

# **Fuktrelasjoner for kommersiell bartrelast**

- effekter av tørketemperatur og prøvebitens lengde

Peder Gjerdrum



## Forord

Skogforsk fikk i 2000 i oppdrag å forestå et fire-årig utviklingsarbeid kalt *Trevirkets dynamiske fukttilpassing* for Moelven Soknabruket AS. Oppdraget har inngått i det brukerstyrte prosjektet *Tørkekvalitet*. Prosjektet har vært fulgt opp av en styringsgruppe bestående av Bjørn Sorteberg (Moelven Soknabruket, formann), Haumann Sund (Moelven Treindustri), Birger Eikenes/Olav Høibø (NLH), og Sverre Tronstad (NTI). Bjarne Hamar (Moelven Soknabruket) var prosjektleder frem til august 2001, deretter overtok Peder Gjerdrum. Prosjektet har arbeidet over et bredt spekter innen temaet tørkekvalitet, så som høvlingsegenskaper og skuruttakets betydning, tørking av impregnert last og fuktdynamikk i tørket tre.

Eksperimenter for å undersøke de sammenhenger som er nevnt i tittelen inngikk i prosjektplanene fra første stund. Alle prøver er hentet ut og preparert/tørket på Soknabruket, og de gode bekvemmeligheter knyttet til fabrikkens tørkelaboratorium var svært nyttige for arbeidet. Målingene tilknyttet betydningen av prøvebitens størrelse, lengdeeffekten, er i sin helhet utført på Soknabruket. Observasjonene av likevektsfuktighet i prøver tørket ved ulike temperaturer ble utført av Knut Magnar Sandland ved NTI. På Soknabruket har fabrikkssjef Bjørn Sorteberg og Thor Johnsrud, som ansvarlig for tørkene, men også en rekke andre personer fra driftsorganisasjonen, vist interesse for forsøkene og deltatt i den løpende diskusjon og praktiske gjennomføring. Norges Forskningsråd har støttet arbeidet økonomisk med betydelige midler. Utdrag av resultatene er presentert for internasjonale konferanser i regi av COST E15 *Advances in the drying of wood* (Gjerdrum 2001) og IUFRO fagkongress for tretørking i Romania i august 2003 (Gjerdrum 2003).

## Innhold

Forord .....	2
Innhold .....	2
Sammendrag .....	3
Innledning .....	4
Faglig bakgrunn .....	4
Formål .....	6
Metode, materiale, beregninger .....	6
Tørketemperaturens effekt .....	7
Undersøkelsen .....	7
Likevektsfuktighet (LVF) .....	9
Hysterese .....	10
Lengdeeffekt - prøvebitens størrelse .....	11
Undersøkelsen .....	11
Likevektsfuktighet (LVF) .....	12
Hysterese .....	13
Oppsummering - konklusjoner .....	15
Litteratur .....	16
Vedlegg .....	19

## Sammendrag

GJERDRUM, P. 2004. Fuktrelasjoner for kommersiell bartrelast – effekter av tørketemperatur og prøvebitens lengde. Rapport fra skogforskningen 1/04 : 1-19.

Problemstillinger knyttet til tørking av trevirke og tørkekvalitet hos de ferdige produkter er gjenstand for kontinuerlig og allsidig innsats, såvel vitenskapelig, som teknisk og merkantilt, og slike forhold tillegges stadig større kommersiell vekt.

Den komplekse natur av sammenhengen tre - fukt er på nytt bekreftet i det gjennomførte arbeidet. Trefuktigheten influeres simultant av mange faktorer, så som luftfuktighet (i omgivelsene), temperatur (i omgivelsene), trestykkets størrelse, trestykkets kvalitet og tørketemperatur. I denne rapporten presenteres resultater for enkeltstående effekter av <sup>1</sup>tørketemperatur og <sup>2</sup>prøvebitens lengde/kvalitet for gitte likevektsklima. Trefuktighet ble bestemt ved tørke/veiemetoden. De viktigste resultatene består i en tallfesting av sammenhengen mellom tørketemperatur og nedgang i likevektsfuktighet (LVF), og i påvisning av høyere LVF for lengre trestykker. Vanlig kommersiell trelast av gran ble benyttet, men resultatene forventes også å kunne anvendes for furu.

Eksperimentet for effekt av tørketemperatur benyttet planker fra 8 stokker tørket ved fire temperaturer fra 30 til 120°C. Små feilfrie prøver ble så preparert og benyttet for å bestemme LVF ved fire nivå for relativ luftfuktighet (RF) i intervallet 33 til 97 % RF, separat for henholdsvis adsorpsjon og desorpsjon. Resultatene viser at LVF reduseres med en faktor som øker proporsjonalt med kvadratet av temperaturen, slik at LVF ved 90°C er 95% og ved 120°C 88% av LVF for friluftstørket tre. Resultatene står i et rimelig forhold til sammenlignbare undersøkelser, herunder oppgitt effekt for tre varmebehandlet ved vesentlig høyere temperaturer. For vanlig industriell trelast tørket ved 70-80 °C betyr dette at LVF reduseres til ca. 97 % av LVF-verdiene oppgitt for friluftstørket trelast. Dette vil kunne ha praktisk betydning, og mest for de mest krevende tørkekvaliteter.

Lengdeeffekten ble undersøkt på 5 industrielt tørkede granplanker. Prøvebiter i 6 kombinasjoner av lengde og kvalitet fra 9 mm feilfri til 90 cm naturlig kvalitet inngikk. LVF ble bestemt for et gitt klima (40°C, 65% RF), separat for adsorpsjon og desorpsjon. Resultatene viser at LVF øker proporsjonalt med logaritmen av prøvebitens lengde. LVF for planker i full lengde kan være ca. 1,0 %-enhet høyere enn for helt korte prøver. Dessuten viste prøver av naturlig kvalitet 0,4 %-enheter lavere LVF enn feilfri prøver av samme lengde. Disse forholdene vil ha betydning for fuktighetseksperimenter med trelast av vekslende størrelse.

Også hysteres <sup>1</sup>økte proporsjonalt med lengdens logaritme, fra forholdstall 1,0 ved "mikroskopisk korte" biter til 0,87 for trelast i full lengde. LVF for desorpsjon er vesentlig mer lengdeavhengig enn LVF for adsorpsjon. Hysteresen økte fra ca. 1 %-enhet ved luftfuktighet 30% til ca. 2%-enheter ved 95% luftfuktighet. Resultatene tyder også på at tre tørket ved høyere temperaturer kan ha større hysteres.

