit metod

Tiden diskretiseras i tidssteg av storlek k och derivatan approximeras med en differens enligt ekvation (14).

$$\dot{\mathbf{W}}(t) = \frac{\mathbf{W}_n - \mathbf{W}_{n-1}}{k} \quad \text{för } t_{n-1} < t \leq t_n \quad (14)$$

Vidare antas som första modell att diffusionskoefficienten $\mathbb{D}(\omega)$ och $\beta(\omega)$ endast beror på det tidigare värdet så att $\mathbb{D} = \mathbb{D}(\omega_{n-1})$. Notera att detta medför att $\mathbb{B}$, $\mathbf{g}$ och $\mathbb{S}$ endast beror på tidigare värdet av ω . Ekvation (14) i (13) ger ekvation (15). För att få bättre resultat viktas funktionsvärdet med en stabilitetsparameter σ och ett viktat medelvärde av funktionens tidigare värde och aktuella värde används enligt $\mathbf{W} = \sigma \mathbf{W}_{n-1} + (1 - \sigma) \mathbf{W}_n$ för $t_{n-1} < t \leq t_n$. Lämpligt värde på σ ger alltså en semi-implicit metod. Låt $(1 - \sigma) = \xi$.

$$\begin{aligned} \mathbb{M} \frac{\mathbf{W}_n - \mathbf{W}_{n-1}}{k} + \mathbb{S}(\omega(t_{n-1}))[\sigma \mathbf{W}_n + \xi \mathbf{W}_{n-1}] + \\ \mathbb{B}(\omega(t_{n-1}))[\sigma \mathbf{W}_n + \xi \mathbf{W}_{n-1}] = \mathbf{g}(\omega(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (15)$$

Algebra ger:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\mathbb{M}}{k} + \sigma \mathbb{S}(\omega(t_{n-1})) + \sigma \mathbb{B}(\omega(t_{n-1})) \right) \mathbf{W}_n = \\ \left(\frac{\mathbb{M}}{k\xi} - \mathbb{S}(\omega(t_{n-1})) - \mathbb{B}(\omega(t_{n-1})) \right) \mathbf{W}_{n-1} \xi + \mathbf{g}(\omega(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (16)$$

Ekvation (16) löser $\mathbf{W}_n$ med en semi-implicit metod ty $\mathbb{D}(\omega)$ samt $\beta(\omega)$ antas bara bero på tidigare värde av ω .

3.1.4 Implicit lösningsmetod

För att lösa problemet (ekvation (13)) med en implicit metod kan Newtons metod användas för att iterera fram $\omega(t_n)$. Newtons metod för ett icke-linjärt ekvationssystem beskrivs av ekvation (17) och (18).

$$\mathbb{J}_f(\omega_n^k) \mathbf{s} = -\mathbf{f}(\omega_n^k) \quad (17)$$

$$\omega_n^{k+1} = \omega_n^k + \mathbf{s} \quad (18)$$

$\mathbf{f}$ beskrivs i ekvation (19), $\mathbb{J}_f$ är jacobianen till $\mathbf{f}$ och $\mathbf{s}$ är steglängd för ω . Algoritmen itereras tills $\mathbf{f}$ är mindre än en godtycklig tolerans.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}(\omega) = & \mathbb{M} \frac{\mathbf{W}_n - \mathbf{W}_{n-1}}{k} + \mathbb{S}(\sigma\omega(t_n) + \xi\omega(t_{n-1}))[\sigma\mathbf{W}_n + \xi\mathbf{W}_{n-1}] + \\ & \mathbb{B}(\sigma\omega(t_n) + \xi\omega(t_{n-1}))[\sigma\mathbf{W}_n + \xi\mathbf{W}_{n-1}] - \\ & \mathbf{g}(\sigma\omega(t_n) + \xi\omega(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (19)$$

Jacobianen $\mathbb{J}_f$ erhålls från derivering av $\mathbf{f}$ och blir enligt ekvation (20).

$$\begin{aligned} \mathbb{J}_f(\omega) = & \frac{\mathbb{M}}{k} + \sigma\mathbb{S}(\sigma\omega(t_n) + \xi\omega(t_{n-1})) + [\sigma\mathbf{W}_n + \xi\mathbf{W}_{n-1}] \sigma \frac{\partial \mathbb{S}}{\partial \omega} \\ & \sigma\mathbb{B}(\sigma\omega(t_n) + \xi\omega(t_{n-1})) + [\sigma\mathbf{W}_n + \xi\mathbf{W}_{n-1}] \sigma \frac{\partial \mathbb{B}}{\partial \omega} - \sigma \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \omega} \end{aligned} \quad (20)$$

$\mathbb{S}'$, $\mathbb{B}'$ och $\mathbf{g}'$ beror av diffusionskoefficienten $\mathbb{D}$ respektive β och deriveras beroende på hur dessa väljs.

3.1.5 Modeller för fukttransport över randen

På Γ_1 i figur 6 gäller Robin villkor enligt ekvation (5) där $\beta(\omega)$ kan väljas konstant. Ett alternativt $\beta(\omega)$ beräknas genom att brytas ut ur ekvation 5:

$$\beta(\omega) = \frac{(D\nabla\omega(t)) \cdot n}{\omega(t) - \omega_\infty} \quad (21)$$

Vidare antas att medelfukthalten beskrivs som en exponentialfunktion av tiden enligt $\bar{\omega} = ae^{-bt}$, där a och b är konstanter. $\bar{\omega}$ beräknas enligt ekvation (22).

$$\bar{\omega}(t_n) = \frac{1}{A} \int_{\Omega} \omega(t_n) dA \quad (22)$$

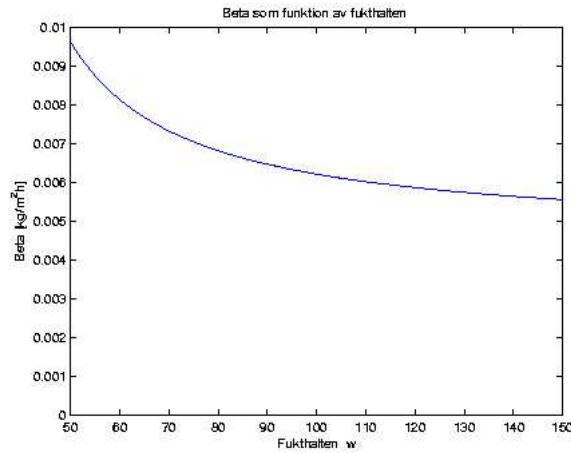
Då det massflöde som transporteras ut ur randen, alltså normalderivatan, är ekvivalent med den fukt som försvinner från träbitens area med tiden så erhålls ekvation (23).

$$\beta(\omega) = \frac{\partial}{\partial t}(ae^{bt}) \frac{A}{B_\Gamma(\omega_\Gamma - \omega_\infty)} = \frac{Hb\bar{\omega}}{(\omega_\Gamma - \omega_\infty)} \quad (23)$$

A är provets area, ω_Γ är fukthalten på randen, B_Γ är randens bredd och H är provets höjd. För att beräkna ett approximativt värde av b görs en icke-linjär anpassning av fukthalten ω som funktion av tiden av given mätdata. Vilket ger $b = 6,0 \cdot 10^{-6}$ (värdet beräknades i enheter om sekunder) vilket beskriver hur snabbt fukthalten minskar i träprovet. Då minskningen är lika stor som utflödet i träbiten så är b proportionell mot normalderivatan.

Med b och träprovets area kända kan β beskrivas som en funktion av fukthalten ω . Fuktkvotens intresseområde ligger mellan ca 12% till 25% vilket motsvarar en fukthalt mellan ca 50 till 105 kg/m³. Figur 7 beskriver β som funktion av fukthalten ω . Figuren visar att β ökar med avtagande ω . Notera att beräkningen av β inte är ideal och därmed aningen ofysikalisk.

Emellertid så är β relativt konstant för fukthalter större än omgivningens fukthalt vilket motiverar ett konstant β . I rapporten så jämförs de olika β -modeller.



Figur 7: Beskriver β :s beroende av fukthalten ω .

3.2 Programmering

Programmeringen är i huvudsak uppdelad i tre stora block, FEM-diffusionslösare som löser själva differentialekvationen, programmet som beräknar vinklarna på årsringarna från given data samt ett grafiskt gränssnitt för programmet.

3.2.1 Diffusionslösare baserad på FEM

För att beräkna ekvation (16) med FEM används en modifierad matlab-mall för lösning av diffusionsproblem i 2D för isotropt och homogent material. Det som skiljer från en vanlig FEM-lösare är behandlingen av diffusionskoefficienten $\mathbb{D}$ och koefficienten för normalderivatan β . Diffusionskoefficienten för ett element består av en matris med radiell respektive tangentiell komponent. Matriselementen roteras enligt ekvation (3) där aktuella vinklar hämtas från programmet som beräknar vinkeln för respektive nod.

Diffusionskoefficienten $\mathbb{D}$ för ett element i diskretiseringen beror av fukthalten ω i respektive nodpunkt samt årsringsvinkel för elementet som hämtas från program för beräkning av årsringsvinkel. β är antingen konstant eller beroende av det tidigare medelvärdet av alla nodpunkter och medelvärdet av nodpunkter på randen.

