SVENSKA TRÄSKYDDSINSTITUTET

THE SWEDISH WOOD PRESERVATION INSTITUTE

Meddelanden
Reports

Nr 107 1974

Faktorer som påverkar barrvedens impregnerbarhet
En litteraturstudie

Factors affecting the permeability of softwood
A literature study

av

ÖSTEN BERGMAN

Särtryck från Rapport Nr R 89, 1973, från Inst. för virkeslära, Skogshögskolan

STOCKHOLM 1974

SVENSKA TRÄSKYDDSINSTITUTET
Swedish Wood preservation Institute

Stockholm i maj 1974

I början av år 1974 bildades Svenska Träskyddsinstitutet. Bland de arbetsuppgifter, som upptagits på institutets arbetsprogram återfinns informations- och upplysningsverksamhet inom träskyddsområdet. En del av denna verksamhet är att svara för utgivandet av meddelanden. Institutet kommer bland annat att övertaga ansvaret för den serie av meddelanden, som sedan år 1952 utgivits av Träskyddskommittén. Detta meddelande nr 107 är det första, som utges i institutets regi och det är vår förhoppning att dessa meddelanden skall fylla ett behov även i fortsättningen. Ytterligare exemplar av detta meddelande kan rekvireras från institutet. I mån av tillgång kan även tidigare utgivna meddelanden i denna serie erhållas efter rekvisition.

In the beginning of the year 1974 the Swedish Wood preservation Institute was formed.

Among the tasks that have been taken up on the institute's working programme are information and educational activities in the field of wood preservation. Part of these activities is the publishing of reports. Among other things the institute will take over the responsibility for the series of reports that has been published since 1952 by Träskyddskommittén the Swedish Wood Preservation Committee. This report no 107 is the first to be published in the institutes organization and it is our hope that these reports will supply a need also in the future. Additional copies of this report can be ordered from the institute. As far as supplies admit older copies can be provided on order.

Svenska Träskyddsinstitutet - *Swedish Wood Preservation Institute*
Adress: Drottning Kristinas väg 47 B, 114 28 Stockholm
Tel. 08/ 22 25 40 ankn. 170.

Innehållsförteckning

Sid.

Sammanfattning 4
1. Inledning 5
2. Mätningar av vedens permeabilitet och impregneringsvätskors inträngning i ved 6
2.1. Flödet genom vedens kapillära struktur 6
2.2. Flödesmätningar 6
2.3. Impregneringsstudier 8
2.4. Sambandet mellan resultat av flödesmätningar och impregneringar 8
2.5. Vedens permeabilitet i axiell, radiell och tangentiell riktning 9
3. Faktorer som har samband med vedens mikroskopiska struktur . 10
3.1. Longitudinella trakeider 10
3.2. Märgstrålar 10
3.3. Hartskanaler och hartskomponenter 14
3.4. Porer 16
3.4.1. Enkla porer och halvenkla porer 17
3.4.2. Ringporer 18
3.4.2.1. Ringporernas anatomi 18
3.4.2.2. Den kemiska sammansättningen hos ringporernas membraner 21
3.4.3. Ringporernas aspiration (stängning) 23
3.4.3.1. Torkning av vedprover som behandlats med organiska lösningar (solvent exchange drying) 25
3.4.3.2. Frystorkning 29
3.4.3.3. Deaspiration 31
3.4.3.4. Sambandet mellan poraspiration och permeabilitet - en statistisk modell .. 32
4. Faktorer som har samband med vedens ursprung 34
4.1. Trädets växtplats 34
4.2. Vedens densitet 35
4.3. Årsringsbredd 35
4.4. Vårved och höstved 36
4.5. Splintved och kärnved 37

4.6. Permeabilitetens variation från trädets rot till topp . 39
5. Faktorer som har samband med virkets behandling före impregneringen 41
5.1. Virkets torkning 41
5.2. Biologisk behandling av virket 47
5.2.1. Vattenlagring 47
5.2.1.1. Inverkan av vattnets temperatur och lagringstidens längd 49
5.2.1.2. Bakterieangreppets omfattning och mönster 50
5.2.1.3. Bevattning av virket 53
5.2.1.4. Vattenlagringens inverkan på vedens hållfasthet 56
5.2.2. Ökad permeabilitet efter angrepp av Trichoderma-arter 58
5.2.3. Behandling med enzymer 59
5.3. Behandling med vattenånga 61
5.4. Kemisk förbehandling av virket 62
5.4.1. Torkning efter behandling med organiska lösningar (Solvent exchange drying) 62
5.4.2. Torkning efter behandling med våtmedel 63
5.4.3. Behandling med sura eller alkaliska lösningar .. 63
5.5. Perforering av virket före impregneringen (Incising) .. 65
5.6. Strålbehandling 65
6. Faktorer som har samband med impregneringslösningen 66
6.1. Typ av lösning 66
6.2. Impregneringslösningens viskositet och temperatur 69
6.3. Åldrade impregneringslösningar 70
6.4. Luftbubblor i impregneringslösningen 70
7. Faktorer som har samband med impregneringsprocessen 73
7.1. Tryckets storlek och trycktidens längd 73
7.2. Förvakuumet 76
Litteraturförteckning 80
Summary 89

Sammanfattning

Denna rapport behandlar de faktorer som påverkar barrvedens impregnerbarhet. I avsnitt 2 beskrives flödesmätning i ved och dess samband med upptagning respektive inträngning av impregneringsmedel. De mikroskopiska vedelement som har direkt anknytning till permeabiliteten är trakeider, märgstrålar, hartskanaler och ringporer (avsnitt 3). Bland dessa synes ringporerna ha den största betydelsen. Deras anatomi och stängningsmekanism (aspiration) har därför behandlats i detalj. I avsnitt 4 redogöres för hur sådana faktorer som trädets växtplats, vedens densitet, årsringsbredd, vår- och höstved och splint- och kärnved påverkar impregneringsresultatet. Virkets behandling före imprggneringen har också stor inverkan på impregneringsmedlets upptagning och inträngning (avsnitt 5). För att förbättra impregnerbarheten har olika torkningsmetoder prövats, så även vattenlagring och vattenbegjutning av virket och behandling med vattenånga och kemikalier. Vattenlagring och bevattning synes ge de bästa resultaten. Denna behandling orsakar bakterieangrepp på märgstrålar och ringporer, varvid permeabiliteten ökar drastiskt. Olika typer av impregneringslösningar ger olika inträngningsresultat (avsnitt 6). Icke polära lösningar (oljemedel) tränger vanligen lättare in i veden än polära lösningar (vattenlösningar). Åldrade lösningar och lösningar som innehåller luftbubblor visar dålig inträngning. Måttliga tryck och tämligen långa behandlingsperioder ger i allmänhet bättre inträngningsresultat än mycket höga tryck och korta behandlingstider (avsnitt 7). För att uppnå ett effektivt förvakuum i veden måste denna vara väl torkad.

1. Inledning

Ved är ett i hög grad poröst men inte särskilt permeabelt material. För torr ved med torr-rådensiteter mellan 0,3 och 0,6 varierar tomrumsandelen från 0,795 till 0,590. Denna tomrumsvolym återfinnes hos barrträden huvudsakligen i fibrerna och till en mindre del i märgstråleceller och hartskanaler. Förbindelsen mellan dessa mikroskopiskt synliga kapillärer går genom små normalt submikroskoposka porer. En vätska som rör sig in i eller genom den grova kapillära strukturen måste passera genom dessa fina öppningar (Stamm, 1963).

Sedan lång tid tillbaka har vedens impregnerbarhet studerats i olika sammanhang. Impregneringsvätskornas inträngning och fördelning i veden har en avgörande betydelse för rötskyddseffekten. Litteratursammanfattningar över vedens permeabilitet och metoder att förbättra inträngningen har publicerats av bland andra Hunt och Garrat (1953), Bailey (1965 a och b), Bellman (1968), Unligil (1969), Erickson (1970) och Jutte (1971). En sammanställning över olika trädslags impregnerbarhet med kreosotolja har nyligen utgivits av Redding (1971).

Vid massaframställning har flisens impregnering med kokvätska stor betydelse för uppslutningen. Problem i samband med detta har behandlats av Stone och Green (1958), Dostal et al. (1960), Jensen et al. (1960), Wardrop and Davies (1961) och Giertz & Rölland (1963).

I denna rapport har en sammanställning gjorts över de faktorer som påverkar vätskors och gasers inträngning i barrved, framför allt i tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) men även i ett flertal vanliga utländska barrträdslag. Vätskors och gasers diffusion i lövved har inte behandlats. Här hänvisas till uppsatser av bland andra Hunt och Garratt (1953), Stone och Green (1958) och Stamm (1967 b).

Ett varmt tack riktas till Professor P. Nylinder och Professor B. Henningsson, Skogshögskolan för värdefulla bidrag till denna rapport.

2. Mätningar av vedens permeabilitet och impregneringsvätskors inträngning i ved

2.1. Flödet genom vedens kapillära struktur

Vätskors och gasers strömning genom vedens kapillärer kan betraktas som analogt till flödet genom en kombination av fulländade serie- och parallellkopplade glaskapillärer. Rörelsen är övervägande laminär snarare än turbulent, som i rör under normalt drivande krafter, och kan uttryckas med Poiseulles ekvation

$$V = \frac{n\pi r^4 P}{8\eta L} = \frac{qr^2 P}{8\eta L}$$

i vilken n är antalet parallella kapillärer, V är flödesvolymen i cm^3/sek, r är den effektiva kapillärens medelradie och L dess längd i cm, q är alla parallella kapillärers tvärsnittsarea i cm^2, P är tryckfallet i dyn per cm^2 och η är viskositeten i poise. I det fall där två kapillärer av samma längd är parallellt förenade, men den ena har en radie som är 10 gånger större än den andras blir flödet genom den större kapillären 10 000 gånger större än flödet genom den mindre vid samma drivande tryck. När de två kapillärerna är kopplade i serie, blir den volym som flyter genom var och en med nödvändighet densamma, men tryckfallet genom den mindre kapillären kommer att bli 10 000 gånger tryckfallet genom den större. Flödet kontrolleras sålunda huvudsakligen av den minsta passagen vid seriekoppling och av den största passagen vid parallellkoppling (Stamm 1967 a).

2.2. Flödesmätningar

Vid flödesstudier låter man en vätska eller en gas strömma genom vedprovet och man mäter genomströmningshastigheten. Den vätska man vanligen använder är vatten, men vill man undvika svällning av veden använder man någon icke polär vätska. De gaser som vanligen användes är luft, kvävgas och syrgas.

Apparatur för flödesmätningar genom ved har beskrivits av bland andra Smith och Lee (1958), Resch och Ecklund (1964), Comstock (1965),

Tesoro et al. (1966), Banks (1968), Bailey och Preston (1970), Prak (1970), Bramhall (1971), Bramhall och Wilson (1971), Choong och Kimbler (1971), Cop och Reginac (1971) och Lin (1972).

Vedens permeabilitet för vätskor kan beskrivas med Darcys lag (Bramhall 1971):

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{KA\Delta P}{\eta l}$$

där dQ/dt = volymflödeshastigheten (cm^3/sek)
η = vätskans viskositet (centipoise)
A = mediets tvärsnittsarea (cm^2)
l = mediets längd (cm)
Δ P = tryckdifferentialen över mediet (atm)
K = permeabilitetskonstanten (Darcy-enheter) vilken är karakteristisk för det penetrerade mediet men oberoende av den penetrerande vätskan.

När det penetrerande medlet är en gas ökar volymen medan den passerar provet. Flödeshastigheten beräknas därför i provets mitt med den modifierade ekvationen:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{KA\Delta P\bar{P}}{\eta l P}$$

där P är trycket vid vilket dQ/dt är mätt och $\bar{P}$ är trycket vid provets mitt.

Gasers flöde genom veden följer inte alltid Darcys lag, därför att K är beroende av $\bar{P}$. När den fria medelpassagen för en gas närmar sig storleken av den öppning genom vilken flödet sker, så inträffar en övergång från visköst till molekylärt flöde. Flödet i denna övergångsregion kallas på engelska för "slip flow", och i praktiten inträffar detta i regionen för x mellan 0,014 och 1,0 där

$$x = \frac{\lambda}{2r}\sqrt{\frac{8}{\pi}}$$

λ = fria medelpassagen för gasen (cm)
r = porradien (cm).

För värden på x 1 är flödet huvudsakligen molekylärt och för värden på x 0,014 är flödet huvudsakligen visköst (Comstock 1967).

Vid flödesmätningar kan man upprepa mätningen på samma vedprov, till exempel först i rått tillstånd och sedan efter torkning eller en särskild behandling. Effekten av torkningen eller behandlingen kan då direkt mätas utan att man behöver ta hänsyn till den variation som ofta förekommer mellan olika provbitar. Man kan också utföra mätningen vid ett tillfälle med en vätska, till exempel med vatten på rå ved, och vid ett annat tillfälle med en gas, till exempel med luft på torkat vedprov.

Om mätningen utföres med vätska på samma vedprov ett upprepat antal gånger kan vedens permeabilitet antingen öka, förmodligen på grund av att extraktivämnen avlägsnas (Comstock 1967), eller minska på grund av att extraktivämnen och gasbubblor blockerar delar av porerna (Bramhall 1971). Filtrerat och gasfritt vatten passerar genom veden med konstant flödeshastighet (Kelso et al. 1963).

2.3. Impregneringsstudier

Impregnering kan utföras under vakuum och/eller tryck eller enbart genom doppning eller pensling. Man mäter sedan vätskans penetreringsdjup eller upptagen mängd. Den tid det tar för ett vedprov att sjunka i en vätska kan också mätas (Jensen et al. 1960). För att kunna observera inträngningsförloppet har bland annat en särskild teknik utvecklats av Smith och Redding (1964).

2.4. Sambandet mellan resultat av flödesmätningar och impregneringar

Undersökningar har utförts över sambandet mellan flödesmätningar och upptagning resepktive penetrering av impregneringsvätskor i veden. Tesoro et al. (1966) rapporterade ett starkt signifikant samband mellan luftpermeabiliteten och penetreringsdjupet respektive upptagningen av kreosotolja efter vakuum-tryckimpregnering av sex barrträdslag och nio lövträdslag. Siau och Shaw (1971), som arbetade med sju östliga och fem västliga nordamerikanska barrträdslag fann att

permeabiliteten var den faktor som mest signifikant påverkade upptagningen. Relationen mellan impregnerbarhet och permeabilitet var bättre definierad när den senare uttrycktes i logaritmisk form. Liknande resultat kom också Choong och Fogg (1972) fram till med Shortleaf pine (Pinus echinata).

2.5. Vedens permeabilitet i axiell, radiell och tangentiell riktning

Ved är ett mycket anisotropt material och permeabiliteten varierar förmodligen mera med riktningen i veden än med någon annan egenskap (Comstock 1969). Vid mätningar av permeabilitet respektive penetrering måste därför resultaten jämföras i varje riktning för sig. De riktningar i vilka mätningarna vanligen utföres är longitudinell (axiell), radiell och tangentiell. Ett par exempel på skillnader i permeabilitet i dessa olika riktningar skall här ges. Erickson och Estep (1962) fann att det tangentiella, radiella och axiella flödet hos härnved av Douglas-fir i medeltal förhöll sig som 1:14:63. (Bailey 1965 a). För både Longleaf och Slash pine var den longitudinella permeabiliteten för vatten i torkad splintved 100 till 1.000 gånger större än den radiella, vilken i sin tur var upp till 150 gånger större än den tangentiella (Erickson 1970). I avsnitt 5.1. (fig. 8-13) ges exempel på permeabilitetsvärden för tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies). Man bör dock observera att den longitudinella permeabiliteten snabbt avtar med ökad längd hos vedprovet (se fig. 8 och 9)

3. Faktorer som har samband med vedens mikroskopiska struktur

Ordningen, storleken och formen hos vedens mikroskopiska element avgör dess impregnerbarhet. I figur 1 visas en schematisk teckning av de olika elementen i tallved.

Varje vedstycke är unikt vad beträffar uppbyggnad och egenskaper. Detta härrör väsentligen från det faktum att cellväggen är föränderlig, vad beträffar kemisk sammansättning och organisation på molekylär nivå. Vidare finns det mellan olika delar i enskilda träd stora skillnader i cellstorlek, väggtjocklek och sammankoppling av celler till vävnader. Alla dessa strukturella drag hos veden påverkar direkt dess fysiska uppträdande (De Zeeuw 1965).

3.1. Longitudinella trakeider

De axiella trakeidernas längd har möjligen en inverkan på inträngningen. Ju längre trakeiderna är ju färre horisontella väggar måste passeras under penetreringen i axiell riktning. Krahmer (1961) mätte fiberlängder hos impregnerbar och svårimpregnerbar Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) och fann att fiberlängden i den förra gruppen varierade mellan 5,06 och 6,16 mm och i den senare gruppen mellan 3,19 och 4,09 mm. Fibrerna i den permeabla gruppen visade i tvärsnittet en hexagonal form medan formen för den andra gruppen var kvadratisk. Den hexagonala formen medgav dubbla rader av ringporer i radialsnittet medan den kvadratiska formen endast hade en rad. Koran (1964) fann däremot att fiberlängden inte var någon betydelsefull faktor för luftpermeabiliteten respektive kreosotupptagningen hos bergstypen av Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii). Det lilla inflytande som fiberlängden kan ha haft doldes av andra mera betydelsefulla faktorers inverkan. Fiberlängdens variation var också mindre i Korans (1964) undersökning än i Krahmers (1961).

3.2. Märgstrålar

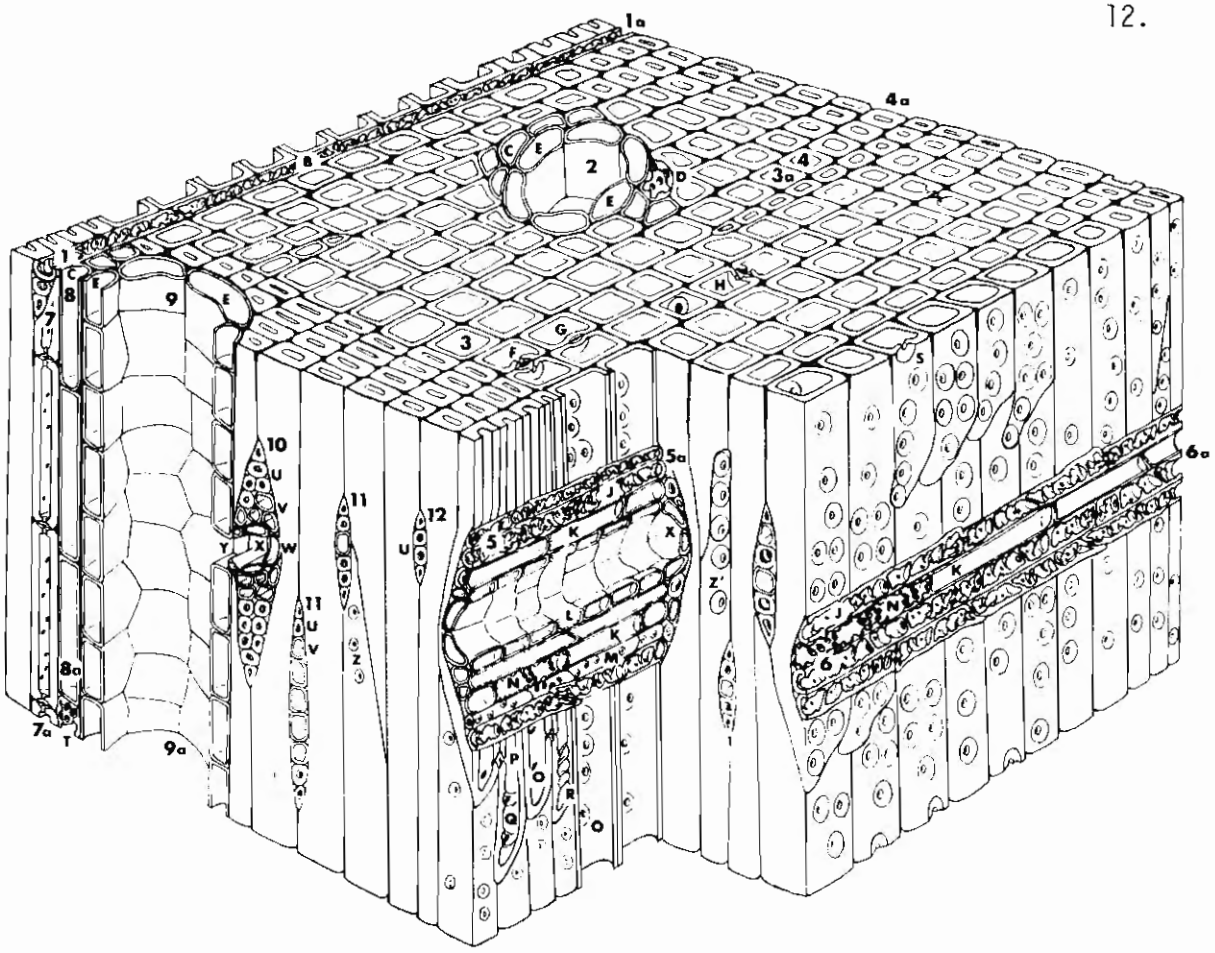
Märgstrålarna hos barrträd kan vara enskiktade eller flerskiktade, dvs. de består av en eller flera cellrader i bredd sett i tangential-

snittet (fig. 1). De mittersta cellraderna utgöres av parenkymceller medan de översta och de understa är trakeider. Hos en del arter saknas dock märgstråletrakeiderna. De flerskiktade märgstrålarna innehåller alltid en hartskanal (fig. 1). Märgstrålarna utgör ledningsbanor i radiell riktning och har stor betydelse för permeabiliteten.