*Nøkkelord: adsorpsjon, desorpsjon, hysteres, høytemperaturtørking, isoterm, likevektsfukt*

---

<sup>1</sup> Hysteres – en fysisk egenskap som "henger" etter, for eksempel dødgang på et ratt eller forskjellig LVF ved adsorpsjon og desorpsjon.

## Innledning

For skognæringen er det generelt ønskelig at trevirke skal bibeholde og helst styrke sin konkurransevne i forhold til andre produkter (substitutter). Dette fordrer at tre har mest mulig forutsigbare egenskaper; det motsatte kan føre til vansker under bruk. Varierende fuktighet vil uvegerlig medføre endringer i form, dimensjon og fysiske egenskaper. Markedet legger stadig sterkere vekt på slike faktorer, hvilket øker fokus på trefuktighet som viktig kvalitetsparameter. Behovet for å spesifisere og dokumentere middelfuktighet, spredning og gradient er voksende og gjelder hele Europa. Flere arbeider er lagt frem de siste ti-årene (INSTA 141, EDG 1994), og for tiden pågår et møysommelig arbeid for å utarbeide felles-europeiske standarder for tørkekvalitet med definerte og presise kvalitetsparametre. For trelastproduserende bedrifter blir det derfor ytterligere avgjørende å ha god kontroll med fuktigheten i trelasten som selges.

Ethvert klima der tre nyttes under praktiske forhold vil være i en dynamisk fluktuerende tilstand; treoverflaten vil tilsvarende gjøres til gjenstand for vekslende adsorpsjon og desorpsjon (oppfukning, uttørking). Døgnvariasjonene vil neppe trenge langt inn under overflaten, mens regn- eller tørkeperioder over noen dager eller uker har en dypere effekt. Årstidvariasjonene for trefuktighet har lenge vært dokumentert (f.eks. NTI 2003); de påvirker hele trekonstruksjoner. Ettersom fuktigheten hele tiden er i forandring, vil det også være fuktighetsgradienter i treet; og hysteresis utgjør et ytterligere kompliserende element. Krymping og svelling følger fuktutviklingen. Med volumendringene følger spenninger og deformasjoner i treet.

De senere årene er det gjort betydelige fremskritt i å forstå selve tørkeprosessen og de fysiske lovene som ligger til grunn. Gode modeller har muliggjort en betydelig effektivisering av tørkingen. Forskningsarbeidene utføres og drøftes i internasjonale nettverk og konferanser, så som COST E15 *Advances in the drying of wood* og IUFRO *Wood drying conferences*. Et større felles-europeisk prosjekt IMCOPCO (*Improvement of Moisture Content Measuring Systems and Testing Strategies to Enable Precise Process and Quality Control of Kiln Dried Timber*) søkte etter bedre metoder for å overvåke og styre tørkingen. Norske sagbruk har satset betydelig på å fornye den tekniske tørkeutrustningen. Ved NLH gis det undervisning i tretørking og et antall studenter har tatt hovedoppgave innenfor emnet. NTI har gjennom Tørkeklubben arbeidet med å øke forståelse og kompetanse ute på sagbrukene. Alt i alt bør vi derfor stå vel rustet til å møte utfordringene på tørkefronten.

## Faglig bakgrunn

Likevektsfuktighet (LVF) for tre finnes gjerne fremstilt i tabeller, funksjoner eller kurver. De fleste lærebøker i tretørking gir slike opplysninger. Således er Esping (1992) mye nyttet som oppslagsverk. Tabellverdiene er felles for alle treslag. De grunnleggende forsøk for å bestemme LVF har nyttet små feilfrie prøver av naturlig tørket virke, dvs. ved temperaturer under ca. 25 °C (jfr. for eksempel Fan et al. 1999). Verdiene er gitt som middel for adsorpsjon og desorpsjon. Aktuelle funksjoner for beregning av LVF ut fra relativ luftfuktighet for en gitt temperatur, ofte kalt isotherm, finnes beskrevet og utprøvet hos Avramidis (1989); et eksempel er gitt

i vedlegg. De bakenforliggende, grunnleggende teorier og modeller for de fysisk-kjemiske forhold i samvirke ved-vann og endringer i treets fysiske og mekaniske egenskaper er utførlig beskrevet av flere forfattere (f.eks. Siau 1995, Fan et al. 1999, Keeey et al. 2000).

Variasjon i LVF fra trestykke til trestykke, antagelig pga. variasjoner i fysisk-kjemisk sammensetning, og fuktdynamikk under alle praktiske klima gjør det svært vanskelig å bestemme fukttilpassning for vanlig, kommersiell trelast. Forsøkene har derfor alltid anvendt små prøvebitar. Erfaringer tilsier likevel at verdiene for LVF kan være betydelig mer nyanserte enn det de tabulerte og tradisjonelt brukte verdiene gir uttrykk for. Dels kan dette henge sammen med ulikheter mellom små feilfrie prøver og trelast i praktiske dimensjoner og dels med den behandling vi gir treet, i første rekke teknisk tørking.

Tørking ved høyere temperaturer enn 40-50 °C er i Europa et forholdsvis nytt fenomen de seneste tiår. For bartrevirke vil vanlig tørketemperatur i dag ofte være 70-80 °C (tørtemp i slutten av prosessen), men såkalt høytemperaturtørking (HT, over 100 °C) vinner etter hvert også innpass. All den tid det aller meste av trelasten blir tørket i tekniske anlegg, er det viktig å få verifisert LVF for vanlig handelsvare tørket ved disse temperaturrene.



Fig. 1. Klargjøring av trelast i lab.tørken.

Behandling av tre ved høye temperaturer er kjent å redusere LVF og gjøre virket mer dimensjonsstabil. Flere undersøkelser indikerer lavere LVF etter tørking eller behandling ved temperaturer over 100 °C (Giebeler 1983, Kolin 1997, Sandland 1998, Edvardsen og Sandland 1999). Derved bedres også dimensjonsstabiliteten. Dette forholdet synes å være knyttet til omdanning av hemicellulose, som er den mest hygroskopiske bestanddelen i tre. Tørking ved ca. 115 °C ble således funnet å forårsake endringer i vedstrukturen og begynnende nedbryting av hemicellulose (Alén et al. 2002, Terziev og Daniel 2002). Også ekstraktivstoffer påvirkes. Under tørkeforløpet transporteres de mot overflaten og anrikes der (Terziev 1996). Dette kan påvirke LVF. En radikal nedbryting av ekstraktivstoffene vil imidlertid først

finne sted over 160-200°C (Nuopponen et al. 2003). Et forholdsvis nytt treprodukt som markedsføres for spesielle bruksformål er ThermoWood®, varmebehandlet i inert atmosfære ved 180-210 °C (Finnforest 2003). Likevektsfuktigheten oppgis å være redusert til henimot det halve.