För att slutligen beräkna ekvation (16) används en mittpunktsmetod för numerisk beräkning av ordinära differentialekvationer, enligt Kapitel 3.1.4.

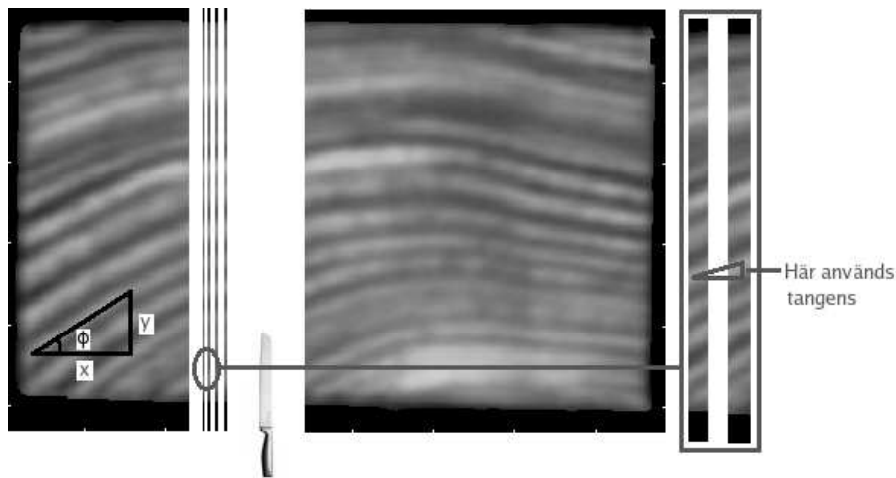
3.2.2 Bestämning av årsringarnas vinklar

För att kunna använda ekvation 3 som beskriver diffusionskoefficienten behövs årsringarnas vinklar, argumentet θ . En metod för att beräkna θ skapades. Metoden kan jämföras med att skära bröd i tunna skivor varför vi har valt att kalla den för "brödsnivemetoden". Programmet "skär" mätdata i vertikalled med jämna intervall som användaren får avgöra. I dessa utskurna bitar används ett program (fpeak) som identifierar extremvärden i matrisen som representerar

träprovet. Med kännedom om var extremvärdena ligger i det första intervallet så matchar programmet ihop extremvärdena för närliggande utskurna element.

Brödsnivemetoden som används i programmet för att hitta årsringsstrukturen bygger på tre antagande:

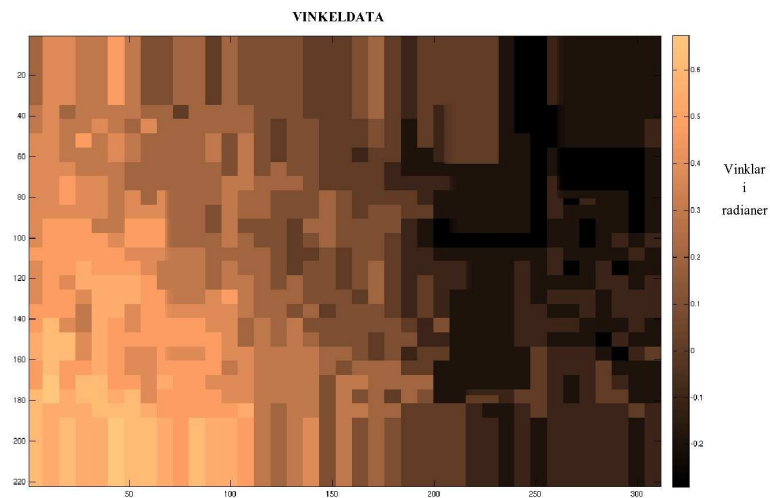
1. Första mätvärdet är korrekt. Detta antagandet är essentiellt eftersom nästkommande vinkelvärde jämförs med det tidigare vinkelvärdet.
2. Kontinuitet hos årsringarna gäller dvs. vinklarna i en liten omgivning till en punkt skiljer sig lite. Antagandet motiveras med att årsringar för trä är någorlunda cirkulära vilket medför att endast kärnved kan bidra med radikala vinkeländringar och då kärnved inte används för torkning i denna rapport så är detta inget problem.
3. Extremvärdet i en punkt tillhör samma årsring som det närmaste extremvärdet i en liten förskjutning i sidled. Detta antagandet är motsägelsefullt jämfört med mätdata då somliga årsringar störtdyker i fuktkvot i vissa områden. Antagande möjliggör att årsringarna kan följas. De årsringarna som inte uppfyller en bestämd toleransnivå negligeras och approximeras med vinkeln för närliggande årsringar, första antagandet appliceras.



Figur 8: Princip för att finna lutningen för årsringarna med brödsnivemetoden.

Programmets definition på vinklar bygger på att årsringarnas vinklar beräknas med tangens, enligt $\theta = \arctan(\frac{y}{x})$, mellan parade extremvärden enligt figur 8. Antagandet om kontinuitet är avgörande då extremvärden kan försvinna. Alla vinkelberäkningar kontrolleras genom antagandet att inget extremvärde kan flytta på sig mer än en till två pixlar i vertikalled per pixel i horisontalled (detta är detsamma som att påstå att ingen vinkel är spetsigare än 45 grader). Med andra antagandet i åtanke avgörs om det uppstått något fel. Detta görs genom att jämföra en beräknad topp med närliggande toppar och kontrollera så att de inte skiljer sig mer än en förinställd tolerans för hur mycket vinklarna får ändra på sig i ett litet område.

Om en identifierad vinkel i ett område visar sig vara större än en bestämd tolerans så approximeras denna med vinkeln för ett närliggande område. Detta är en bra approximation ty vinklarna i årsringsstrukturen förändras inte alltför radikalt på små avstånd. Visserligen skulle det kunna uppstå problem om programmet inte hittar någon rimlig vinkel för flera punkter i rad men detta är inte sannolikt eftersom mätdata är tillräckligt bra.



Figur 9: Värdet på årsringarnas vinklar (i radianer) på lokala områden hos träprovet.

Vissa områden är svåra för programmet att arbeta med vilket beror på diffusa eller minimala årsringstrukturer som inte detekteras som extremvärden. Detta medför att dessa områden tyvärr kommer att tänja på andra antagande om att närliggande struktur har samma vinklar, då dessa områden kan sträcka sig över trettio pixlar. Detta är den största källan till fel i vinkelberäkningarna. Dock är dessa fel inom vad vi anser acceptabla gränser. Om uppenbart felaktiga områden i vinkeldata skulle uppträda så finns möjligheten att approximera dessa med närliggande vinklar manuellt i efterhand.

Resultatet erhålls i form av en matris som plottas i ett färgschema enligt Figur 9. De olika färgerna beskriver hur stor vinkeln är i ett visst område. När vinkeldatan har kontrollerats och antas vara korrekt skickas den till respektive nodpunkt.

Metoden för beräkning av vinklarna hos årsringarna förutsätter att träprovets årsringar är orienterade någorlunda horisontellt. Om de skulle vara orienterade vertikalt så är det det förvisso bara att rotera bilden. Eftersom det är splintved som behandlas så är inte helt cirkulära årsringar något problem eftersom dessa finns i kärnveden.

3.2.3 Grafisk programmering

För att skapa stora delar av det grafiska gränssnittet i matlab användes objektet "uicontrol". Detta objekt är mycket versatilt och kan skapa diverse knappar samt textrutor och det har många valbara alternativ så som fontstorlek, värde och "callback". För att rita figurer användes "axes" vilka namngavs för att uppdatering av figurer skulle kunna göras med hjälp av "subplot". En annan viktig detalj var en struktur skapad med hjälp av "guihandles" som gjorde det möjligt att komma åt de olika grafiska objekten i deras callbackfunktioner. För ytterligare information om programmet se appendix B.

4 Resultat

Resultatet består av utvärderingar om vikten hos olika parametrar i en diffusionsmodell för trä samt ett relativt användarvänligt matlab-program som simulerar diffusion av fukt i trä.

4.1 Programmet

Programmet som har skapats uppfyller båda kraven enligt Kapitel 1.5.2 och i programmet finns möjlighet att:

- Lösa diffusionsproblemet för trä.
- Variera och ställa in nödvändiga parametrar.
- Visualisera simuleringen.
- Beräkna vinkeldata för årsringstrukturen.
- Köra flera mätningar med olika parametrar i serie.
- Beskära och behandla ursprungsdata.
- Jämföra simulerad data med experimentell data.
- Spara och ladda resultat

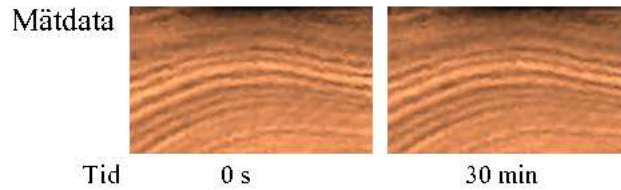
Följande parametrar kan ställas in i programmet:

- Global diffusionskoefficientsberoende (p_1)
- Diffusionskoefficientens fukthaltsberoende (p_2)
- Diffusionshastighet på randen (b)
- Konstant respektive fukthaltsberoende β
- Med eller utan vinkelberoende
- Förhållande mellan radiell och tangentiell diffusionshastighet (α)
- Antal element i finita elementmetoden
- Fukthalt på omkringliggande luft (ω_∞)
- Robin- alternativt Neumannrandvillkor på respektive rand
- Tidssteg för diffusionslösaren
- Semi-implicit/Implicit metod
- Parametrar för viktning med densitet
- Parametrar för vinkeldatahantering
- Beskärning av begynnelsedata
- Presentation av resultat samt mätdata

Programmets gränssnitt finns i Appendix B.