Den huvudsakliga anledningen till att granved är svårimpregnerbar beror på strukturen hos märgstrålarna (Liese & Bauch 1967 b). Både tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) har märgstrålar uppbyggda av parenkymceller och märgstråletrakeider. Hos tallen är parenkymcellerna förenade med varandra genom pormembraner med stor yta. Mellan märgstråleparenkymcellerna och de längsgående trakeiderna finns också stora fönsterliknande porer. Hos gran däremot står märgstråleparenkymcellerna i förbindelse med varandra endast genom små porer. Även anslutningarna till de längsgående trakeiderna - genom halvenkla porpar - är mycket mindre än hos tall. Uppenbarligen kan vätskor och gaser röra sig från en märgstråleparenkymcell till en annan märgstråleparenkymcell mycket lättare genom större pormembraner (tall) än genom små porer (gran). Dessa olikheter i struktur mellan tall och gran säges i allmänhet vara huvudorsaken till skillnaderna i radiell inträngning vid tryckimprengering. Mikroskopiska undersökningar av impregnerade prover avslöjar emellertid att parenkymcellerna ofta är utan impregneringsmedel medan märgstråletrakeiderna företrädesvis är genomträngda (Liese & Bauch 1967 b, Erickson & Balatinecz 1964, Behr et al. 1969, Unligil 1972).

Märgstråletrakeiderna är ofta inte kontinuerliga. Vid årsringsgränserna är ibland parenkymceller inskjutna. Trakeidens längd i höstveden är ungefär hälften av den i vårveden. Dessa två faktorer förklarar observationerna att den radiella inträngningen ofta slutar vid en årsringsgräns (Liese & Bauch 1967 b).

Från tabell 1 kan iakttagas att ytandelen märgstrålar varierar mellan olika trädslag. Hos gran är den enbart hälften av den hos tall. Förhållandet mellan parenkymceller och märgstråletrakeider är inte heller lika. Hos tall är det ungefär 1:1 medan det hos gran är 4:1. Tabell 1 visar även vattenupptagningen efter en vakuum-tryckbehandling av trä-



Figur 1. Schematisk teckning av typisk tallved (Howard & Manwiller 1969). Tvärsnitt. 1-1a, märgstråle; B, tandad märgstråletrakeid; 2, hartskanal; C, tunnväggigt longitudinellt parenkym; D, tjockväggigt longitudinellt parenkym; E, epitelceller; 3-3a, vårvedstrakeider; F, G, radiellt ringporpar; H, tangentiellt porpar; 4-4a, höstved. Radialsnitt. 5-5a, uppskuren flerskiktad märgstråle; J, tandad märgstråletrakeid; K, tunnväggigt parenkym; L, epitelceller; M, icke uppskuren märgstråletrakeid; N, tjockväggigt parenkym; O, radiell por; P, tangentiell ringpor; S, radiella ringporer; 6-6a, uppskuren enskiktad heterogen märgstråle. Tangentialsnitt. 7-7a, trakeidsträng; 8-8a, longitudinellt parenkym (tunnväggigt); T, tjockväggigt parenkym; 9-9a, longitudinell hartskanal; 10, flerskiktad märgstråle; U, märgstråletrakeider; V, märgstråleparenkym; W, horisontella epitelceller; X, horisontell hartskanal; Y, öppning mellan horisontella och vertikala hartskanaler; 11, enskiktad heterogen märgstråle; 12, enskiktad homogen märgstråle; Z, små tangentiella porer i höstved; Z', stora tangentiella porer i vårved.

Schematic drawing of typical southern pine wood (Howard & Manwiller 1969). Transverse view. 1-1a, ray; B, dentate ray tracheid; 2, resin canal; C, thin-walled longitudinal parenchyma; D, thick-walled longitudinal parenchyma; E, epithelial cells; 3-3a, earlywood tracheids; F, G, radial bordered pit pair; H, tangential pit pair; 4-4a, latewood. Radial view. 5-5a, sectioned fusiform ray; J, dentate ray tracheid; K, thin-walled parenchyma; L, epithelial cells; M, unsectioned ray tracheid; N, thick-walled parenchyma; O, radial pit; P, tangential bordered pit; S, radial bordered pits; 6-6a, sectioned uniseriate heterogeneous ray. Tangential view. 7-7a, strand tracheids; 8-8a, longitudinal parenchyma (thin-walled); T, thick-walled parenchyma; 9-9a, longitudinal resin canal; 10, fusiform ray; U, ray tracheids; V, ray parenchyma; W, horizontal epithelial cells; X, horizontal resin canal; Y, opening between horizontal and vertical resin canals; 11, uniseriate heterogeneous rays; 12, uniseriate homogeneous ray; Z, small tangential pits in latewood; Z', large tangential pits in earlywood.

Tabell 1. Andelen märgstrålar och vattenupptagning hos barrträd (Liese & Bauch 1967 b).
Proportion of rays and absorption of water by conifers.

Trädslag	Märgstrålearea, Ray area			Andel märgstråle-trakeidarea i förhållande till tall Ratio of ray tracheid area (taking Pinus as 100)	Vattenupptagning[1] Water uptake[1]
	Total	Parenkym Parenchyma	Trakeider Tracheids		
	%	%	%		l/m^3
Tall, Pinus silvestris	6.6	3.3	3.3	100	214
Gran, Picea abies	3.7	3.0	0.7	21	40
Lärk, Larix decidua	7.3	6.1	1.2	36	59
Douglas fir Pseudotsuga taxifolia	6.7	6.0	0.7	21	67

1) Vakuum 15 mm Hg 30 min. + tryck 4 atm 15 min.
Vacuum 15 mm Hg 30 min. + pressure 4 atm 15 min.

prover förseglade i ändytorna. Tall hade den största upptagningen och gran den lägsta. Märgstråletrakeidernas stora inverkan på den radiella inträngningen framgår här tydligt (Liese & Bauch 1967 b). Becker och Starfinger (1956) visade också att splintved hos tall har en radiell inträngning vilken saknas hos gran. Buro och Buro (1959 a) anger att inträngningen i tallsplintved är nästan helt begränsad till märgstråletrakeiderna och inte till märgstråleparenkymcellerna. Hos Pinus radiata däremot fann Wardrop and Davies (1961) att märgstråleparenkymcellerna var mer genomträngliga än märgstråletrakeiderna.

Om inträngningen skulle ske längs parenkymcellerna så måste vätskan flyta längs cellernas lumina och sedan genom korsningsfältporerna (de halvenkla porerna) till de axiella trakeiderna (McQuire 1969). Côté Jr och Krahmer (1962) samt Thomas (1967) har genom elektronmikroskopiska studier av Pinus strobus och Pinus palustris respektive, visat att dessa halvenkla porer saknar öppningar. Alltså framgår det, att det inte finns någon genomfart för impregneringsvätskor från märgstråleparenkymcellerna till trakeiderna hos många trädslag, såvida inte parenkymväggarnas membraner bryts sönder genom någon behandling (McQuire 1969). Ett exempel på sådan behandling, nämligen ångbehandling under tryck, beskrivs av Bamber och Johnstone (1968). En faktor som kan ha samband med parenkymcellernas permeabilitet är lignifieringen. Hos den grupp av tallarter till vilken Pinus silvestris hör ökar antalet fullt lignifierade celler gradvis med avståndet från kambiet. Flertalet celler är fullt lignifierade före gränsen mellan splint- och kärnved (Balatinecz & Kennedy 1967).

Hos barrveden finns också ett system av gaskanaler längs parenkymcellernas rader, för transport av syre till och koldioxid från cellerna vid växtens respiration. Av märgstråleparenkymet utgör detta system 8 % hos tall och 5 % hos gran (Back 1969). Om detta system av gaskanaler har någon betydelse för impregnerbarheten är inte känt.

3.3. Hartskanaler och hartskomponenter

Hartskanaler finns i barrveden både i longitudinell och radiell riktning, öppet anslutna med varandra. De radiella hartskanalerna finns i märgstrålarna omslutna av epitelceller och parenkymceller. Det råder

en viss tveksamhet om hartskanalernas betydelse vid vätskors inträngning i ved.

Erickson (1938) pressade vatten genom barrvedsprover (Douglas-fir och Shortleaf-pine) och observerade att radiella hartskanaler i några delar av vedproverna kunde leda vatten i hög grad. När hartskanalerna var synliga för blotta ögat var det till och med möjligt att fotografera de utgående vattenstrålarna. Hos icke synliga hartskanaler var vattenflödet obetydligt.

I en senare undersökning fann Erickson och Crawford (1959) att hartskanaler av normal typ inte syntes öka vattenflödet genom splintved (Douglas-fir, kusttypen, Pseudotsuga menziesii och Western hemlock, Tsuga heterophylla) vid lågt tryck. Hos Pinus radiata däremot observerade Wardrop och Davies (1961) att hartskanalerna underlättade den longitudinella inträngningen.

Buro och Buro (1959 a) visade att både axiella och radiella hartskanaler hos splintved av tall (Pinus silvestris) var genomträngliga för vatten men i allmänhet inte för paraffin. Hartskanalerna i kärnveden däremot var ogenomträngliga.

Hartskanalerna fungerar alltså som inkörsportar för vätskor och gaser i barrved. Frågan är i vilken utsträckning de är blockerade. De tidigare nämnda epitelcellerna som närmast omger hartskanalerna utsöndrar en särskild typ av harts, nämligen oljeharts (oleoresin), ibland kallat kanalharts till skillnad från den typ av harts som bildas i parenkymcellerna. Oljeharts består väsentligen av harts löst i flyktig olja (Hillis 1962).

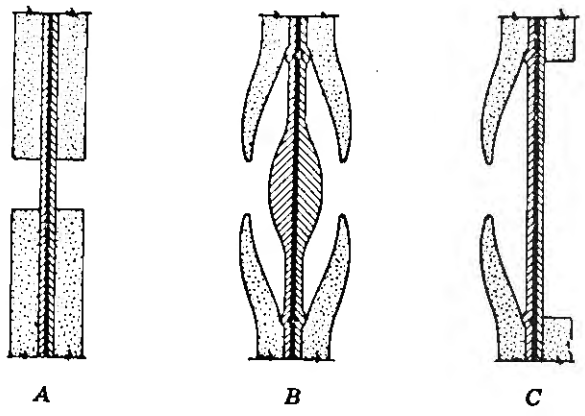
Koran (1964) fann att ju högre extrakthalten var (sammansatt splint- och kärnvedsprov av Douglas-fir, Pseudotsuga menziesii) desto större var graden av avsättningar på pormembranen och desto större var minskningen av både antalet och storleken hos pormembranes kapillärer, vilket resulterade i lägre tangentiell inträngning. Bailey och Preston (1969) framhåller också att extraktivämnen i kärnved hos Douglas-fir hindrar absorption och inträngninng av vattenlösningar i cellväggarna.

Erickson och Balatinecz (1964) fann att antalet ledande hartskalaler var något större hos vedprover av Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii), vilka extraherats med organiska lösningsmedel. Dessa löste ut och avlägsnade förmodligen en del naturligt harts. Krahmer och Côté Jr (1963) fann också att permeabiliteten förbättrades hos kärnvedsprover av Douglas-fir efter extraktion med etanol- eller etanol-bensen-lösningar. Extraktion med hett vatten gav en något mindre förbättring.

Vid vattenlagring av tall (Pinus silvestris) fann Suolahti och Wallén (1958) att hartserna inte hade någon inverkan på den erhållna högre vattenupptagningen hos vedproverna. Däremot framhöll de, att en förhartsning på ytan minskade impregnerbarheten hos helbarkade landlagrade stolpar. Förhartsningen leder förmodligen till att radiella ledningsbanor i veden täpps till. Vid uppvärmning av vedprover av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) till 100 och 150° C fann Willeitner (1960) att en stor mängd harts flöt ut och lade sig på vedens yta. Detta harts bildade en för vatten ogenomtränglig beläggning. Ett utsökt hartsrikt splintvedprov, som var täckt med harts på alla sidor, tog upp avsevärt mindre impregneringsmedel än ett rent kärnvedsprov.

3.4. Porer

Barrvedens porer kan indelas i tre typer nämligen enkla porer, halvenkla porer och ringporer. Den halvenkla poren är egentligen en kombination av en enkel por och en ringpor (fig. 2). De enkla porerna uppträder mellan intill varandra liggande parenkymceller, och de halvenkla porerna mellan parenkymceller och längsgående trakeider. Hos dessa två porer befinner sig pormembranet alltid i samma säge (se fig. 2). Ringporerna förenar de längsgående trakeiderna med varandra och de uppträder även mellan märgstråletrakeiderna och de längsgående trakeiderna. De senare är vanligen någon mindre än de förra. Ringporerna kan antingen befinna sig i öppet eller stängt (aspirerat) läge. Detta har en avgörande betydelse för barrvedens permeabilitet. Därför behandlas ringporernas anatomi och aspiration mera utförligt i det följande.



Figur 2. Schematisk teckning som visar olika typer av porpar (Browning 1963). A - Enkelt porpar i genomskärning (mittlamellen är tecknad helsvart och primärväggen med tvärstreck). B - Ringporpar i genomskärning med den sammansatta torus i mittläget. C - Halvenkelt porpar i genomskärning; där finns inget tecken på en sammansatt torus.

Schematic drawings illustrating various types of pit-pairs. A - Simple pit-pair in sectional view (the intercellular substance is indicated by solid black, the primary wall by crosshatching). B - Bordered pit-pair in sectional view with the compound torus in the medial position. C - Half-bordered pit-pair in sectional view; there is no evidence of a compound torus.

3.4.1. Enkla porer och halvenkla porer

Som tidigare nämndes förenar de enkla porerna märgstrålarnas parenkymceller med varandra. De halvenkla porerna bildas på den förenade väggen mellan en parenkymcell och en trakeid. De senare kallas ibland korsningsfältporer. Deras form och antalet porer är ofta så utpräglat att de utnyttjas för att skilja olika trädslag från varandra, bland annat tall och gran. Tallen har, till exempel, fönsterliknande korsningsfältporer.

De enkla och de halvenkla porerna har tämligen tjocka membraner, sammansatta av flera lager. Perforeringar i dessa har inte påträffats och torus saknas. Det är inte troligt att impregneringsvätskor kan passera genom dessa tjocka membraner (Jutte 1971). I avsnitt 3.2. (om märgstrålar) påvisades också att inträngingen av vätskor längs märgstrålarnas parenkymcellrader var obetydlig. Utbytet av substanser i levande ved mellan två förenade parenkymceller sker över tunna plasmatiska bryggor så kallade plasmodesmer, vilka leder genom pormembranet (Fengel 1972).

3.4.2. Ringporer

Tidigare ansåg man att när veden torkar så bildas små mikroskopiska sprickor i trakeidernas cellväggar genom vilka vätskor och gas kan tränga in i veden. Bailey (1913) var den förste som påvisade ringporernas stora betydelse för vätskors och gasers penetrering i ved. Den beskrivning han gav av en ringpor överensstämmer beundransvärt väl med det nuvarande kunskapsläget, grundat på elektronmikroskopiska studier (Tsoumis 1965).

Det är allmänt antaget att ringporerna i det levande trädet till större delen är öppna åtminstone i splintveden. Om veden torkar stänger (aspirerar) många av porerna vid en viss fuktkvot (Jutte 1971). Ringporens permeabilitet är beroende av porens struktur och aspirationen.

3.4.2.1. Ringporernas anatomi

Ringporerna är cirkulära sett från ytan med en liten rund öppning. I tvärsnitt (fig. 2) har pormembranet en central linsformad förtjockning, vilken kallas torus. Den icke förtjockade delen av pormembranet runt torus kallas margo. Genom denna kan en transport av vätska eller gas normalt ske. Torus kan röra sig till endera sidan av porkammaren och stänger därmed poröppningen. I detta läge säges poren vara aspirerad (stängd) (Bailey 1965 a, Thomas 1967).

Ringporerna uppträder talrikast på trakeidernas radialväggar. Deras förekomst på tangentialväggarna tenderar att vara sporadiskt och företrädesvis i de yttre delarna av årsringen. Märgstråletrakeidernas ringporer är mindre än de vertikala trakeidernas ringporer och de kan

uppträda på alla cellväggar (Bailey 1965 a). Ringporerna i höstveden är också mindre än ringporerna i vårveden och varierar dessutom avsevärt mer i storlek (Thomas 1967).

Hos trakeider i vattenledande splintved består margo av ett stort antal mikrofibriller, som bildar en lös vävnad. Dessa är företrädesvis ordnade i ett radiellt mönster (Liese 1965). Storleken hos de radiella strålarna i margo skiljer sig avsevärt. Många är uppbyggda av enkla mikrofibriller med en diameter av omkring 150-200 Å. Andra synes vara sammansatta av åtskilliga mikrofibriller förenade i tjocka buntar. Så många som 500 mikrofibriller har uppräknats i margo hos Pinus silvestris. Den yttre kanten av margo synes vara mer kompakt (Liese 1965). Mätningar på ett antal mikrofotografier av ringporer hos Longleaf pine (Pinus palustris) avslöjade att margos yta intill torus i medeltal var tio gånger mer porös än ytan i den yttre delen. Dessutom påträffades ett antal pormembraner som hade en mycket hög mikrofibrilltäthet genom större delen av margo. Undersökningar av ett stort antal prover indikerade också att margos porositet varierade lika mycket inom en årsring som mellan årsringar. Vidare syntes variationen inom en trakeid vara lika stor som mellan trakeider. Sålunda befanns margos porositet variera från 10 till 80 procent (Thomas 1967). I allmänhet har margo en tätare struktur i höstvedstrakeider än i vårvedstrakeider (Liese 1965). Filtreringar av TiO_2-suspensioner med partiklar från 10 till 850 mμ genom nyhuggna råa splintvedsprover av flera tallarter avslöjade öppningar i pormembranet upp till 200 mμ (Liese 1965).

Pormembranet bär i den centrala delen torus som härstammar från inkrusteringar på båda sidor av primärväggen. Dess form är linsartad. Förtjockningen består av extra mikrofibriller och av amorft material. Beroende på graden av inkrustering visar torus yta en mer eller mindre tydlig fibrillstruktur (Liese 1965). Runt torus periferi är mikrofibrillerna utpräglat cirkulärt orienterade medan de i den centrala delen är mer slumpmässigt ordnade (Thomas 1967). Ibland kan dock en ordnad struktur skönjas relativt långt in på torus yta (Frey-Wyssling & Bosshard 1953).

Den kompakta torus betraktas i allmänhet som ogenomtränglig. Emellertid har Stemserud (1956. 1959) funnit perforeringar i den centrala delen av torus från splintved av tall. Perforeringarna uppträdde talrikast nära kärnvedsgränsen. Liese (1965) har i sina studier aldrig observerat en sådan struktur och han anser att dessa hål i torus är att betrakta som artefakter (= uppkomna vid provberedningen). Jutte (1971) hävdar däremot att dessa resultat inte kan ignoreras. De kan kanske peka mot ett ungt stadium i utvecklingen under vilket utformningen av poren som sådan ännu inte fullbordats.