Fenomenet hystereser beskriver i relasjon til tretørking det forhold at LVF innstiller seg på en annen og lavere verdi ved adsorpsjon i forhold til ved desorpsjon. I et naturlig klima vil treoverflaten stadig utsettes for vekslende av- og oppfukning pga. variasjoner i klimaet. Effekten av hystereser er derfor spesielt betydningsfull for fuktutviklingen i virkesoverflaten. Prinsippene for fenomenet hystereser er vel kjente og beskrevet (Peralta og Bangi 1998, Time 2002). Hystereser oppgis enten som differansen ( $\geq 0$ ) eller forholdstallet ( $\leq 1$ ) mellom fuktighet ved desorpsjon og adsorpsjon.

Hysteresens størrelse er oppgitt til 2,8 %-enheter når trefukt er 22 %, 2,4 ved 13 % og 1,9 %-enheter ved 9 % trefukt, tilsvarende forholdstall på 0.8-0.88 (Peralta 1995). Resultatene er basert på korte (7 mm lange) prøver ved 30 °C. Shmulsky et al. (2001) undersøkte betydningen av prøvebitens størrelse og fant at fuktinnholdet økte med lengde fra mikroskopisk opp til 5 cm og at forholdstallet ad-/desorpsjon synker med økende lengder. For ”mikroskopisk korte” biter er dette forholdstallet 1,0, dvs. ingen hystereser. Forholdet ble forklart ved interne spenninger i treet som følge av krymping/svelling, og at disse spenningene påvirker treet's potensiale til å reagere med vann. Man har ment at hystereser ikke lenger er til stede ved omgivelsestemperatur over 80 °C (Malmquist og Söderström 1996, Böhner 1996). Dette kan da forklares ved overgang til mer plastiske egenskaper for veden, slik at muligheten for oppbygging av indre spenninger reduseres.

## **Formål**

Et par studentarbeider og virksomheten i tørkeseminaret i daværende Norske Skog FoU Trelast kan betraktes som forløpere eller forberedelser (Gjerdrum 1997, Hovde 1997, Elsener 1998). De fuktforhold man her observerte, samsvarte ikke fullt ut med vanlig oppgitte verdier for LVF. Det ble antatt at avvikene, iallfall delvis, kunne henge sammen med forskjellige fuktegenskaper for industrielt fremstilt trelast og små feilfri, friluftstørkede prøver. Delprosjektet ”Dynamisk fuktutvikling i tørket trelast” arbeidet med fuktforhold for slik kommersiell, teknisk tørket trelast. I de arbeidene som presenteres i denne rapporten, har hensikten vært å identifisere effekten av tørketemperatur og av tredimensjon, og kvantifisere disse effektene separat for LVF ved adsorpsjon og ved desorpsjon.

## **Metode, materiale, beregninger**

Det er gjennomført to uavhengige eksperimenter, ett for tørketemperatur og ett for lengdeeffekt. Sentrumslast av fersk gran (*Picea abies*) fremstilt for kommersiell bruk ble benyttet i begge eksperimentene.

Fuktighet ble gjennomgående fastsatt ved tørke/veie-metoden, med de usikkerhetsmomentene det innebærer. Mest betydningsfullt antas å være <sup>1</sup>gjenværende fukt ettersom tørkeluften inneholder noe fukt og <sup>2</sup>avdampning av ekstraktivstoffer

sammen med vannet. Da de mer nøyaktige metoder er svært arbeidskrevende, er tørke/veie-metoden den vanlig brukte standard- og referansemetode, og altså benyttet i denne undersøkelsen.

Fuktigheten er bestemt for hver enkelt prøvebit. Der ikke annet er oppgitt, er likevektsfukt (LVF) bestemt som middel av ad- og desorpsjon. Hysterese er bestemt enten som differansen mellom de- og adsorpsjon (positiv verdi), eller som forholdstallet mellom adsorpsjon og desorpsjon (verdi  $\leq 1.0$ ). Alle statistiske beregninger er utført i Statistica (2003). Isotermen i vedlegget er beregnet i Mathcad (2003).

## Tørketemperaturens effekt

### Undersøkelsen

For dette eksperimentet valgte vi parplanker fra 8 stokker, dvs. 16 planker, skåret som 50\*100 mm 2x uttak av ca. 15 cm grovt tømmer, tilfeldig utvalgt av den løpende produksjon. Fra toppenden av hver planke ble det kappet 4 biter (etter renkapping), hver av 60 cm lengde. Vi bedømte de 8 bitene fra hver stokk å ha såvidt mulig beskjeden variasjon i egenskaper seg imellom ("søsteriske egenskaper"). Toppenden ble valgt, ettersom den ut fra Soknabrukets erfaring har minst variasjon i ekstraktivemner som kan forstyrre den etterfølgende tørke/veie-måling. Alle bitene ble merket med stokknummer, endebeskyttet, pakket i plast og oppbevart i fryser opptil noen uker, inntil videre behandling.

Forsøket hadde fire behandlinger: fire tørkeprogram med temperaturer fra 30 til 120 °C i intervaller på 30 °C (tabell 1). Én tilfeldig bit fra hver stokk ble nyttet for hver behandling. Behandlingen ved 90 °C nådde ikke fastsatt temperatur og måtte gjentas. De øvrige bitene ble nyttet til å prøve ut behandlingsprogram og utgjorde ellers en ubenyttet reserve.