4.2 Bibehållande av årsringsstrukturen

För att bibehålla årsringsstrukturen har i huvudsak tre metoder utforskats, förhållande mellan radiellt och tangentiellt fukttransport (parameter α i ekvation 3), viktning med densitet i diffusionskoefficienten samt diffusionskoefficientens fukthaltsberoende (parameter p_2). Figur 10 visar att årsringstrukturen för mätdata inte påverkas radikalt på 30 min.



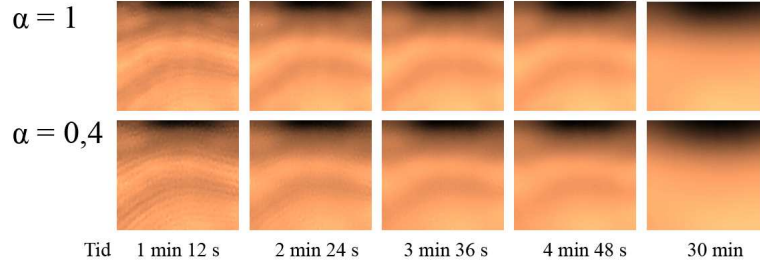
Figur 10: Fukthalten hos mätdata vid begynnelsedata (figuren till vänster) efter 30 min (figuren till höger). Till synes är årsringstrukturen intakt men noggrannare granskning av mätdata visar att årsringstrukturen har reducerats något.

4.2.1 Förhållandet mellan tangentiellt och radiellt diffusionshastighet

Återupprepade mätningar med varierande värden på α (där α beskriver förhållandet mellan radiellt och tangentiellt flöde enligt $1 : \alpha$) i intervallet $[0, 1]$ har visat att ett lägre α är gynnsamt för bibehållandet av årsringstrukturen. Emellertid bibehålls årsringstrukturen endast någon minut längre vid ett lågt α jämfört med ett högre. Figur 11 visar att skillnaden i årsringstrukturen för ett lågt ($\alpha = 0,4$) respektive högt värde ($\alpha = 1$) på α är märkbar men har liten inverkan. Då ett lågt α endast bidrar med att årsringstrukturen bibehålls några få sekunder längre än för ett högt så kan inte förhållandet mellan tangentiellt och radiellt flöde som ensam parameter bibehålla årsringstrukturen en önskvärd tid på några tiotal timmar.

4.2.2 Viktad diffusionskoefficient

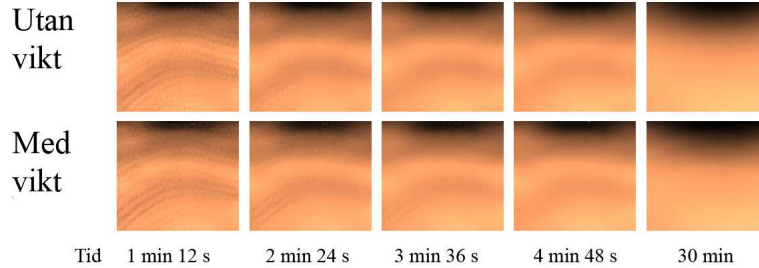
För att ha möjlighet att bibehålla årsringstrukturen måste diffusionskoefficienten vara större i en årsringsdal jämfört med en årsringstopp eftersom fenomenet diffusion annars medför att årsringsstrukturen jämnas ut. En plausibel metod för att lyckas med detta är att vikta diffusionskoefficienten med densiteten ty massakoncentrationen beskriver årsringsstrukturen och är därmed högre vid en topp. Simuleringar visar att en viktning är gynnsamt för årsringstrukturens bevarande vilket framgår i figur 12. Diffusionskoefficienten i figur 12 är viktad enligt ekvation (24) med $n = 1$. Viktningen medför att en årsringstopp får en lägre lokal diffusionskoefficient än en årsringsdal. Som framgår i figur 12 har viktningen en för liten inverkan för att bibehålla årsringsstrukturen under en längre tid. Värt att notera är att $\alpha = 0,4$ i figuren vilket är ett relativt lågt α vilket medför att ett lågt α och en viktad diffusionskoefficient inte är tillräckligt



Figur 11: I övre bildserien är förhållandet mellan radiell och tangentiell diffusionshastighet 1:1 och i den nedre bildserien är förhållandet 1:0,4. Notera att årsringstrukturen är tydligare och därmed mer konserverad i den nedre bildseriens två första bilder (1 min 12 s och 2 min och 24 s) vilket visar att ett lågt α är gynnsamt för årsringstrukturen. Dock visar bildserien även att årsringstrukturen är borta efter bara 30 min oberoende av α . I simuleringen har den globala samt lokala fukthalten kalibrerats så att de stämmer väl överens med mätdata.

för att bibehålla årsringstrukturen.

$$\frac{\text{medeldensitet}^n}{\text{lokal densitet}} \quad (24)$$



Figur 12: Övre bildserien har en oviktad diffusionskoefficient medan nedre har en diffusionskoefficient med viktningen enligt ekvation (24) där $n = 1$. Om bilderna 2 och 3 (2 min 24s och 3 min 36 s) granskas noggrant så kan en liten skillnad i årsringstrukturen noteras till bilden med viktningens fördel. Efter 30 min så finns inte längre någon märkbar skillnad mellan en oviktad och viktad diffusionskoefficient. I simuleringen har den globala samt lokala fukthalten kalibrerats så att de stämmer väl överens med mätdata, ett $\alpha = 0,4$ har använts.

Starkare viktningar har applicerats för att få en större effekt på bibehållandet av årsringsstrukturen. Viktningar enligt ekvation (24) med $n = 5$ samt viktningar med exponentialfunktioner har applicerats. Dessa viktningar har haft små men märkbara effekter på årsringstrukturen. Eftersom en starkare viktad diffusionskoefficient inte har visat sig vara tillräcklig för bibehållandet av

årsringstrukturen har inte några tester på viktningar med $n > 5$ genomförts ty en viktad diffusionskoefficient har visat sig kräva små tidssteg för att erhålla ett stabilt problem och därmed lång simuleringstid.

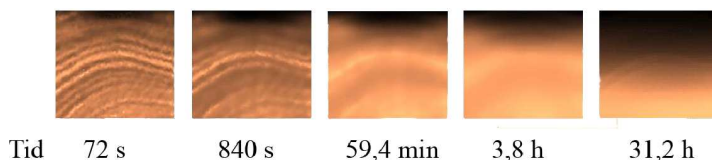
4.2.3 Negativt exponentialfunktionsberoende hos diffusionskoefficienten

En negativ exponentialfunktion som diffusionskoefficienten fukthaltsberoende, enligt ekvation (25), medför att diffusionskoefficienten blir högre för en årsringsdal och lägre för en årsringstopp. Som figur 13 visar är en negativ exponentialfunktion i diffusionskoefficienten väldigt gynnsam för årsringstrukturen och medför att strukturen behålls under ett längre tidsintervall. Tyvärr är en avtagande exponentialfunktion förödande för den lokala medelfukthalten vilket framgår i figur 14.

$$D \propto e^{-p_2 \omega} \quad (25)$$

p_2 är en positiv konstant och ω är fukthalten.

För att behålla årsringstrukturen en längre tid än i simuleringen för figur 13 samt 14 så behövs emellertid ett större värde för p_2 -parametern än den som användes. Detta är nödvändigt för årsringstrukturens konservering under hela tidsintervallet för torkningen. En större p_2 -parameter medför visserligen att årsringstrukturen upprätthålls en längre tid men är i sin tur sämre för den lokala medelfukthalten. En negativ exponent i diffusionskoefficienten löser alltså inte problemet med bibehållandet av årsringstrukturen.



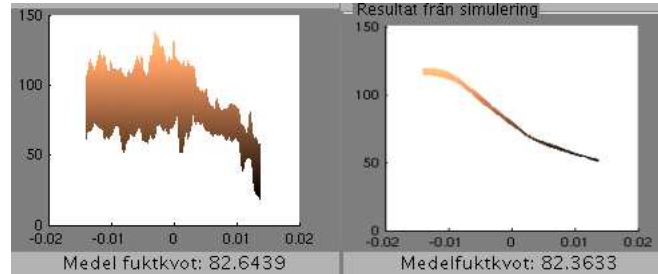
Figur 13: En 31,2 h lång simulering med en diffusionskoefficient med negativt exponentialfunktionfukthaltsberoende. Efter 30,2 h är årsringstrukturen fortfarande påtaglig. Diffusionslösaren har kalibrerats så att den globala medelfukthalten stämmer överens med mätdata. Den lokala medelfukthalten är emellertid inte i överensstämmelse med mätdata.