En teori, avvikande från gängse uppfattning, för utformningen av torus har föreslagits av Jayme et al. (1960). Enligt dessa har pormembranet samma tjocklek helt igenom i vattenledande ringporer och innehåller alltså ingen torus. Endast genom pormembranets aspiration drar det utgående vattnet den lösa primärväggstrukturen mot centrum liksom ett irisdiafragma, sålunda formande ett förtjockat lager av mikrofibriller, vilka bygger upp torus. Torus utbildas alltså först i samband med vedens torkning. Emellertid har snitt genom icke aspirerade porer redan visat närvaron av en fullt utbildad torus (Liese 1965). Thomas och Nicholas (1966) har också visat att deaspirerade ringporer har samma struktur som icke aspirerade porer. Med detta kunde de fastställa att ringporernas aspiration inte kan påverka pormembranets struktur.

Enligt IAWA (1964) definieras torus som "a central thicker part of a pit membrane". Baserat på resultat av en nyligen genomförd studie föreslår Bauch et al. (1972) en utvidgad definition, nämligen "a torus is the central part of a pit membrane which can be distinguished from the margo by containing no capillary interspaces due to amorphous substances".

Om Pinusarternas pormembraner kan sammanfattningsvis sägas att de har en tydligt utbildad torus och ett måttligt tjockt margo med relativt stora öppningar.

Beträffande uppbyggnaden av de olika lagren i cellväggen hos en ringpor råder delade meningar. Det förekommer sällan att två beskrivningar

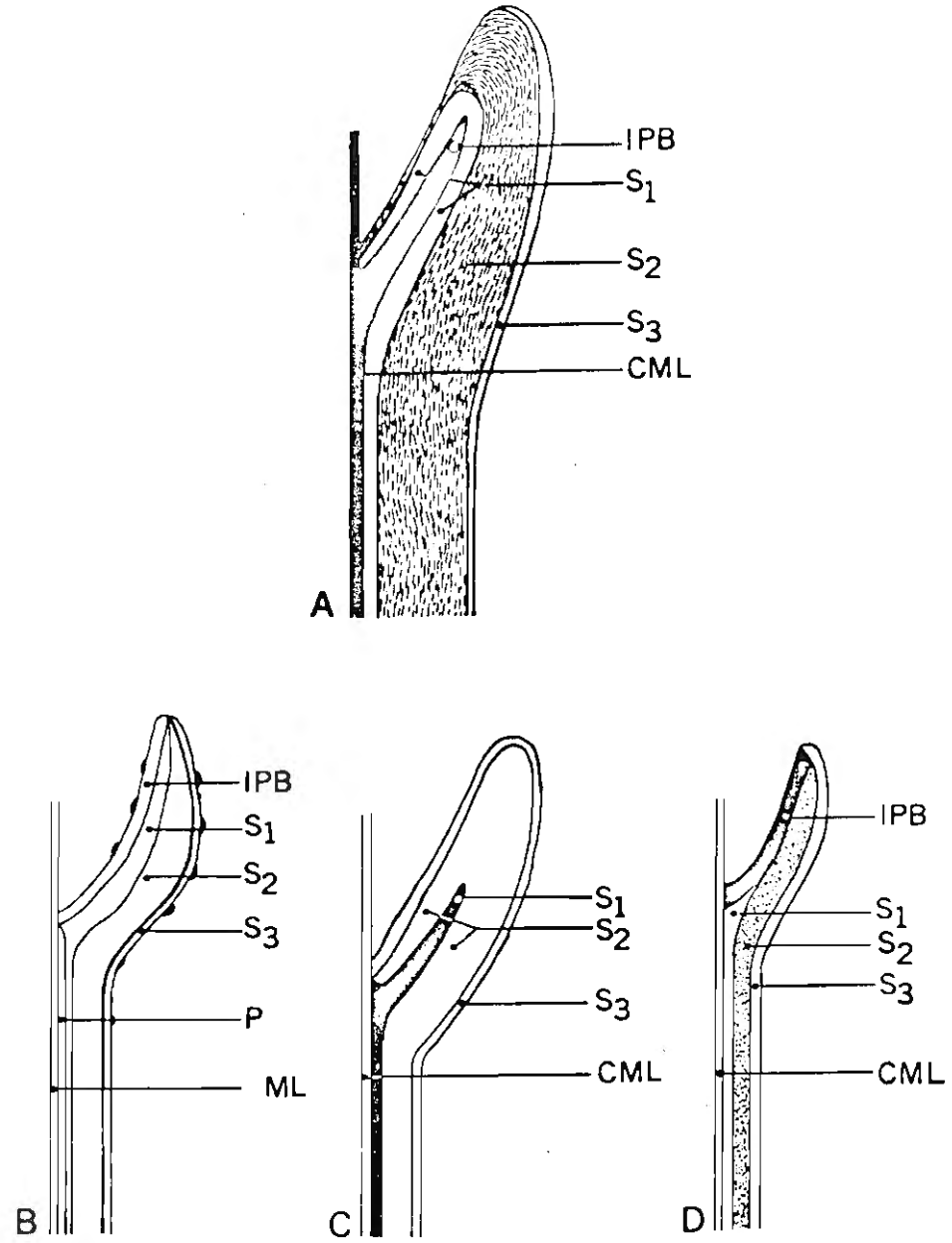
är helt identiska. I figur 3 jämföres den beskrivning som Murmanis och Sachs (1969) föreslår med den av Harada och Côté (1967), Jutte och Spit (1963) och Wardrop och Davies (1961).

Elektronmikroskopiska undersökningar har avslöjat vissa skillnader mellan tall och gran beträffande finstrukturen i porkammarens insida. Hos granen är de cirkulärt ordnade mikrofibrillerna klart synliga och de ger en jämn yta medan porkammaren hos tall är täckt med ett vårtlager, som ger en jämförelsevis skrovlig yta. Denna anatomiska skillnad har tolkats att ge upphov till en tätare stängning av ringporerna hos gran än hos tall och skulle därmed förklara skillnaden i permeabilitet hos de två trädslagen. Det finns dock inget exakt bevis för ett sådant antagande och det är tveksamt om detta morfologiska drag kan korreleras med permeabiliteten. Fördelningen av vårtorna synes vara alltför ojämn för att påverka tätningen och dessutom förblir många porer öppna (Liese & Bauch 1967 b).

3.4.2.2. Den kemiska sammansättningen hos ringporernas membraner

Vid bestämningar av den kemiska sammansättningen hos ringporernas membraner har man studerat resultaten av färgningsreaktioner och enzymatiska reaktioner (Bauch et al. 1968, Nicholas & Thomas 1968 a). Dessa reaktioner verkar specifikt på olika kemiska vedkomponenter. Det har därvid visat sig att fibrillerna i margo består av cellulosa. Splintvedens tori består huvudsakligen av pektin och halten av cellulosa och hemicellulosa är låg. Cellulosan härrör från fibriller vilka sträcker sig in i torus. Inget lignin har påträffats i splintvedens tori. Inkrusteringen av torus med lignin och ligninartade substanser sker först vid kärnvedsbildningen (Fengel 1972).

Pormembranen kan vara mer eller mindre inkrusterade, vilket påverkar permeabiliteten. Hos "White spruce" (Picea glauca) indelar Sebastian et al. (1965) membranen i tre typer med avseende på aspiration och inkrustering. Den första typen aspirerade och icke inkrusterade membraner påträffades huvudsakligen i kärnveden hos prover med låg permeabilitet. Den andra typen icke aspirerade och partiellt inkrusterade membraner fanns nästan uteslutande i splintveden hos prover med god permeabilitet. Den tredje typen fullständigt inkrusterade membraner uppträdde uteslutande i kärnveden med endast i ringa antal.



Figur 3. Jämförelse mellan diagram som visar vår uppfattning (A) och den hos andra forskare (B, C, D). A. Diagram över en ringpor av White pine (Pinus strobus)(Murmanis och Sachs 1969).

Comparison between diagram representing our concept (A) and those of other researchers (B, C, D). A. Diagram for a bordered pit of white pine (Murmanis and Sachs 1969).

B. Harada och Côté (1967)
C. Jutte och Spit (1963)
D. Wardrop och Davies (1961)

CML	= sammansatta mittlamellen	**Compound middle lamella**
IPB	= inledande porvägg	**Initial pit border**
ML	= mittlamell	**Middle lamella**
PW	= primärvägg	**Primary wall**
S_1	= S_1 skikt	S_1 **layer**
S_2	= S_2 skikt	S_2 **layer**
S_3	= S_3 skikt	S_3 **layer**

Thomas (1969) observerade inkrusteringar i pormembranen hos frystorkade prover av Southern pine. Inkrusteringar som kunde förändra margos porositet påträffades inte i pormembraner hos vårved genom hela splintvedszonen. Kraftiga inkrusteringar noterades däremot i pormembraner hos höstved oavsett läge.

Krahmer och Côté Jr.(1963) undersökte vad inkrusteringen av pormembranen hos kärnved av Western red ceder (Thuja plicata) bestod av. Genom extraktion med olika kemikalier kom de fram till att inkrusteringen förmodligen utgjordes av en ligninartad substans.

3.4.3. Ringporernas aspiration (stängning)

När veden torkar förskjutes pormembranet från det centrala läget i porkammaren mot endera poröppningen, som därvid effektivt stänges. Poren säges då vara aspirerad. Phillips (1933) studerade aspirationen i splintved vid olika fuktkvoter hos några barrträdslag, däribland Pinus silvestris och kom fram till följande huvuddrag:

1) I färsk ved uppträder aspirerade porer även när en avsevärd mängd fritt vatten fortfarande finns kvar.
2) När veden torkar ökar antalet aspirerade porer gradvis tills fibermättnadspunkten närmas; vid detta läge har nästan alla porer i vårveden blivit aspirerade.
3) En viss del av höstvedens porer förblir icke aspirerade (öppna) i torr ved.

Liese och Bauch (1967 a), som undersökte lufttorkade splintvedsprover av släktet Pinaceae fann att alla ringporer i vårveden var stängda. I höstveden däremot påträffades vissa skillnader mellan arterna. Så till exempel var upp till 50 % av porerna hos Pinus silvestris öppna medan motsvarande siffra för Picea abies var endast 20-25 %.

När torkade vedprover jämföres med färska vedprover finner man att permeabiliteten minskar avsevärt mer i splintved än i kärnved. Detta kan förklaras med att merparten av kärnvedens ringporer är aspirerade redan före torkningen, så att ytterligare aspiration sker endast i liten omfattning (Stamm 1970 b).

Comstock och Côté (1968) har ställt upp tre faktorer som ensamma eller i kombination kan tänkas påverka aspirationen. Dessa är:

1) ytspänningskrafter som tenderar att dra torus till kontakt med poröppningen
2) stelhet eller styvhet hos pormembranet som resulterar i en kraft riktad mot ytspänningskraften, vilken utvecklas av den avdunstande vätskan
3) adhesion av torus till poröppningen när kontakt uppkommer.

Den första faktorn, ytspänningskrafterna hos den avdunstande vätskan, är i första hand beroende av vätskans ytspänning och storleken och formen hos poröppningen, porkammaren, torus och öppningar i margo. Hart och Thomas (1967) diskuterar i detalj de krafter som kan utvecklas beroende på närvaron av luft-vätska menisker i ringporerna. De kom fram till att de krafter som är förenade med en menisk mellan torus och porkammarens öppning (pit border) ökar med vätskeförlusten allteftersom torus dras närmare poröppningen (Comstock & Côté 1968).

Den relativa styvheten hos pormembranet jämfört med ytspänningskrafterna kommer att bestämma hur långt torus blir förskjuten från det centrala läget. Ju styvare och fastare membranet är desto starkare måste den erforderliga kraften vara för att aspirera poren. Höstvedsporer tenderar att aspirera svagare än vårvedsporer, uppenbarligen därför att de vanligen är mindre och har ett tjockare och mera styft membran (Comstock & Côté 1968). Thomas (1967) har visat att hos Southern pine har ringporerna i höstved en mycket tätare margo än ringporerna i vårved, vilket beror på en väsentligt högre halt av mikrofibriller. Detta kopplat med en mindre pordiameter medför en väsentligt ökad styrka hos höstvedens pormembraner (Thomas & Kringstad 1971). Samma gäller även för ringporerna mellan märgstråletrakeiderna och de längsgående trakeiderna vilka mestadels avsjöljar ett kraftigt pormembran (Liese & Bauch 1967 a).

En annan faktor som kan påverka pormembranens styvhet, vid torkning med vätskor som inte innehåller vatten, är graden av svällning hos vätskan. Det är välkänt att de flesta styrkeegenskaper hos ved inklusive elasticitetsmodulen, ökar med fuktighetens minskning under

fibermättnadspunkten. Det kan därför förväntas att pormembranens styvhet ökar när vatten ersätts med vätskor av lägre svällningsstyrka (Comstock & Côté 1968).

Den tredje faktorn inbegriper adhesionkrafterna mellan torus och poröppningen. Antag att ytspänningskrafterna är tillräckligt stora för att övervinna pormembranets styvhet och sålunda föra torus i kontakt med poröppningen. Då kommer torus att stanna i detta läge endast om det finns adhesionskrafter mellan den och porkammarens öppning (Comstock & Côté 1968). Dessa krafter som tidigare föga uppmärksammats, men som torde vara en nyckelfaktor vid ringporernas aspiration, har studerats av Comstock och Côté (1968) och Thomas och Kringstad (1971).

Genom att använda olika vätskor med hög och låg ytspänning, liksom även hög och låg svällningsstyrka eliminerade Comstock och Côté (1968) både ytspänning och relativ svällningsstyrka som nyckelfaktorer. De resonerade att även om ytspänningskrafterna är tillräckligt stora för att bringa torus i kontakt med poröppningen så måste vidhäftningskrafter utbildas mellan torus och poröppningen för att upprätthålla det aspirerade läget. De spekulerade i att sådana adesivkrafter kunde vara vätebindningskrafter, eftersom vatten visar sig vara den huvudfaktor som utbildar de molekylära krafter, vilka erfordras för att adhesionen skall kunna ske (Thomas & Kringstad 1971). Se vidare nästa avsnitt.

3.4.3.1. Torkning av vedprover som behandlats med organiska lösningar (solvent exchange drying)

Vedprover som torkats efter behandling med organiska lösningar visar avsevärt bättre permeabilitet än vedprover som torkats direkt (dvs. ur vatten). Man har funnit att detta beror på att ringporerna helt eller delvis förblir i icke aspirerat tillstånd. Metoden kallas på engelska "solvent exchange drying" och går i stort ut på att man blötlägger ett färskt vedprov i en organisk lösning, varvid denna ersätter vattnet i veden. Sedan torkas vedprovet. Exempel på lösningar som använts är metanol, etanol, aceton, bensen, pentan m.fl. Ibland har två eller flera medel använts i följd. Försök med "solvent

exchange drying" har rapporterats i litteraturen av bland andra Liese (1951), Erickson och Crawford (1959), Thomas och Nicholas (1966), Comstock och Côté (1968), Thomas (1969), Erickson och Schmidt (1969), Bramhall (1969. 1971), Petty och Puritch (1970), Meyer (1970), Bramhall och Wilson (1971) och Thomas och Kringstad (1971). Försöken har ännu inte lett till någon praktisk behandling av virke i avsikt att förbättra impregnerbarheten. Behandlingen är alltför dyrbar och dessutom farlig ur brandsynpunkt. Metoden användes framför allt vid studier av mekanismerna kring ringporernas aspiration.

Anledningen till att ringporerna förblir i icke aspirerat tillstånd efter torkning ur organiska lösningar har förklarats på olika sätt. En förklaring ger Liese och Bauch (1967 a). Deras experiment stöder den uppfattningen att ringporernas aspiration orsakas av ytspänningskrafterna, som verkar mellan pormembranet och den tillbakadragande vätskan (se sid. 24, faktor 1). De prövade blandningar av vatten och etanol resp. vatten och aceton. För koncentrationer över 75 % etanol resp. 80 % aceton observerade de att permeabiliteten ökade snabbt, vilket berodde på att ringporernas aspiration avtog. Dessa koncentrationer motsvarar en ytspänning av omkring 26 dyn/cm. De fastslog således att vattenledande trakeider (splintved) i vårved hos Pinus, Picea och Abies har ringporer som aspirerar redan vid en ytspänning av omkring 26 dyn/cm. Hos höstved, som har tjockare och samtidigt mera linsformad torus krävs det starkare krafter för att stänga poren. Till och med den höga ytspänningen hos vatten (omkring 72 dyn/cm) är ibland inte tillräcklig för att aspirera många av ringporerna i höstveden. Comstock och Côté (1968) anser däremot att ytspänningen inte är den enda betydande faktorn vid ringporernas aspiration. De fann att ringporerna kunde aspirera när man använde vattenhaltiga ytaktiva lösningar med ytspänningsvärden så låga som 20 dyn/cm. Å andra sidan fann man att porerna inte aspirerade när de torkades från organiska lösningar med ytspänningsvärden så höga som 44 dyn/cm.

En annan förklaring till den minskade aspirationen vid "solvent exchange drying" är att pormembranets styvhet kan väntas öka när vatten ersätts med vätskor, som har lägre svällningsförmåga (se sid. 24 faktor 2). Denna förklaring avvisar Liese och Bauch (1967 a). De

fann nämligen att ringporerna aspirerade hos vårved som först torkats i aceton och sedan filtrerats med vatten och torkats igen. Detta bevisar att pormembranen förblir rörliga även efter behandling med ren aceton och efterföljande torkning. Comstock och Côté (1968) avfärdade också svällningen som kontrollerande faktor, eftersom cellosolv och furfural, vilka båda har hög svällningsförmåga och hög ytspänning gav hög permeabilitet.

En tredje förklaring till att ringporerna inte aspirerar när veden torkas efter behandling med organiska lösningar är att inga adhesionskrafter utvecklas mellan torus och porkammarens öppning (se sid. 24 faktor 3). Comstock och Côté (1968) anser att adhesionen av torus till porkammarens öppning är en nyckelfaktor beträffande mekanismen vid ringporernas aspiration. De framhåller att, även om ytspänningen antages vara tillräckligt stark för att bringa torus i kontakt med prooppningens kant, så utvecklas uppenbarligen inga adhesionskrafter mellan torus och porkammarens öppning, när veden torkats efter behandling med organiska lösningar. Eftersom vattnet syntes spela en avgörande roll vid adhesionsprocessen spekulerade Comstock och Côté (1968) i att sådana adhesionskrafter kunde vara av typen vätebindningar. De kunde även klart påvisa att substanser lösliga i organiska lösningar inte uppträdde adhesivt, eftersom ringporerna aspirerade när vatten avdunstades från splintved, som tidigare var extraherad med organiska lösningar.

Thomas och Kringstad (1971) redovisar nyligen en undersökning där man utvärderar vätebindningskrafternas betydelse vid ringporernas aspiration. I tabell 2 upptas de vätskor, som de prövade vid sina försök. I överensstämmelse med Comstock och Côté (1968) fann Thomas och Kringstad (1971) inget uppenbart samband mellan ringporernas aspiration och den avdunstande vätskans ytspänning (tab. 2). Alltså måste andra egenskaper hos den avdunstande vätskan vara av avgörande betydelse. Sådana vätskor som vatten, flytande ammoniak, dietylamin och pyrrol innehåller både en givare och en mottagare av vätebindningar genom antingen OH- eller NH-grupper. Dessa vätskor bildar sålunda inte enbart vätebindningar med hydroxylgrupper i pormembranet och i porkammarens öppning, utan molekylerna bildar starka vätebindninger även

Tabell 2. Poraspiration som funktion av den avdunstande vätskans egenskaper (Thomas & Kringstad 1971).

Pit aspiration as a function of the properties of the evaporating liquid.

Avdunstande vätska[3]	Formel	Givare D eller mottagare A av vätebindande grupper	Ytspänning	Svällning i förhållande till vatten	Poraspiration + ja - nej
Evaporating liquid 3)	Formula	Donor (D) or acceptor (A) groups	Surface tension Dynes/cm 1)	Swelling relative to water 2)	Pit aspiration + yes - no
Ammonia	NH_3	D and A	18	116	+
Diethylamine	C_2H_5—NH—C_2H_5	D and A	16	108	+
Pyrrole	C_4H_4NH	D and A	34		+
Water	H_2O	D and A	72	100	+
Water & Surfactant	H_2O	D and A	22		+
Methanol	CH_3OH	D and A	22	95	+
Ethanol	C_2H_5OH	D and A	23	83	-
Cellosolve	CH_2-OH CH_2-O-C_2H_5	D and A	30	87	-
Pyridine	C_5H_5N	A	38	118	-
Furfural	C_4H_3CHO	A	44	68	-
Acetone	C_3H_6O	A	23	63	-
Quinoline	C_9H_7N	A	45	0	-
Benzene	C_6H_6	None	29	0	-
Chloroform	$CHCl_3$	None	27	3.2	-
Toluene	C_7H_8	None	29	1.6	-
Ethyl Ether	$C_4H_{10}O$	A	17	3	-
Pentane	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	None	16	3	-
Amyl Acetate	$CH_3CO_2C_5H_{11}$	A	25	3	-

1) Except for the pyrrole and surfactant solution all surface tension values were obtained from Handbook of Chemistry and Physics. The values for pyrrole and the surfactant solution were obtained with a ring tensiometer.