Tabell 1. Behandlinger, tørketemperatur

Temperatur, tørr føler, °C	Behandlings-tid, timer	Utlufting	Luft-fuktighet
30	504	ja	ingen kontroll
60	168	ja	90 % RF
90	72	begrenset	95 % RF
120	42	nei	pakket i Al-folie, fukt tilført

Temperaturen i veden, som under starten er lavere enn tørrtemperaturen pga. vannfordampingen, antas å ha vært nær oppunder de oppgitte tørr-temperaturer i sluttfasen. Behandlingen ved 30 °C illuderer friluftstørking/konvensjonell tørking. Den ble gjort i et Thermax tørkeskap med sirkulasjonsviften på laveste trinn. De to neste 60 °C og 90 °C, ble utført i et Thermax klimaskap (fig. 2) med god luft-sirkulasjon og styrt luftfuktighet; industriell tørking utføres vanligvis etter program



Fig. 2. Tørketemperatur.  
Prøvebiter i klimaskap.

som ligger mellom disse programmene. Behandlingen ved 120 °C, som illuderer HT-tørking, ble utført i tørkeskapet med stengt lufterventil og etterat bitene først var pakket i aluminiumsfolie. For behandlingene 90 og 120 °C var bitene også plassert inne i en metallboks, for ytterligere å redusere uønsket raskt fuktighetstap. Ved behandlingens slutt holdt bitene 6–18% fuktighet. Den etterfølgende akklimatisering over flere måneder i inneklimate utjevnet trefuktigheten til ca. 10 %.

Fra hver bit ble det tatt ut små, feilfrie prøver med tørrvekt ca. 10 g. Disse prøvene ble kondisjonert til høvelig fukt i klimarom for bruk til hhv. adsorpsjon og desorpsjon for de benyttede fuktnivåer (tabell 2).

Tabell 2. Benyttede saltløsninger med tilhørende luftfuktighet

Saltløsning	Kjemisk formel	Luftfuktighet, %
Magnesiumklorid	MgCl <sub>2</sub>	32,8
Natriumklorid	NaCl	75,3
Kaliumklorid	KCl	84,3
Kaliumsulfat	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,3

Likevektsfuktighet i prøvene ble oppnådd ved at prøvene suksessivt ble plassert i et klimakabinett. For å oppnå et stabilt klima benyttet vi følgende prosedyre (Siau 1995): Diffusjonstette bokser av pleksiglass var plassert inne i et klimakabinett, et klimaskap, med kontrollert temperatur på 25 °C. I hver boks fantes en skål med en mettet løsning av et ønsket salt, og dessuten et antall treprøver. Vekten av prøvene kunne overvåkes automatisk uten å åpne kabinettet, slik av målingene kunne avsluttes så snart likevekt var oppnådd. Fuktighet for hver prøvebit ble avslutningsvis bestemt ved tørke/veiemetoden.

Samlet besto forsøksplanen av 4 behandlinger/tørkeprogram \* 8 gjentak \* 4 klimaer \* 2 ad-/desorpsjon = 256 observasjoner. Av ulike årsaker bortfalt 20



observasjoner. De fleste (17 av de 20) skyldtes at det ikke lyktes å oppnå likevekt for det fuktigste klimaet (97,3 % RF). For å opprettholde den balanserte plan der alle gjentakene inngår, ble det valgt å erstatte manglende observasjoner med estimerte verdier etter følgende fremgangsmåte: Differanse i fuktighet mellom først ad- og desorpsjon og dernest i forhold til naboklimaet skulle opprettholdes for den manglende observasjon. Resultatene for det fuktigste klimaet vil være beheftet med større usikkerhet enn de andre fuktnivåene.

### Likevektsfuktighet (LVF)

Observasjonene er vist i fig. 3. For oversiktens skyld er punktene forbundet med linjer (splines), men uten at det ligger noen modell bak kurvene. Observasjonene for høyere tørketemperaturer ligger hele tiden lavere enn for konvensjonelt tørkeklima ( $T_t = 30^\circ\text{C}$ ).

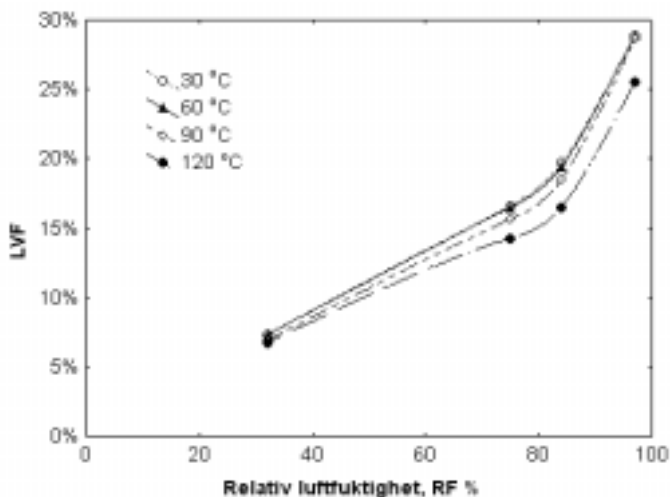


Fig. 3. Likevektsfuktighet for små, feilfrie prøver forbundet med utjevningskurver; hvert punkt er middel av 16 observasjoner, 8 de- og 8 adsorpsjon.

Effekten av tørketemperatur (fig. 4) er beregnet som forholdet mellom LVF ved aktuell temperatur og LVF for konvensjonell tørking. Samlet sett er det en tydelig tendens til progressiv nedgang i LVF etter tørking ved høyere temperatur. Tilleggs-effekten av luftfuktighet er uklar, med unntak av at standardavviket økte med økende RF. Beregnet standardavvik er mer ømfintlig enn middelerdi for antall observasjoner bak beregningen, samtidig som det var vanskelig å oppnå likevekt i bitene ved høy RF (se foran). Begge disse forhold kan forklare det økte standardavvik. I fig. 4 og i grunnlaget for den beregnede funksjon (I) er det dessuten tatt inn data for varmebehandlet tre hentet fra brosjyren for ThermoWood® (Finnforest

2003). Det antas, utfra rent matematiske betraktninger, at funksjonen dermed blir mer robust i området for de høyeste temperaturene vi tenker å nytte, opp mot 120 °C.

