

Lufthastighet, utjevning og avkjøling under tørkeprosessen – betydning for tørkekvalitet

Air velocity, equalization and cooling during the drying process – significance for drying quality

Saksbehandler: Knut Magnar Sandland, Ylva Steiner, Henning Horn
Finansiering: Norges forskningsråd og Tørkeklubben
Dato: Oktober 2010

Sammendrag

Det har vært fokusert på følgende områder:

- Lufthastighet og lufthastighetsfordeling underveis i tørkeprosessen.
- Effekten av utjevning og kondisjonering, både i kombinasjon eller hver for seg.
- Utførelse av avkjølingsfasen i slutten av tørkeprosessen.

Effekten av de forskjellige lufthastighetene begynner å vise seg klart i området ved 25-30 % trefuktighet, dvs. at lufthastigheten får mindre betydning ved trefuktigheter under dette nivået. Forsøkene viser at det er muligheter for å redusere lufthastigheten underveis i tørkeprosessen, men at det samtidig må foretas tilpasninger av tørkeskjema når dette utføres i en industriell tørkeprosess.

Tetting av truckstrømellomrom hadde, overraskende nok, ingen effekt på lufthastigheten i strømellomrommet. Dette er trolig på grunn av de komplekse luftstrømningene i tørkekammeret.

Når en utjevningsfase blir brukt på slutten av tørkeprosessen for å redusere variasjonen i fuktighet, vil den på samme tid redusere yteherdingsnivået betraktelig. Den største reduksjonen i yteherding under utjevning oppnås i løpet av de første ti timene. Etter det er reduksjonen i yteherding relativt liten, og da er det variasjonen i trefuktighet som alene avgjør hvor lang utjevningsfasen skal være. Ved strenge krav til yteherding kan det være vanskelig å oppnå god nok kondisjoneringseffekt med en utjevningsfase alene. Da må det utføres en kort kondisjoningsperiode i tillegg.

Stikkord: Lufthastighet, utjevning, avkjøling, tørkekvalitet
Keywords: *Air velocity, equalization, cooling, drying quality*

Resultatene viser at yteherdingen under avkjøling er relativt stabil for alle behandlingene. Kun basert på disse resultatene, er det ikke nødvendig å ha en kontrollert avkjøling i tørken når det gjelder hensynet til yteherding og sprekker/mikrosprekker. Det er dog viktig å merke seg at utendørstemperaturen i denne studien var ca. 0-4 °C. I kaldere klima enn dette, må det undersøkes mer før en eventuell konklusjon kan trekkes.

Summary

The following areas have been focused on:

- Air velocity and air velocity distribution during the drying process.
- The effect of equalization and conditioning, both in combination or separately.
- Execution of the cooling phase at the end of the drying process.

The effect of the different air velocities start to show clearly in the area around 25-30 % moisture content, i.e. the air velocity has less significance at moisture contents below this level. The trials show that there are possibilities for reducing the air velocity during the drying process, but when performed in an industrial process this requires some adjustments of the drying schedule.

Surprisingly, sealing of batten spaces had no effect on the air velocity in the sticker spaces. This is probably due to the complex air flows in the drying chamber.

When an equalizing phase is used at the end of the drying process to reduce the variation in moisture content, it will at the same time reduce the case hardening level considerably. The biggest reduction in case hardening during equalizing is obtained during the first ten hours. After that the reduction in case hardening is relatively small, and then the variation in moisture content alone decides how long the equalizing phase should be. At strict demands for case hardening, it can be difficult to accomplish a sufficient conditioning effect with an equalizing phase alone. Then there must be performed a short conditioning phase in addition.

The results show that the case hardening during cooling is relatively stable for all treatments. Only based on these results, it is not necessary to have a controlled cooling in the dryer when it comes to the consideration of case hardening and checks/ micro checks. However, it is important to note that the outdoor temperature in this study was about 0-4 °C. In colder climate than this, more research needs to be done before a possible conclusion can be drawn.

Forord

Denne rapporten beskriver resultatene i prosjektet "Produktrettet effektivisering av tørkeprosessen", som er gjennomført i regi av Tørkeklubben. Målet med prosjektet har vært å øke kunnskapen på viktige områder for å utføre tørkeprosessen på en effektiv måte ut fra de kravene som blir stilt til trelastens kvalitet.

I prosjektarbeidet har det inngått både forsøk og egenanalyser hos Tørkeklubbens medlemsbedrifter, samt ulike laboratorieforsøk ved Treteknisk.

Norges forskningsråd har finansiert prosjektet sammen med Tørkeklubben.

Takk til alle som har bidratt med finansiering og egeninnsats for å få gjennomført prosjektet!

Innhold

Sammenheng.....	3
Summary	5
Forord	6
1 Innledning.....	8
2 Lufthastighet.....	9
2.1 Generelt om lufthastighet	9
2.2 Forsøk med tetting av truckstrø.....	11
2.2.1 Materiale og metoder	11
2.2.2 Resultater	12
2.2.3 Diskusjon og konklusjoner	13
2.3 Forsøk med reduksjon av lufthastighet	13
2.3.1 Forsøk med reduksjon av lufthastighet i laboratorietørke	13
2.3.1.1 Materiale og metoder.....	13
2.3.1.2 Resultater.....	14
2.3.1.3 Diskusjon og konklusjoner	18
2.3.2 Forsøk med reduksjon av lufthastighet i industriell tørke	18
2.3.2.1 Materiale og metoder.....	18
2.3.2.2 Resultater.....	19
2.3.2.3 Diskusjon og konklusjoner	20
3 Utjevning og kondisjonering.....	20
3.1 Generelt om utjevning og kondisjonering.....	20
3.2 Forsøk med utjevning og kondisjonering.....	21
3.2.1 Materiale og metoder	21
3.2.2 Resultater	23
3.2.3 Diskusjon og konklusjoner	29
4 Avkjøling.....	29
4.1 Generelt om avkjøling	29
4.2 Forsøk med forskjellige avkjølingsmetoder.....	30
4.2.1 Materiale og metoder	30
4.2.2 Resultater	33
4.2.3 Diskusjon og konklusjoner	36
Litteratur	37

1 Innledning

En rekke av treproduktenes egenskaper kan relateres til hvordan tørkeprosessen har blitt utført. Det er derfor svært viktig å utføre denne på en optimal måte for å få treprodukter med ønskede egenskaper. I de siste årene har det blitt en stadig sterkere fokusering på tørkekvalitet, noe som bl.a. har resultert i nye europeiske standarder for tørkekvalitet.

Generelt ligger norsk trelastindustri langt fremme når det gjelder tørkekvalitet. I de siste 10-15 årene har det blitt gjennomført ulike typer prosjektarbeid, bl.a. i Tørkeklubben, som har bidratt til dette. Her kan det nevnes spesielt studier på kondisjoneringsfasen for å redusere/eliminere indre spenninger i trevirket, bruk av toppbelastning for å redusere vridningsdeformasjoner, samt evnen til å treffe ønsket middelfuktighet og spredning i trelasten etter tørking.

I Norge blir i praksis all trelast tørket med konvensjonell varmluftstørking, enten i kammer- eller kanaltørker. Trelasten gjennomgår et tørkeforløp som består av ulike faser, og tørkeskjemaene er i en kontinuerlig prosess for forbedring. Den største utfordringen i denne forbedringsprosessen er å balansere mellom tørkekapasitet og effektivitet på den ene siden og tørkekvalitet på den andre. I tillegg kommer energiforbruk inn som en viktigere og viktigere faktor. Det er viktig å se på totaløkonomien i utførelsen av tørkeprosessen, slik at innsatsen står i forhold til verdien på produktene.

Tørkeanleggene til norske trelastbedrifter er av ulik alder og beskaffenhet, noe som fører til at det er nødvendig med mange individuelle tilpasninger ved optimalisering av tørkeprosessen for hver enkelt bedrift. I dette arbeidet er det svært viktig å ha god kunnskap og kompetanse med hensyn til alle enkeltfasene som en tørkeprosess består av.

Selv om nivået generelt er bra i Norge når det gjelder konvensjonell varmluftstørking, er det imidlertid behov for ny kunnskap på en del områder som har stor betydning for å kunne oppnå en ytterligere optimalisering og effektivisering av tørkeprosessen. På bakgrunn av dette har det i prosjektet vært fokusert på følgende områder:

- Lufthastighet og lufthastighetsfordeling underveis i tørkeprosessen.
- Utførelse av avkjølingsfasen i slutten av tørkeprosessen.
- Effekten av utjevning og kondisjonering, både i kombinasjon eller hver for seg.

2 Lufthastighet

2.1 Generelt om lufthastighet

Lufthastigheten og hvordan den varierer i en trelasttørke, er viktige faktorer når det gjelder tørketid og jevnhet i tørkekvaliteten. Viftene i tørkene bruker generelt mest elektrisitet på sagbrukene, noe som tilsier at det er interessant å se på muligheten for å redusere viftehastigheten underveis i tørkeprosessen. Likeledes kan sammenhengen mellom viftehastighet og energiforbruk beskrives med en funksjon opphøyd i tredje, dvs. at en halvering av viftehastigheten fører til at energiforbruket reduseres ned til en åttendedel. Derfor kan til og med små reduksjoner i viftehastighet føre til en betydelig reduksjon i energiforbruket (Vranizan 1986, Esping 1992, Salin 2001, Wengert 2006). Det er begrenset med systematiske forsøk som er utført på dette området, og de forsøkene som har blitt gjort, har vært på treslag som ikke er særlig vanlige på skandinaviske sagbruk (Simpson 1997, Torgeson 1951).

Den sirkulerende tørkeluften har tre funksjoner: Å transportere fuktighet bort fra virket, å transportere varme til virket og å gi jevn relativ luftfuktighet og temperatur gjennom hele kammeret (Eckelman & Baker 1976, Bachrich 1980). Kapillærtransport av vann er mye raskere enn diffusjon. Dette fører til høy vanntransport når trevirket inneholder mye fritt vann, og lav vanntransport når det bare er bundet vann igjen i trevirket. Derfor bør kravene til lufthastighet være mindre når det frie vannet er fjernet og det bare er bundet vann til stede (Lamb 2002). Fibermetningspunktet kunne derfor være et passende punkt for å redusere lufthastigheten (Torgeson 1951). Utfordringen er imidlertid at fibermetningspunktet vil nås på forskjellige tidspunkt i tverrsnittet av trelasten, avhengig av den fuktighetsgradienten som oppstår.

Under tørkeprosessen tørker plankene raskere nær overflaten enn i midten. Dette fører til en fuktighetsgradient i tverrsnittet av plankene, og at områdene nær overflaten på plankene vil nå fibermetningspunktet før den gjennomsnittlige fuktigheten gjør det. Dette fører til at vannet nær overflaten på trevirket diffunderer ut, dvs. tørker langsommere. Dette kan gjøre det mulig å redusere lufthastigheten før gjennomsnittlig trefuktighet er ved fibermetningspunktet. Lamb (2002) og Wengert (2006) ser muligheter for å gradvis redusere lufthastigheten fra 40 % trefuktighet ned mot 20 %, hvilket er grensen for at lufthastigheten har noe å si. Andre studier setter også en øvre grense for når økt lufthastighet øker tørkeraten til 40-50 % (Simpson 1997).

En annen viktig faktor for behovet for en viss lufthastighet, er grensesjiktet mellom trevirkets overflate og tørkeluften. I tverrsnittet av strømmellomrommet vil lufthastigheten være høyest midt imellom flørne. Jo nærmere overflaten på plankene, desto høyere motstand møter luften, og lufthastigheten minker mot null rett ved overflaten til plankene (Esping 1992). Dette fører til et grensesjikt ved overflaten på plankene hvor luften beveger seg svært langsomt, hvilket fører til en reduksjon i tørkerate (Salin 2001). Når luften beveger seg over en overflate er strømmingen laminær, dvs. lineær strømming i strømningsretningen. Etter en stund vil luftstrømmingen bli turbulent. Reynolds nummer kan brukes for å finne hvilken strømming som vil oppstå (Siau 1984). Denne turbulente strømmingen gjør grensesjiktet tynnere og gir da bedre tørkeforhold. Avstanden før strømmingen blir lineær, er kortere jo høyere lufthastigheten er (Siau 1984, Wengert 2006). Dette betyr at en for lav lufthastighet gir et utilfredsstillende tykt grensesjikt som forsinker tørkeprosessen.