2) With the exception of furfural and pentane the relative swelling values were obtained from A.J. Stamm, Wood and Cellulose Science, Ronald Press Co., New York. The values for furfural and pentane are from Comstock, G.L. and W.A. Coté Jr., 1968. Wood Science and Technology 2, 279-291.

3) Engelska benämningar. English names.

inbördes. På denna grund antar Thomas och Kringstad (1971) att vätskor av detta slag under något stadium av avdunstningen kan koppla samman pormembranet med porkammarens öppning (border) genom en vätebindning mellan öppning - vätska, vätska - vätska och vätska - membran (fig. 4, A och B). Pyridin kan också bilda starka vätebindningar med hydroxylgrupper i pormembranet i porkammarens öppning (border)(fig. 4, C). Men eftersom pyridin endast kan mottaga vätebindningar (tab. 2) kommer den inte att koppla samman membran och border, därför att den saknar förmågan att bilda vätebindningar inbördes mellan molelylerna. Poren förblir således i icke aspirerat tillstånd.

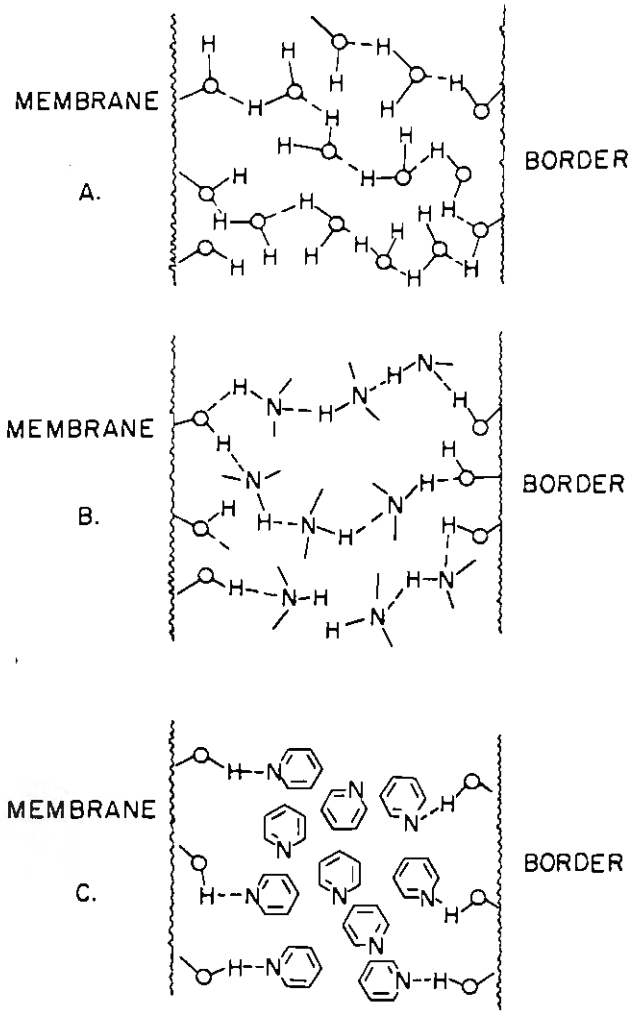
För att ringporernas aspiration skall kunna ske föreslår Thomas och Kringstad (1971) sammanfattningsvis att den avdunstande vätskan måste ha följande egenskaper:

1. Molekylen måste kunna bilda vätebindningar och kunna både avge och mottaga dessa.
2. Förmåga att svälla veden lika mycket eller mer än vatten.
3. Ett ytspännings- och kontaktvinkelförhållande sådant att den inledande kapillära dragkraften är tillräckligt hög för att påbörja pormembranets förskjutning.

3.4.3.2. Frystorkning

Studier av ringporernas aspiration hos frystorkad ved har rapporterats av bland andra Comstock och Côté (1968), Thomas (1969), Erickson och Schmidt (1969) och Meyer (1970), Bramhall och Wilson (1971).

Comstock och Côté (1968) erhöll högre permeabilitet hos barrved (red pine och eastern hemlock) frystorkad vid -18° C än hos ved torkad vid temperaturer mellan +20 och +140° C, men permeabiliteten var ändå endast 1/20 av den före torkning. De hade väntat sig att ringporerna inte skulle aspirera vid torkning vid -18° C därför att det fria vattnet i veden skulle frysa och därmed eliminera de ytspänningskrafter som orsakar aspirationen. De antog därför att en tillräcklig mängd vätska i flytande fas uppträdde vid -18° C för att utbilda de krafter som orsakar poraspirationen. Erickson och Schmidt (1969) kunde inte heller helt eliminera ringporernas aspiration med frystorkning vid -20° C.



Figur 4. Ett diagram utvisande den funktion som vätebindande givare- och mottagare-atomer har vid ringporernas aspiration. A. Vatten, B. Dietylamin, C. Pyridin. Märk den kontinuerliga vätebryggan från membranet till porkammarens öppning (border) i A och B och avsaknaden av en sådan brygga i C (Thomas & Kringstad, 1971).

A diagramatic representation of the role of hydrogen bonding donor and acceptor atoms in pit aspiration. A. Water, B. Diethylamine, C. Pyridine. Note the continuous hydrogen bonding linkages from membrane to border in A and B and the lack of such bonding in C.

Thomas (1969) frystorkade vid lägre temperaturer och anbringade dessutom ett vakuum under torkningen. Han erhöll då icke aspirerade ringporer av samma utseende, som de efter torkning från organiska lösningar (solvent exchange drying). Bramhall och Wilson (1971) frystorkade vedprover av Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) vid 50 mm Hg absolut tryck och -50° C till konstant vikt. De erhöll nästan lika hög permeabilitet som vid torkning i organiska lösningar. Meyer (1970) rapporterar att ringporernas aspiration nästan helt förhindrades när splintvedsprover av Douglas-fir från kustregionen frystorkades vid -70° C och ett tryck något mindre än 1 mm Hg.

Det är alltså uppenbart att frystorkning vid succesivt lägre temperaturer gradvis ökar vedens permeabilitet på grund av att ett minskande antal ringporer aspirerar. För att uppnå tillfredsställande effekt krävs emellertid mycket låga temperaturer och högt vakuum. Metoden är därför inte genomförbar i praktiken.

3.4.3.3. Deaspiration

Det har antagits att ringporernas aspiration är en irreversibel process (Liese 1951, Krahmer och Côté Jr 1963), dvs. att porerna är omöjliga att öppna, sedan de en gång stängts. Emellertid fann Nicholas (1967) att ringporernas aspiration var en reversibel process om deaspirationen utfördes snart efter det att veden torkats. Ju längre veden förblev i torkat tillstånd desto sämre gick det att deaspirera ringporerna. Genom att i vatten blötlägga tidigare lufttorkade vedprover av Southern pine och därefter genom "solvent exchange drying" torka dem från pentan erhöll Thomas och Kringstad (1971) pormembraner i icke-aspirerat tillstånd. Utsträckningen av den tid under vilken pormembranen befann sig i aspirerat tillstånd minskade behandlingens verkan. För prover som var torkade till 5 % fuktkvot under 3 månader deaspirerade till exempel nästan alla porer efter blötläggning i vatten under en vecka. Hos prover torkade 7 månader blev efter en veckas blötläggning emellertid endast 40 % av porerna deaspirerade och många av dessa endast delvis. Andra prover torkade 13 månader och därefter blötlagda en vecka deaspirerade inte. När blötläggningen utsträcktes till fyra veckor avslöjade dock många porer en partiell deaspiration i margos yta nära intill torus. Nödvändigheten av att utsträcka blötläggningen

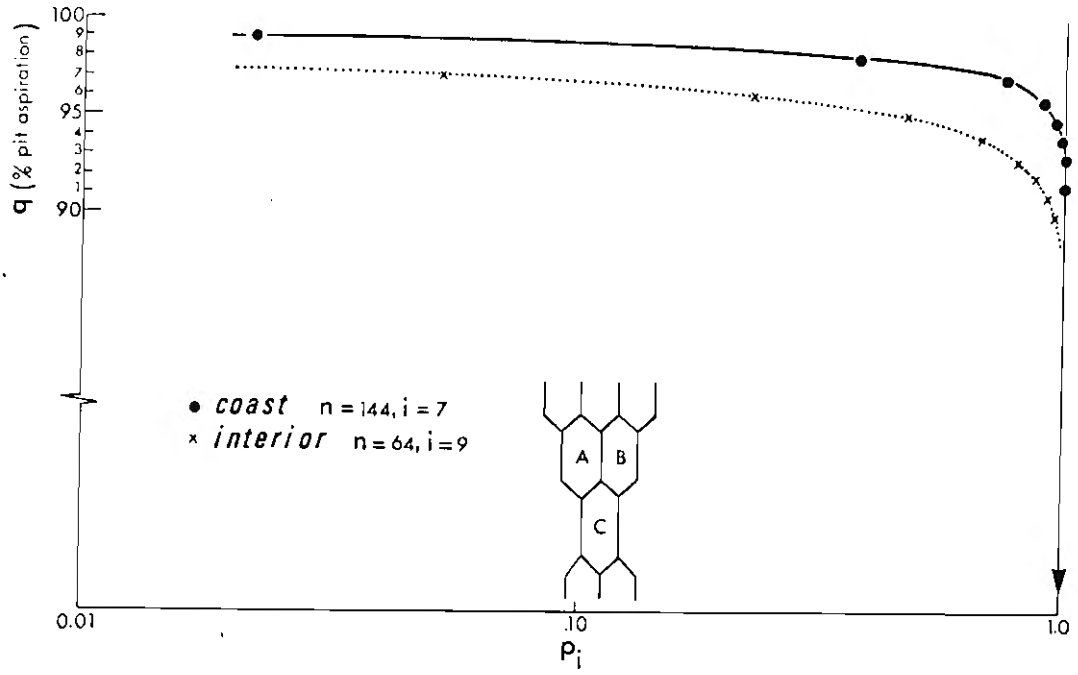
för att uppnå deaspiration antogs bero på att flera vätebindningar bildades när tiden i aspirerat tillstånd förlängdes.

3.4.3.4. Sambandet mellan poraspiration och permeabilitet - en statistisk modell

Meyer (1970) har beräknat sannolikheten för att en trakeid av Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) på ett avstånd av 25 mm från vedytan skall fyllas med vätska vid longitudinell inträngning (permeabilitetsmätning). Vid sannolikhetsberäkningen användes en förenklad modell av en trakeid (fig. 5). Trakeiderna antages överlappa varandra med en fjärdedel av sin längd. Medelantalet porer per trakeid (n) fördelas jämnt över de fyra kontaktytorna mellan trakeiderna. Inget flöde skall kunna ske från en trakeid till en annan trakeid om alla porer som förenar de två trakeiderna är aspirerade. Varje por antages ha samma sannolikhet att vara aspirerad (q) eller icke aspirerad (p), där p+q = 1. Det är möjligt att beräkna sannolikheten p att en genomträngande vätska skall penetrera en given sträcka vid användning av relationen

$$p_{i+1} = p_i(1-q^{n/4}) \left[2-p_i(1-q^{n/4})\right]$$

där i är vedprovets längd uttryckt i antalet fullständiga trakeider. Värdena på i, n och q är speciella för varje givet vedstycke och kan bestämmas mikroskopiskt. Av figur 5 framgår att vid poraspirationsnivån 95 % kommer mindre än hälften av trakeiderna av inlandstypen att bli vätskefyllda medan 96 % av trakeiderna från kusttypen kommer att bli vätskefyllda.



Figur 5. Sannolikheten för att påträffa vätskefyllda trakeider 25 mm från vedytan. Värdena erhållna efter användning av anatomiska parametrar för splintved av Douglas-fir från kust- och inlandsregionerna. Den anatomiska modellen förklaras i appendix (se Meyer 1970).

Probability of occurrence of fluid-filled tracheids 25 mm from wood surface, obtained using anatomical parameters for coast and interior Douglas-fir sapwood. The anatomical model is explained in Appendix (see Meyer 1970).

4. Faktorer som har samband med vedens ursprung

I detta avsnitt behandlas hur sådana faktorer som trädets växtplats, vedens densitet, årsringsbredd, vår- och höstved, splint- och kärnved, m.m. påverkar barrvedens permeabilitet.

4.1. Trädets växtplats

I flera undersökningar har det påvisats att Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) som vuxit vid Stillahavskusten varit lättare att impregnera än den som vuxit i Klippiga bergen (Krahmer 1961, Miller 1961, Blew Jr 1961). Krahmer (1961) observerade skillnader i trakeidernas storlek och form mellan kust- och inlandstypen (se avsnitt 3.1.). Blew Jr (1961) rapporterar att snabbvuxen kärnved av kusttypen från bonitetsklass II i Oregon visade något bättre upptagning och penetrering av kreosot än senvuxen kärnved från bonitetsklass IV. Materialet i de båda klasserna hade samma procentandel höstved. Bramhall (1966) undersökte Douglas-fir från 26 områden i British Columbia. Han kom fram till att vedprover från torrare områden visade lägre permeabilitet än de från områden med hög nederbörd (Liese & Bauch 1967 b).

Buro & Buro (1959 b) jämförde luftpermeabiliteten hos tall (Pinus silvestris) från Tyskland och Sverige. Vid lika splintvedsbredd visade svensk tall en lägre radiell permeabilitet än tysk tall. Den axiella och tangentiella permeabiliteten var i stort sett densamma hos de två grupperna.

Det har i praktiken visat sig att tall från norra Sverige i allmänhet är svårare att impregnera än tall från södra Sverige.

Ibland har ett stort antal impregneringsmissar noterats för ved från vissa ganska begränsade områden. Holmgren (1961) antyder att tall som vuxit på kalkmark är mer svårimpregnerad. Något exakt bevis för detta finns inte. Kremers (1963) anger att kalciums viktigaste funktion i växande ved kanske är dess förening med pektinämnena i den sammansatta mittlamellan, där det påverkar cellväggens struktur och förflyttningen

av material för ämnesomsättningen in i eller ut ur cellen. Det kan kanske finnas ett samband mellan markens kalkhalt och ringporernas utveckling.

4.2. Vedens densitet

Den absoluta porositeten hos ett poröst medium, sådant som ved, är definierat som den del av hela materialets volym vilken upptages av tomrum. Den effektiva porositeten är emellertid den del av hela volymen som utgöres av sammankopplade tomrum. Materialets permeabilitet beror på den effektiva porositeten och storleken av öppningarna mellan tomrummen. Om den absoluta porositeten ensam vore en faktor som påverkade permeabiliteten, så skulle denna vara beroende av densiteten (Resch & Ecklund 1964).

I en del undersökningar har man studerat sambandet mellan vedens densitet och permeabilitet. I de flesta fall har inte något sådant samband kunnat påvisas. Så fann till exempel Resch och Ecklund (1964) inget samband mellan densitet och longitudinell permeabilitet hos Redwood (Sequoia sempervirens). De undersökte 45 prover vars medeldensitet var 0,364 och högsta och lägsta densitet 0,506 respektive 0,280. Miller (1961) och Koran (1964) kunde inte heller påvisa något samband mellan densitet och permeabilitet hos Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii). Erickson och Crawford (1959) fann däremot att flödeshastigheten avtog med stigande densitet hos prover av Douglas-fir, kusttypen (Pseudotsuga menziesii) och Western hemlock (Tsuga heterophylla). Sambandet var emellertid endast svagt signifikant. Arganbright och Wilcox (1969) observerade att permeabiliteten och upptagningen hos prover av White fir (Abies concolor) inte visade något samband med densiteten.

4.3. Årsringsbredd

En faktor med nära anknytning till densiteten är årsringsbredden. Hos Douglas-fir fann Koran (1964) inget signifikant samband mellan årsringsbredd och luftpermeabilitet respektive upptagning av kreosot. Årsringsbredden avtog från märgen till periferin medan varken kreosotupptagningen eller luftpermeabiliteten följde samma mönster.

Hos gran (Picea abies) påvisade Becker och Starfinger (1956) att med sjunkande årsringsbredd avtog upptagningen av såväl vattenlösliga som oljelösliga impregneringsmedel. Spridningen var dock ganska stor. Hos tall (Pinus silvestris) kunde de inte fastställa något samband mellan upptagning och årsringsbredd. Buro och Buro (1959 b) observerade en tendens till högre permeabilitet hos prover av tall (Pinus silvestris) med breda årsringar än hos de med smala, fastän spridningen var utomordentligt stor. De fann också att årsringsbredden avtog med splintbredden, varför de framhåller, att årsringsbredden inte ensam kan användas som mått på permeabiliteten. Splintbredden och framför allt provets läge i splinten har större betydelse för permeabiliteten.

4.4. Vårved och höstved

I avsnitten om ringporernas uppbyggnad och aspiration nämndes i flera sammanhang förekommande olikheter mellan vårved och höstved. Vid torkning av splintvedsprover av tall (Pinus silvestris) från en medelfuktkvot av 150 % till 25 % fann Banks (1968), att flödeshastigheten genom vårved föll avsevärt; från ett medelvärde av 13 till 1,2 ml/min i de yttre årsringarna och från 5 till 1,5 ml/min i de inre årsringarna av splintveden. I höstvedsdelarna av årsringarna minskade flödeshastigheten mycket mindre vid torkningen; från 3,0 till 1,3 ml/min i de yttre årsringarna och från 0,8 till 0,5 ml/min i de inre årsringarna. I kärnveden observerades små skillnader såväl mellan vår- och höstved som mellan färskt och torrt material. Medelflödeshastigheten genom färska prover var 0,4 ml/min och genom torkade prover 0,5 ml/min. Phillips (1933) observerade att de flesta ringporerna i färsk splintved var i öppet tillstånd, medan vid fuktkvoter nära och under fibermättnadspunkten, alla utom 2 % av vårvedens ringporer hos tall (Pinus silvestris) befanns vara aspirerade. I höstved däremot aspirerade endast 33 % av porerna under torkningen. Dessa observationer stämmer väl överens med det föregående, eftersom stora förändringar i flödeshastigheten noterades vid torkning av splintvedens vårved, medan endast små förändringar i flödet erhölls mellan våt och torr höstved hos splintvedsproverna (Banks 1968).

Stemserud (1959) impregnerade ved av tall (Pinus silvestris) med saltimpregneringsmedlet Tanalith, som gjorts radioaktivt. Efter förask-

ning av veden mättes aktiviteten hos två vår- och höstvedsprover (tab. 3). Av tabellen framgår att vårveden innehöll mer impregneringsmedel per gram räknat än höstveden medan per volym ved räknat, höstveden innehöll mer impregneringsmedel än vårveden.

Tabell 3. Aktiviteten (antal impulser per min.) hos impregnerad radioaktiv vår- och höstved av tall efter föraskning. (Stemserud 1959).