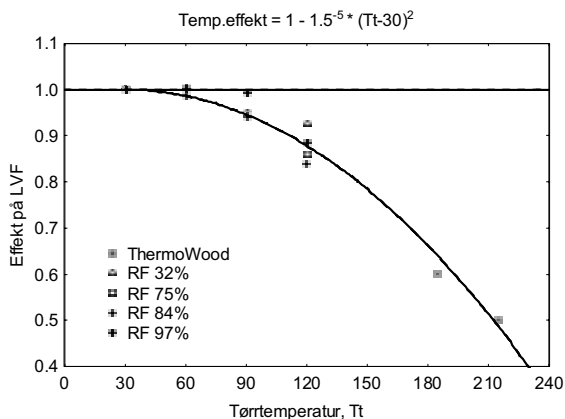


Fig. 4. Reduksjon i LVF med tilhørende funksjon; konvensjonell tørking er satt til 1.0; små feilfrie prøver supplert med data for ThermoWood.

$$Temp.effekt = 1 - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot (Tt - 30)^2 \quad (I)$$

Likevektsfuktighet for en gitt tørketemperatur i forhold til konvensjonell tørking kan beregnes etter formel (I),  $R^2 = 0,974$ . I middel var LVF redusert til 0,88 (av konvensjonell LVF) etter tørking ved 120 °C og til 0,95 ved 90 °C. Ved 60 °C var det bare en ubetydelig nedgang. Ved temperaturer som er vanlige for dagens industrielle tørking, ca. 70-80 °C, vil faktoren være ca. 0,97. Dette tilsvarer at LVF er redusert fra 15,0 % (eksempel tilsvarende 15 °C, 76 % RF) til ca. 14,6 %.

### Hysteres

Hysteresen økte for små feilfrie treprøver tørket ved høyere tørketemperaturer og med høyere luftfuktighet, fig. 5. Variasjonen mellom de 8 observasjonene som ligger bak hvert punkt i figuren er proporsjonal med hysteresens størrelse, med variasjonskoeffisient 0,37. Både av denne grunn, og pga. de enkelte manglende observasjoner (se foran), er resultatene for høyeste luftfuktighet minst nøyaktige.

$$Hysteres[e\%] = 0,7 + 0,016 \cdot e^{0,014 \cdot (Tt-30) + 0,040 \cdot RF} \quad (II)$$

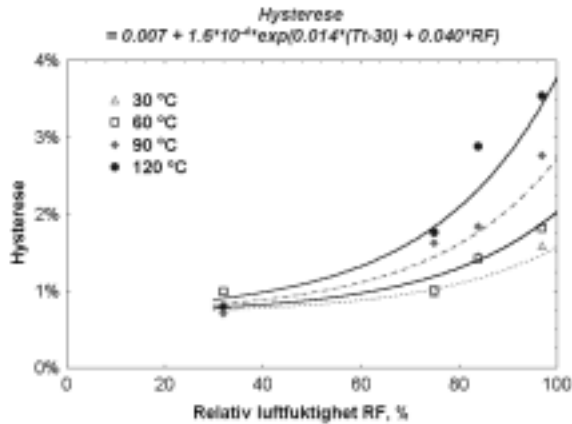


Fig. 5. Hysteresis; små feilfrie prøver.

Størrelsen på hysteresen (differanse mellom de- og adsorpsjon) kan beregnes ut fra formel (II); formelen er tilpasset observasjonene ved ikke-lineær regresjon og forklarer 56 % av variansen for de 128 observasjonsparene.

Hysteresis uttrykt som forholdstall viste følgende resultat: Forholdstallet var 0,92 ved 30 og 60 °C, 0,90 ved 90 °C og 0,87 ved 120 °C. Standardavviket innen hver temperaturgruppe var 0,045. I forhold til relativ luftfuktighet ble det ikke funnet noen enkel lovmessighet.

## Lengdeeffekt - prøvebitens størrelse

### Undersøkelsen

Her benyttet vi trelast skåret som 2x 45\*100 mm fra ca. 15 cm tømmer og tørket ved ca 75 °C i lab.tørke (fig. 1). 5 planker ble plukket ut med vekt på å oppnå varierende kvistsetting, årringmønster og være fra forskjellige stokker; forøvrig var utvelgelsen tilfeldig. Fra toppenden av hver planke ble det skåret fire meter-lange biter, som var forutsatt å ha "søsteriske egenskaper". To av bitene ble merket for adsorpsjon og to for desorpsjon, slik at rekkefølgen varierte for hver stokk, og akklimatisert i innklima i ti uker. For å oppnå en høvelig utgangsfuktighet ble de deretter kondisjonert slik: Prøvene for adsorpsjon ble lagt ved 45°C i et tørkeskap, mens de for desorpsjon først ble søkt i vann i to uker og deretter lagt i klimaskap ved 50 °C/90 % RF. Kondisjoneringen fortsatte til det ikke var nevneverdig vektendring.

Den videre behandling besto i lengdepreparering. Halvparten av prøvene ble kappet i prøvebiter av varierende lengde og kvalitet, den andre halvparten ble renkappet og forøvrig brukt i full lengde (tabell 3). Prøvene ble plassert i klimaskapet (fig. 6) under konstant klima 40 °C/65 % RF i henimot et halvt år (169 dager). Et par uregelmessigheter i klimaregulering inntraff, men syntes ikke å påvirke vektutviklingen i nevneverdig grad og ble derfor bedømt å ha mindre betydning for resultatet. De minste bitene oppnådde likevekt i løpet av kortere tid. Forsøket ble stoppet da det ikke lenger kunne observeres nevneverdig vektendring

for de lengste prøvene; man kan likevel ikke forutsette at disse bitene oppnådde perfekt likevekt. Ved forsøket slutt ble fukt bestemt for hver enkelt prøve i sin fulle størrelse ved tørke/veie-metoden.

Forsøket besto av 6 dimensjoner/kvaliteter \* 5 gjentak \* 2 ad-/desorpsjon = 60 observasjoner.

Tab. 3 Prøver for Lengdeeffekt

Lengde	Kvalitet	Antall 1)
9 mm	feilfri	2 * 5
39 mm	feilfri	2 * 5
121 mm	feilfri	2 * 5
121 mm	naturlig (noe kvist ol.)	2 * 5
303 mm	naturlig (noe kvist ol.)	2 * 5
894 mm	naturlig (noe kvist ol.)	2 * 5

1) ett sett for adsorpsjon ett for desorpsjon



Fig. 6. Lengdeeffekt; prøvebiter i klimaskap

### Likevektsfuktighet (LVF)

Likevektsfuktigheten ble funnet å øke proporsjonalt med logaritmen,  $\ln$  (fotnote <sup>2</sup>), av prøvebitens lengde, fig. 7. Dessuten hadde feilfri prøver 0,4 %-enheter høyere LVF, sammenlignet med prøver av samme lengde og naturlig kvalitet. Nivået for LVF, i dette tilfellet rundt 11 %, er knyttet til det valgte klimaet (40 °C, 65 % RF). Slik forsøket var lagt opp, er det ikke mulig å si noe direkte om sammenhengen mellom LVF, virkeskvalitet og prøvebitens lengde under andre klimaforhold.