4.3 Övriga modeller

I programmet så har flera metoder för lösning av diffusionsproblemet jämförts och utvärderats. Av dessa beskrivs de av störst intresse nedan.

4.3.1 Semi-implicit vs implicit metod

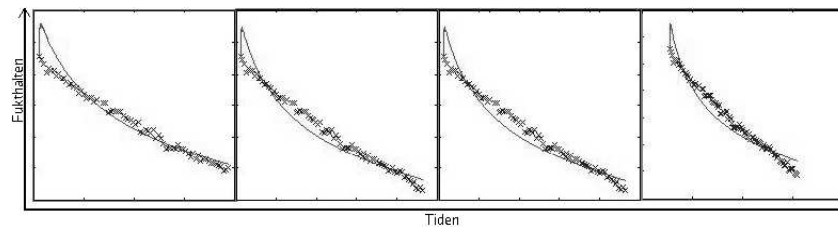
Två metoder för numerisk lösning av diffusionsproblemet har tillämpats, den semi-implicita metoden som beskrivs av ekvation (16) och den implicita metoden enligt kapitel 3.1.4. Simuleringar har inte visat på någon skillnad mellan dessa metoder. Därför har de flesta simuleringar gjorts med den semi-implicita metoden eftersom den är snabbare.



Figur 14: Vänster figur beskriver mätdatans fukthalt sett från sidan i en 3D-visualisering (vilket beskriver den lokala medelfuktkvoten) efter 31,2 h och höger bild beskriver simuleringens fukthalt efter 31,2 h. I figurerna beskriver vertikalaxeln fukthalten och horisontalaxeln position hos trädprovet. Figuren visar att den lokala fukthalten för simuleringen inte stämmer med mätdatan vilket orsakas av en diffusionskoefficient enligt ekvation (25). Simuleringen har kalibrerats så att den globala medelfukthalten stämmer. Försök gjordes även att bevara den lokala medelfukthalten utan givande resultat.

4.3.2 Jämförelse för modeller på randen

Medelvärde på randen är litet problematiskt eftersom den initiala fukthalten på randen är väldigt ojämn vilket en diffusionsmodell med så hög diffusionskoefficient som erfordras för att få rimliga resultat strävar mot. Detta medför att fukthalten ökar radikalt på randen i början av simuleringen för att därefter minska successivt, se figur 15. Dock så är det möjligt att kalibrera modellen så att medelvärdet på randen stämmer överens med mätdata efter en liten tid.



Figur 15: Beskriver randens medelfukthalt som funktion av tiden. Kryssen beskriver de experimentellt framtagna medelfukthalterna på randen och linjen beskriver den simulerade medelfukthalten på randen. Första figuren från vänster i bildserien redovisar en simulering på 38 h, andra figuren 45,5 h, tredje på 45,5 h med litet större konduktivitet (b), fjärde på 51 h.

Ett konstant β och ett β enligt kapitel 3.1.5 skiljer sig inte märkbart för höga fukthalter på randen. Då fukthalten på randen närmar sig den yttre omgivningens fukthalt så ökar utflödet med modell enligt kapitel 3.1.5 till skillnad mot den konstanta modellen. Vilket som stämmer överens bäst med mätdata beror emellertid på val av parametrar.

4.3.3 Medelfukthaltens vinkelberoende

Skillnaden i simuleringar med och utan årsringsvinkelberoende har visat sig vara liten men märkbar för den lokala och globala medelfuktkvoten. En orsak till att skillnaden inte är så stor kan vara att årsringarna i provet inte lutar så mycket. Tyvärr är det svårt att avgöra vilken modell som fungerar bäst eftersom bra kalibreringar kan göras både med och utan vinkelberoende. Visserligen har indier erhållits på att ett vinkelberoende följer medelfukthalten mer kontinuerligt under ett längre tidsintervall.

5 Diskussion

Vi tvivlar på att en diffusionsmodell av fukthalten verkligen kan användas för att simulera verklighetsnära resultat på årsringsnivå. Detta grundas delvis på alla de återupprepade simuleringar som vi har gjort under projektets gång och granskning av fenomenet diffusion. När fukthalten simuleras som ett diffusionsproblem så innebär det att densiteten också diffunderar vilket i viss mån kan vara sant eftersom det är svårt att skilja på torrdensitet och uppmätt densitet då en del av densiteten faktiskt består av fukten som befinner sig i trä. Dock så bör inte den del av densiteten som tillhör själva trädcellerna utan fukt diffundera. Emellertid så har det visat sig att den lokala och globala medelfukthalten kan simuleras och beräknas med goda resultat med en diffusionsmodell. Detta anser vi intressant och givande för uppskattning av torkningstiden av trä. Dock anser vi att det viktigt att ha information om fuktskillnader mellan årsringsdal och årsringstopp för att simuleringar av fukthalten ska vara givande eftersom årsringsstrukturen inte bevaras. Förmodligen så kan en bättre modell erhållas om hänsyn tas till de svagt årsringstrukturbevarande parametrarna.

5.1 Bibehållandet av årsringsstrukturen

Att behålla vågstrukturer (tex. årsringar) samtidigt som medelvärdet av strukturen minskar i ett diffusionsproblem är komplext eftersom diffusion strävar mot att jämna ut alla ojämnheter. En anisotrop diffusionsmodell skulle emellertid kunna bidra till att årsringstrukturen bibehålls under en längre tid. Problematiken i att kalibrera parametrar för en sådan modell för ett träprov ligger i att träprovet har en avtagande fukthalt närmare randen och därmed är diffusionskoefficienten mindre ju närmare randen ett fuktelement befinner sig. Precis som intuitionen säger så ger en låg fukthalt en långsammare diffusion. Men å andra sidan för att behålla en årsringstruktur så måste diffusionen på en årsringstopp (högre fukthalt) vara långsammare än i en årsringsdal (lägre fukthalt). Detta motsäger att en lägre fukthalt medför en lägre diffusionshastighet. Så det hela utmynnar i ett dilemma eftersom båda kraven inte kan vara uppfyllda samtidigt.

För att ha en chans att lyckas med att bibehålla årsringstrukturen om diffusionskoefficientens fukthaltsberoende är exponentiellt växande så måste andra faktorer införas. En kandidat till att lösa detta problem var förhållandet mellan den tangentiella och radiella diffusionshastigheten vilket visade sig vara gynnsamt för årsringstrukturen. Dock visade den sig vara alldeles för svag.

I simuleringar och beräkningar av fuktkvot och fukthalt så anser vi att hänsyn bör tas till förhållandet mellan radiell och tangentiell diffusionshastighet eftersom det förmodligen bidrar till mer verklighetsnära modeller. Detta grundas delvis på att förhållandet hjälpte till att bibehålla strukturen en längre tid men framförallt så grundas det på att det finns flera rapporter som visar på att det faktiskt finns en skillnad i hastigheten för radiell och tangentiell diffusionshastighet [20],[21].

Vi har inte hittat någon teori om viktning av diffusionskoefficienten med densiteten men det har visat sig vara gynnsamt för årsringstrukturen att ha en omvänt proportionellt viktning med avseende på densiteten, enligt ekvation (24). Detta bidrar trots allt enbart med att diffusionskoefficient får ett större densitetsberoende och därmed ett större årsringsberoende. Det är inte alltför uppteendeväckande att en densitetsviktning faktiskt bidrar med en förbättring

av årsringstrukturen. Det är tänkbart att en starkare eller annorlunda viktning skulle kunna lösa problemet men så verkar inte fallet vara då vi testat med exponentiella viktningar samt med viktningar enligt ekvation (24) i potenser upp till $n = 5$ utan framgångsrika resultat. Starkare viktning är tänkbart men då vi inte har sett tendenser till att det verkar kunna lösa årsringstruktursproblemet så har vi nöjt oss med att inte simulera med starkare viktningen än femtegradspolynom samt svaga exponentialfunktioner då det krävs större beräkningskraft ju starkare viktning.

Vi vill notera att diffusionskoefficientens densitetsberoende även finns i exponentialfunktionen som ursprungligen beskriver vår diffusionskoefficient vilket medför att en viktning ger ett mer komplext densitetsberoende än vad som kanske förväntas. Med en viktning beskrivs diffusionskoefficientens densitetsberoende av ekvation (26).

$$D \propto \left(\frac{1}{\rho}\right)^n e^{p_2 \omega(x, \rho)} \quad (26)$$

ρ är densiteten, n är ett positivt heltal, x är fuktkvoten, p_2 är konstant och ω är fukthalten. Ekvationen (26) visar att det vore mer överskådligt och kanske lämpligare att vikta fuktkvoten med densiteten vilket förmodligen skulle leda till bättre resultat. Vi anser att diffusion i trä bör vara beroende av densiteten på något sätt, hur återstår att utreda.

Ett alternativt sätt att lösa problem kan vara att byta till en mindre densitetsberoende potential, till exempel fuktkvoten. Då kan diffusion simuleras för fuktkvoten och där efter kan fukthalten beräknas genom multiplikation med densitet.