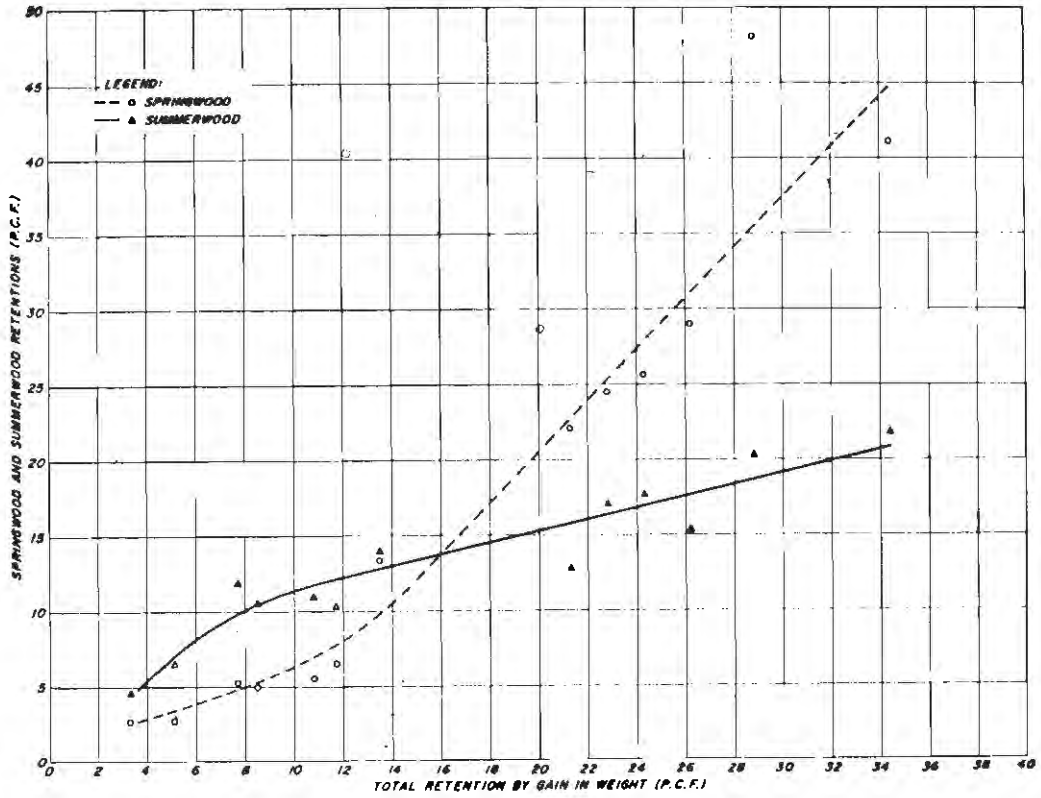
Activity (number of impulses per minute) of impregnated radio-active springwood and summerwood of Scots pine after ashing.

	Antal impulser per minut Number of impulses per minute		
	absolut total	per g ved per g of wood	per cm^3 ved per cm^3 of wood
Höstved, Summerwood	85	277	233
Vårved, Springwood	147.5	481	188
Höstved, Summerwood	114	287	241
Vårved, Springwood	115	484	189

Gjovik et al. (1970) mätte upptagningen av kreosotolja i vår- och höstved av Longleaf pine (Pinus palustris) vid olika total upptagning. Vid en total upptagning under 16 pcf (pounds per cubic foot) var upptagningen i höstved större än i vårved (fig. 6) och vid upptagningar över 16 pcf blev upptagningen större i vårveden. Höstveden är lättare att impregnera på grund av mindre aspiration i ringporerna. Därför fylls dess cellumina först. Vid en förlängning av trycktiden går impregneringsmedlet in i de tunnväggiga vårvedscellerna. För att skydda virke mot angrepp av Limnoria-arter som företrädesvis angriper vårveden är det således viktigt att utsträcka behandlingstiden.

4.5. Splintved och kärnved

Tall, Douglas-fir och lärk har mörkfärgad kärna som är lätt att skilja från splinten. Hos gran däremot visar endast den färska veden skillnader mellan kärna och splint, orsakade av olika fuktkvoter. Så snart som veden torkat försvinner observerbara skillnader mellan kärnved och splintved.



Figur 6. Förhållandet mellan upptagningar hos vårved och höstved vid varierande total upptagning (Gjovik et al. 1970).

Relation of springwood and summerwood retentions to varying total retentions.

Hos de flesta barrträdslag är splintveden väsentligt mer permeabel än kärnveden, vilket är ett välkänt faktum. Hos tall (Pinus silvestris) fann man, till exempel, att det radiella vattenflödet var omkring 1.000 gånger större i splintved än i kärnved (Erickson 1970). Hillis (1968) anger att det krävs tryck på omkring 70 kp/cm^2 för att nöjaktigt impregnera kärnved medan det räcker med 10-15 kp/cm^2 för att impregnera splintved. Ett undantag har dock rapporterats beträffande White fir (Abies concolor). Hos detta trädslag visade kärnveden både högre behandlingsindex och högre upptagningar än splintveden (Arganbright & Wilcox 1969).

I föregående avsnitt (4.4.) visades att flödeshastigheten var större i den yttre delen än i den inre delen av tallens splintved (Banks 1968). Markstrom och Hann (1972) mätte permeabiliteten hos Lodgepole pine (Pinus contorta), Engelmann spruce (Picea engelmannii) och Douglas-fir,

bergstypen (Pseudotsuga menziesii). Både vätske- (vatten och gas- (kvävgas) permeabiliteten, som mättes på färska respektive torkade vedprover var större i splinten än kärnan. Vätskepermeabiliteten i den yttre splinten hos de tre trädslagen blev större än i den inre splinten. I kärnans delar fanns däremot inga skillnader. Gaspermeabiliteten varierade inte nämnvärt inom splinten respektive kärnan. Comstock(1965) fann också att permeabiliteten hos Eastern hemlock (Tsuga canadensis) var avsevärt högre i yttre än i inre splinten. Inom kärnveden var skillnaderna mycket små.

I figur 7 visas luftpermeabiliteten hos vedprover av tall (Pinus silvestris) på olika avstånd från kambiet (Buro & Buro, 1959 b). Det vänstra diagrammet (a) visar det mest förekommande kurvförloppet. Här sjunker flödesmängden per tidsenhet mer eller mindre regelbundet från kambiet och inåt. Vid kärnans början faller den brant. I några enstaka fall visar sig permeabiliteten inom splinten vara förhållandevis oberoende av provets avstånd från kambiet (diagram b). I ett fall har hos tall (Pinus silvestris) rapporterats högre upptagning av impregneringsmedel i splintvedsdelen närmast kärnvedsgränsen än i den övriga delen av splintveden (Stemserud 1959, jfr även avsnitt 3.4.2.1.).

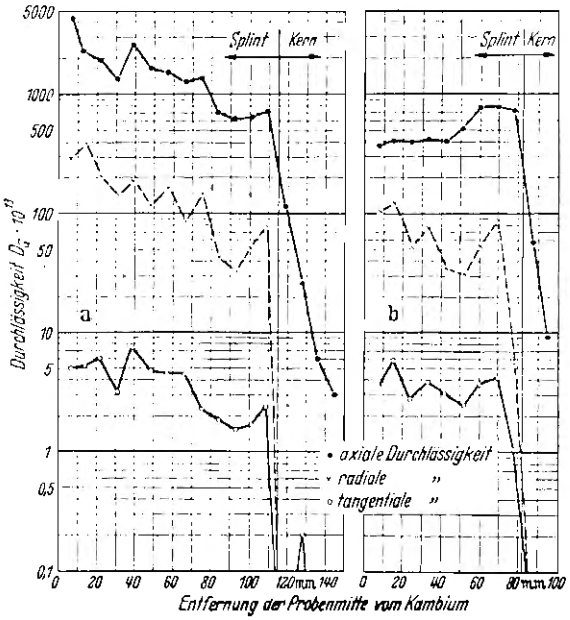
4.6. Permeabilitetens variation från trädets rot till topp

Medan permeabilitetens variation från kambiet till märgen redovisats i ett flertal undersökningar finns endast ett par uppgifter om variationen från rot till topp.

Buro och Buro (1959 b) undersökte luftpermeabiliteten hos vedprover av tall (Pinus silvestris) upp till en maximal höjd av 8 m. På grund av materialets otillräckliga storlek kunde inte någon slutgiltig bild fastslås, men undersökningarna tydde dock på att permeabiliteten avtog med stigande höjd. Comstock (1965) som arbetade med Eastern hemlock (Tsuga canadensis) fann däremot att permeabiliteten ökade med stigande höjd.

Choong och Fogg (1972) rapporterar nyligen att gaspermeabiliteten tenderade att öka svagt med stigande höjd hos äldre (50 år) träd av Shortleaf pine (Pinus echinata). Hos yngre träd (10 år) noterades inga

skillnader såväl med höjden som med avståndet från märgen. Detta förklarades med att veden hos träd i den åldern befann sig i ungvedsstadiet (juvenile stage).



Figur 7. Permeabilitet hos två tallvedsprover (Pinus silvestris) i tre anatomiska riktningar i förhållande till provets avstånd från kambiet (Buro & Buro 1959 b).

Permeability of two specimens of Scots pine in three anatomical directions in relation to the distance of the specimen from the cambium.

5. Faktorer som har samband med virkets behandling före impregneringen

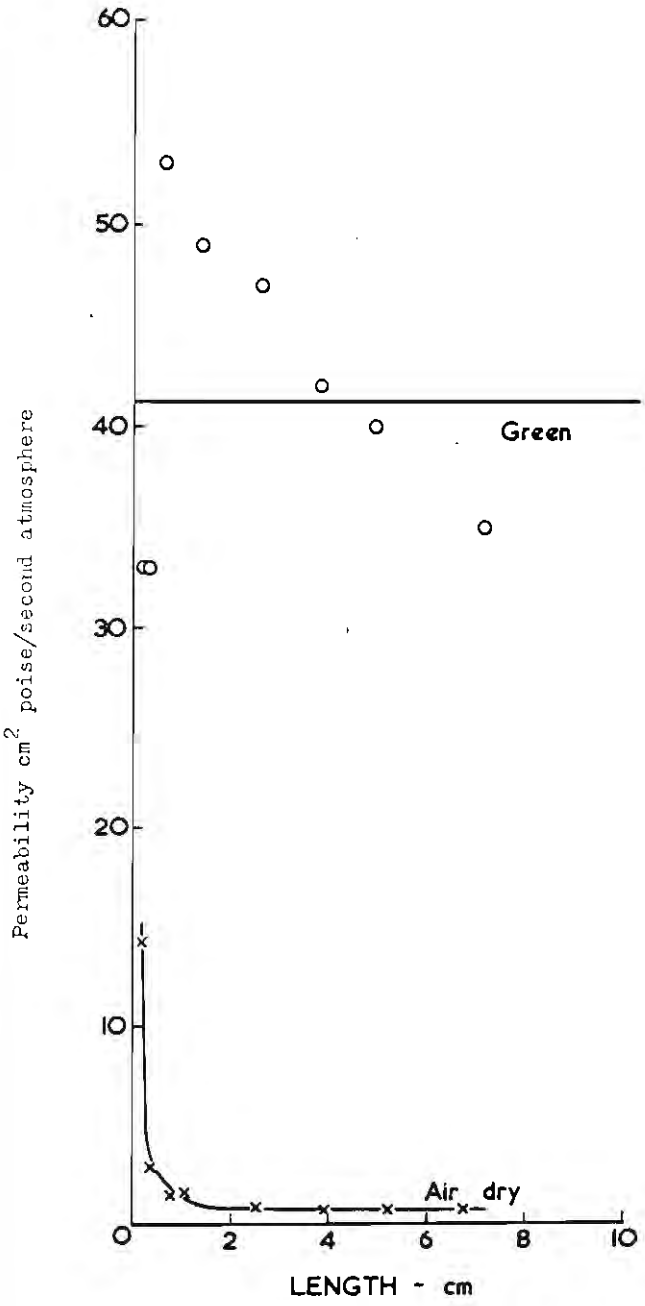
Virkets behandling före impregneringen har stor betydelse för impregneringsresultatet. I syfte att förbättra inträngningen hos svårimpregnerat virke har man prövat olika torkningsmetoder, biologisk behandling och behandling med ånga och kemikalier.

5.1. Virkets torkning

För att impregneringsmedlet skall kunna fördela sig jämt i veden bör hela splintveden ha torkats till en fuktkvot under fibermättnadspunkten. När fuktkvoten ligger över fibermättnadspunkten finns fritt vatten i cellhåligheterna. Detta minskar det disponibla utrymmet för impregneringsmedlet. När icke vattenlösliga medel användes hindrar fritt vatten även inträngningen på grund av att ytspänningskrafter utvecklas (Holmgren 1952, Koljo 1953).

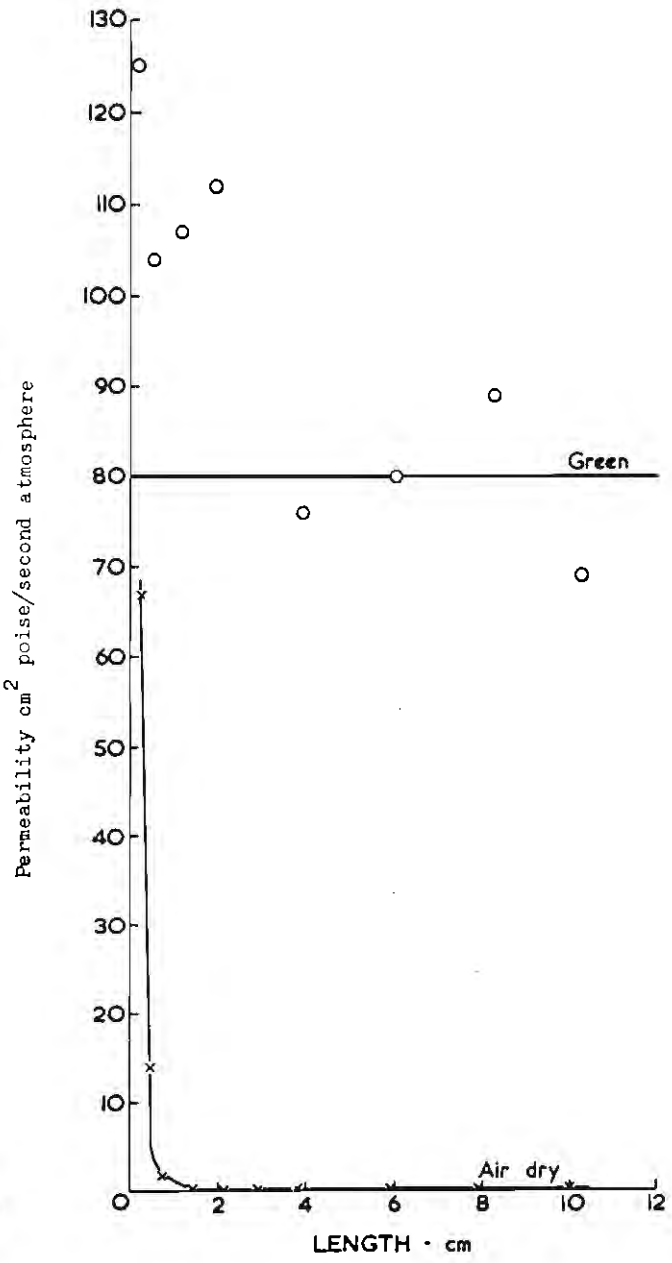
Som tidigare visats leder en torkning av veden till ökad aspiration av ringporerna vilket i sin tur kraftigt reducerar möjligheterna för impregneringsmedlet att tränga in i veden.

Banks (1970 a) mätte permeabiliteten i longitudinell, tangentiell och radiell riktning hos olika långa vedprover av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies). På råa vedprover mättes permeabiliteten för vatten och på torkade för kvävgas. Före torkningen var faktiskt den longitudinella permeabiliteten något högre hos gran än hos tall (fig. 8 och 9). Efter torkning blev dock permeabiliteten för granprover över 0,5 cm i längd (ca en trakeidlängd) nästan lika med noll medan tallproverna fortfarande förblev något permeabla. Även i tangentiell riktning medförde torkningen en större minskning av permeabiliteten hos gran än hos tall (fig. 10 och 11). Permeabiliteten i radiell riktning minskade med ökad längd hos proverna för både rå och torr ved (fig. 12 och 13). För prover av tall längre än 0,5 cm ökade faktiskt permeabiliteten efter torkningen. Hos torkade prover blev den radiella permeabiliteten hos tall högre än den tangentiella permeabiliteten och även högre än både den radiella och den tangentiella permeabiliteten hos gran.



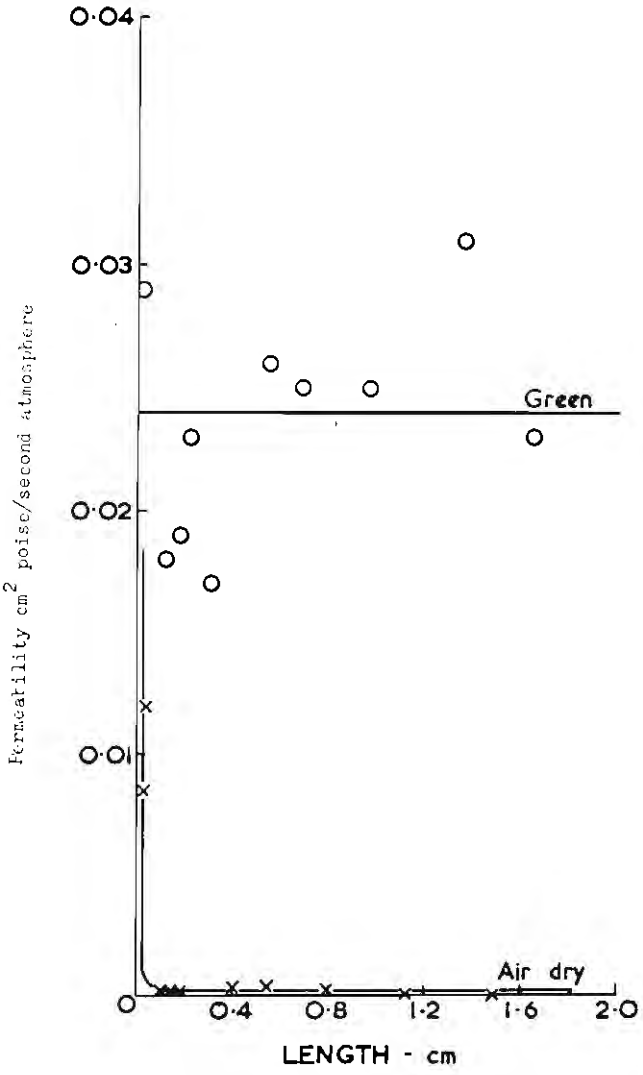
Figur 8. Tall (Pinus silvestris), longitudinellt flöde (Banks 1970 a).

Scots pine, longitudinal flow.



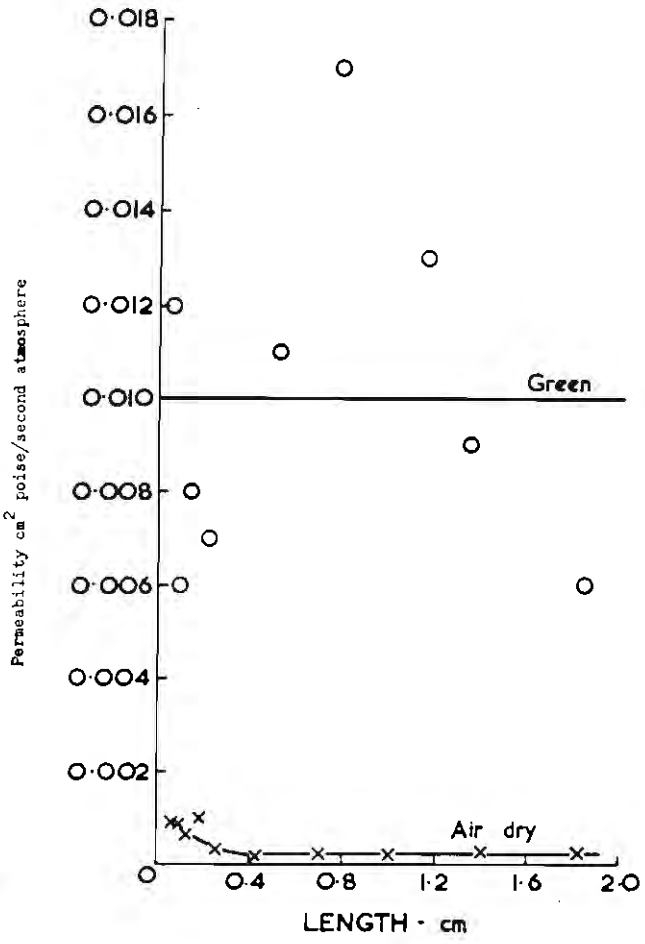
Figur 9. Gran (Picea abies), longitudinellt flöde (Banks 1970 a).

Norway spruce, longitudinal flow.