<sup>2</sup> ) Logaritmeverdi	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Naturlig verdi (mm)	1	3	7	20	55	148	403	1096	2980	8103

Formelen for beregning av LVF for dette klimaet er gitt i (III). Modellen forklarer 67 % av variansen og residualene er normalfordelte og utgjør 0,13 %-enheter

$$LVF[\%] = 9,6 + 0,18 \cdot \ln(Lengde) + 0,4 \cdot (Kvalitet = Feilfri) \quad (III)$$

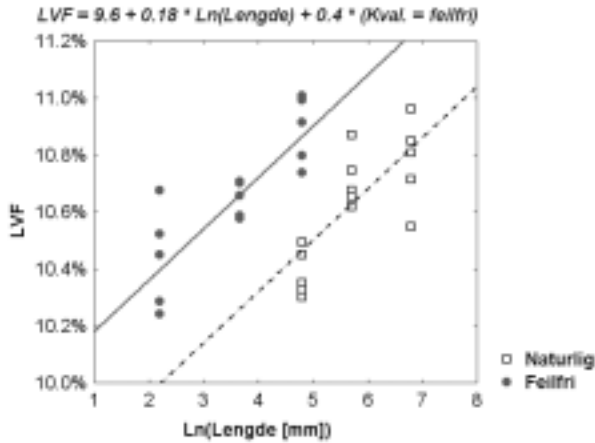


Fig. 7. Likevektsfuktighet for prøver av varierende lengde og kvalitet, med estimerte funksjoner

### Hysteresese

Hysteresesen – differansen i likevektsfukt for desorpsjon og adsorpsjon - ble funnet å være proporsjonal med den naturlige logaritme av prøvebitens lengde. I henhold til resonnementet hos Shmulsky et al. (2001) ble det estimert en funksjon med verdi null for svært korte biter, i vårt tilfelle 1 mm. Resultatet er fremstilt i formel (IV) og fig. 8. Ingen tydelig forskjell kunne påvises mellom feilfri prøver og naturlig kvalitet. Det er stor restspredning, RSME = 0,23 %-enheter, og bare 38 % av variansen er forklart.

$$Hysteresese[\%] = 0,18 \cdot \ln(Lengde[mm]) \quad (IV)$$

For ytterligere å beskrive dette forholdet, vises i figur (9) likevektsverdiene separat for adsorpsjon og desorpsjon. Det fremgår at desorpsjon er vesentlig mer lengdeavhengig (brattere kurve) enn adsorpsjon. En funksjon som beskriver de observerte verdier er beregnet ved ikke-lineær estimering (formel V,  $R^2 = 0,886$ ).

$$LVF = 9,6 + a1 \cdot \ln(Lengde[mm]) + 0,4 \cdot (Kvalitet = Feilfri) \quad (V)$$

Adsorpsjon :  $a1 = 0,09$

Desorpsjon :  $a1 = 0,27$

Hysteresis uttrykt som forholdstallet mellom likevektsfukt oppnådd ved adsorpsjon og desorpsjon er vist i figur (10). Ettersom vi fortsatt antar (Shmulsky et al. 2001, se foran) at det ikke skal være hysteresis for helt korte biter, skal forholdstallet da være 1.00. Modellen er gitt i formel (VI)

$$A / D - \text{forhold} = 1 - \frac{\ln(\text{Lengde}[\text{mm}])}{a2}$$

$$\text{Feilfri} : a2 = 56$$

$$\text{Naturlig} : a2 = 66$$

(VI)

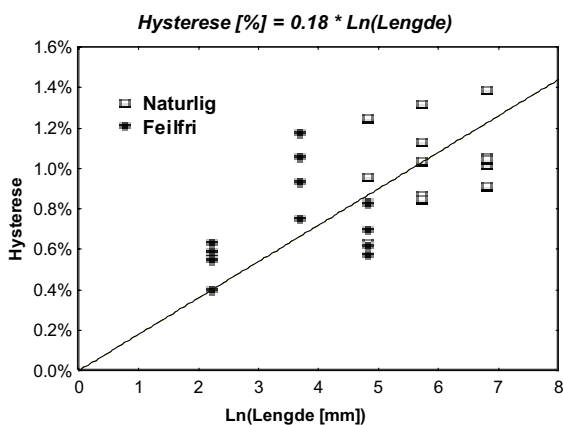


Fig. 8 Hysteresis øker med prøvebitens lengde

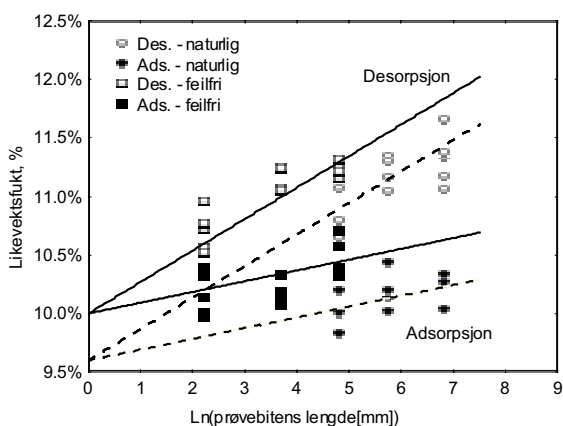


Fig. 9 Likevektsfukt separat for ad- og desorpsjon.

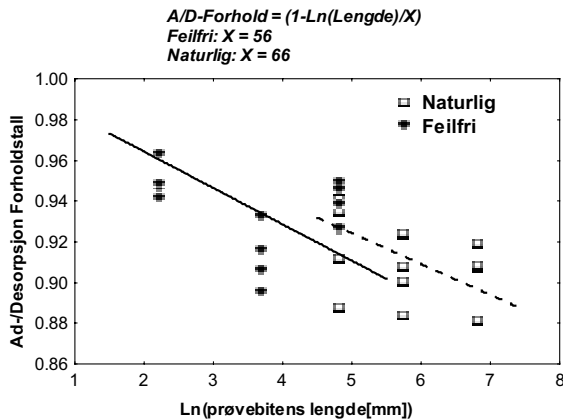


Fig. 10 Hysteresis angitt som forholdstallet mellom ad- og desorpsjon.