5.2 Felkällor

Den referens- och begynnelsedata som vi har använt för simuleringar, uppskattningar och jämförelser är mätdata gjorda med datortomografi och det är svårt att uppskatta noggrannheten och pålitligheten hos dessa mätningar då vi inte gjort dem själva. Vi har noterat att komplikationer hos mätningprocessen är att provet är fastlimmat i mätanordningen vilket bidrar med att det blir fel på ränderna hos mätningarna. För att bortse från dessa mätfel så har vi beskurit provet men givetvis fortplantar sig detta fel i hela provet. En annan felkälla är förmodligen att omgivning och prov antogs vara isotermiskt vilket är svårt att uppnå vid torkning av trä [22]. Då isotermiska förhållanden är en nödvändighet för att fuktkvoten i trä ska kunna betraktas som ett diffusionsproblem så medför det att fel uppstår då detta inte är uppfyllt. I rapporten har felkällor pga. av mätningarna antagits försumbara vilket kan vara ett felaktigt antagande. För att mätningarna ska ha betydelse för resultaten som tagits fram i rapporten så måste de vara helt felaktiga vilket vi anser är osannolikt.

5.3 Programmet

Programmet som skapats fungerar bra för att simulera diffusion i trä med begynnelsedata från datortomografi liknande den som använts i rapporten. I programmet så kan parametrar enkelt varieras vilket medför ökad användarvänlighet. Visualiseringen underlättar för förståelse och resultathantering.

Dock finns det ingen möjlighet att ändra parametrar för yttre förhållande som temperatur och luftflödes hastighet hos omgivningen. Detta begränsar programmets användningsområde eftersom ny kalibrering måste genomföras om de yttre förhållandet ändras. Vi har tyvärr inte haft någon möjlighet att integrera dessa yttre randvillkor i vårt program då mätdata och tid har varit bristfällig.

Det är oklart i vilket format data som inte är tagen med datortomografi ges vilket begränsar programmets användningsområde ytterligare.

En nackdel med programmet är att det kräver stor beräkningskraft för att erhålla goda resultat. Detta gäller visserligen för de flesta större problem som löses med FEM. Förbättringar i FEM skulle vara att använda adaptiva metoder för att dela upp området i element och andra finita element än linjära skulle kunna förbättra beräkningarna. Datorerna som vi har haft till vårt förfogande har emellertid varit tillräckliga för att erhålla goda resultat.

Programmet bör fungera som grund för fortsatta studier i liknande projekt. Det bör noteras att eftersom programmet inte har testats lika intensivt som kommersiella program så kan buggar existera.

6 Slutsats

Alla metoder som har tillämpats för att bibehålla årsringstrukturen har varit för svaga eller katastrofala för den lokala medelfukthalten. Vi tvivlar på att det finns någon parameter som kan beskriva fukthalten i trä perfekt under en längre tid. Detta grundas dels på komplexiteten som uppstår av blandningen mellan gas och vätska i trä [9] [23], trädcellernas densitetsberoende av fukthalten vilket medför att delar av densiteten är oberoende av diffusionen och det faktum att diffusion strävar mot att jämna ut fukthalten. Simuleringar ger indikationer på att fukthalten inte är en lämplig potential för diffusion i trä. Ett annat argument för att fukthalten inte är en bra potential är för att diffusion beskriver massförflyttningar och då vissa delar (framförallt delar av densiteten) av fukthalten är stationära så erhålls felaktiga resultat om dessa antas förflyttas. Vi förmodar att bättre resultat hade uppnåtts om simuleringarna hade gjorts på fuktkvoten istället för fukthalten och om hänsyn hade tagits till förhållandet mellan radiell och tangentiell diffusionshastighet samt en viktning av densiteten.

Programmet som har skapats kan användas för simuleringar av diffusion av fukttransport i trä för diffusion av fukthalt och fuktkvot. Programmet tar hänsyn till alla de parametrar som mätdata har gett möjlighet till men saknar en del yttre parametrar som temperatur hos omgivning och luftflödets hastighet. För simuleringar av diffusion i trä med konstanta förhållande hos omgivningen så anser vi att programmet fungerar bra och är användarvänligt.

Förutom upplysningar om olika parametrars betydelse i en anisotrop diffusionsmodell för trä så har projektet resulterat i en djupare förståelse för diffusion i trä.

Referenser

- [1] G. Borneskär *Svensk skog 2008, snabbfakta om skogsnäringen i Sverige*, 2008, Jönköping, Skogstyrelsen Analysenhet
- [2] Skogsindustrierna *Om skogsindustri*, [hämtat: 2009-03-11] Tillgänglig: <http://www.skogsindustrierna.org>
- [3] J. Danvind, M. Ekevad *Local water vapor diffusion coefficient when drying Norway spruce sapwood*, 2006, Japan, Springer-Verlag
- [4] Skogsstyrelsen *Skogsstatistisk årsbok 2008*, 2008, Jönköping, Swedish Forest Agency
- [5] B. Esping, J.G. Salin, P Brander *Fukt i trä för byggindustrin*, 2005, Stockholm, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
- [6] Brundtlandskommisionen *Our Common Future*, 1987, England, Oxford University Press
- [7] K. Gustafsson, P. Angelstam, H. Eriksson, S. Hultgren, H Weibull *Framtidens skog, Några tänkbara konsekvenser för miljö och produktion av 1900-talets skogsbruk*, 2002, Jönköping, Skogsstyrelsens förlag
- [8] H. Eriksson *Svenskt skogsbruk möter klimatförändringarna* 2007, Jönköping, Skogstyrelsens förlag
- [9] F. F. P. Kollmann och Wilfred A. Côté Jr *Principles of wood science and technology v. 1. Solid wood* , 1968, Berlin, Springer-Verlag
- [10] L. Gunnarson <http://dodesign.se/Naerbilder.html>, Högskolan Dalarna
- [11] Träguiden *Stammens uppbyggnad med dess cylindersymmetri och symmetriplan*, [hämtat: 2009-05-10], Tillgänglig: www.traguiden.se
- [12] Nationalencyklopedin *torrvikt*, [hämtat: 2009-03-25], Tillgänglig: www.ne.se
- [13] P. Jacobsson *Metoder för fuktmätning i trä -noggrannhet och duglighet*, 2003, Stockholm, Träteknik Rapport P 0310038
- [14] J.G. Salin *Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying*, 2001, Stockholm, Swedish Institute for Wood Technology Research
- [15] J.G. Salin *Lufthastighetens inverkan vid kammartorkning*, 2001, Stockholm, Swedish Institute for Wood Technology Research
- [16] R. B. Keey, T. A. G. Langrish, J. C. F. Walker *Kiln-Drying of lumber*, 2000, Berlin, Springer-Verlag
- [17] E. Boeker, R. Van Grondelle *Environmental Physics*, 2nd ed, 1999, Chichester, John Wiley and Sons Ltd
- [18] F.Mandl *Statistical Physics*, 2nd ed, 2007, Chichester, John Wiley and Sons Ltd

-
- [19] F. F. P. Kollmann, E. W. Kuenzi, A. J. Stamm *Principles of wood science and technology v. 2. Wood Based Materials* , 1975, Berlin, Springer-Verlag
 - [20] J. A. M. Fotsing, C. W. Tchagang *Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions*, 2004, Berlin, Springer-Verlag, s. 977-980
 - [21] M. Sehlstedt-Persson *Properties of solid wood: responses to drying and heat treatment* Luleå University of Technology, Division of Wood Science and Technology
 - [22] G. Bramhall *A Mathematical Description of Lumber Drying*, 1984, British Columbia, Forest Products Laboratory
 - [23] H. K. Burr, A. J. Stamm *Diffusion in wood*, *J Phys. Chem.*, 1947, Washington, American Chemical Society

A Ursprunglig projektbeskrivning

Projektförslag för kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik TMEX02

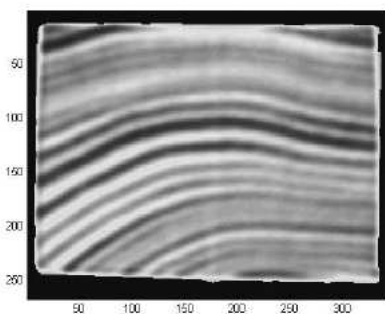
Projektbeskrivning:

Sågade träprodukter, (t ex plankor), torkas efter sågning ner till en fuktkvot på c:a 10-15 viktsprocent vatten. Denna torkning sker i speciella kammare med en noggrant styrd miljö (temperatur, luftflöde och fuktkvot i luften). För att kunna styra torkningen effektivt behövs en bra modell för hur fukten transporteras. För långsam torkning är oekonomisk och för snabb torkning kan ge upphov till oönskade deformationer, t.ex skeva eller vridna plankor.