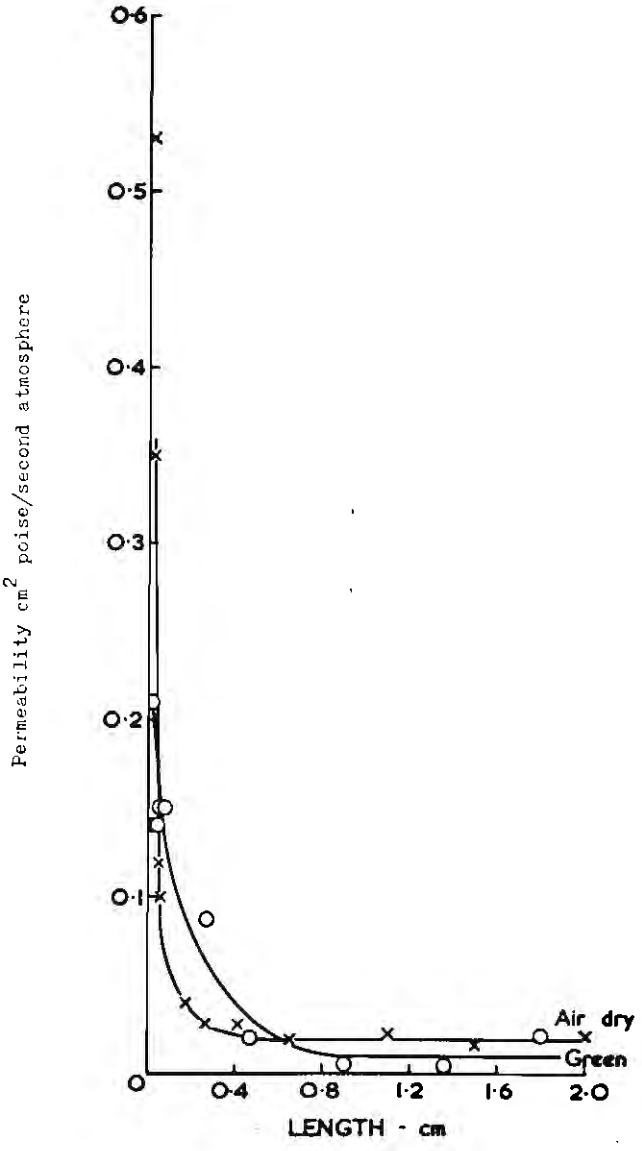
Figur 10. Tall (Pinus silvestris), tangentiellt flöde (Banks 1970 a).

Scots pine, tangential flow.



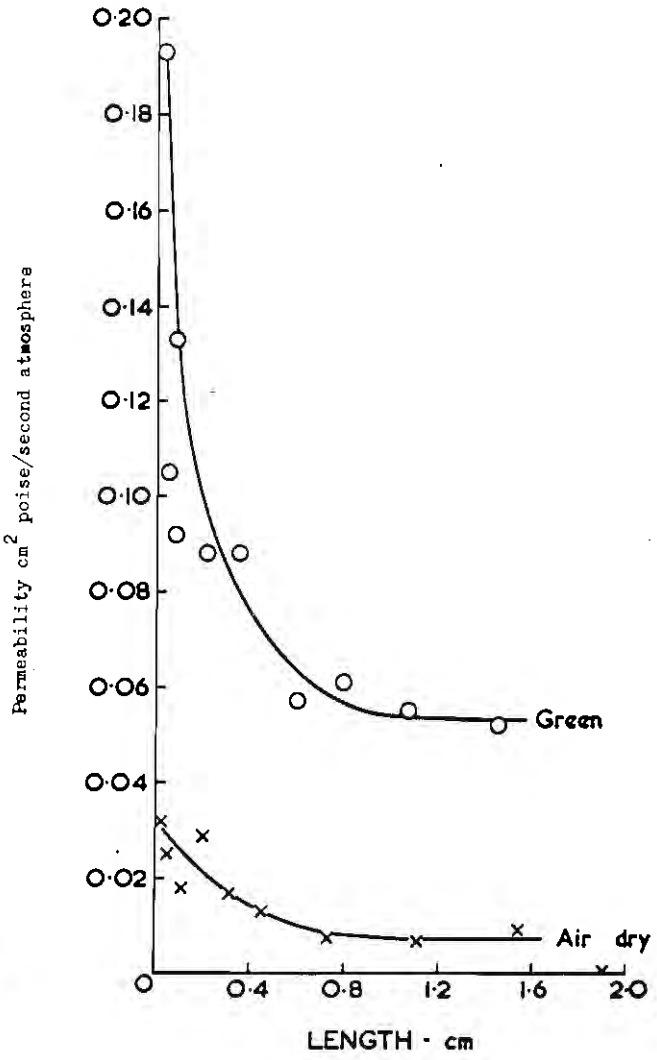
Figur 11. Gran (Picea abies), tangentiellt flöde (Banks 1970 a).

Norway spruce, tangential flow.



Figur 12. Tall (Pinus silvestris), radiellt flöde (Banks 1970 a).

Scots pine, radial flow.



Figur 13. Gran (Picea abies), radiellt flöde (Banks 1970 a).

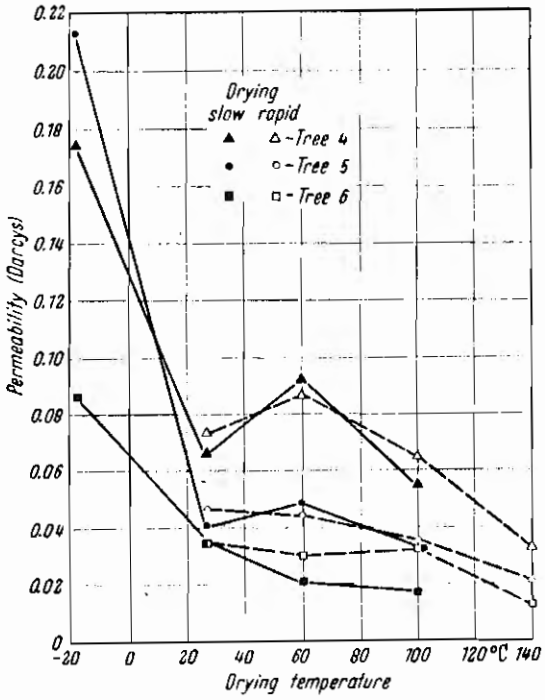
Norway spruce, radial flow.

Erickson och Crawford (1959) torkade vedprover av Douglas-fir, kusttypen (Pseudotsuga menziesii) och Western Hemlock (Tsuga heterophylla) långsamt, medium och snabbt (103° C). Efter torkningen visade de prover som torkats långsamt omkring 50 procent högre permeabilitet än de som torkats medium och snabbt. Erickson och Crawford (1959) prövade också infraröd torkning under vakuum. Metoden visade sig ge högre permeabilitet än vanlig lufttorkning.

Comstock och Côté (1968) torkade splintvedsprover av Eastern hemlock (Tsuga canadensis) vid följande temperaturer -18° C, 20, 60, 100 och 140° C. Vid de tre mellersta temperaturerna användes två torkningshastigheter. Vid den lägsta temperaturen förekom endast långsam torkning och vid den högsta endast snabb torkning. Vattenpermeabiliteten före torkning uppgick i medeltal till 2,78 Darcys. I figur 14 visas sambandet mellan permeabiliteten för kvävgas och torkningstemperaturen. De prover som torkats vid -18° C gav en avsevärt bättre permeabilitet än de som torkats vid högre temperaturer, men den blev ändå endast 5 % av permeabiliteten före torkningen. Över 27° C märktes en gradvis avtagande permeabilitet med stigande temperatur. Torkningshastigheten hade ingen inverkan på permeabiliteten. Den starkare aspirationen vid högre temperaturer är uppenbarligen mer beroende av den större plasticiteten hos veden vid denna temperatur än av ytspänningen, eftersom ytspänningen minskar med ökande temperatur (Comstock och Côté 1968).

Thompson (1969) fann också att stolpar av sydstatstall torkade vid 182° F (83° C) visade signifikant lägre upptagning av kreosotolja än stolpar torkade vid maximalt 152° F (67° C). Endast 14 % av stolparna i den förra gruppen tog upp 7 pounds per kubikfot (112 kg/m^3) och mer, jämfört med 90 % av stolparna i den senare gruppen.

Siau och Shaw (1971) jämförde ugnstorkat virke med lufttorkat virke i en undersökning som omfattade sju östliga och fem västliga Nordamerikanska trädslag. De fann att både luftpermeabiliteten och upptagningen av oljemedel efter tryckimpregnering i allmänhet var bättre för ugnstorkat virke än för lufttorkat.



Figur 14. Permeabilitetsvärden för kvävgas (korrigerade för "slip flow") hos torra vedprover som funktion av torkningstemperatur och torkningshastighet. Permeabiliteten före torkningen var i medeltal 2,78 Darcys (Comstock & Côté 1968).

Slip-corrected nitrogen permeability of dry specimens as a function of drying temperature and rate of drying. Permeability before drying averaged 2.78 Darcys.

Markstrom och Hann (1972) insamlade vedprover av Lodgepole pine (Pinus contorta), Engelmann spruce (Picea engelmannii) och inlandstypen av Douglas-fir (Pseudotsuga menziesii) under fyra säsonger nämligen vår, sommar, höst före frosten och vinter under frosten. Någon skillnad mellan de olika säsongerna beträffande vätske- och gaspermeabiliteten, som mättes på färska respektive torkade vedprover, kunde inte fastställas. Fukthalten i splintveden varierade signifikant mellan säsongerna, och den var högst under vintern.

Holmgren (1952) undersökte hur olika barkningssätt såsom helbarkning, savbarkning och skalbarkning kunde påverka upptagningen av dels vattenlösligt saltmedel och dels kreosotolja. Den första barkningsmetoden gav något långsammare torkning. Före impregneringen torkades dock alla

proverna till samma fuktkvot. Någon skillnad i upptagning mellan de olika barkningssätten kunde inte konstateras.

Suolahti (1954) fann att furustolpar som lagrats två somrar visade större upptagning av vattenlösligt saltmedel än stolpar som lagrats endast en sommar. För stolpar som avverkats på våren kunde inte tillfredsställande impregneringsresultat erhållas före hösten. Hos virke som torkats under längre tid utomhus kan det antagas att inte enbart den utsträckta torktiden inverkar på impregnerbarheten, utan att virket också utsätts för biologisk nedbrytning, vilket kan förändra permeabiliteten (se nästa avsnitt).

5.2. Biologisk behandling av virket

Biologisk behandling av virket före impregneringen omfattar vattenlagring vilket i allmänhet ger upphov till bakterieangrepp samt behandling med Trichoderma och med enzymer.

5.2.1. Vattenlagring

Ganska tidigt erfor man att flottat virke var lättare att effektivt impregnera än icke flottat. För att fastlägga vattenlagringens inverkan utförde Holmgren (1952) ett försök med rundvirke av tall (Pinus silvestris) som barkats på olika sätt (se avsnitt 5.1.). Direkt efter barkningen lagrades hälften av virket i sjövatten under juni månad. Därefter torkades det vattenlagrade virket tillsammans med den andra hälften, som hela tiden lagrats på land. Impregneringen utfördes dels med kreosotolja och dels med vattenlösligt salt. Det vattenlagrade virket erhöll väsentligt bättre upptagningar än det virke som lagrats på land hela tiden. Någon tillfredsställande förklaring till den förbättrade impregnerbarheten kunde inte ges.

I slutet av 1950-talet genomfördes i Finland omfattande försök med vattenlagring av tall (Pinus silvestris) av Suolahti och Wallén (1958) och Suolahti (1961). Även dessa försök visade högre upptagningar hos virke som vattenlagts någon tid. De sökte efter olika förklaringar till det inträffade, och fann därvid att en ökning av upptagningen alltid åtföljdes av en minskning av vedens pektinhalt. De påvisade också att pektinet bröts ned av mikroorganismer.

Först med Ellwood och Ecklunds (1959) undersökning blev det fastlagt att det var bakterier som orsakade den ökade porositeten hos virke vid vattenlagring. Den bakterie som påträffades mest var B. polymyxa. Den angrep hemicellulosa och pektin men inte cellulosa.

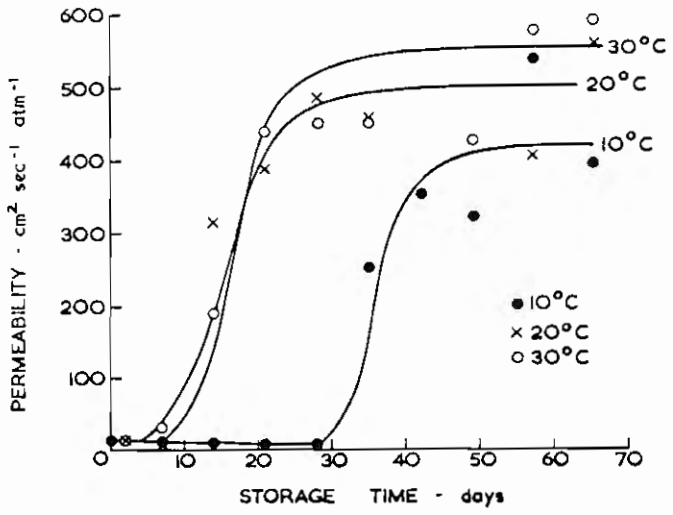
Efter Ellwood och Ecklunds (1959) rapport har flera undersökningar publicerats, som behandlar vedens ökade permeabilitet orsakad av bakterieangrepp vid lagring i vatten. Med vattenlagring har man påvisat förbättrad impregnerbarhet i splintved av tall (Pinus silvestris) i bland annat följande undersökningar: Anonym (1964), Vasilev (1965), Liese och Karnop (1968), Karnop (1972 a och b), Banks (1970 b) och Bauch et al. (1970). I ett par undersökningar har man även noterat en tendens till mindre utsvettning av kreosotolja hos furustolpar som vattenlagrats före impregneringen (Holmgren 1961, Liese & Karnop 1968).

Det har även visat sig möjligt att med vattenlagring avsevärt öka permeabiliteten i splintved hos så pass svårimpregnerade trädslag som gran (Picea abies), Sitkagran (Picea sitchensis) och White spruce (Picea glauca). Rapporter över detta har publicerats av bland andra Vasilev (1965), Liese och Karnop (1968), Karnop (1972 a och b), Schulz (1968), Vakin et al. (1968), Banks (1970 b), Bauch et al. (1970), Dunleavy och McQuire (1970), Dunleavy och Fogarty (1971, 1972), Gerstetter och Liese (1972) och Unligil (1971, 1972).

Ökad porositet, som vattenlagring medför, är inte alltid önskvärd. Den kan nämligen orsaka överabsorption och ojämn fördelning av impregneringsvätska i veden vid doppning av till exempel fönsterelement. Från de partier som tagit upp för mycket vätska kan sedan vätskan sprida sig och missfärga en efterföljande ytbehandling. Ibland är man emellertid tvungen att lagra sågtimmer i vatten kortare eller längre tid för att skydda det mot angrepp av blånads- och rötsvampar. Överabsorption i samband med vattenlagring har behandlats av bland andra Ellwood och Ecklund (1959), Knuth och McCoy (1962), Mac Peak (1963), Anonym (1965), Hof (1971) och Jutte (1971). För att minska den bakteriella nedbrytningen vid vattenlagring och därmed undvika överabsorption har man försökt att behandla antingen stockarna (Ellwood & Ecklund 1959) eller vattnet (Mac Peak 1963). Den förra metoden fungerade inte och den senare var för dyrbar.

5.2.1.1. Inverkan av vattnets temperatur och lagringstidens längd

Banks (1970 b) lagrade vedprover (2,5 cm långa) av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) i vatten från en damm vid 10, 20 och 30° C. Proverna togs ut vid olika tidpunkter och torkades till en fuktkvot av 15 %. Efter torkningen mättes permeabiliteten med kvävgas. Av figur 15 framgår att permeabiliteten ökade snabbare vid 20° C än vid 10° C men att temperaturökningen till 30° C hade liten effekt.



Figur 15. Longitudinell permeabilitet hos splintved av gran (Picea abies) lagrad under vatten från en damm (Banks 1970 b).

Longitudinal permeability of Norway spruce sapwood, stored by immersion in log pond water.

Vid vattenlagring av tall (Pinus silvestris) fann Liese och Karnop (1968) att upptagningen ökade avsevärt redan efter fyra veckor sommartid. En förlängning av lagringstiden till två respektive tre månader medförde ingen ytterligare ökning.

Schultz (1968) lagrade stolpar av gran (Picea abies) i stillastående vatten från juli till september. Därefter lagrades de utomhus tillsammans med kontrollerna och sedan inomhus för att de skulle erhålla samma fuktkvot. Impregneringarna utfördes med ett vattenlösligt salt

enligt fullcellmetoden. Vakuumtiden var 3 timmar och trycktiden 5 timmar vid 10 atm. Resultaten från impregneringarna visas i tabell 4.

Tabell 4. Resultat från impregnering av granstolpar som vattenlagrats (Schulz 1968).
Results of preservation of water-stored poles of Norway Spruce.

Stolparnas förbehandling Pretreatment of the poles	Genomsnittlig upptagning av impregneringslösning Average retention of preservative kg/m^3	Genomsnittligt inträngningsdjup Average penetration mm
Ingen vattenlagring No water storage	174.0	11.5
Vattenlagring 4 veckor Water storage 4 weeks	217.8	16.2
Vattenlagring 8 veckor Water storage 8 weeks	230.0	19.4

Unligil (1971, 1972) rapporterar nyligen två försök med lagring av klampar av White spruce (Picea glauca) sommartid i sjövatten. Vattenlagring fyra månader ökade permeabiliteten hos virket i sådan utsträckning att full inträngning i splintveden erhölls både med CCA-medel och med kreosotolja. Vid en förkortning av vattenlagringen till fem veckor uppnåddes också full inträngning med kreosotolja efter 8 timmars Lowry-impregnering.

5.2.1.2. Bakterieangreppets omfattning och mönster

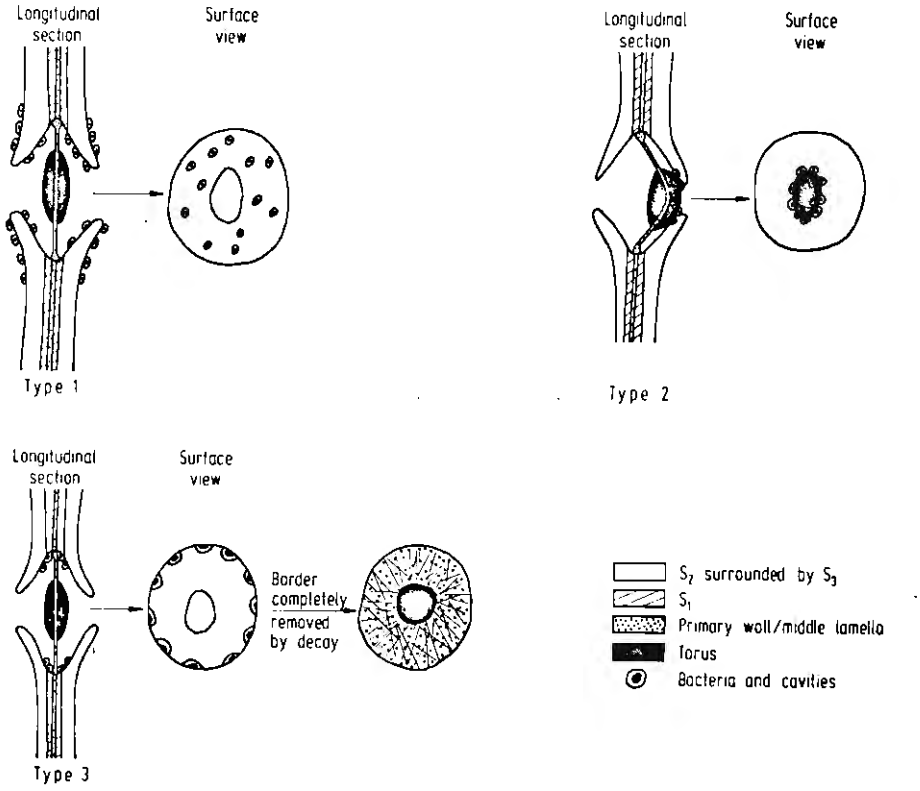
Bland de arter av bakterier som påverkar vedens porositet nämner Ellwood och Ecklund (1959) och Knuth och McCoy (1962) Bacillus polymyxa. Mac Peak (1963) anser att Desulphovibrio desulphuricans också spelar en viss roll. Bacillus omelianski (Clostridium omelianski) nämns av Liese och Karnop (1968) som en viktig bakterie på vattenlagrat virke. Den kunde anrikas inte endast i tallsplint, som vid stranden av en sjö kommit i beröring med markslam, utan även på skogsfärsk eller lufttorkad tallsplint, som lagrats tre veckor i sterilt ledningsvatten vid

rumstemperatur (Karnop 1972 b). De flesta undersökningar visar att endast barrvedens splint angrips av bakterier. Kärnveden angrips alltså inte.