## Oppsummering - konklusjoner

Den komplekse sammenhengen mellom tre og fuktighet manifesterte seg også i denne undersøkelsen. Trefuktighet influeres av mange faktorer simultant, for eksempel luftfuktighet (i omgivelsene), temperatur (i omgivelsene), trestykkets størrelse, trestykkets kvalitet og tørketemperatur. I dette forsøket har det bare vært mulig å undersøke de enkeltstående effektene av 1) tørketemperatur og 2) prøvebitens lengde/kvalitet for gitte likevektsklima. De viktigste resultatene er knyttet til tallfesting av nedgang i LVF etter teknisk tørking ved høyere temperaturer, den noe overraskende sterke effekt av prøvebitens lengde og variasjonen i hysteresis under ulike forhold. Undersøkelsen er gjort for gran; ut fra generelle betraktninger om felles isotermer for alle treslag, antas resultatene også å være gyldige for furu.

Industriell tørking, slik dette utføres i dag, ble funnet å redusere LVF med ca. 0,4 %-enheter ved LVF = 15 %. En slik nedgang vil kunne ha praktisk betydning, og mest for de mest krevende tørkekvaliteter. I mange tilfeller vil imidlertid denne reduksjonen forsvinne i "støy" knyttet til utvalget av prøver, selve målingen og fuktdynamikken. Det minnes i denne forbindelse om at spredningen mellom enkeltstykker av tre akklimatisert gjennom lang tid aldri kom under standardavvik lik 0,6 %-enhet (Gjerdrum 1997). For de mest krevende tørkekvaliteter vil imidlertid en slik systematisk nedgang være av betydning. Selvom bare ett likevektsklima er undersøkt, må det ventes at faktoren, 97 %, også kan brukes for høyere og lavere verdier av LVF. Effekten for andre tørketemperaturer kan estimeres ved den oppgitte funksjon (I). Resultatene er i god overensstemmelse med tidligere arbeider for HT-tørking (bl.a. Edvardsen og Sandland 1999) og for varmebehandling (Finnforest 2003), selvom temperaturspranget her er for langt til å muliggjøre en direkte sammenligning.

Den sterke lengdeeffekten var noe overraskende med en økning av LVF på ca. 1 %-enhet fra prøvebiter på 5-10 mm til trelast av full lengde (med samme kvalitet, fig. 7). Det er usikkert om en lengdeeffekt av denne størrelse, og som viser en vedvarende effekt også for lengder utover 50-100 mm, kan forklares ved indre

spenninger i treet knyttet til krymping/svelling, som påvirker treets fuktpotensiale (Shumulsky et al. 2001). Prøver av naturlig kvalitet viste 0,4 %-enheter lavere fukt enn feilfri prøver. Forklaringen ligger antagelig i avvikende LVF i kvist pga. avvikende sammensetning av veden. Prøver av ulik kvalitet viste ingen forskjell i hysteres. Nivåforskjellen i LVF mellom små, feilfri biter i forhold til naturlig kvalitet antas ikke å ha nevneverdig betydning under praktiske forhold, ettersom det alltid tas små, feilfrie fuktprøver uavhengig av plankens egentlige kvalitet. Disse forholdene vil imidlertid ha betydning for fuktigheteksperimenter med trelast av vekslende størrelse. Hele denne problemstillingen knyttet til effekt av lengde og kvalitet synes å trenge ytterligere verifisering og analyse.

Hysteres er angitt som differansen mellom de- og adsorpsjon eller forholdstallet mellom dem. Det later til at differansen heller øker enn minker ved høyere tørketemperatur (fig. 5) og at den er større for lange enn for korte biter (fig. 9). Differansen øker hele tiden ved økende luftfuktighet (fig. 5), altså ved økende LVF. Likevektsfukt ved desorpsjon er sterkere lengdeavhengig enn ved adsorpsjon (fig. 9). Alt i alt fremviser hysteres et temmelig komplekst variasjonsmønster, som det vil være nødvendig å verifisere og bearbeide videre ved ytterligere empiriske og analytiske undersøkelser.

Beregning av LVF under ulike forutsetninger kan gjøres etter beskrivelsen i vedlegget.

## Litteratur

- Alén R, R Kotilainen og A Zaman 2002. Thermchemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180-225 °C. Wood Science and Technology 36: 163-171.
- Avramidis, S 1989. Evaluation of 'Three-Variable' Models for the Prediction of the Equilibrium Moisture Content in Wood. Wood Sci. Tech. 23: 251-258.
- Böhner G 1996. Überlegungen und Ergänzungen zum "Keylwerth-Diagramm". Holz als Roh- und Werkstoff 54:73-79.
- COST E15. Advances in the drying of wood, <http://www.vtt.fi/rte/bss/coste15/indexe.html>
- EDG 1994. Welling J (red.) EDG-recommendation - Assessment of Drying Quality of timber. European Drying Group c/o BFH, Hamburg. 28 s.
- Edvardsen K og KM Sandland 1999. Increased drying temperature - its influence on the dimensional stability of wood. Holz als Roh- und Werkstoff 57(3): 207-209.
- Elsener O 1998. Prediction of Moisture Content in Lumber of Spruce in Storage. Forestia FoU-rapp 2-98. ISSN 15-1237, 12 s. + vedl.
- Esping B 1992. Trätorkning 1a grunder i torkning. Trätekt, Stockholm. ISBN 91-8170-06-3. 234 p.
- Fan K, SG Hatzikiriakos og S Avramidis 1999. Determination of the Surface Fractal Dimension from Sorption Isotherms of Five Softwoods. Wood Sci. Tech. 33 (1999) 139-149
- Finnforest 2003. ThermoWood®. <http://www.finnforest.com>
- Giebel E 1983. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Warme/Druck-Behandlung. Holz als Roh- und Werkstoff, 41: 87 –94