I detta projekt skall en diffusionsmodell för fukttransport i trä studeras. En egenhet hos trä (till skillnad från t ex konstruktionsstål) är att årsringsstrukturen i träet ger upphov till en anisotropi, där materialegenskaperna skiljer sig åt i radiell riktning (tvärs årsringarna) och tangentiell riktning (längs årsringarna). Dessutom skiljer sig materialegenskaperna åt över årsringarna, där den hårdare sommarveden har andra egenskaper än den mjukare vårveden. För att studera modellen och jämföra med experimentella resultat är uppgiften att utveckla en programkod som simulerar fukttransporten med hjälp av finit elementmetod.

Projektet består av två delmoment som vardera skall implementeras i Matlab:

- 1) Ett 2D FE-program för Poissons ekvation där diffusionskoefficienten beror på rumskoordinaten.
- 2) En algoritm som utifrån en bild (bilden nedan är en representation av en 267×345 matris) identifierar årsringsstrukturen och tar fram radiell och tangentiell riktning för årsringarna.



Målgrupp: M, Z, F

Gruppstorlek: 3-4 studenter

Förkunskapskrav: Finit elementmetod gk, goda kunskaper i Matlab-programmering.

Handledare: Håkan Johansson, hakan.johansson@chalmers.se

Examinator: Kenneth Runesson, keru@chalmers.se

B Lathund för programmet

I detta avsnitt förklaras det grafiska gränssnittet som används för hanteringen av mätdata samt FEM-simulering av trätorkning. Programmet är relativt omfattande och även om koden för det mesta är välkommenterad är den inte enkel att sätta sig in i utan en mindre guide. Användarvänlighet har varit av stort intresse under programmets uppbyggnad och detta har resulterat i ett överskådligt grafiskt gränssnitt. Problem kan dock uppkomma vid en första start av programmet om till exempel någon fil saknas eller mätdata har annorlunda namn. I nästföljande avsnitt kommer detta tas upp så att eventuella problem skall kunna lösas. I avsnitten efter det fås en genomgång av de olika delarna i programmet och hur det grafiska gränssnittet hanteras. Trots mycket testning kan självklart någon "bug" finnas kvar. Dessa bör dock kunna kringgås genom enbart en omstart av programmet.

B.1 Filer och filstruktur

Programmet använder en mängd m-filer för exekvering av olika metoder samt ett antal mat-filer för rå-, processerad mätdata och sparade resultat. Bland m-filerna är det "main.m" som är viktigast då den innehåller all information om det grafiska gränssnittet samt anropen till de andra m-filerna. I programmets ursprungliga form finns alla m-filerna i samma källkatalog medan råmätdata ligger i en undermapp kallad "matdata", processerad mätdata i "initialdata" samt resultat i en mapp med samma namn. Namnen på respektive filer följer nedan i figur 16.



Figur 16: Filstruktur i källkatalogen för programmet.

Om andra namn önskas användas på mätdata kan detta göras genom att gå in i koden i "main.m" och ändra dessa under stycket "Initieringar (default värden)" då strukturen "gh.fil" skapas. Namnen är uppdelade i två delar där den första delen är innan en numrering av filen och den sista delen namnet efter numreringen samt filtypen. I figur 17 finns detta markerat. Där fuktkvoten (kallad mc1 och mc2) och densiteten (kallad t1 och t2) är understrukna. Om mappnamnen eller filen med mättider behöver ändras kan detta göras på samma ställe genom att ändra tillhörande del av strukturen.

```

72 %% ~ Initieringar (default värden)
73 %% Observera punkten för att lägga till dem i strukturen gh
74
75 % Sökvägar för filer/mapnamn samt namn
76 gh.fil = struct('mat','matdata/', 'ini','initialdata/', 'res','resultat/',...
77 - 'mc1','MC_stack', 'mc2','scan1.mat', 't1','t_stack', 't2','scan1.mat'...
78 , 'tid','MeasurementTimes.mat');
79
80

```

Fuktkvot Densitet

Figur 17: Kodstycke i "main.m" där filnamn definieras för mätdata och undermappar, på bilden är fuktkvoten respektive densitetens filnamn understrukna för att illustrera vart ändring ska göras då annat filnamn för dessa används.

B.2 Användning av programmet

Programmet startas genom att köra/anropa filen "main.m" i matlab. Observera att detta inte kommer att fungera om inte filstrukturen är enligt standard eller motsvarande modifierad. Andra fel kan även uppstå som korrupta initieringsfiler eller mer troligt initieringsfiler av okompatibel version. Om detta händer erhålls förhoppningsvis ett tydligt felmeddelande med information av vad som gick fel. Om detta inte är fallet kan en mindre genomgång av "main.m" eller någon annan anropad fil behövas. Om allt går bra kommer en ruta liknande figur 18 att visas om ingen initialdata eller vinkeldata finns att tillgå. Om initialdata eller vinkeldata laddats kan det ses i figurerna i panelen "Processerad mätdata" och i "Vinklar för årsringar". Om detta är fallet och båda eller någon av dessa redan finns behöver inte deras respektive stycke läsas nedan om det inte är av intresse att ändra dem.

B.2.1 Processering av mätdata

Om ingen processerad mätdata finns eller om ett nytt område av mätdatan vill användas som initial och sluttillstånd för simuleringen måste mätdata processeras först. Innan knappen "Processera mätdata" används bör man notera de parameter inställningar som erbjuds se figuren 19 och mätdatahanterings delen av figur 18. Viktigast är de två sliderna precis anslutande till bilderna i panelen "Val av tidsperiod" vilka definierar under vilken tidsperiod som en simulering vill göras. Som hjälp för att välja rätt tidsperiod fås en direkt läsning av mätdatan varje gång en slider ändras på och ett medel för fuktkvoten respektive fukthalten visas upp under slidern tillsammans med en bild av mätdatan.

De andra alternativen i panelen "Processering av mätdata" ser i sin grundinställning ut enligt figur 19 och innehåller alternativen: Reducera, Beskär NaN, Beskär ytterligare, Medelvärdesbilda, Geometriparameter samt val att spara det som gjorts. En kort förklaring av dessa alternativ följer nedan:

- "Reducera" används om användaren anser att mätdatan är onödigt stor och reduceras då med vald faktor.
- "Beskär NaN" beskär kanter av mätdatan fyllda med felaktig mätdata, bör användas om felaktig data finns.
- "Beskär ytterligare" bör användas med grundinställningen av ytterligare inskränning enligt rutorna under och beskär då utöver NaN beskärningen mätdatan enligt värdena för respektive kant.

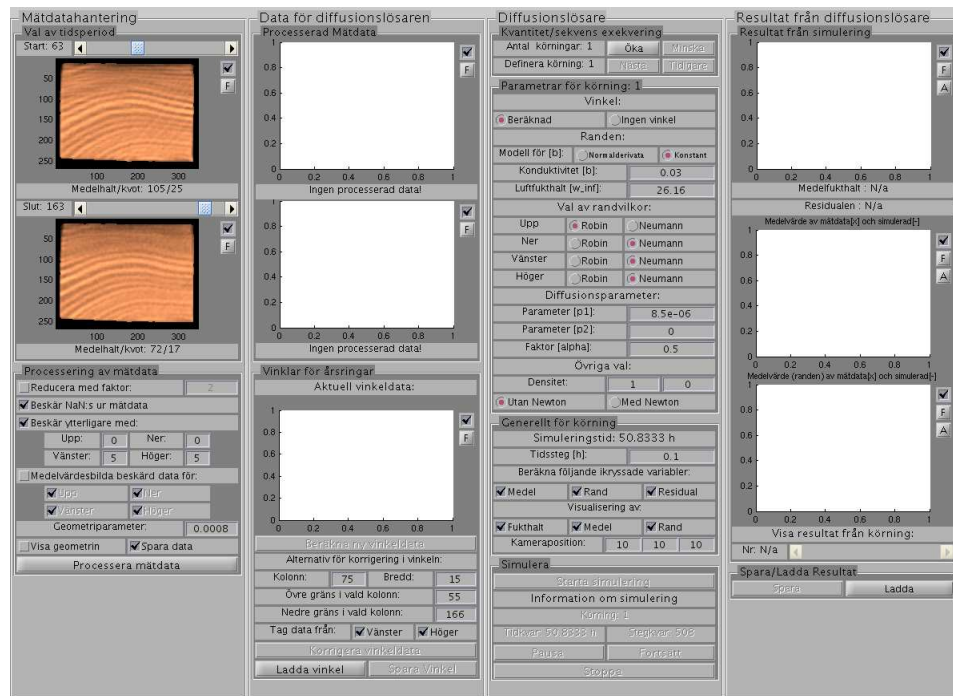


Figure 18: Programfönster från körning av 'main.m' utan initialdatan: processerad mätdata och beräknad vinkeldata.



Figure 19: Panelen "Processering av mätdata".

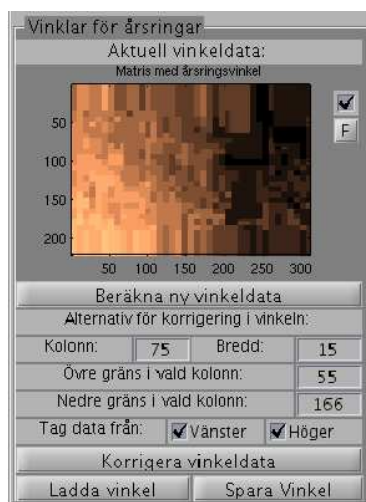
- "Medelvärdesbilda" kan användas om det anses att viktig mätdata beskärs samtidigt som felaktig mätdata. Denna mätdata medelvärdesbildas då in till kanten av den beskärda mätdata.
- "Geometriparameter" är direkt avgörande för hur många finita element som kommer användas vid FEM-simuleringen. Observera att en liten förändring i denna ger ett stort utslag i antalet element. Värdet 0.008 ger runt 3000 trianglar.