De bakterier som påverkar vedens permeabilitet angriper i första hand märgstrålar och ringporer. Dessa angrepp har påvisats och beskrivits av bland andra Greaves och Levy (1965), Liese och Karnop (1968), Greaves (1969, 1970, 1971), Dunleavy och McQuire (1970), Dunleavy och Fogarty (1971, 1972) och Unligil (1972).

Märgstrålarna bildar den huvudsakliga inkörsporten för mikroorganismerna. De har också det största näringsförrådet, vilket underlättar mikroorganismernas invasion. Efter det att cellinnehållet förbrukats sker angrepp på de cellulosarika parenkymcellernas väggar (Greaves 1971). Hos tallved angrips märgstrålarnas fönsterporer snabbt, vilket kan påvisas med det pektinkänsliga basiska färgämnet astrablå. Angreppet leder slutligen till en mer eller mindre stark nedbrytning av alla pormembran och parenkymcellväggar. Särskilt påfallande är förstöringen av de märgstrålar som omsluter en hartskanal (Liese & Karnop 1968).

Greaves (1969) beskriver tre huvudtyper av bakterieangrepp på ringporer (fig. 16). Hos typ 1 sker angreppet i porkammarens öppning (border). Det kan leda till att porkammaren fullständigt bryts ned och avlägsnas. Typ 2 som observerats relativt sällan antas ske på aspirerade ringporer, som sålunda hindrar bakterierna från att komma in i porkammaren. Angreppet begränsas till poröppningens periferi och kan leda till att poren deaspirerar. Typ 3 är den mest intressanta och förmodligen den mest vanliga. Här angrips ringporen vid pormembranets ringformiga fäste. Tidiga stadier av denna angreppstyp visar en försvagad ringpor, medan vid senare stadier pormembranet helt och hållet lossnar. I extrema fall av angrepp på ringporer, där de ovan beskrivna typerna förmodligen är kombinerade, inträffar det att porkammaren, margo och torus helt avlägsnas. Passagen mellan cellumina blir då helt öppen och permeabiliteten ökar drastiskt.



Figur 16. Diagram som förklarar de tre typerna av angrepp på ringporer (Greaves 1969).

Diagram to illustrate the three types of pit border attack.

En viktig fråga i detta sammanhang är om bakterierna hinner angripa cellväggarna under den relativt korta tid som virket måste vattenlagras för att uppnå acceptabel permeabilitet. Efter ett års vattenlagring av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) kunde Liese och Karnop (1968) med ljusmikroskop inte notera några förändringar i cellväggarna hos de längsgående trakeiderna och märgstråletrakeiderna. Karnop (1972 b) framhåller att bakterierna bara kan angripa sådan cellulosa som inte är bunden till lignin. Courtois (1966) observerade däremot bakterieangrepp på cellväggarna hos vedprover som inkuberats 18 månader. Nedbrytningen var oregelbunden och började från cellumen och/eller mittlamellen. Den var delvis orienterad i fibrillernas riktning. Mittlamellen angreps mycket långsamt. Bakteriernas angrepp betraktades som obetydligt jämfört med svamparnas. Greaves (1971) rapporterar att sekundära cellväggar angripna av bakterier visade en tyd-

lig förändring av det dubbelbrytande mönstret under polariserat ljus. Det var alltså inget tvivel om att bakterierna på något sätt förändrade cellulosans ordning i sekundärväggen. Seifert (1967, 1968) fann att bakterier även kan förändra ligninet genom demetoxylering, en egenskap som de delar med de vednedbrytande svamparna (Jutte 1971).

5.2.1.3. Bevattning av virket

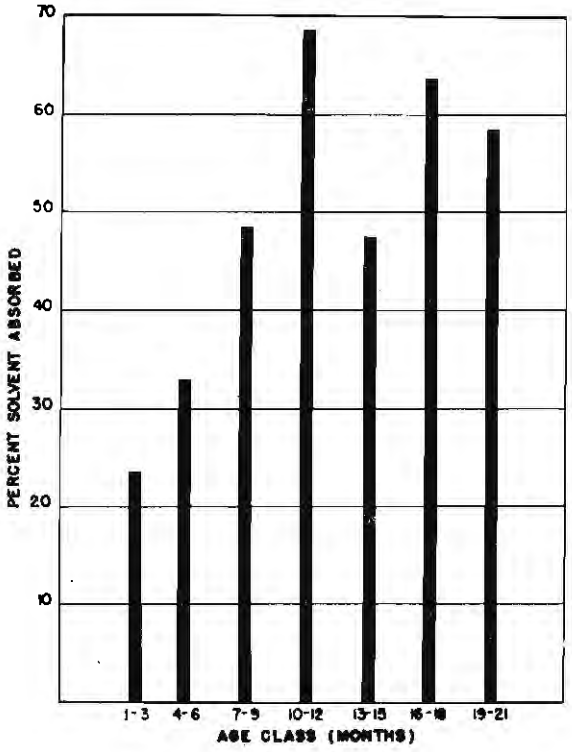
Hitintills har refererats bakterieangrepp uppkomna vid lagring av virke i sjövatten, som varit mer eller mindre stillastående. Det har därvid framgått att permeabiliteten ökat avsevärt och att problemen med överabsorption av impregneringsmedel varit omfattande. Ett alternativ till vattenlagring är bevattning av virket under lagring på land. Bevattning av sågtimmer ger nästan lika gott skydd mot blånads- och rötangrepp som vattenlagring och torde dessutom vara avsevärt billigare.

Ellwood och Ecklund (1959) observerade ingen överporositet hos virke som lagrats under bevattning, vilket avviker från andra försök. Det virke som vattenlagrats i stillastående vatten lika lång tid visade extrem porositet. Skillnaderna antogs bero på lägre temperatur och mindre bakteriepopulation hos de stockar som bevattnades. De rekommenderade därför bevattning av sågtimret i stället för vattenlagring för att övervinna problem med överabsorption.

Mac Peak (1963) utförde en studie vid ett antal sågverk över absorptionen hos bevattnat virke. Han fann därvid att absorptionen var överraskande hög redan efter en kort tids bevattning (fig. 17). Ingen skillnad kunde avslöjas mellan de sågverk som använde färskt vatten till bevattningen och de som använde vatten från stillastående dammar. Studien visade att överabsorption inte enbart var ett problem vid vattenlagring av virke utan även vid bevattning.

De Groot (1972) mätte permeabiliteten och absorptionen av oljemedel efter doppning av vedprover från Longleaf pine (Pinus palustris). Vedproverna var kapade ur stockar som bevattnats olika lång tid under sommaren. För prover tagna nära kambiet ökade permeabiliteten nästan femfaldigt varje månad under den första och den andra bevattningsmånaden. Längre från kambiet var ökningen under den första månaden tre-

faldig. Under den första månaden ökade permeabiliteten snabbast hos de vedprover som kapades 0 till 15,2 cm från stockarnas ändyta. Därefter var skillnaderna längs stockarna små. Medelpermeabiliteten efter fyra månader var endast obetydligt högre än efter två månader. Beträffande absorptionen, observerades ingen nämnvärd ökning under den första bevattningsmånaden. Under den andra månaden inträffade en stor ökning. Den uppgick till nära två tredjedelar av den totalt observerade ökningen. Maximal absorption uppnåddes vid slutet av den tredje månaden. Denna snabba ökning hade samband med en nedbrytning av märgstråleparenkymcellerna.



Figur 17. Lagringstidens inverkan på porositetens utveckling hos bevattnade tallstockar (Mac Peak 1963).

Effect of time in storage on porosity development in sprinkled pine log decks.

Under somrarna 1957, 1958 och 1961 genomförde Suolahti (1961) försök med lagring av furustolpar (Pinus silvestris) i vatten och på land under bevattning. Lagringen i fuktigt tillstånd utfördes i perioder om 2 till 4 veckor under juni och början av juli. I augusti impregnerades dessa stolpar tillsammans med de stolpar som lagrats torrt hela tiden. De bästa resultaten gav de stolpar som lagrats i vatten men även de be-

vattnade stolparna visade goda resultat. De ovan nämnda somrarna var särskilt regniga. Under torra somrar kunde det förväntas att stolpar som lagrats i vatten eller under bevattning skulle ge väsentligt bättre upptagningar än de stolpar som lagrats torrt hela tiden.

För att öka vedens permeabilitet kan det ibland räcka med att fördröja torkningen genom att täcka över virket. Av tabell 5 framgår att torkning vid 95 % luftfuktighet och 21° C under sex veckor ökade permeabiliteten hos splintved av tall (Pinus silvestris) omkring sex gånger. Nedsänkning i vatten gav även här det mest överlägsna värdet men försöket visar att en väsentlig ökning av permeabiliteten kan uppnås endast med fördröjd torkning under hög luftfuktighet (Anonym, 1964).

Tabell 5. Permeabilitetens variation hos splintved av tall (Pinus silvestris) med lagringsmetod och torkning (Anonym 1964).
Variation in permeability of Scots pine sapwood with method of storage and drying.

Typ av lagring och torkning Type of storage and drying	Permeabilitet Permeability cc/sec cm^2 atm/cm
Snabb torkning Quick drying	
Tre dagar i värmeskåp vid 35°C Three days in oven at 35°C	10
Normal torkning Normal drying	
Tre veckor vid 90 % r.h. + tre veckor vid 75 % r.h. och 25°C Three weeks at 90 % r.h. + three weeks at 75 % r.h. and 25°C	12
Långsam torkning Slow drying	
Sex veckor vid 95 % r.h. och 21°C Six weeks at 95 % r.h. and 21°C	76
Nedsänkning i sjövatten Immersion in pond water	
Sex veckor vid 21°C Six weeks at 21°C	520

r.h. = relativ luftfuktighet, relative humidity

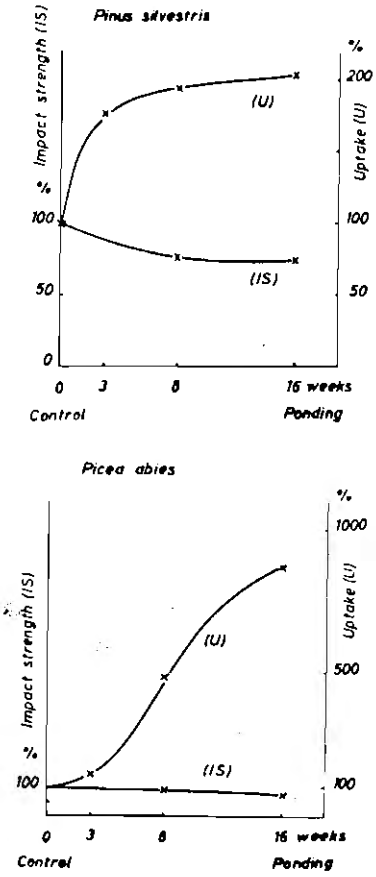
I vissa avseenden avvikande resultat från de tidigare observerade har nyligen redovisats av Moltesen et al. (1972). De impregnerade, enligt olika metoder, stolpar av stormfälld gran (Picea abies) som lagrats med bark under bevattning 11-20 månader eller helt nedsänkta i sjövatten under 3 år. Impregnering med Bolidensalt K 33 av icke torkade stolpar enligt Geweke-metoden gav dåliga resultat. Således vrakades 22 % av de stolpar som lagrats 11 månader och 53 % av de stolpar som lagrats 20 månader under bevattning samt 67 % av de stolpar som vattenlagrats 3 år, därför att de inte uppfyllde minimifordringarna beträffande inträngning och upptagning. Av kontrollstolparna, som utgjordes av nyavverkat virke, vrakades endast 11 %. Impregnering med Bolidensalt K 33 enligt fullcellmetoden av stolpar som lufttorkats till en genomsnittlig fuktkvot på 28 % (variationsvidd 19-47 %) gav också dåligt resultat, medan kreosotimpregnering enligt Rüping-metoden gav fullgod, såväl inträngning som upptagning. Det antogs att saltimpregneringens dåliga resultat kunde bero på att saltet hade en koagulerande inverkan på bakterieslemmet, vilket således kunde tänkas blockera impregneringsvätskans vidare inträngning. Det antyddes också att tryckimpregneringen kunde ha gett bättre resultat om virkets fuktkvot varit lägre.

5.2.1.4. Vattenlagringens inverkan på vedens hållfasthet

I slutet av avsnitt 5.2.1.2. nämndes att angrepp på cellväggarna observerats hos vattenlagrat virke. I detta avsnitt refereras till några undersökningar där man behandlat vattenlagringens inverkan på vedens hållfasthet.

I figur 18 visas vätskeupptagningens och slaghållfasthetens beroende av vattenlagringens utsträckning i tiden (Bauch et al. 1970). För tall ökade vätskeupptagningen märkant redan efter tre veckors lagring i sjövatten, medan slaghållfastheten minskade till 80 %. Efter 16 veckors lagring fördubblades absorptionen medan slaghållfastheten sjönk till omkring 70 %. För gran medförde tre veckors lagring endast en liten ökning av vätskeupptagningen och nästan ingen styrkeförlust. Efter 16 veckors vattenlagring visade proverna en niofaldig ökning av upptagningen, medan den kvarvarande slaghållfastheten, var 75 %. Som jämförelse till här angivna slaghållfasthetsvärden bör nämnas, att för ett svampangrepp är en minskning av slaghållfastheten till 50 %

förenad med en viktsförlust av omkring 5 %. Det bör även framhållas att en minskning av slaghållfastheten inte nödvändigtvis innebär en faktisk minskning av drag- och tryckhållfastheten (Bauch et al. 1970).



Figur 18. Sambandet mellan vattenlagringens längd, permeabiliteten och slaghållfastheten (Bauch et al. 1970).

Relationship between ponding, permeability and impact strength.

Unligil (1972) fann att klampar av White spruce (Picea glauca), som lagrats 9 veckor i sjövatten visade endast obetydliga minskningar av splintvedens styrkeegenskaper. Vid vattenlagring under fyra månader däremot avtog en del av styrkeegenskaperna med upp till 10 % (Unligil 1971).

Efter lagring av granvirke (Picea abies) i vatten under tre år erhöll Gerstetter och Liese (1972) ganska stora hållfasthetssänkningar. I splintvedens yttre delar minskade slag-, böj- och tryckhållfastheten med omkring 10-15 % och torr-rådensiteten med omkring 10 %. I en omfattande undersökning över sjunktimmer av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) som legat i flodvatten i mer än 100 år kunde däremot Klem och Halvorsen (1963) inte påvisa några försämringar av hållfastheten. Hos granstockarna i detta material var det möjligt att tryckimpregnera hela splinten.

5.2.2. Ökad permeabilitet efter angrepp av Trichoderma-arter

Förbättrad permeabilitet har påvisats hos ved som utsatts för angrepp av den gröna mögelsvampen Trichoderma. Den favoriseras på ved som behandlas med svaga fluoridlösningar, vilka minskar växt av andra typer av svampar. Trichoderma uppvisar också under vissa betingelser en antagonistisk effekt mot vissa rötsvampar.

För att stimulera tillväxten av Trichoderma på stängselstolpar av Longleaf pine sprutade Lindgren och Harvey (1952) dessa med 3 procentig lösning av natriumfluorid eller 4 procentig lösning av ammoniumbiflourid. Fluoridbehandlingen gynnade utvecklingen av Trichoderma och hindrade andra svampar. Hos den möglade veden ökade vätskeupptagningen, efter doppning, fyra gånger jämfört med oinfekterad ved. Upptagningen stod i direkt förhållande till graden av mögelinfektion, vilken dock var ganska ojämn. Den ökade permeabiliteten ansågs bero på att märgstråleparenkymcellerna bröts ned.

Under mitten av 1950-talet utfördes ytterligare några undersökningar över behandling med Trichoderma där avsikten var att öka vedens permeabilitet (Graham 1954, Lindgren & Wright 1954, Schulz 1956, Panek 1957, från Unligil 1969). I dessa undersökningar ökade vätskeupptagningen i genomsnitt 2-4 gånger på grund av behandlingen.

I en nyligen genomförd undersökning fann Johnsson och Gjovik (1970) att en bakterie som följde med Trichoderma viride svarade för nästanhela permeabilitetsökningen. De ympade Trichoderma viride på obehandlade eller ångsteriliserade vedprover av Douglas fir (Pseudotsuga

menziesii) och Loblolly pine (Pinus taeda). För de obehandlade proverna ökade gaspermeabiliteten 30 gånger efter infektionen med Trichoderma. Vid elektronmikroskopiska studier av dessa prover upptäckte de att en bakterie av typen Kocker, vilken de inte lyckades identifiera, hade förstört pormembranen i de flesta av ringporerna. De vedprover som ångsteriliserats före inympningen med Trichoderma blev inte angripna av bakterier och dessa visade endast obetydlig, men ändå signifikant högre permeabilitet än kontrollerna. Elektronmikroskopiska studier bekräftade att parenkymcellerna och de halvenkla pormembranen vanligen helt förstördes av mögelsvampen. Eftersom alla längsgående trakeider står i kontakt med märgstråleparenkymet via de halvenkla porerna, så medför en förstöring av dessa och parenkymcellerna att en ny led för flödet av vätska till de längsgående trakeiderna öppnas. Denna nya led ansågs svara för den ökade permeabiliteten och upptagningen.

Någon behandling med Trichoderma i syfte att förbättra impregnerbarheten utföres för närvarande inte i praktiken.

5.2.3. Behandling med enzymer

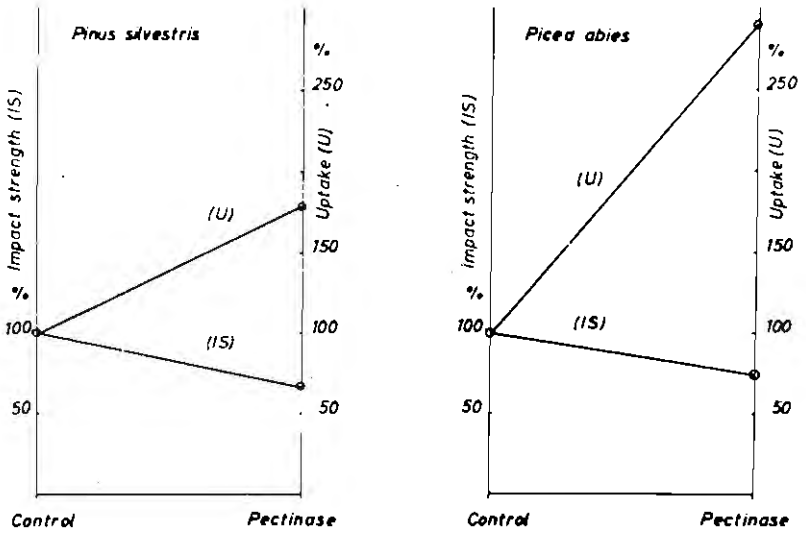
Eftersom mikroorganismernas vednedbrytning är ett resultat av enzymatiska reaktioner, så borde direkt anbringande av lämpliga enzymer förbättra vedens impregnerbarhet. Behandling av ved med enzymer har också utförts i detta syfte och rapporterats av bland andra Suolahti och Wallén (1958), Nicholas (1967), Nicholas och Thomas (1968 a), Bauch et al. (1970) och Dunleavy och Fogarty (1972).

Suolahti och Wallén (1958) behandlade färska splintvedsprover av tall (Pinus silvestris) med pektinas. Detta resulterade i ökad vätskeupptagning och minskad pektinhalt i veden, alltså samma resultat som efter vattenlagring av vedproverna.

Nicholas och Thomas (1968 a) behandlade vedprover av Loblolly pine (Pinus taeda) med följande enzymer; pektinas, hemicellulas och cellulas. Pektinas orsakade avsevärd nedbrytning av ringporernas tori i splintveden och påvisade därmed den höga halten av pektin i torus. På torus i kärnved hade pektinas ingen verkan, förmodligen på

grund av dålig inträngning. Hemicellulas orsakade en svag nedbrytning av torus, och var inte lika effektivt som pektinas. Cellulas avlägsnade fullständigt pormembranets margodel och orsakade en svag nedbrytning av torus. Detta antyder att margo helt består av cellulosa och att torus innehåller en mindre del cellulosa.

Bauch et al. (1970) behandlade färska och lufttorkade vedprover av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies) med pektinas. Vätskeupptagningen för de färska vedproverna visas i figur 19. För tall erhölls nästan samma ökningar som efter vattenlagring men för gran något lägre ökningar (jfr fig. 18). På de lufttorkade proverna hade behandlingen ingen verkan. Av figur 19 framgår också att slaghållfastheten minskade till omkring 70 % både för tall och för gran.