I et storskala tørkekammer er det noen viktige faktorer som gjør en reduksjon i lufthastighet vanskelig. Trelasten i tørken har varierende startfuktighet. Denne variasjonen minker under tørkeprosessen, men vil likevel påvirke behovet for en viss lufthastighet. Dersom gjennomsnittlig trefuktighet legges til grunn for en reduksjon av lufthastigheten, vil tørkeraten til de fuktigste plankene bli redusert. Dette leder til en enda større variasjon i fuktighet (Culpepper 2000). Derfor må ikke lufthastigheten reduseres for tidlig i tørkeprosessen.

Når luft blåses inn i trelasten, har den en gitt relativ luftfuktighet og temperatur. Når luften går gjennom kammeret, synker temperaturen, og den relative luftfuktigheten øker, hvilket fører til ujevne tørkeforhold i kammeret. Denne variasjonen øker med økt blåsedybde, men kan reduseres med reverserende vifter (Salin 2001). Med reverserende vifter får begge sider i kammeret alternerende tørre og varme perioder og kalde og fuktige perioder. Dette gjør sidene mer uniforme, men i midten er forholdene de samme som ved ikke-reverserende vifter. Det vil derfor fortsatt være en variasjon i blåsedybden. Denne variasjonen kan bli ytterligere redusert med høy lufthastighet, som tilfører mer varme og holder relativ luftfuktighet på ønsket nivå (Salin 2001).

Et annet problem i mange tørker er variasjonen i lufthastighet i tørkekammeret. En stor variasjon i lufthastighet kan føre til en stor variasjon i slutfuktighet. Luftsirkulasjonen kan reguleres ved hjelp av kammerdesign og flaps for å hindre lekkasje av luft på sidene av trelasten (Riepen & Paarhuis 1999). I en tørke med liten variasjon i lufthastighet, er det et stort potensial for å redusere lufthastigheten underveis i tørkeprosessen, men i en tørke med dårlige lufthastighetsforhold, vil en reduksjon i lufthastighet måtte styres etter den laveste lufthastigheten. Dette kan i verste fall gjøre det umulig å redusere lufthastigheten underveis i tørkeprosessen.

Salin (2001) poengterer at når viftfrekvensen reduseres, produserer de mindre varme. Denne varmen må kompenseres for ved hjelp av varmebatteriene (forutsatt at varmen fra viftene tilføres tørkeluften). Dette fører til et skifte i energibruk, fra elektrisk til termisk energi. Siden prisene på energi gjør det mindre kostbart å kompensere med varme, er dette oftest ønskelig (Esping 1992, Vranizan 1986).

Tørkene i dag har et mer uniformt klima og en mer uniform lufthastighet enn tidligere, og det er mulig å justere viftfrekvensen etter eget ønske. Dette burde gi gode muligheter for å redusere lufthastigheten uten at det påvirker tørkekvaliteten. I dag, når energiprisene øker, trengs det mer kunnskap om mulighetene for å redusere lufthastigheten. For å kunne ta økonomisk og miljømessig riktige beslutninger i industrien trengs mer informasjon om mulighetene for dette. Målet med dette forsøket er å analysere effekten av lufthastighet på tørkeraten til trevirke, for å finne når i tørkeprosessen og hvor mye lufthastigheten kan reduseres uten at det påvirker tørkeraten til trevirket.

2.2 Forsøk med tetting av truckstrø

2.2.1 Materiale og metoder

I forsøket ble det brukt to identiske tørker ved Haslestad Bruk AS som var ett år gamle, med toppflaps integrert i trykkrammene og med sideflaps. Hver tørkerommet fire pakker i høyden og fem ranker i dybden. Pakkene var 1,5 m brede, 1,5 m høye og 6 m lange, med 50 mm x 100 mm granplanker med fallende lengder. Avstanden mellom trelastpakkene og gulvet er minimal i disse kamrene, og derfor representerer truckstrømellomrommet den antatt største andelen av lekkasjeluften.

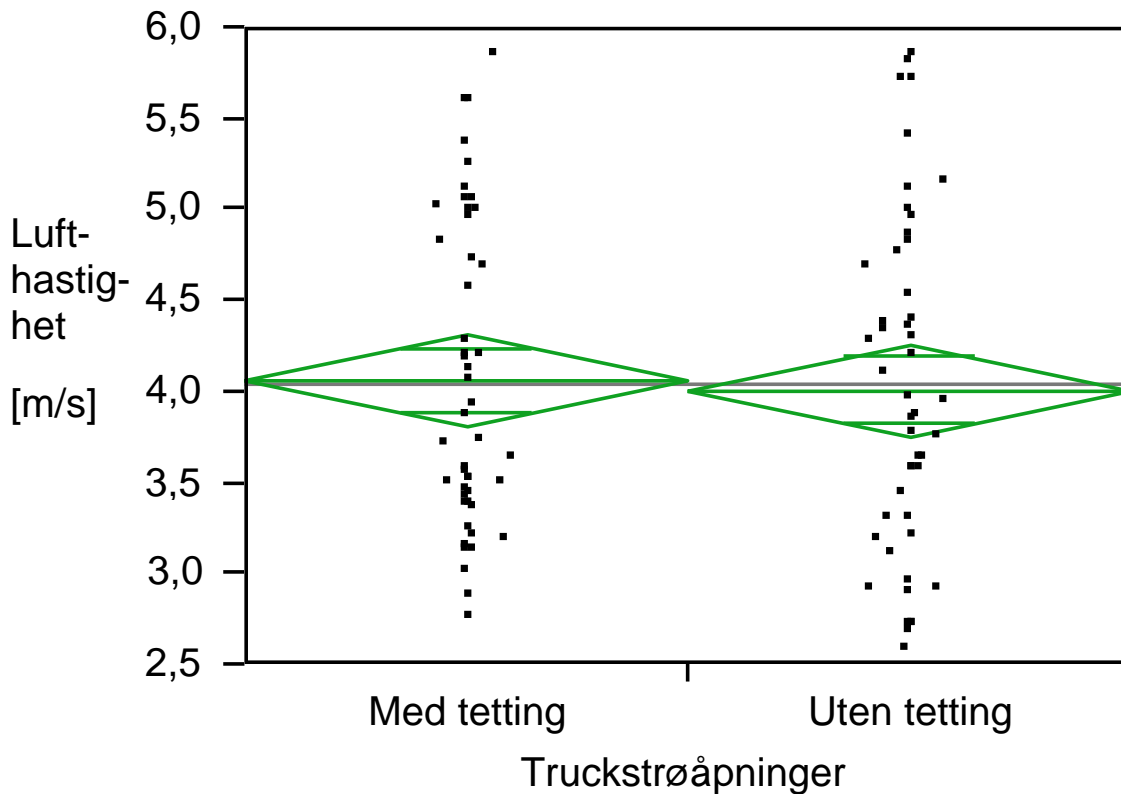
Truckstrømellomrommene ble tettet i det ene kammeret for å optimalisere lufthastighetsforholdene. Tettingen ble gjort med 100 mm brede bord, som ble spikret fast til truckstrøene på begge sider av truckstrømellomrommene. Siden lasten hadde fallende lengder, ble tettingen i endene ikke helt tilfredsstillende.

Lufthastigheten ble målt med et termoanemometer på 86 forskjellige steder på utblåsningssiden; seks steder over og under pakkene, fire på hver side av trelasten, 18 i strømellomrommet og 12 i strømellomrommet på hver pakke.

Trefuktighet ble målt ved tørke-/veiemetoden på prøver tatt fra fem planker i seks pakker i hver tørkeomgang. Totalt ble det tatt 30 prøver før tørking og 30 etter tørking.

2.2.2 Resultater

Figur 1 viser resultatene fra de to omgangene med og uten tetting av truckstrøpninger.



Figur 1. Lufthastighet i strø mellomrommet med og uten tetting av truckstrøpningene. Den horisontale streken i hver av firkantene viser middelverdien, mens det øverste og nederste hjørnet viser grensene for et 95 % konfidensintervall for middelverdien. Punktene i figuren viser verdien for hver enkeltmåling.

Det er en tendens til at lufthastigheten er lavere når truckstrøpningene ikke er tett, men denne forskjellen er ikke statistisk sikker.

Det ble funnet at slutfuktigheten var høyere i kammeret med tetting av truckstrø mellomrommet, men dette antas å bero på en tilfeldig variasjon i virkesegenskaper (f.eks. startfuktighet).

2.2.3 Diskusjon og konklusjoner

Tetting av truckstrømellomrom hadde, overraskende nok, ingen signifikant effekt på lufthastigheten i strømmellomrommet. Dette er trolig på grunn av de komplekse luftstrømningene i tørkekammeret. Mer omfattende målinger av lufthastighet i kammeret ville trolig kunne forklare hvor den "ekstra" luften tar veien. Hvis det hadde vært faste lengder på trelasten, antas det at effekten hadde blitt tydeligere. Målingene viste høyere slutfuktighet for partiet med tette truckstrømellomrom. Siden tettingen ikke hadde noen effekt på lufthastigheten, ville det være mer logisk at det ikke var noen effekt på fuktigheten. Den høyere fuktigheten kan kun forklares med forskjeller på grunn av at sammenligningen er mellom to partier og to tørker.

2.3 Forsøk med reduksjon av lufthastighet

2.3.1 Forsøk med reduksjon av lufthastighet i laboratorietørke

2.3.1.1 Materiale og metoder

Seks planker (2xlog) av gran (*Picea abies* L. Karst.) med dimensjonen 50 x 100 mm ble plukket tilfeldig ut fra en produksjonsserie på Romerike Trelast AS. Disse plankene ble kappet i sju 500 mm lange biter, som ble merket med plankenummer og nummer fra hvor i planken (rot til topp) den var tatt. For å unngå påvirkning av endetørking ble endene forseglet med silikon (Våtromssilikon 193 Essve). Bitene ble pakket i plastikk og plassert i en fryser for å unngå uttørking og mugg. Før tørking ble bitene tint i 5 °C i tre dager. Startfuktigheten var ca. 80 % og basisdensiteten var 407 kg/m³.

Eksperimentet ble utført i en labtørke med seks plankebiter i hver tørkeomgang. Plankebitene ble plassert mellom to sponplater og strø med en tykkelse på 22 mm. Tørkeskjemaet hadde en konstant tørrtemperatur på 70 °C og en avtagende våttemperatur. Slutfuktigheten ble simulert i TORKSIM (Tråtek 2001) til å bli 13 %. Sju programmer med samme tørkeskjema, men med varierende viftefrekvens, ble utarbeidet (Tabell 1). For å redusere eventuelle effekter av plankenummer og posisjon i planke på tørkingen, ble plankebitene fordelt systematisk mellom programmene.

Sponplatene absorberte noe fuktighet under tørkingen, og ble noe deformert. Denne deformasjonen var veldig liten og ble antatt ikke å påvirke lufthastigheten.

Tabell 1. Reduksjon i lufthastighet for program A-F.
MC er forventet fuktighet i henhold til TORKSIM.

Tid [timer]	Trefukt. [%]	Lufthastighet [m/s]					
		A	B	C	D	E	F
0	80	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
30	50	5,0	1,9	5,0	0,7	1,9	3,2
36	40	5,0	1,9	3,2	0,7	1,9	3,2
42	30	5,0	0,7	1,9	0,7	1,9	3,2
66	20	5,0	0,7	0,7	0,7	1,9	3,2

Lufthastigheten ble målt med et termoanemometer (VelociCalc Plus 8384A med en nøyaktighet på $\pm 3\%$, eller $\pm 0,015$ m/s) i midten av strø mellomrommet. Lufthastigheten ble målt gjennom hele tørkeforløpet. For program A og B ble lufthastigheten målt rett før veiing av plankebitene. For program C-F ble lufthastigheten logget hver time, og et gjennomsnitt for timen før veiing ble regnet ut. Forskjellen mellom de to metodene var liten.

Plankebitene ble veid før og under tørking. For hver veiing ble de seks plankebitene tatt ut av tørken og veid individuelt. Plankebitene var ute av tørken i maks. fem minutter, og effekten av dette antas neglisjerbar. Tidspunkt for målinger ble basert på simuleringer i TORKSIM. Tidspunkt som ble brukt korresponderte med en trefuktighet på 50 %, 45 %, 40 %, 35 %, 30 %, 25 %, 20 % og 13 %.