Det är viktigt att tänka på att om något av beskärningsalternativen vill ändras på så att en större yta skapas kommer ny vinkeldata att behöva beräknas eller laddas.

När dessa val är gjorda är det enda som återstår att trycka på knappen "Processera mätdata" för att gå vidare. Programmet kommer då visa en progressionsruta som visar hur mycket av processeringen som är klar och när den är fylld kommer dels figurerna under panelen "Processerad mätdata" att fyllas i samt en ny figur kommer visas där enbart densiteten visas upp för mätdata. Denna extra figur kan utan problem stängas ner och vidare användning av programmet kan fortskrida. Om alternativet spara var valt behöver denna procedur inte genomföras nästa gång programmet startas.

B.2.2 Beräkning av vinkeldata

Beräkning av ny vinkeldata initieras av knappen "Beräkna ny vinkeldata" i panelen "Vinklar för årsringar", se figur 20. Den nya vinkeldatan kommer beräknas utifrån antingen densiteten eller senast processerad mätdata enligt slidern "Start:". Observera att för att en ny "Start:" parameter ska sparas och kunna användas i beräkningen krävs det att knappen "Processera mätdata" i panelen "Processering av mätdata" har använts efter att "Start:" slidern har ändrats.



Figur 20: Panelen "Vinklar för årsringar", där vinkeldata kan beräknas, korrigeras, sparas och laddas

Efter att "Beräkna ny vinkeldata" har applicerats tillkommer en ny figur vid namn "Vinkel", se figur 21, som är en meny för inställningar av diverse parametrar.

Nedan följer en lista över parametrarnas namn samt deras egenskaper.

- "Maximal söklängd:" beskriver antalet kolonner som stegas framåt i sidled innan vinkeln beräknas fram. Se kapitel 3.2.2 om brödsnivemetoden i rapporten.

Val av Parameterar för att framställa en ny vinkelmatris	
Maximala söklängd:	5
Steglängd i x-led:	10
Steglängd i y-led:	40
Topindrag i y-led:	80
Botindrag i y-led:	40
Epsilon för värdet :	0.25
Epsilon för vinkeln :	1
Beräkna	
Stäng ner	

Figur 21: Panel för val av parametrar som definierar beräkningen av den nya vinkelberäkningen.

- "Steglängd i x-led:" Längden mellan varje ny beräkning av vinkeln i horisontell riktning.
- "Steglängd i y-led:" Längden mellan varje ny beräkning av vinkeln i vertikal riktning.
- "Topindrag i y-led:" Antalet rader ifrån toppen som kommer ansättas till samma värde som raden "Topindrag i y-led:" parametern valts till.
- "Botindrag i y-led:" Samma som ovan, fast ifrån botten.
- "Epsilon för värdet:" Maximala ändringen i vinkel per ny beräknad vinkel. Observera om detta värdet överstigs kommer en ny årsring väg väljas till slutligen elementet får samma värde som tidigare beräknad vinkel. Använd ej för liten i förhållande till steglängd i x och y-led.
- "Epsilon för vinkeln:" bestämmer maximala ändringen av antalet rader per kolumn för årsringen då den maximala söklängden stegas fram. Om detta värdet överstigs ansätts vinkeln till föregående vinkel som beräknats. Observera steglängden i söklängden är hårdkodad och ansatt till 1.

Tag i beaktning att processen kan ta lång tid. För att få en inblick i när den är klar finns det progressionsrutor för både aktuell x och y koordinat.

Efter att ny vinkeldata har erhållits kan antingen vinkeldatan förkastas, genom att ladda en gammal vinkeldata med knappen "Ladda vinkel" vilket ersätter denna med någon föregående sparad vinkeldata, eller så kan man välja att spara den nya vinkeldatan genom att trycka ner knappen "Spara vinkel". Man kan även manuellt korrigera den aktuella vinkeldatan. Det är dock bäst att spara vinkeldatan innan korrigeringen påbörjas. Korrigeringen sker med hjälp av parametrarna under texten "Alternativ för korrigering i vinkeln:", se figur 22. Nedan följer en lista av dessa parametrarnas namn och egenskaper.

- "Kolonn:" ansätter ifrån vilken kolumn modifieringen kommer ske. Observera att denna kolumnen gärna ska vara i mitten i horisontalled på det området som ska modifieras.
- "Bredd:" är bredden i horisontalled på modifieringen, hälften kommer gå åt höger och hälften åt vänster ifrån den valda kolumnen.

Alternativ för korrigering i vinkeln:			
Kolonn:	75	Bredd:	15
Övre gräns i vald kolonn:		55	
Nedre gräns i vald kolonn:		166	
Tag data från:	☒ Vänster	☒ Höger	
Korriger vinkeldata			
Ladda vinkel		Spara Vinkel	

Figur 22: "Alternativ för korrigering i vinkeln:" i sektionen "Vinklar för årsringar"

- "Övre gräns i vald kolonn:" bestämmer ifrån vilken rad modifieringen ska börja.
- "Nedre gräns i vald kolonn:" bestämmer vilken rad modifieringen ska sluta. Observera om "Övre gräns i vald kolonn:" är ett lägre tal än "Nedre gräns i vald kolonn:" kommer programmet skifta plats på dessa.
- Checkboxen "Vänster" kommer innebära att vikten av medelvärdesbildningen över området kommer ske med värden vänster om modifierade området i horisontalled.
- Checkboxen "Höger" som ovan fast höger om det modifierade området i horisontalled.

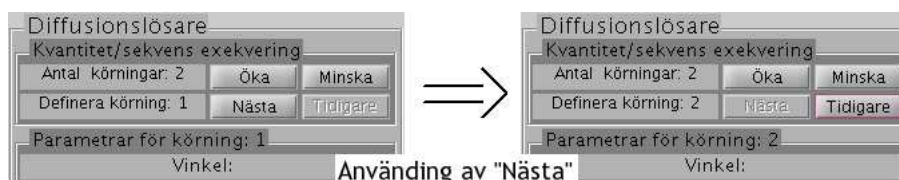
För att sedan genomföra modifieringen används knappen "Korriger vinkeldata". Om den nya beräknade och modifierade vinkeldatan är värd att spara används åter knappen "Spara vinkel". Utifall att vinkeln inte var bättre än den innan sparade vinkeln finns möjligheten återgå till föregående sparade vinkeldatan genom att pressa ner "Ladda vinkel" och ladda denna fil.

B.2.3 Parametrar för diffusionslösaren

Parametrarna som kan ändras på i diffusionslösaren är förklarade i kapitel 4.1. En viktig detalj är att antalet simuleringar kan väljas högst upp i panelen "Diffusionslösare" med hjälp av knapparna "öka" och "minska" från en till ett maximum av tio stycken. Alla simuleringar kan ha olika parametrar och för att välja parametrar för en specifik körning används knapparna "Nästa" och "Tidigare" för att stega runt bland det valda antalet av simuleringar. Att ändra parametrar eller metoder görs då enkelt i panelen "Parametrar för körning: X" ⁸ genom att ändra de redan inskrivna parametrarna respektive genom att byta alternativ på radioknapparna. I figur 23 kan en illustration över detta ses.

I panelen "Generellt för körning" kan några alternativ på vad som ska visas/beräknas i en simulering väljas samt tidsteget för simuleringen. Dessa är inte specifika för någon körning utan gäller för alla simuleringar som startas. Här kan även kameraposition ändras som bestämmer hur alla figurer ritas ut. Denna kan ändras under simulering men bilderna uppdateras inte innan de ritas ut nästa gång.

⁸X är vald simulering



Figur 23: Panelen "Diffusionslösare" där antalet körningar ändrats till två och parametrar för körning ett respektive två kan ställas in genom att använda knapparna "Tidigare" och "Nästa".

B.2.4 Att simulera

När allt tidigare i denna guide är gjort är det dags att börja simulera. Simuleringen startas genom att klicka på knappen "Starta simulering" och fältet under knappen börjar då uppdateras med information om simuleringen allt eftersom. Till höger kan resultaten ses i realtid efter varje tidssteg där hela fukthalten ritas upp i den översta bilden. Under bilden skrivs aktuell medelfukthalt ut samt residualen mot närmast liggande mätdata. Under dessa två fält plottas medelfukthalten för mätdata som "x" samt för den simulerade som en linje som funktion av tiden. Figuren nedanför plottar samma storhet men enbart för den öppna randen för mätdata respektive den simulerade datan. Ett exempel över en simulering finns att se i figur 24.