- Gjerdrum P 1997. Trelasttørking ved Norske Skog Trelast's sagbruk. Rapport FoU Trelast 29-97.
- Gjerdrum P 2001. Dynamics of moisture adsorption in commercial softwood boards - the effect of temperature in a steady-state climate. Proceedings COST E15, 11-13 June 2001, VTT, Helsinki.
- Gjerdrum P 2003. The Connection between Kiln Temperature, Specimen Size and Equilibrium Moisture Content for Commercial Norway Spruce Timber. I Proceedings, 8. IUFRO Wood Drying Conference. <http://webe.unitbv.ro/il/iufro2003modific/postiufro.htm>
- Hovde HM 1997. Gjenoppfukning av tørket trelast av gran. Hovedoppgave, NLH/ISF. 70 s.
- INSTA 141. Timber – Sawn and Planned Timber of Softwood – Moisture Quality (NS\_INSTA 141).
- Keey RB, TAG Langrish og JFC Walker 2000. Kiln-Drying of Lumber. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-66137-9. 326 s.
- Kolin B 1997. Relation between Wood Movement and Thermal Pretreatment for Beechwood (*F. moesiaca* L.). IUFRO, July 7-12, 1997, Washington State University Pullman, Washington, USA. Final program and proceedings. Page 139.
- Malmquist L og O Söderström 1996. Sorption Equilibrium in Relation to the Spatial Distribution of Molecules – Application to Sorption of Water by Wood. *Holzforschung* 50(1996) 437-448.
- Mathcad 2003. <http://www.mathsoft.com>
- NTI 2003. Temasider. [http://www.treteknisk.no/fagartikler/Tre\\_og\\_fuktighet](http://www.treteknisk.no/fagartikler/Tre_og_fuktighet)
- Nuopponen M, T Vuorinen, S Jämsä, Sog P Viitaniemi 2003. The effects of heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. *Wood Sci Technol* 37: 109-115.
- Peralta PN 1995. Sorption of moisture by wood within a limited range of relative humidities. *Wood and Fibre Science* 27(1): 13-21
- Peralta PN og AP Bangi 1998. Modelling wood moisture sorption hysteresis based on similarity hypothesis. *Wood and Fibre Science* 30: 48-55 og 148-154
- Shmulsky R, K Kadir og R Erickson 2001. Effect of sample geometry on EMC and moisture hysteresis of red oak (*Quercus sp.*). *Wood and Fibre Science* 33(4): 662-666
- Siau JF 1995. Wood: influence of moisture on physical properties. Virginia Tech, Keene. ISBN 0-9622 181-0-3. 227 s.
- Statistica 2003. Statistical Textbook <http://www.statsoft.com/>
- Terziev N 1996. Low-molecular weight sugars and nitrogenous compounds in Scots pine. Silvestris, dr.avhandling SLU, Uppsala.
- Terziev N og G Daniel 2002. Industrial Kiln Drying and its Effect on Microstructure, Impregnation and Properties of Scots Pine Timber Impregnated for Above Ground Use. *Holzforsch.* 56 (4): 434-439.
- Time B 2002. Studies on hygroscopic moisture transport in Norway spruce (*Picea abies*). *Holz als Roh- und Werkstoff* 60: 271-276 (part 1) and 405-410 (part 2).
- Zurits C, RP Singh, SM Moini og SM Henderson 1979. Desorption isotherms of rough rice from 10 °C to 40 °C. *Trans ASAE* 22:433-440. Referert etter Avramidis (1989)



## Vedlegg

Formel for beregning av isoterm for tre. Beregningen gjøres med Zuritz/Avramidis (1989) formel (nedenfor), der nivåfaktoren N bestemmes ut fra resultatene beskrevet foran for å kompensere for effekt av tørketemperatur og prøvebitens lengde, eller for å beregne separate verdier for ad- og desorpsjon.

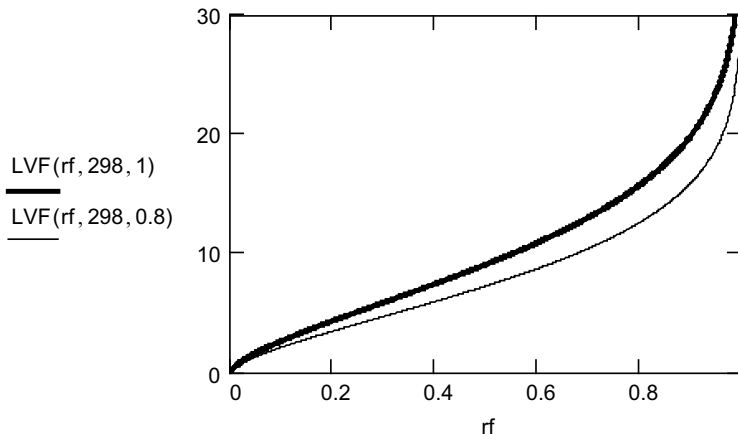
-----

*Aktuelle formler som kan beskrive fukt-isotemer for tre er evaluert av Avramidis (1989). Han modifiserte og estimerte parametre for en generell formel tidligere tatt frem og nyttet for ris av Zuritz et al. (1979), og konkluderte med at denne ga best tilpassning.*

$c1 := -6.46$	$c1...c4$ parametre bestemt av Avramidis (1989)
$c2 := 0.13$	etter obs. referert i USDA Wood Handbook 1955
$c3 := 110$	$rf$ relativ luftfuktighet, andel
$c4 := -0.75$	$T$ temperatur, Kelvin (298 K tilsvarer 25 °C)
$Tc := 647.1$	$Tc$ kritisk abs. temperatur for vann i Zuritz modell

**N** Nivåfaktor, tilføyet her, brukes for å korrigere LVF for effekt av tørketemperatur, lengde og separate kurver for ad-/desorpsjon

$$LVF(rf, T, N) := N \cdot \left[ \frac{-T \cdot \ln(1 - rf)}{c2 \cdot \left(1 - \frac{T}{Tc}\right)^{c1}} \right]^{c3 \cdot T^{c4}}$$



## Rapport fra skogforskningen

*Utkommet i 2003:*

- 1-03 *Ketil Kohmann: Vekst og utvikling relatert til nattlengde for ulike provenienser og frøplantasjematerialer av gran (Picea abies (L.) Karst.)  
Growth and development of spruce seedlings related to night length reaction, bud set and flushing for different provenances and seed orchard materials*
- 2-03 *Bernt-Håvard Øyen: Tynning i granskog på Sørlandet – effekter på tilvekst, dimensjon og økonomi*
- 3-03 *Volkmar Timmermann: Skogoppsynets overvåkingsflater. Vitalitetsregistreringer 2003. Forest Officers' Monitoring Plots. Vitality survey 2003*
- 4-03 *Svein Solberg, Kjell Andreassen, Gro Hysten, Wenche Aas: Overvåkingsprogram for skogskader. Årsrapport 2002. Norwegian monitoring programme for forest damage. Annual report 2002*