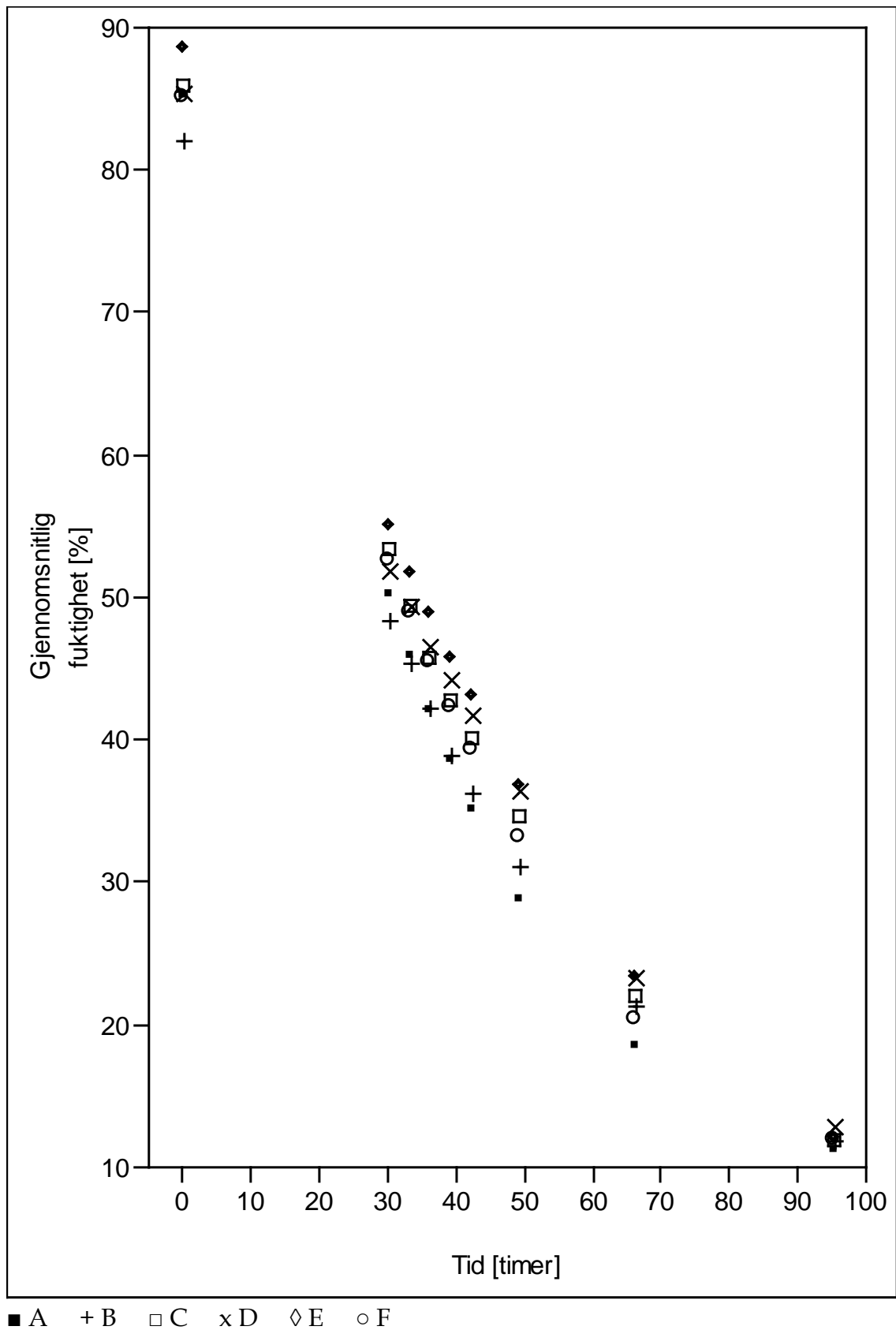
Trefuktigheten ble bestemt ved hjelp av tørke-/veiemetoden for hele biten.

Statistiske analyser ble utført i JMP 7 (SAS Institute Inc. 2007).

Materiale og metode har tidligere blitt beskrevet av Steiner (2008).

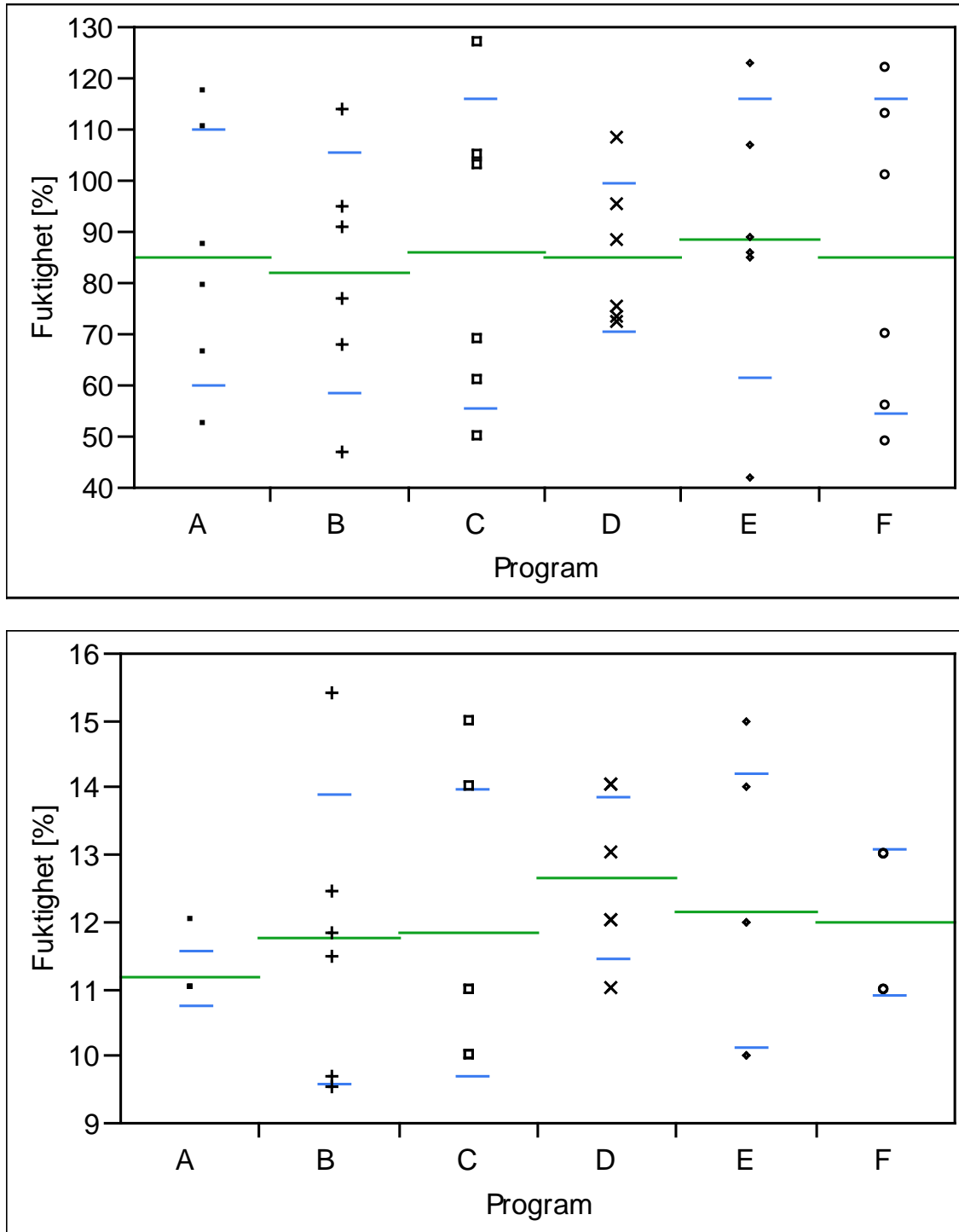
2.3.1.2 Resultater

Figur 2 viser gjennomsnittlig fuktighet under tørkeprosessen for de seks programmene. Det er ikke statistisk sikker forskjell i fuktighetsforløpet for de forskjellige programmene.



Figur 2. Gjennomsnittlig fuktighet for de seks programmene under tørkeprosessen.

En ANOVA-analyse viser at det ikke er noen signifikant forskjell i trefuktighet mellom de seks programmene, verken ved start eller slutt. Variasjonen i slutt-fuktighet var minst for program A (konstant lufthastighet på 5 m/s), og også program D og F har relativt liten variasjon. Reduksjonen i variasjon fra start til slutt er størst for program A og F (Figur 3).



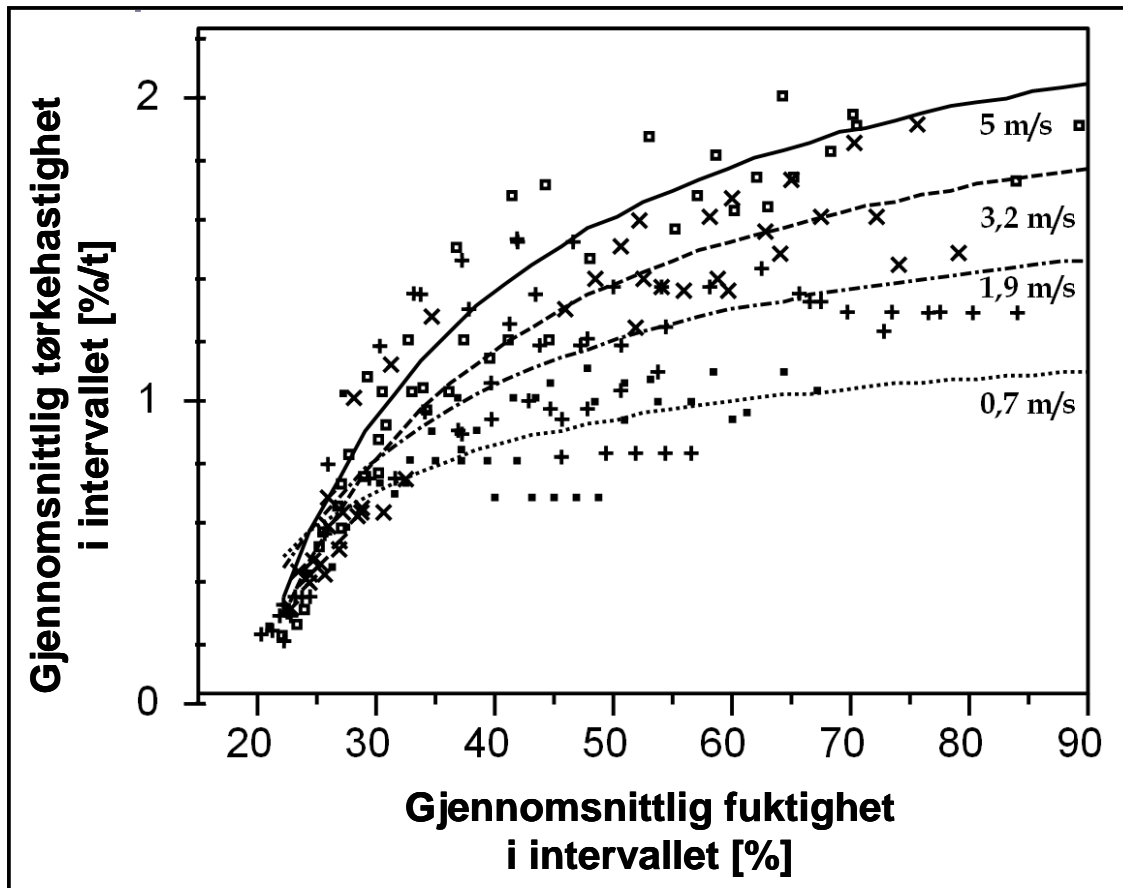
Figur 3. Start- (øverst) og slutt- (nederst) fuktighet for de seks programmene. Lange linjer indikerer gjennomsnitt og korte linjer standardavvik.

Tørkehastighet og korresponderende gjennomsnittlig fuktighet mellom målinger ble kalkulert. I den statistiske analysen i Figur 4, er observasjonene fra de første 30 timene utelatt fordi et gjennomsnitt før den første lange perioden ville gjort analysen svært usikker. I tillegg er observasjoner hvor likevektsfuktigheten avviker fra 10-11 % også utelatt, fordi tørkehastigheten påvirkes i stor grad av likevektsfuktigheten.