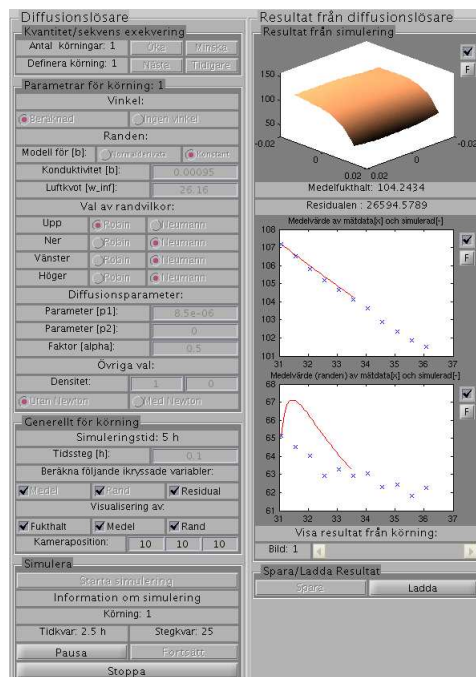
När simuleringen är igång kan den avslutas om exempelvis det är uppenbart att parametrarna efter några tidssteg inte ger bra resultat. Om användaren vill kan denne även pausa en pågående simulering. Om detta görs så tänds knappen "Fortsätt" som används för att fortsätta simuleringen. Simuleringen måste fortsättas innan programmet stängs ned om resultat vill erhållas för de använda valen av parametrar. Observera att simuleringen måste gå klart för att få resultat som kan sparas eller för att få resultat som kan förstöras och granskas med den lilla knappen "F" eller "A" bredvid respektive figur.

B.2.5 Resultathantering

När simuleringen är klar kan resultaten granskas direkt i huvudprogramfönstret eller mer tydligt genom att förstora någon figur genom användandet av knappen "F" eller "A" bredvid. Om fler än en simulering valts ritas alla resultat ut om "A" används och programmet kan visa upp de olika simuleringarnas resultat individuellt genom att använda slidern längs ned i panelen "Resultat från simuleringen". Då slidern ändras kommer även parametrarna till vänster att ändras för att enkelt kunna se vilka parametrar som gav vilket resultat.

Efter en fulländad simulering kan resultat sparas till en mat-fil om så önskas. För att göra detta används knappen "Spara" i panelen "Spara/ladda resultat" så öppnas en dialog där namn samt plats kan väljas. För att få en bra ordning bland filerna bör resultaten sparas i en egen mapp istället för i källkatalogen.

Det går alltid att ladda gamla resultat för att granska dessa ytterligare eller för att se deras parametrar. Detta görs genom knappen "Ladda" och programmet visar då upp en vanlig dialog för öppning av fil.



Figur 24: Programmets simuleringsdel, här syns en pågående simulering till höger och dess parametrar till vänster. Observera att knapparna "Pause" och "Stopp" finns under parametrarna för att avbryta simuleringen.

B.3 Om koden

Programmet är som tidigare nämnt skrivet i matlab och där har matlabs "Rapid Cell Mode" använts för att enklare kunna strukturera upp koden. För att skapa det grafiska gränssnittet har matlabs grafiska objekt kallade "uicontrol" använts. Dessa kan skapas som diverse typer av knappar och texttrutor. Även matlabs objekt "uipanel" och "uibuttongroup" har använts för att förbättra gränssnittet och strukturen "guihandles" användes för att göra de olika objekten tillgängliga från callbackfunktion. Mer om hur dessa används finns att läsa i matlabs "Help Navigator". Om ett större grafiskt program i matlab vill skapas är vårt "main.m" ett exempel på hur detta kan göras. En översiktsbild av koden finns att se i figur 25.

För utritning av de grafiska objekten användes pixelpositioner och för att kontrollera var varje objekt ritas ut så byggdes programmet upp genom att ingående definiera om en vänsterkants- och överkantenspositionen som användes för varje objekts positionsvektor. Detta gjorde att det enkelt gick att flytta var objekt placerades i figuren.

En av de större svårigheterna med programmeringen var när ett specifikt variabelnamn ville associeras till ett visst textfält. Detta löstes slutligen genom att definiera variabelns namn som en sträng och spara denna i det specifika grafiska objektets "UserData". Variabeln kunde då senare få sitt värde ändrat genom att använda matlabs "eval" anrop när fältets "Callback" funktion kördes. Detta användes till exempel för att skapa ett generellt sparningssystem för våra para-

```

1  % Information
2  % Skapad för: kandidatarbete, "Anisotrop diffusionsmodell för träd"
3  % Grupp: Johan Wings, Karl Gustafsson, Christoffer Strömberg
4  % Startad: 2009-05-03
5  % Klar: 2009-05-12 v 1.1
6  % Inne denna kod skall kommentarerna vara av olika typ för att ge en
7  % snabbare förståelse av koden:
8  % Kommentarer följda av % -- antyder att ett nytt "stycke" i koden följer.
9  % Kommentarer följda av % - antyder att ett nytt "stycke" i koden följer.
10 % Kommentarer följda av % -- antyder att ett nytt "under stycke" följer.
11 % Kommentarer följda av ? antyder förklaring av någon kod.
12 % Kommentarer direkt efter en rad med kod beskriver vad som gjorts.
13 % Kommentarer med * är kod för testsyften.
14 % Använd nulllistan för %* för att snålet finna det stycke i koden du vill.
15
16 % --- Huvudprogram för användning av diffusionslösare ---
17 % -----
18 % I stort enbart en grafisk hanterare av de metoder och program som kommer
19 % till användning för lösning av diffusionsmodell samt preparering av data.
20 function main()...
21
22 % --- Callback funktioner ---
23 % -----
24 % Nedan följer callbackfunktioner till alla knappar/replage som definierats
25 % ovan. Ordningen stämmer inte helt överens men en rad till ska finnas som
26 % förklarar vad som hör ihop med vad.
27
28 % - Closefunktion - För programfönstret och skapade fönster
29 function f_close(source, eventdata) ...
30
31 % - Slider: Start/Slut, Visa resultat Nr: #
32 function fs_callback(source, eventdata) ...
33
34 % - Figur (knapp/checkbox) - Visa/dölj samt förstora vald bild
35 function fc_v_callback(source, eventdata) ...
36 function fc_b_callback(source, eventdata) ...
37 function fc_a_callback(source, eventdata) ...
38
39 % - Checkbox
40
41 % -- Inre Panel: Processering av nätdata
42 function fc_reducer_callback(source, eventdata) ...
43 function fc_beskar_callback(source, eventdata) ...
44 function fc_beskar_callback(source, eventdata) ...
45 function fc_geometri_callback(source, eventdata) ...
46
47 % -- Inre Panel: Generellt för körning
48 function fc_ber_callback(source, eventdata) ...
49
50 % --- knapp ---
51 % -- Inre Panel: Processering av nätdata
52 function fb_processor_callback(source, eventdata) ...
53 % -- Inre Panel: kvantitet/parameters ändring
54 function fb_diff_antal_aka_callback(source, eventdata) ...
55 function fb_diff_antal_aka_callback(source, eventdata) ...
56 function fb_diff_val_aka_callback(source, eventdata) ...
57 function fb_diff_val_aka_callback(source, eventdata) ...
58 % -- Inre Panel: Simulera
59 function fb_sim_starta_callback(source, eventdata, init) ...
60 function fb_sim_sp_callback(source, eventdata) ...
61 function fb_sim_fortsatt_callback(source, eventdata) ...
62 % -- Inre Panel: Spara/Ladda Resultat
63 function fb_sim_spara_callback(source, eventdata) ...
64 function fb_sim_ladda_callback(source, eventdata) ...
65
66 % --- Radioknappsgrupp: Generell funktion för alla radioknappar ---
67 function rg_change_callback(source, eventdata, val) ...
68
69 % --- Edit: Generell funktion för alla editboxar ---
70 function fe_callback(source, eventdata) ...
71
72 % --- Vinkeldata hantering, diverse knappar och editboxar ---
73 function fe_vinkel_par_callback(source, eventdata) ...
74 function fb_vinkel_ber_callback(source, eventdata) ...
75 function fb_vinkel_par_ber_callback(source, eventdata) ...
76 function fb_vinkel_ber_callback(source, eventdata) ...
77 function fb_vinkel_lad_callback(source, eventdata) ...
78 function fb_vinkel_spa_callback(source, eventdata) ...
79
80 % --- Generella Funktioner ---
81 % -----
82 % Nedan följer vanliga funktioner som valts att sättas här istället för
83 % egna a-filer då de är rätt isynner till det grafiska gränssnittet.
84
85 % - Andra visuella parametrar
86 function diff_val_andra(source) ...
87
88 % - Enable av för parametrar/knappar/radio
89 function on(source) ...
90
91 % - Enable på för parametrar/knappar/radio
92 function off(source) ...
93
94 % - Simuleringsfunktion, anropar diffusionslösaren
95 function simulera(source) ...

```

Figur 25: Överblicksbild av koden i filen "main.m" där funktionerna är minimerade.

metrar. Detta genomfördes genom att så fort en parameter ändrats anropades en generell callbackfunktion vilken dels avgjorde om denna parameter var giltig, det vill säga var ett tal, samt sparade värdet av den i variabeln definierad av dess "UserData".