Disse to aspektene er i stor grad relatert til de samme observasjonene, fordi tørkeskjemaet forandret seg mest i begynnelsen av tørkeprosessen, mens resten av tørkeprosessen hadde relativt stabilt tørkeklima med en likevektsfuktighet på 10-11 % (10,5 % var ønsket nivå, men likevektsfuktigheten i en tørke varierer rundt ønsket verdi).

Sammenhengen mellom tørkehastighet, fuktighet og lufthastighet beskrives best av en $1/x$ -funksjon (Figur 4). I analysen er observasjonene for alle omgangene samlet, og fuktighet og lufthastighet for hvert intervall er kombinert med tørkehastigheten. Tørkehastigheten er til en viss grad også påvirket av tidligere tørkeforhold, men det antas at dette vil påvirke resultatet i svært liten grad.

Det er ikke mulig å skille ut eksakt ved hvilken fuktighet det er passende å senke lufthastigheten, men dette skillet mellom ulike lufthastigheter ligger et sted mellom 25-30 %.



Figur 4. Fuktighetens effekt på tørkehastigheten ved forskjellig luftfartshastighet (trendlinje: $1/x$). Verdiene representerer gjennomsnitt for intervallene mellom målingene.

2.3.1.3 Diskusjon og konklusjoner

Tørkeraten var som forventet høy tidlig i tørkeprosessen og avtar mot slutten av tørkingen. En for tidlig reduksjon i luftfartshastighet gir en større variasjon i fuktighet. Derfor er det ikke å anbefale en for tidlig og for stor reduksjon i luftfartshastighet. Det er ikke mulig å finne eksakt ved hvilken fuktighet det er passende å redusere luftfartshastigheten, men effekten av de forskjellige luftfartshastighetene begynner å vise seg klart i området 25-30 %. Resultatene fra denne studien samsvarer med tidligere studier på området (Lamb 2002, Simpson 1997, Wengert 2006), som sier at tørkehastigheten er avhengig av luftfartshastigheten ned mot 40 %, og gradvis mindre avhengig ned mot 20 %.

2.3.2 Forsøk med reduksjon av luftfartshastighet i industriell tørke

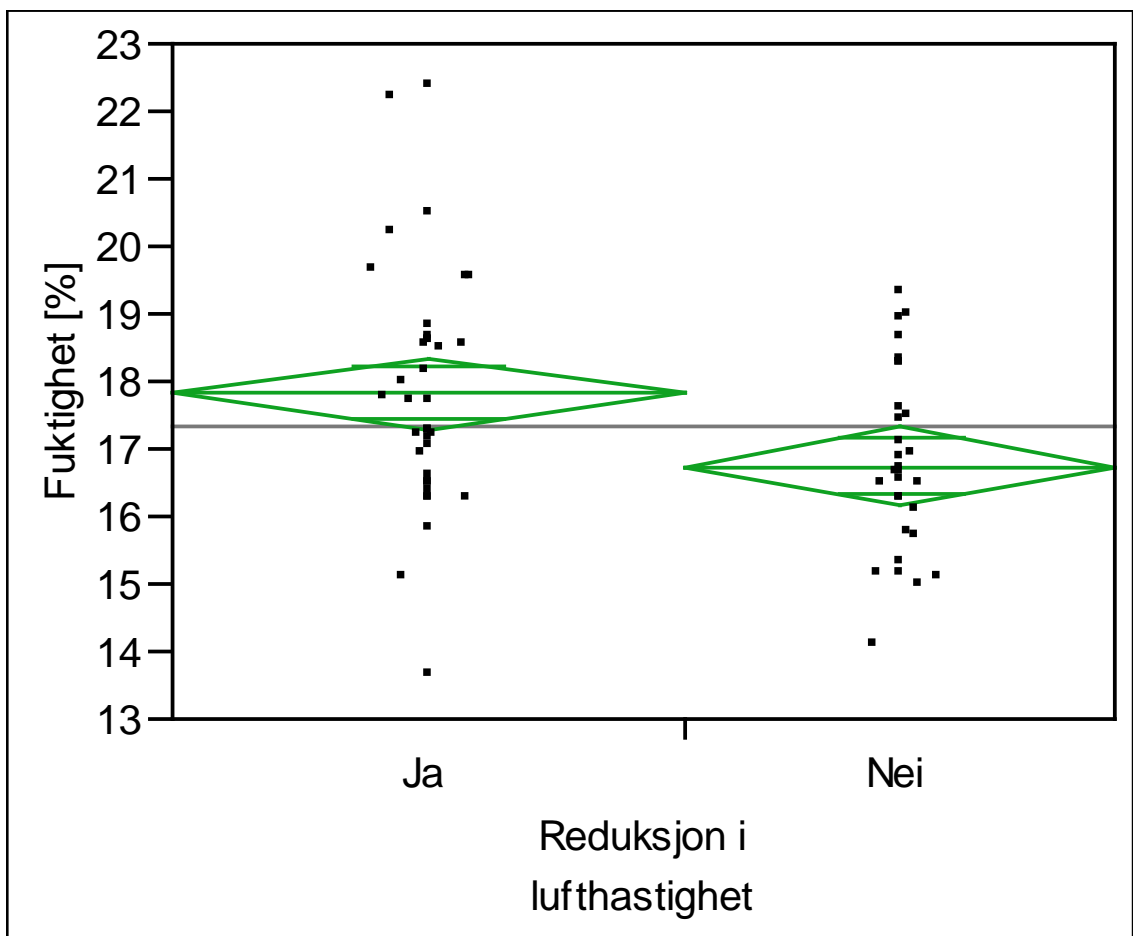
2.3.2.1 Materiale og metoder

For å teste effekten luftfartshastigheten har i en industriell kammertørke, ble samme tørke kjørt én gang med konstant luftfartshastighet og én gang med redusert luftfartshastighet (i begge omgangene ble truckstrømellomrommene tettet). Frekvensen på viftene ble redusert ned til 60 % ved antatt trefuktighet på 40 % og ned til 40 % ved en antatt trefuktighet på 20 %.

Trefuktigheten ble målt ved tørke-/veiemetoden på prøver tatt fra fem planker i seks pakker i hver tørkeomgang. Totalt 30 prøver før tørking og 30 etter tørking (36 for den med redusert lufthastighet) ble tatt.

2.3.2.2 Resultater

Tørkeprosessen med reduksjon i lufthastighet ga en signifikant ($\text{Prob}>F=0,0086$, $DF=1-64$) høyere sluttfuktighet enn prosessen med konstant lufthastighet. Variasjonen i sluttfuktighet ble klart større med reduksjon i lufthastighet (Figur 5).



Figur 5. Effekten på sluttfuktigheten ved å redusere lufthastigheten ned til 60 % ved 40 % trefuktighet og ned til 40 % ved 20 % fuktighet. Den horisontale streken i hver av firkantene viser middelværdien, mens det øverste og nederste hjørnet viser grensene for et 95 % konfidensintervall for middelværdien. Punktene i figuren viser verdien for hver enkeltmåling.

2.3.2.3 Diskusjon og konklusjoner

En for tidlig og/eller en for stor reduksjon i lufthastighet vil ha en innvirkning på slutfuktighetsnivået, forutsatt samme tørkeskjema. Likeledes blir spredning i slutfuktighet påvirket. Forsøkene viste at gjennomsnittlig fuktighet er klart høyere for omgangen med en betydelig reduksjon i lufthastighet, og spredningen er større.

Standarden EN 14298 (CEN 2004) tillater at gjennomsnittlig fuktighet kan avvike -2,5 % til +2,0 % fra en målfuktighet på 17 %. Grensene for variasjonen i fuktighet er definert som at 93,5 % av plankene/bordene må ha en fuktighet innen intervallet 1,3 x målfuktighet og 0,7 x målfuktighet, dvs. 22,1 % og 11,9 %. Til tross for at trelasten i kammeret med redusert lufthastighet har en høyere gjennomsnittlig fuktighet og en større variasjon i fuktighet, oppfyller den kravene i standarden.

Det ligger et stort økonomisk potensial i å redusere lufthastigheten, og laboratorietestene viser at det mest sannsynlig er muligheter for noe reduksjon. Den industrielle testen derimot, viser hvor vanskelig det er å omsette teori til en industriell tørkeprosess. Et svært viktig aspekt i denne sammenhengen er å tilpasse tørkeskjemaet når lufthastigheten reduseres. På denne måten vil det være mulig å redusere lufthastigheten under tørking uten å få uakseptable negative konsekvenser for tørkekvaliteten. Det bør også undersøkes hvordan ulike faktorer, som treslag, strøtykkelse, temperaturnivå og skjerming av lekkasjeluft påvirker effekten av lufthastighet på tørkeprosessen.

3 Utjevning og kondisjonering

3.1 Generelt om utjevning og kondisjonering

I konvensjonell trelasttørking kan det være nødvendig med en utjevningsfase etter tørkefasen for å redusere variasjonen i trefuktighet mellom plankene/bordene og for å treffe målfuktigheten best mulig. Spesielt i dag, når tørkeprosessen blir kortere og mer effektiv for å øke tørkekapasiteten og redusere energiforbruket, kan dette bli mer og mer viktig. Utjevningsfasen har normalt en likevektsfuktighet i tørken på 1 % lavere enn målfuktigheten til partiet. Til tross for at likevektsfuktigheten er nesten lik gjennomsnittlig trefuktighet i trelasten, vil det være et betraktelig fuktopptak i ytre deler av plankene/bordene på grunn av den bratte fuktighetsgradienten etter tørkefasen. Dette fuktopptaket vil mer eller mindre jevne ut fuktighetsgradienten, men vil i tillegg gi en kondisjoneringseffekt, med redusert yteherding som resultat. Denne effekten er avhengig av fuktgradienten, fuktighetsnivået og likevektsfuktigheten i utjevningsfasen. For å uttrykke effektiviteten en kondisjoneringsfase har på reduksjon i yteherding, definerte Fløtaker *et al.* (1996) termen ΔEMC som forskjellen i likevektsfuktighet i klimaet i kondisjoneringsfasen og gjennomsnittlig fuktighet i trelasten. Hvis f.eks. gjennomsnittlig

trefuktighet er 14 % og likevektsfuktigheten i kondisjoneringsfasen er 18 %, blir Δ EMC på 4 %.

I trelasten er det imidlertid en fuktgradient i plankene/bordene rett etter tørking, og i kondisjoneringsfasen er det de ytre delene som er eksponert mot klimaet i kammeret. Det er også i de ytre delene som yteherdingen er lokalisert. Derfor er det bedre å beskrive kondisjoneringseffekten ved å bruke Δ EMC mellom likevektsfuktigheten i klimaet i kammeret og fuktighet i de ytre delene av plankene/bordene, som beskrevet av Sandland (1999). Ved å bruke denne metoden for å beskrive kondisjoneringseffekt, viser det seg at Δ EMC, og da også kondisjoneringseffekten, er positiv også når gjennomsnittlig fuktighet i plankene/bordene er lik eller høyere enn likevektsfuktigheten i tørken. Derfor vil det være en kondisjoneringseffekt under utjevningsfasen, og på denne måten har utjevningsfasen en dobbel effekt. Spørsmålet er hvor stor denne kondisjoneringseffekten er og om det er nødvendig med en kondisjoneringsfase i tillegg når det kreves lave verdier på yteherding.

3.2 Forsøk med utjevning og kondisjonering

3.2.1 Materiale og metoder

Fem hovedplanker av gran (*Picea abies*) med dimensjon 44 mm x 150 mm ble kappet til forsøksplanker med en lengde på 1 m. Fire tørkeomganger ble kjørt i labtørken på Norsk Treteknisk Institutt, med en bit fra hver planke i hvert forsøk, dvs. fem forsøksplanker i hvert forsøk. Forsøksplankene ble fordelt slik at en eventuell lengdeeffekt i hovedplankene ble minimalisert.

I alle tørkeomgangene ble det brukt en konstant tørretemperatur på 75 °C og en avtagende våttemperatur. Tørretemperaturen var også 75 °C i utjevningsfasen (utført i alle omgangene) og kondisjoneringsfasen (utført i omgang 4). Likevektsfuktigheten under utjevning og kondisjonering er vist i Tabell 2. Utjevningsfasen varte i 24 timer i alle omgangene. Kondisjoneringsfasen i omgang 4 varte i to timer og ble utført rett etter tørkefasen og før utjevningsfasen.

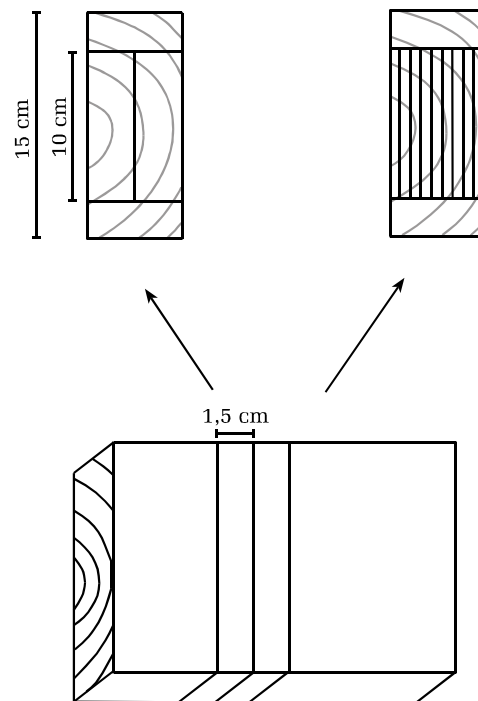
Tabell 1. Likevektsfuktighet for tørkeomgangene under kondisjonering og utjevning.

Omgang	Målfuktighet [%]	LVF under kondisjonering [%]	LVF under utjevning [%]
1	14	Ingen kond.	13
2	16	Ingen kond.	15
3	12	Ingen kond.	11
4	12	17	11

Fuktigheten i hver forsøksplanke ble målt med elektroder (resistansmetoden). Disse målingene, sammen med simuleringer i TORKSIM (Tråtek 2001), ble brukt for å bestemme tidspunkt for å skifte fra tørkefase til utjevning (kondisjonering i omgang 4).

Det ble tatt ut prøver for å måle fuktighet og yteherding rett etter tørkefasen og underveis i utjevningsfasen. I omgang 4 ble det også tatt prøver rett etter kondisjoneringsfasen.

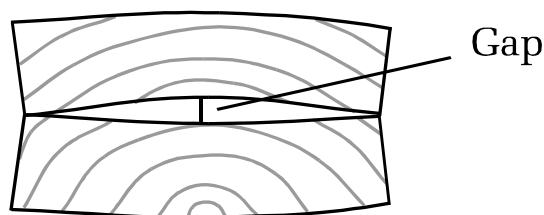
Ved hver prøvetaking ble to ca. 10-15 mm tykke tverrsnittsskiver skåret ut fra hver forsøksplanke. Plankene ble deretter forseglet med silikon og lagt tilbake i tørken. Disse skivene ble brukt til 2- og 9-kløyvprøver, se Figur 6.



Figur 6. Prosedyre for preparering av kløyvprøver.

Alle lamellene ble veid rett etter kløyving. Prøvene ble deretter fuktighetsutjevnet i mer enn en uke i et klima med 20 °C og 65 % RF. Etter denne perioden ble gapet til 2-kløyvprøvene målt i henhold til ENV 14464 (CEN 2002), Figur 7. I tillegg ble et bilde tatt av 9-kløyvprøvene for en subjektiv vurdering av yteherdingsdeformasjonene i tverrsnittet under utjevningen (og kondisjoneringen i omgang 4).

Metoden som ble brukt til å måle utvikling i fuktighet og yteherding i tverrsnittet, er tidligere beskrevet av Fløtaker *et al.* (1996) og Sandland (1999).



Figur 7. Metode for måling av gapet som gir yteherdingsnivået.

Tørke-/veiemetoden ble brukt til å finne fuktigheten i alle prøvene.

3.2.2 Resultater

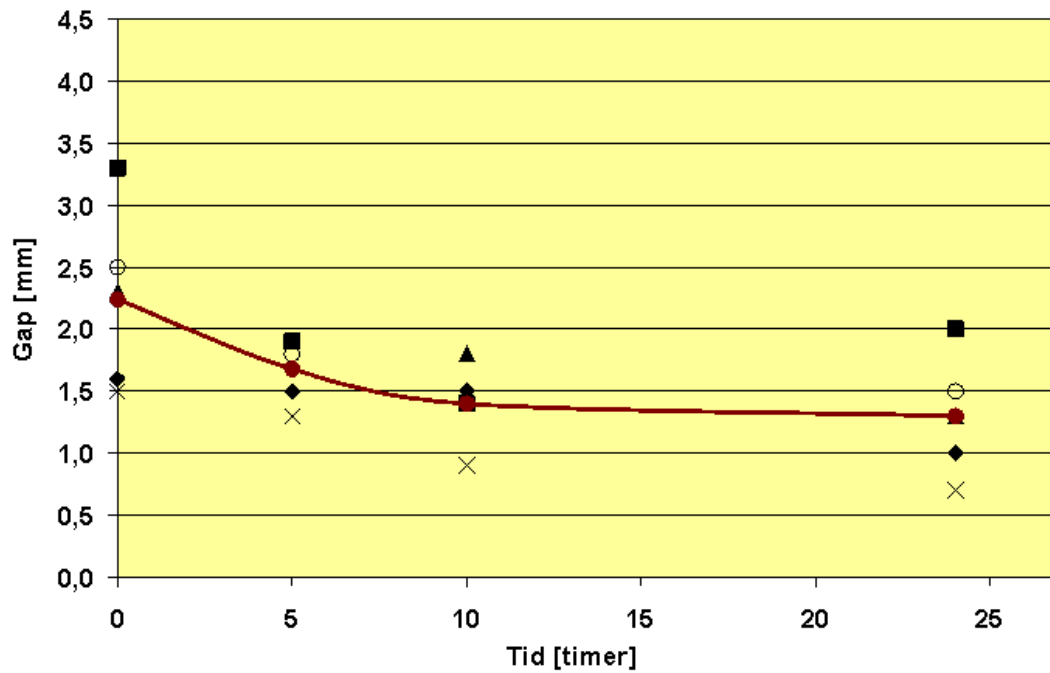
Gjennomsnittlig fuktighet etter tørkefasen og etter utjevningsfasen er vist i Tabell 2.

Tabell 2. Gjennomsnittlig fuktighet etter tørkefasen og utjevningsfasen.

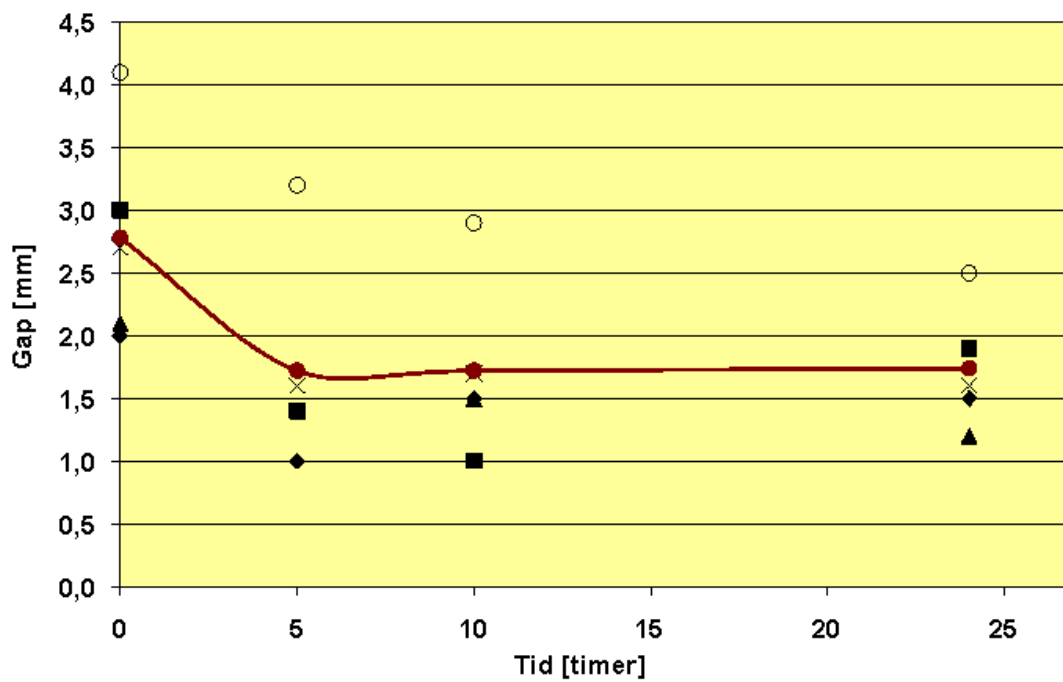
Omgang	Gjennomsnittlig fuktighet, etter tørkefase [%]	Gjennomsnittlig fuktighet, etter utjevningsfase [%]
1	14,5	14,2
2	19,9	17,7
3	11,3	11,5
4	10,3	10,3

I omgang 2 hadde en av plankene veldig høy fuktighet etter tørking, hvilket forklarer det store avviket fra målfuktighet. Under utjevningsfasen ble fuktigheten i denne planken redusert betraktelig.

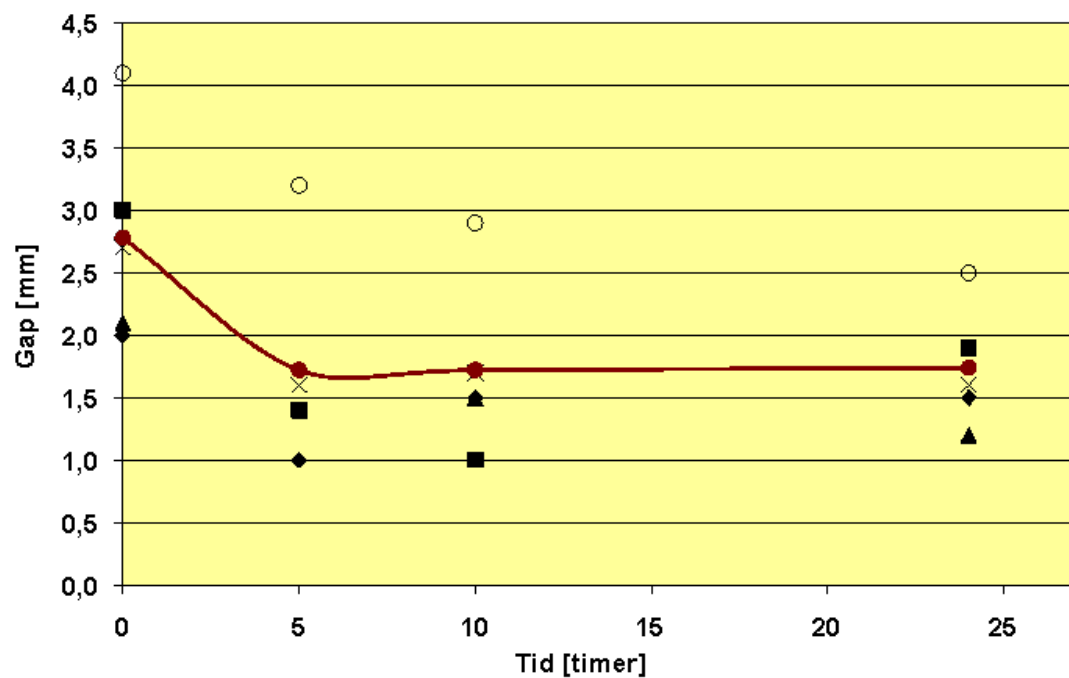
Reduksjonen i yteherding under utjevningen er vist i Figur 8-11. Figur 11 viser i tillegg hvordan yteherdingen reduseres under den korte kondisjoneringen som ble utført i omgang 4. Hver hovedplanke er representert med samme indikator i alle figurene.



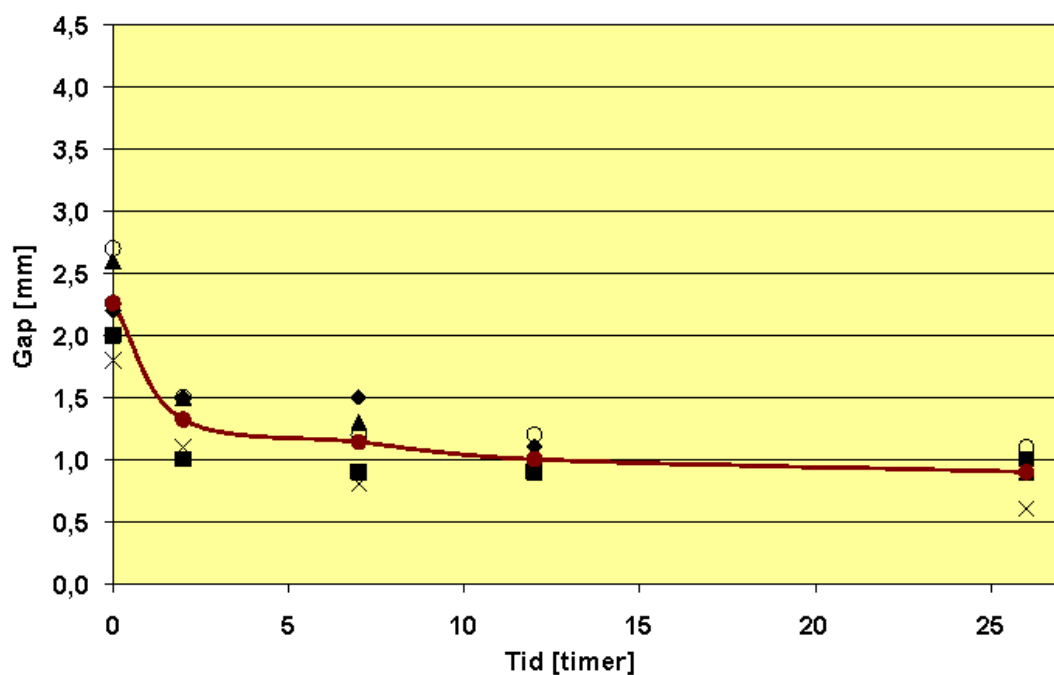
Figur 8. Sammenhengen mellom utjevningstid og yteherding for omgang 1.
Linjen går gjennom gjennomsnittsverdiene.



Figur 9. Sammenhengen mellom utjevningstid og yteherding for omgang 2.
Linjen går gjennom gjennomsnittsverdiene.



Figur 10. Sammenhengen mellom utjevningstid og yteherding for omgang 3. Linjen går gjennom gjennomsnittsverdiene.



Figur 11. Sammenhengen mellom utjevningstid/kondisjoneringstid og yteherding for omgang 4. Kondisjonering fra 0 til 2 timer, etter det utjevning fra 2 til 26 timer. Linjen går gjennom gjennomsnittsverdiene.

Figurene viser at yteherdingen ble betraktelig redusert under utjevningsfasen. Det virker imidlertid som det er vanskelig å redusere yteherdingen under et gap på 1,0-1,5 mm ved å kun bruke en utjevningsfase. Ved å ha en kondisjoneringsfase i tillegg, blir yteherdingen redusert til verdier under 1,0 mm, også med kun to timer kondisjonering.

Figur 12-17 viser noen representative eksempler angående utviklingen av deformasjoner i 9-kløyvprøvene under utjevningen og kondisjoneringen. Prøvene i figurene er alle fra samme hovedplanke.



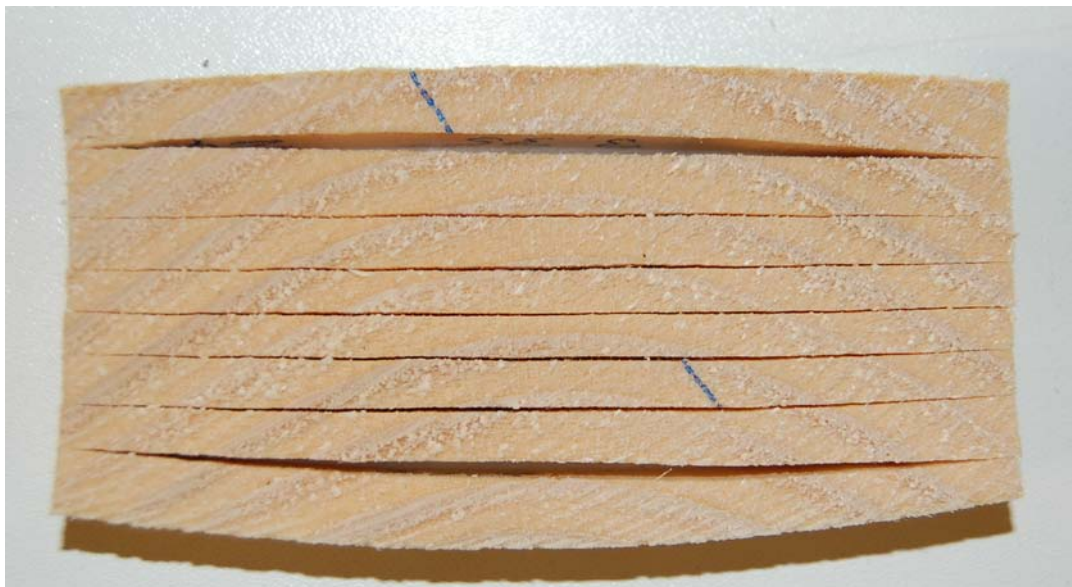
Figur 12. Eksempel på en 9-kløyvprøve etter tørkefasen (ved start av utjevningsfasen i omgang 3).



Figur 13. Eksempel på en 9-kløyvprøve (samme planke som i Figur 12) etter fem timer med utjevning (omgang 3).



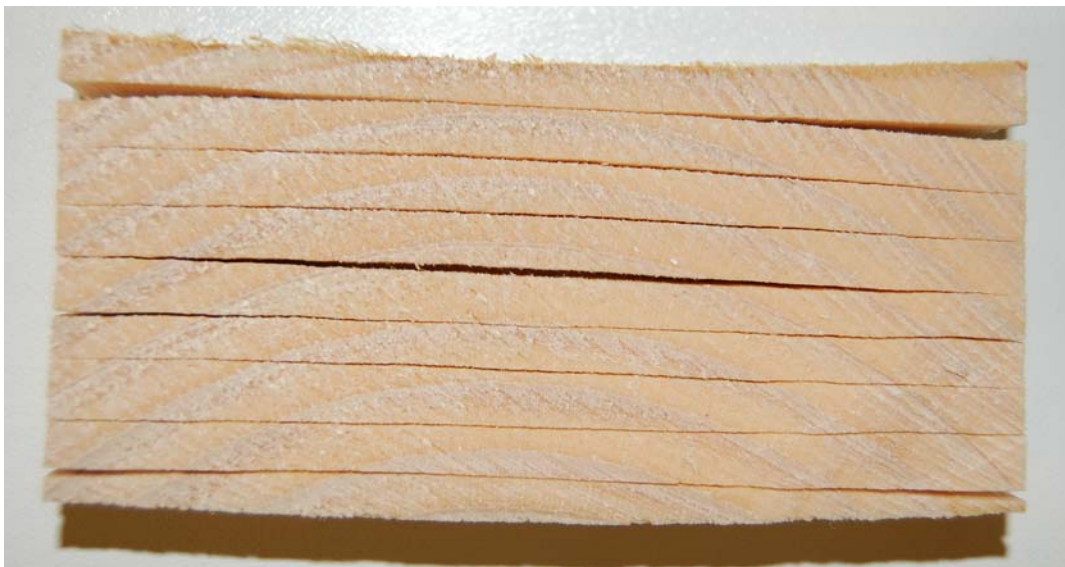
Figur 14. Eksempel på en 9-kløyoprøve (samme planke som i Figur 13 og 14) etter 24 timer med utjevning (omgang 3).



Figur 15. Eksempel på en 9-kløyoprøve etter tørkefasen (ved start av kondisjoneringsfasen i omgang 4).



Figur 16. Eksempel på en 9-kløyoprøve (samme planke som i Figur 16) etter kondisjoneringsfase på to timer (starten på utjevningsfasen i omgang 4).



Figur 17. Eksempel på en 9-kløyoprøve (samme planke som i Figur 16 og 17) etter kondisjoneringsfase på to timer og 24 timer utjevning (omgang 4).

Som bildene viser, er kondisjoneringseffekten synlig i den ytterste lamellen etter noen timer med utjevning. I omgang 4 er kondisjoneringseffekten åpenbar etter kondisjoneringsfasen på to timer, og effekten er så tydelig i overflaten at den ytterste lamellen har fått en konkav deformasjon. Under den etterfølgende utjevningsfasen ser det ut til at kondisjoneringseffekten går dypere inn i tverrsnittet, hvilket resulterer i mindre konkav deformasjon i den ytterste lamellen.

3.2.3 Diskusjon og konklusjoner

Når en utjevningsfase blir brukt på slutten av tørkeprosessen for å redusere variasjonen i fuktighet, vil den på samme tid redusere yteherdingsnivået betraktelig. For trelast som skal bli oppdelt etter tørkeprosessen for videreforedling til f.eks. panel og kledning, kan det derfor være effektivt totalt sett å ha en så kort tørkefase som mulig på bakgrunn av hva som tillates ut fra trevirkets sprekkrisiko, og deretter redusere både fuktighetsvariasjonen og yteherdingen med en utjevningsfase. Hvis det er strenge krav til yteherding, er det nødvendig å utføre en kondisjoneringsfase i tillegg. Resultatene viser imidlertid at det er tilstrekkelig med en veldig kort kondisjoneringsfase når den blir utført i kombinasjon med en utjevningsfase. Yteherdingen ble vesentlig redusert etter en kondisjoneringsfase på to timer.

I denne undersøkelsen ble kondisjoneringsfasen utført før utjevningsfasen. Det finnes ulike teorier om den optimale rekkefølgen på utjevning og kondisjonering, men dette har ikke blitt undersøkt i dette forsøket og antas å ha minimal påvirkning.

Det virker som om den største reduksjonen i yteherding under utjevning oppnås under de første ti timene. Etter det er reduksjonen i yteherding relativt liten, og da er det variasjonen i trefuktighet som alene avgjør hvor lang utjevningsfasen skal være.

Noen uregelmessigheter kan observeres i utviklingen i yteherding under utjevning og kondisjonering for hver planke. Dette kan relateres til mulige variasjoner i vedegenskaper i lengderetningen på plankene (prøver ble tatt ut fra planken underveis i utjevningen/kondisjoneringen).

4 Avkjøling

4.1 Generelt om avkjøling

I en tørkeprosess i en kammertørke utføres vanligvis en avkjølingsfase på slutten. Klimaet i avkjølingsfasen skal korrespondere med ønsket slutfuktighet hos produktet (likevektsfuktighet er lik ønsket slutfuktighet). Det er normalt at en avkjølingsfase varer i 5-8 timer, og at tørretemperaturen i tørken er ca. 40 °C på slutten av fasen. Tradisjonelle argumenter for en kontrollert avkjøling er å unngå uønsket tørking av det ytre laget når varm trelast blir tatt ut i et kaldt klima, spesielt i nordisk vinterklima. Når trelasten blir eksponert for så tørt klima, er det risiko for at det dannes sprekker/mikrosprekker i treoverflaten. For kondisjonert virke er det en mulig risiko for at det på nytt utvikles yteherding. I tillegg kan en kontrollert avkjøling bidra til en reduksjon i variasjonen mellom planker/bord. Det er i dag viktigere og viktigere å redusere tørkekostnader på sagbrukene, og

spørsmålet er om det er å anbefale å kutte ut den kontrollerte avkjølingen og spare tørketid.

Målet med denne studien var derfor å finne mulige konsekvenser av tørkespenningene som kan oppstå i det ytre laget i trelasten i forskjellige avkjølingsfaser. Utviklingen i yteherding og mulige sprekker/mikrosprekker var de viktigste parametrene for resultatet. Et viktig aspekt var å utsette trelasten for et lignende klima som vil oppstå inne i en trelastpakke når den kommer rett fra en varm tørke og ut i et kaldt klima. Innledningsvis ble det derfor gjort målinger av klimaet inne i varme trelastpakker som ble utsatt for et vinterklima.

4.2 Forsøk med forskjellige avkjølingsmetoder

4.2.1 Materiale og metoder

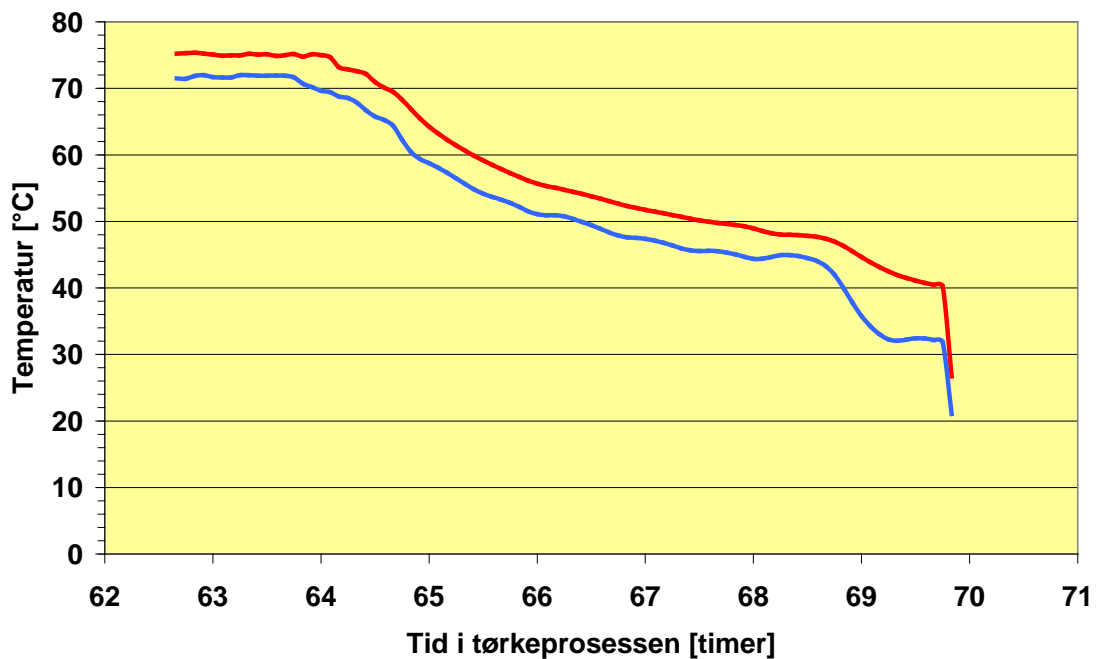
Fem hovedplanker av 44 mm x 150 mm gran ble kappet til ca. 1 m lange prøver. Fire tørkeomganger ble utført i laboratorietørken på Norsk Treteknisk Institutt, og i hver omgang ble en prøve fra hver hovedplanke brukt, dvs. fem prøver i hver omgang.

Tørkeomgangene hadde alle en konstant tørrtemperatur på 75 °C og en avtagende våttemperatur. Etter tørkefasen ble det kjørt en utjevningsfase på 24 timer (omgang fire hadde en kondisjoneringsfase på to timer før utjevningsfasen) og ønsket slutfuktighet var henholdsvis på 16 %, 14 %, 12 % og 12 %.

Etter utjevningsfasen ble prøvene utsatt for følgende avkjølingstyper:

Type 1

Tradisjonell avkjøling i tørken, ned til ca. 40 °C. I denne fasen prøver tørken å bibeholde en LVF som tilsvarer målfuktigheten. Figur 18 viser tørr- og våttemperatur under avkjølingsfasen i tørken.



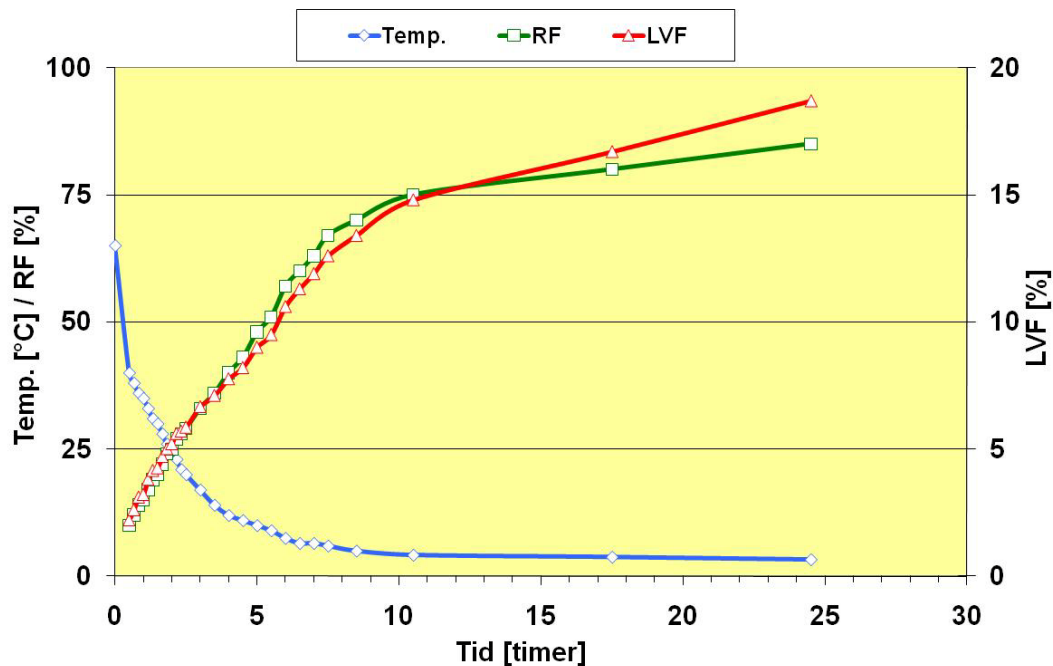
Figur 18. Tørr- (rød) og våttemperatur (blå) under avkjølingsprosessen i tørken.

Etter den ca. seks timer lange kontrollerte avkjølingsfasen i tørken ble prøvene utsatt for et normalt utendørsklima (senhøst/vinter). Én prøve fra hver omgang ble eksponert for denne typen avkjøling.

Type 2

Avkjøling under forhold som tilsvarer klimaet i den midtre delen av en trelastpakke som kommer direkte ut i kaldt klima fra tørking/utjevning i tørken (ingen avkjøling i tørken).

For å finne klimaet som er representativt for denne situasjonen, ble temperatur og relativ luftfuktighet målt og logget i en trelastpakke på et sagbruk. Tørketemperaturen var 70 °C ved slutten av tørkeprosessen, og trelasten ble tatt rett ut i kaldt klima uten styrt avkjøling i tørken. Klimaet i midtdelen av pakken er vist i Figur 19. Trelastens fuktighet var ca. 17 %.



Figur 19. Logget klima i midten av en trelastpakke som blir tatt rett ut fra tørken uten øvkjøling.

Figur 19 viser at trelasten i midten av pakken blir utsatt for et klima som vil gi tørking i flere timer. Lengden av denne perioden vil selvfølgelig også være avhengig av vindforholdene (og potensiell lufthastighet i pakkene). Lufthastigheten ble ikke målt, men vindstyrken var veldig lav når målingene ble tatt.

Trelasten i den ytre delen av pakken vil bli eksponert for det normale utendørs-klimaet hele tiden, og det vil være en gradvis overgang mellom disse to forholdene fra ytre del av pakken til midtre del. Når det gjelder den uønskede tørkeeffekten som kan oppstå, er det den midtre delen av pakken som er mest utsatt for denne risikoen.

I forsøket ble et klimaskap brukt for å oppnå klimaet som er vist i Figur 20. To prøvebiter fra hver omgang ble utsatt for denne typen avkjøling.

Type 3

Direkte fra tørking og utjevning i tørken inn i en fryser ved -18°C . Dette representerer trelast som ligger i ytre del av en pakke som blir tatt rett ut i kaldt klima, uten noen styrt avkjøling i tørken. En prøve fra hver omgang ble eksponert for denne typen avkjøling.

Type 4

Direkte ut i utendørsklima. Klimaet i løpet av dagene forsøkene ble utført varierte fra $0-4^{\circ}\text{C}$ og $75-90\%$ RF. Dette representerer trelasten i ytre del av en pakke som

blir tatt direkte ut i moderat kaldt klima uten noen styrt avkjøling i tørken. En prøve fra hver omgang ble eksponert for denne typen avkjøling.

For alle forsøkene ble en prøve fra hver planke tatt ut etter tørking for måling av fuktighet og yteherding. Etter prøveuttak ble plankene endeforseglet på nytt med silikon og utsatt for de forskjellige avkjølingstypene. Etter avkjøling ble nye prøver tatt ut for måling av fuktighet og yteherding. Fuktighet og yteherding ble målt som beskrevet i kapittel 3.2.

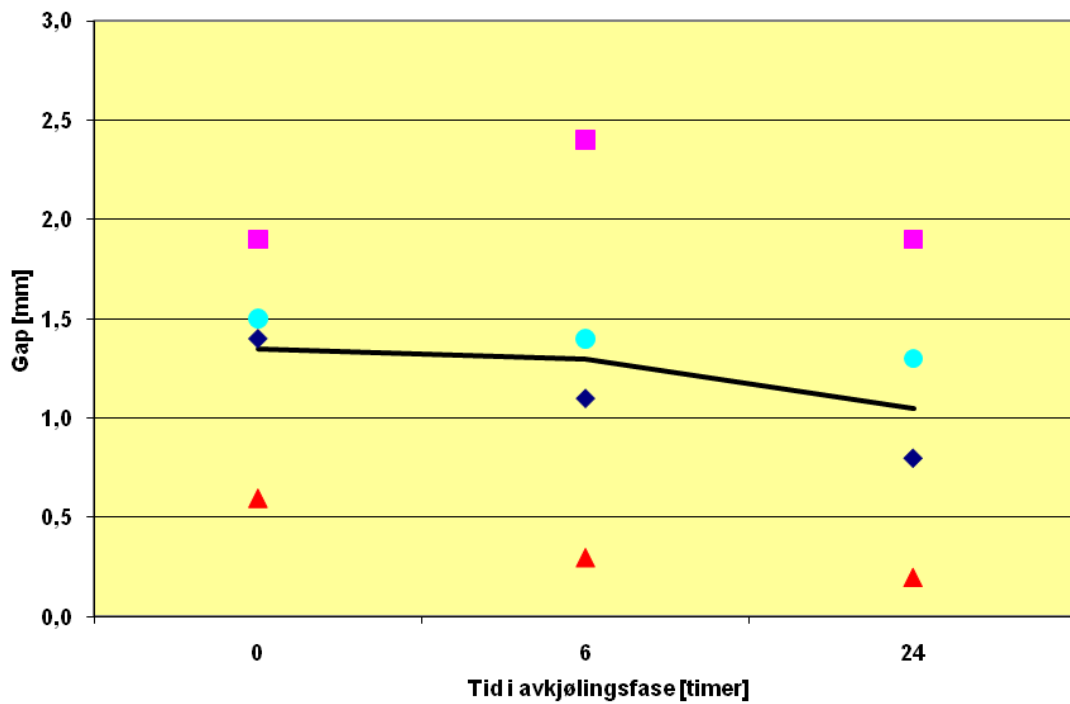
For å finne eventuelle sprekker og mikrosprekker ble makroskopiske og mikroskopiske metoder brukt. For å detektere mikrosprekker, ble en blå kontrastvæske påført overflaten av prøvebitene, og et 0,5-1,0 mm lag ble gradvis slipt ned. Figur 20 viser prøvebitene.



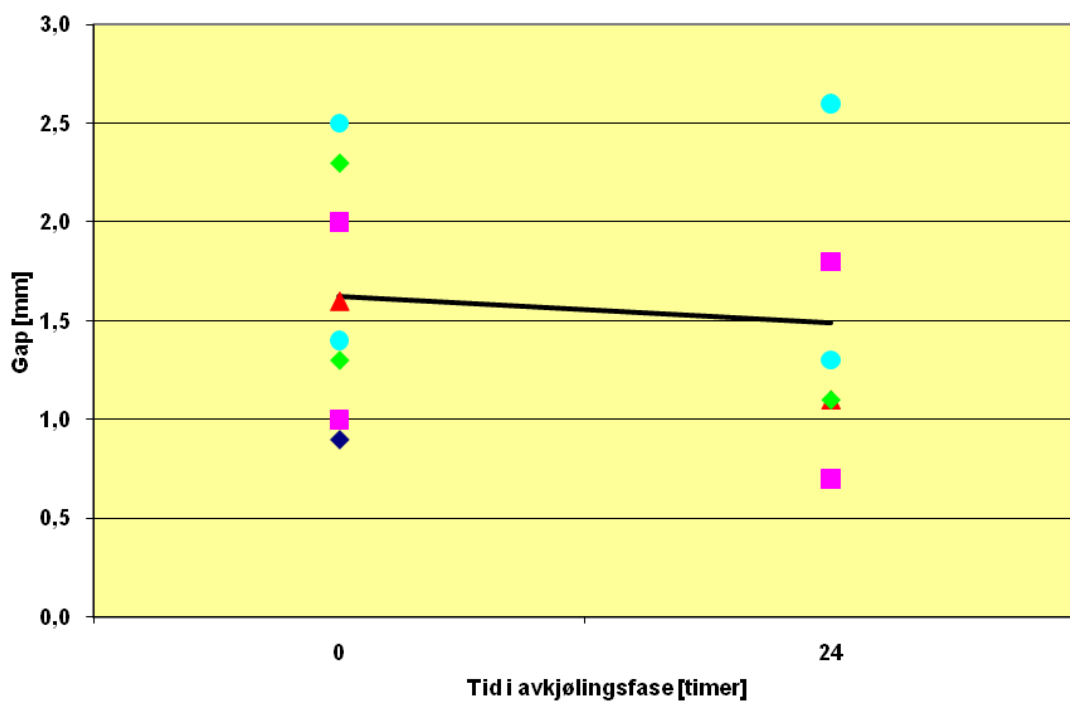
Figur 20. Prøvebiter med blå kontrastvæske. Prøvebiten nede til venstre viser hvordan bitene så ut før sliping. De andre prøvebitene er blitt slipt etter at den blå kontrastvæsken var blitt påført.

4.2.2 Resultater

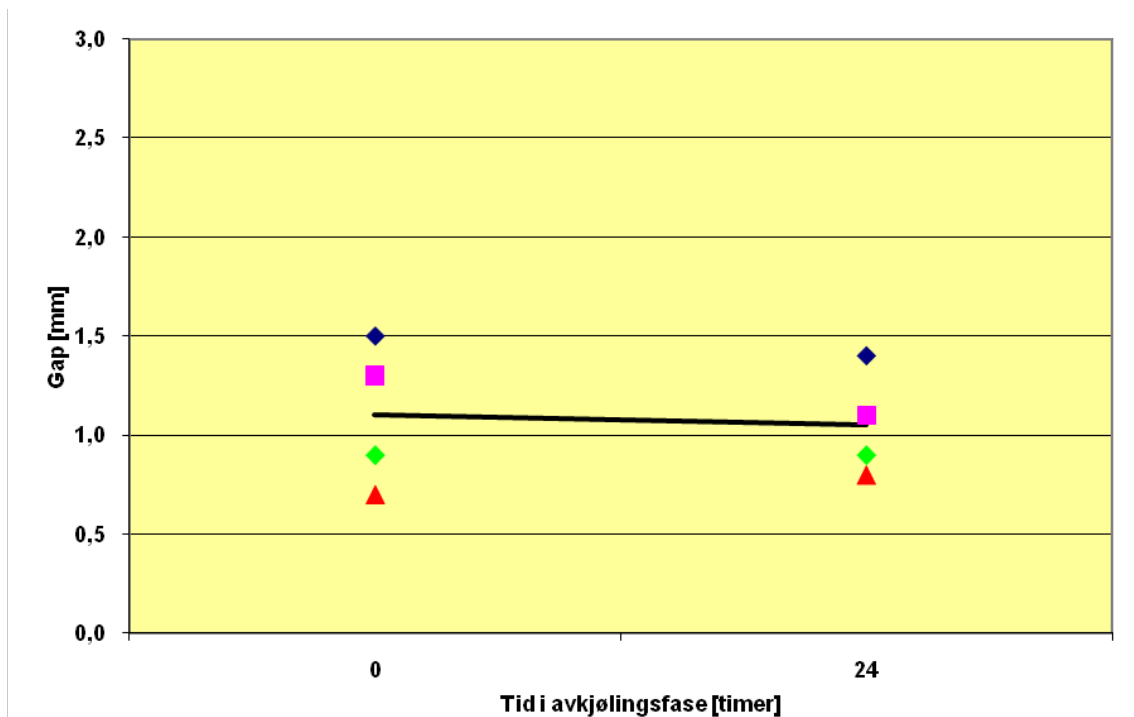
Utviklingen i yteherding for de fire forskjellige avkjølingstypene er vist i Figur 21-24.



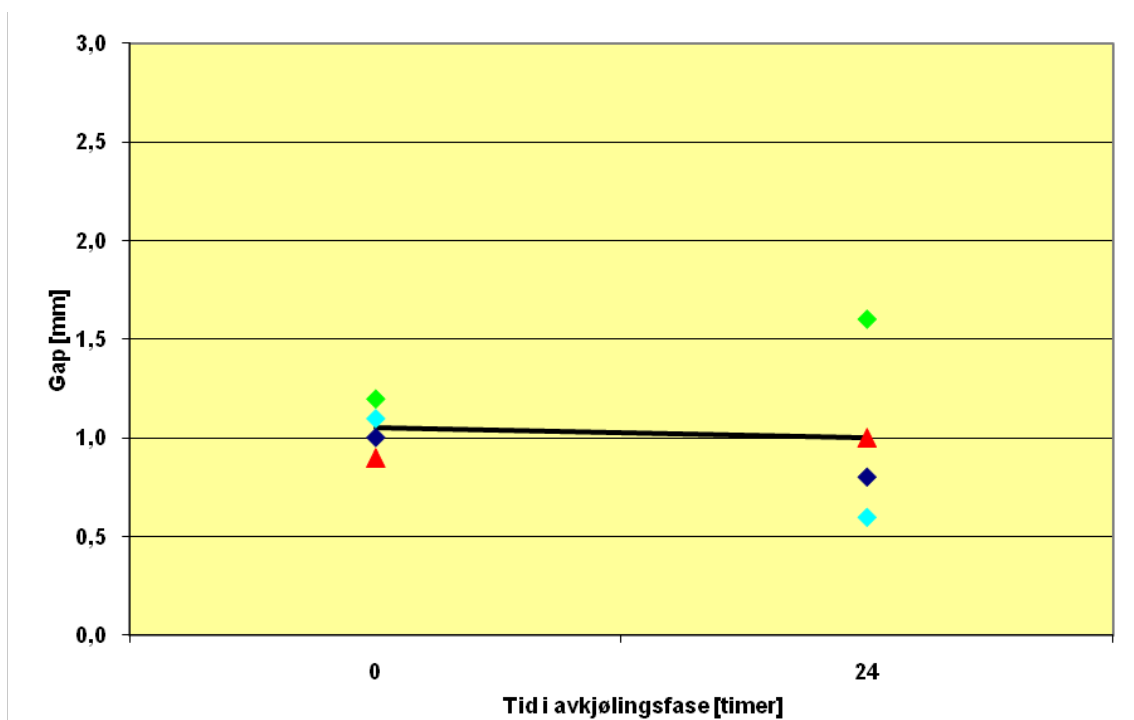
Figur 21. Forløp i yteherding under den styrte avkjølingen i tørken (fra 0-6 timer), og deretter eksponert for utendørsklima (fra 6-24 timer) (type 1). Én indikator for hver hovedplanke. Den svarte linjen indikerer gjennomsnittsverdier.



Figur 22. Forløp i yteherding under avkjølingen som tilsvarte klimaet midt i en trelastpakke som blir tatt direkte ut i kaldt vinterklima (type 2). Én indikator for hver hovedplanke. Den svarte linjen indikerer gjennomsnittsverdier.



Figur 23. Forløp i yteherding under avkjøling i fryser (type 3).
Én indikator for hver hovedplanke. Den svarte linjen indikerer gjennomsnittsverdier.



Figur 24. Forløp i yteherding under avkjøling i utendørsklima (type 4).
Én indikator for hver hovedplanke. Den svarte linjen indikerer gjennomsnittsverdier

Yteherdingsnivået for de ulike avkjølingstypene er nokså stabilt under avkjølingen. Ingen av avkjølingstypene skiller seg betydelig ut når det gjelder yteherding.

Det oppsto ikke tradisjonelle tørkesprekker ved noen av avkjølingsmetodene. Det var heller ingen tydelige tegn til mikrosprekker, men det presiseres at det er usikkerhet knyttet til den brukte metoden.

4.2.3 Diskusjon og konklusjoner

Resultatene viser at yteherdingen under avkjøling er relativt stabil for alle behandlingene. Heller ikke for avkjølingen med svært tørt klima i flere timer, korresponderende med situasjonen i midten av en trelastpakke, er det funnet noen signifikant utvikling av yteherding eller sprekker/mikrosprekker. Kun basert på disse resultatene, er det ikke nødvendig å ha en kontrollert avkjøling i tørken når det gjelder hensynet til yteherding og sprekker/mikrosprekker. Det er dog viktig å merke seg at utendørstemperaturen i denne studien var ca. 0-4 °C. I kaldere klima enn dette, må det forskes mer før en eventuell konklusjon kan trekkes. Andre reservasjoner som må tas i denne sammenhengen, er at forsøkene inneholder et begrenset antall observasjoner, og resultatene er ikke verifisert med industrielle forsøk.

Den mulige positive effekten avkjølingen kan ha på spredningen i fuktighet mellom planker/bord er ikke undersøkt i denne studien. Hvis dette er motivasjonen for en kontrollert avkjøling i tørken, kan det tenkes at det er bedre å bytte ut den styrte avkjølingen med en utjevningsfase. Da vil fuktighetsutjevningen foregå ved en høyere temperatur og dermed mer effektivt.

Litteratur

- Bachrich, J. L. 1980: Dry kiln handbook, H.A. Simons (international) Ltd., Vancouver.
- CEN (2002). Sawn timber – Method for assessment of case-hardening. ENV 14464, November 2002, European Committee for Standardization.
- CEN. 2004: EN-14298, Sawn timber - Assessment of drying quality, Brussels.
- Culpepper, L. 2000: Fan Systems and Airflow. Softwood Drying, Miller Freeman Books, San Francisco.
- Eckelman, C. A.; Baker, J.L. 1976: Heat and Air Requirements in the Kiln Drying of Wood. Indiana Agricultural Experiment Station Research Bulletin, 933: 3-19.
- Esping B. 1992: Trätorkning 1a. Grunder i torkning (in Swedish), Trätekt, Stockholm.
- Esping B. 1996: Trätorkning 1b. Praktisk torkning (in Swedish), Trätekt, Stockholm.
- Fløtaker, S., Tronstad, S. & K. M. Sandland. (1996). Tørkespenninger – kondisjonering, bakgrunn, forsøk, metoder. Rapport 35, Norsk Treteknisk Institutt, Oslo, Norway.
- Lamb, F. M. 2001: The Importance of Air Velocity in Drying – How air speed through the kiln affects lumber seasoning. Modern Woodworking.
- Riepen M.; Paarhuis B. 1999: Analysis and Optimisation of the Airflow Distribution in Convection Kilns. COST-E15 Workshop Edinburgh.
- Rosenkilde, A. 1996: Measurements of moisture content gradients and surface phenomena during drying of wood, Licentiate thesis, Building Material, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Salin J-G. 2001: Lufthastighetens inverkan vid kammartorkning (in Swedish), Rapport P0112039, Trätekt, Stockholm.
- Sandland, K. M. (1999). Deformations in wood – The influence of the wood drying process. Doctor scientiarum theses 1999:9, Agricultural University of Norway, Ås.
- SAS Institute Inc. 2007: JMP User Guide, Release 7, Cary.
- Siau J. F. 1984: Transport Processes in Wood, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Simpson, W. T. 1997: Effect of air velocity on drying rate of single eastern white pine boards, Res. Note FPL-RN-0266, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.

Steiner, Y. 2008: Optimizing the Air Velocity in an Industrial Wood Drying Process, Master thesis, Department of Ecology and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Ås.

Torgeson, O. W. 1951: The drying rate of sugar maple as affected by relative humidity and air velocity, No. R1264, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.

Trätek. 2001: Manual och användarbeskrivning till programmet TORKSIM ver. 3.0.1 (in Swedish), Stockholm.

Vranizan, J. M. 1986: Thermodynamics of energy use in dry kilns. Proceedings (Western Dry Kiln Association) 37th. p. 38-45.

Wengert, E. M. 2006: Principles and Practices of Drying Lumber, Lignomat USA Ltd, Virginia.