Figur 19. Sambandet mellan förbehandling med pektinas, permeabilitet och slaghållfasthet (Bauch et al. 1970).

Relationship between pectinase pretreatment, permeability and impact strength.

Med enzymbehandling kan man således på mycket kort tid avsevärt förbättra vedens permeabilitet. Än så länge är dock enzympreparaten för dyra för att de skall kunna användas i större skala.

5.3. Behandling med vattenånga

När det antingen är opraktiskt eller icke önskvärt att lufttorka virke av sydstatstall före impregneringen behandlas virket vanligen med ånga följt av vakuum för att konditionera veden. Behandlingen med ånga utföres i en impregneringscylinder under några timmar, vanligen under tryck. Den efterföljande vakuumperioden varar en timme eller mer. Denna behandling resulterar i en viss fuktighetsförlust och gör även veden mer lämplig för impregnering trots att fukthalten fortfarande är relativt hög. Delvis och även väl torkat virke kan också behandlas, särskilt när det är önskvärt att ångsterilisera veden (Hunt & Garratt 1953).

Ångbehandlingens inverkan på vedens permeabilitet har studerats sedan lång tid tillbaka. I det följande behandlas några undersökningar som utförts under senare tid.

Erickson och Crawford (1959) behandlade färska vedprover av Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) och Western hemlock (Tsuga heterophylla) med ånga under tre tidsperioder 10, 20 och 30 min. Vätskepermeabiliteten mättes dels på färsk ved och dels på ångbehandlad ved före och efter lufttorkning. För en serie av de ångbehandlade proverna avslutades processen med ett 30 minuters vakuum och permeabiliteten mättes sedan efter lufttorkning. I icke torkat tillstånd hade ångbehandlingen från 10 till 30 min. ingen signifikant inverkan på permeabiliteten hos splintved hos de två trädslagen. Ångbehandlingen förändrade alltså inte permeabiliteten i den färska veden. De prover som lufttorkades efter ångbehandlingen visade något högre permeabilitetsvärden än lufttorkade icke ångbehandlade prover. För Douglas fir uppgick således flödet efter ångbehandling och torkning till 2,5 % av flödet i färsk ved jämfört med 1,3 % hos lufttorkad icke ångbehandlad ved. Ångbehandling följt av vakuum under 30 min. och sedan lufttorkning gav i stort samma resultat som ångbehandling direkt följt av lufttorkning. Någon större skillnad i permeabilitet på grund av olika lång behandlingstid, 10-30 min., kunde inte påvisas. Fogg (1969) fann också att en förlängning av tiden utöver 10 min. vid ångbehandling av sydstatstall hade liten verkan.

Thompson (1969) konditionerade stolpar av sydstatstall med ånga under 14 timmar vid 245° F (118° C). Efter kreosotimpregnering erhöll 57 % av dessa stolpar en upptagning av 7 pounds per kubikfot (112 kg/m^3) och mer. Detta resultat var bättre än ugnstorkning vid 182° F (83° C) men sämre än ugnstorkning vid 152° F (67° C). (Jfr avsnitt 5.1.)

Nicholas och Thomas (1968 b) studerade ultrastrukturen hos ångbehandlad ved av Loblolly pine (Pinus taeda) med elektronmikroskop för att finna en förklaring till den förbättrade permeabiliteten. De fann att ångbehandlingen hade en tydlig effekt på ringporernas membraner. Särskilt visade det sig att margofibrillerna hos det ångbehandlade materialet var mer flexibla. En studie av extremt tunna snitt av ångbehandlad vårved visade att ringporerna hade deaspirerat och att torus hade splittrats upp i tre tydliga lager. Hos icke behandlad vårved var alla ringporer tätt aspirerade. Uppsplittringen av torus i tre lager ansågs emellertid orsakad av svällning vid prepareringen av vedmaterialet för mikroskopiska studier. Observationerna indikerade att ångbehandlingen hade hydrolyserat någon av kolhydraternas komponenter, vilket orsakat minskad styrka hos pormembranen. Behandlingen hade också uppenbarligen förändrat de kemiska komponenter som svarar för bindningen mellan torus och porkammarens öppning (border). Nicholas och Thomas (1968 b) hänvisar också till australiensiska försök (Anonym 1962) med ångbehandling av virke. I dessa försök fann man att ångbehandlingen reducerade torkningstiden med omkring 20 %. Vidare fann man att samma resultat kunde erhållas genom att utsätta veden för svagt sur hydrolys.

Bamber och Johnstone (1968) observerade att väggarna i märgstrålarnas parenkymceller hos splintved av färsk Pinus radiata föll samman när veden ångbehandlades under tryck. Detta förbättrade vedens permeabilitet.

5.4. Kemisk förbehandling av virket

5.4.1. Torkning efter behandling med organiska lösningar (Solvent exchange drying)

Denna metod har tidigare beskrivits under avsnitt 3.4.3.1. Den torde vara en av de mest effektiva metoderna för att öka vedens permeabilitet. Den används för närvarande dock inte i praktiken, eftersom den är dyrbar ock dessutom farlig ur brandskyddssynpunkt.

5.4.2. Torkning efter behandling med våtmedel

Stamm (1970 a, 1970 b) behandlade färska vedprover av flera barrträdslag med en vattenlösning innehållande ett icke joniskt våtmedel med namnet Tergitol TMN (trimetylnonyleter) Efter torkning visade dessa prover högre permeabilitet än de som torkats från vatten. Effekten var dock mycket mindre än väntat och behandlingen kunde inte rekommenderas för praktiskt bruk som en metod att förbättre impregnerbarheten. (Jfr avsnitt 3.4.3.1. angående effekten av nedsatt ytspänning.)

5.4.3. Behandling med sura eller alkaliska lösningar

Som nämndes i slutet av avsnitt 5.3. erhölls samma resultat när veden utsattes för svagt sur hydrolys som när den behandlades med vattenånga. Vid framställning av dissolvingmassor med hög halt av cellulosa förhydrolyseras flisen före kokningen. En förhydrolysmetod går ut på att flisen behandlas med vattenånga vid hög temperatur, vanligen 170^{o} C under 0,5-1,5 tim. Därvid avspjälkas vedens acetylgrupper och organiska syror bildas, som sedan katalyserar en hydrolys av hemicellulosan.

Ett sätt att påverka ringporernas membraner vore således att behandla veden med svagt sura eller alkaliska lösningar. Det kan förväntas att dylika lösningar angriper pektinet i torus. I en nyutkommen rapport beskriver Yoshimoto et al. (1972) just ett sådant försök. De behandlade små torkade vedklotsar av trädslagen Cryptomeria japonica och Pinus thunbergi med 0,5, 0,25 och 0,125 procentiga natriumhydroxidlösningar under 15 min. Efter behandlingen studerades snitt av klotsarna i faskontrastmikroskop. De fann därvid att det var möjligt att lösa ut och avlägsna pormembranen, särskilt tori, utan att nämnvärt förändra cellväggarnas struktur. Skillnaderna i koncentrationen hade inget inflytande, vilket betyder att en natriumhydroxidlösning av så låg koncentration som 0,125 % visade tillräcklig aktivitet för att lösa ut pektinet i torus. De påpekar avslutningsvis att endast tunna vedklotsar användes vid försöket och att man bör undersöka natriumhydroxidlösningens effekt på större vedprover.

Hos splintvedsprover av tall (Pinus silvestris) tryckimpregnerade med sura saltmedel rapporterar Fengel och Wolfsgruber (1971) nyligen, att man vid elektronmikroskopiska studier observerade symtom av hydrolys på ringporernas tori.

Behandling med sura eller alkaliska lösningar har emellertid prövats innan man kände till vilka komponenter som pormembranen var uppbyggda av. Sutherland et al. (1934) mätte flödet genom splint- och kärnvedsprover av White spruce (Picea canadensis) med enmolara lösningar av natriumhydroxid och saltsyra. I prover av kärnved fann de att natriumhydroxidlösningen penetrerade veden snabbare än vatten, medan saltsyrelösningens flödeshastighet efter ett tidigt högt värde föll under det värde som vattnet gav. I splintveden visade natriumhydroxidlösningen en penetrationshastighet som var lägre än för vatten. Saltsyrelösningens flödeshastighet i splintved blev ungefär lika med vattnets. Liese (1951) prövade också vilken inverkan en förbehandling av granved (Picea abies) med 2 och 5 procentiga lösningar av natriumhydroxid, kaliumhydroxid, saltsyra och svavelsyra hade på upptagningen av kreosotolja. Han fann att dessa medel inte gav någon nämnvärd förbättring av upptagningen. Däremot nåddes mycket goda resultat med aceton och 96 procentig alkohol. (Jfr avsnitt 3.4.3.1.)

En behandling av veden med natriumhydroxid före impregneringen kan medföra vissa nackdelar. Bland annat spricker veden ganska mycket efter torkning. En natriumhydroxidlösning orsakar nämligen mer svällning i veden än enbart vatten (Sutherland et al. 1934). Vid impregnering med basiska saltmedel kan fixeringen fördröjas eller utebli på grund av vedens höjda pH. Vid impregnering med sura saltmedel kan medlet utfällas för snabbt i veden, vilket kan hindra den fortsatta inträngningen.

I detta avsnitt kan också nämnas att förbehandling av veden med klorgas och saltsyregas prövats. Dessa medförde en ökning av vedens permeabilitet men tyvärr även en försämring av vedens styrkeegenskaper (Stamm 1967 a).

5.5. Perforering av virket före impregneringen (Incising)

Eftersom erfarenheten har visat att vedens longitudinella permeabilitet är mycket större än dess radiella eller dess tangentiella permeabilitet har man sedan lång tid tillbaka tillämpat metoden att göra små hål i virket för att skapa nya inträngningsmöjligheter för impregneringsvätskorna (Bellman 1968). Den engelska termen för denna metod är "incising". "Incising" innebär att man gör grunda skåror i ytan på det virke man avser att impregnera. I sågat virke göres skårorna vanligen 6-18 mm långa och omkring 3 mm breda med längsriktningen ungefärligen parallell med vedens fiberriktning. Denna förbehandling av virket utföres i stor omfattning på sågade varor av Douglas fir och på rotändar av stolpar av olika trädslag (Nordamerika). Den användes också i viss utsträckning på sliprar. Den väsentliga fördelen med "incising" är att en jämn fördelning av impregneringsmedlet erhålles i ytveden till ett djup motsvarande hålens djup, som vanligen är 12 mm för stolpar och 12-18 mm för sliprar (Hunt & Garratt 1953).

Ett antal maskiner av amerikanskt och tyskt fabrikat för "incising" har beskrivits av Hunt & Garratt (1953) och Bellman (1968). En engelsk maskin, som prövats på sågat virke av gran har nyligen beskrivits av Morgan (1972).

5.6. Strålbehandling

Gertjejansen (1970) beskriver ett försök med gammastrålning av kärnved från sitkagran (Picea sitchensis). Syftet med bestrålningen var att öka permeabiliteten genom en försvagning av ringporernas membraner. Strålbehandlingen utfördes vid två dosnivåer nämligen $3{,}2 \cdot 10^6$ och $1{,}0 \cdot 10^7$ rads. Den resulterade inte i någon effektiv ökning av permeabiliteten, vilken mättes för vatten i longitudinell riktning. De starkast bestrålade proverna visade en svag dock inte signifikant minskning av tryckhållfastheten.

6. Faktorer som har samband med impregneringslösningen

6.1. Typ av lösning

Erickson et al. (1937) mätte flödeshastigheter genom torkade vedprover av 16 olika nordamerikanska barrträdslag för a) destillerat vatten, b) 3 % zinkklorid i vattenlösning och c) bensen. Flödeshastigheten mättes för varje vedprov i början av studien (initialflödeshastighet) och efter 2,75 timmars kontinuerligt flöde (slutflödeshastighet). Zinkkloridlösningens initialflödeshastighet i de olika trädslagens splintved blev i en del fall något större än vattnets. Dess slutflödeshastighet blev i samtliga fall större än vattnets. För bensen blev både initialflödeshastigheten och slutflödeshastigheten flera gånger större än för vatten.

Nicholas (1972) beskriver nyligen ett försök där torkade kärnvedsprover av Douglas fir fullcellimpregnerades med olika träskyddsmedel. Som framgår av tabell 6 visade alla vattenlösliga medel utom natriumfluorid lägre upptagningar än enbart vatten. Natriumkromat och natriumarsenat som båda finns med i FCA och FCAP (se tabellen) gav omkring 20 procent lägre upptagningar än vatten. Variansanalysen visade att minskningarna var signifikanta. Orsaken till att kromaterna och arsenaterna påverkade permeabiliteten, men däremot inte fluoriderna, antogs bero på att de förra jonerna hade en starkare tendens att polymerisera och adsorberas. Pentaklorfenolaternas inverkan erhålles genom att jämföra behandlingsresultaten från FCA och FACP. Det var uppenbart att natriumpentaklorfenolat reducerade upptagningen. Pentaklorfenolater omvandlas under sura förhållanden till pentaklorfenol, vilken är olöslig i vatten. Eftersom veden är sur kan fällningar av pentaklorfenol bildas i ringporernas membraner, vilket kan väntas minska permeabiliteten. Borax visade den lägsta upptagningen, 33 procent lägre än vatten. Liknande resultat har också observerats med borsyra. En möjlig förklaring till den låga upptagningen för borax antogs vara att borater kan bilda komplexa föreningar med kolhydrater. Dessa föreningar kunde tänkas blockera pormembranen.

Tabell 6. Impregneringsmedlens inverkan på upptagningen (Nicholas 1972).
Effect of preservative chemicals on treatment retention.

Behandlingslösning Treating solution	Medelupptagning Ave. retention (pcf)
Water	24.4
Sodium fluoride (1 %)	23.4
Sodium arsenate (1 %)	19.3
Sodium chromate (1 %)	19.2
FCAP[1)] (2 %)	15.0
FCA[1)] (2 %)	19.8
Borax (1 %)	13.8

Variansanalys[2)] Analysis of variance

Variationsursprung Source of variation	Frihets-grader Degrees freedom	Kvadratsummor Sum of squares	F
Treating solutions	5	187.200	8.76+
Water vs. Sodium fluoride soln.	1	1.500	0.35
Water vs. Sodium arsenate soln.	1	39.015	9.13++
Water vs. Sodium chromate soln.	1	40.560	9.49+
Water vs. FCAP soln.	1	132.540	31.00+
Water vs. FCA soln.	1	30.826	7.21++
FCA vs. FCAP	1	35.526	8.31++
FCA vs. ave. of Sodium fluoride, Sodium arsenate, & Sodium chromate	1	1.322	0.31
Error	12	51.300	
Total	17	238.500	

1) FCA innehåller natriumfluorid, natriumkromat och natriumarsenat.
consists of sodium fluoride, sodium chromate and sodium arsenate.

1) FCAP innehåller dessutom natriumpentaklorfenolat.
consits also of sodium pentachlorophenate.

2) Variansanalysen innefattar inte Borax. Analysis of variance does not include Borax.

\+ Signifikant vid sannolikhetsnivån 1 %. Significant at the 1 % level of probability.

++ Signifikant vid sannolikhetsnivån 2.5 %. Significant at the 2.5 % level of probability.

Nicholas (1972) impregnerade också vedprover med ett oljemedel (lösning 265). Som framgår av tabell 7 blev upptagningarna för detta medel avsevärt högre än för vatten, fastän båda lösningarna hade samma viskositet och trycktiden vid oljeimpregneringen var väsentligt kortare. Mellan de olika vedproverna blev skillnaderna också ganska stora. I detta försök liksom i det tidigare beskrivna (Erickson et al. 1937) visade icke polära lösningar väsentligt större upptagning respektive flödeshastighet än polära lösningar.

Tabell 7. Upptagningar vid tryckimpregnering med oljemedlet lösning 265 och vatten (Nicholas 1972).
Comparison of treating retentions[1] for solvent 265 and water.

Prov nr	Medelupptagning Ave. retention (pcf)[2]	
	Lösning 265	Vatten
Board No.	Solv. 265	Water
17	34.6	11.8
21	9.7	5.8
30	16.6	10.4
42	19.6	11.8
Medelvärde Mean	20.13	9.95

1) Upptagning efter 30 minuters tryckperiod. Upptagningarna för lösning 265 justerades i överensstämmelse med den relativa densitetsskillnaden mellan de två vätskorna.
Retention after 30 minutes pressure period. The solvent 265 retentions were adjusted in accordance with the relative density difference between the two liquids.

2) Medelvärde av 2 prover.
Average of 2 blocks.

Skillnaden i permeabilitet mellan polära och icke polära vätskor har ibland ansetts orsakad av vattnets svällningseffekt. För att pröva detta impregnerade Nicholas (1972) vedprover vid fuktkvoterna 10 respektive 20 %. Han fann då att vattnets och oljemedlets upptagningar båda blev 35 procent lägre i vedproverna med den högre fuktkvoten. Av

detta försök drogs den slutsatsen att variationer i fuktkvot inte förklarade skillnaderna i permeabilitet mellan de två vätskorna. Sedan både viskositet (oljemedlet och vattnet hade samma viskositet) och fuktkvot strukits som möjliga förklaringar till skillnaderna i permeabilitet mellan de två typerna av vätskor, syntes den mest logiska förklaringen vara den relativa graden av växelverkan mellan vätska och ved. Vatten har på grund av sin förmåga att bilda vätebindningar en affinitet till ved. Denna affinitet, tillsammans med det faktum att vatten är strukturerat (Goring 1966) på grund av intramolekylära vätebindningar, kan tänkas effektivt minska vattnets flödeshastighet i ved. Å andra sidan borde inte någon nämnvärd växelverkan mellan oljemedlet och veden uppkomma, eftersom oljemedlet saknar förmågan att bilda vätebindningar. Därför kan oljemedel väntas penetrera veden snabbare än vatten (Nicholas 1972). (Jfr avsnitt 3.4.3.1. solvent exchange drying.)

6.2. Impregneringslösningens viskositet och temperatur

Ett impregneringsmedels viskositet påverkas starkt av temperaturen. Detta gäller särskilt oljemedel. De har en hög viskositet vid vanlig rumstemperatur men blir gradvis tunnare och mer flytande vid uppvärmning, varvid de lättare kan tränga in i veden (Hunt & Garratt 1953). Dessa förhållanden är väl kända vid kreosotimpregnering. Även en relativt liten minskning av viskositeten hos zinkkloridlösningar på grund av ökad temperatur har visat sig förbättra inträngning och upptagning. Tyvärr måste höga temperaturer undvikas vid användning av de flesta nutida vattenlösliga impregneringsmedel, eftersom de kan orsaka icke önskvärda kemiska reaktioner i impregneringslösningen. Zinkkloridlösning är ett undantag i detta avseende eftersom den inte skadas vid temperaturer upp till 100^{o} C och högre (Hunt & Garratt 1953). Vid uppvärmning av impregneringsvätskan finns det skäl att antaga att även veden påverkas så att den blir mer permeabel. Vissa försök antyder nämligen att temperaturen själv är en faktor av betydelse i detta avseende. Den förbättrade inträngningen och upptagningen vid uppvärmning har dock väsentligen sin grund i lägre viskositet hos impregneringsvätskan (Hunt & Garratt 1953).

6.3. Åldrade impregneringslösningar

Vid tryckimpregnering pumpas överskottslösningen vanligen tillbaka till en lagringstank och används på nytt i efterföljande behandlingsomgång. Medan lösningen är i kontakt med veden lakas en del av vedens extraktivämnen ut och blandas med lösningen. Alla behandlingslösningar genomgår således en åldringsprocess, vilken kan resultera i märkbara förändringar av vätskans egenskaper. Resultaten och variansanalysen i tabell 8 utvisar att vattenlösliga extraktivämnen från veden har en signifikant inverkan på impregneringsresultaten (Nicholas 1972). Vidare har vattnets pH vid tiden för dess kontakt med veden en effekt på upptagningen. Av tabellen framgår nämligen att upptagningen blev lägre när åldrat vatten med pH 9 användes än när åldrat vatten med pH 2,7 användes. Detta antyder att det skulle vara önskvärt att använda sura impregneringsmedel, om man vill minimera vedextraktivämnenas åldrande inverkan. Tabell 8 visar också att olika pH hos det färska vattnet vid tiden för behandlingen inte signifikant påverkar permeabiliteten. Följaktligen måste skillnaderna i upptagningar, erhållna med åldrat vatten av olika pH, bero på vedextraktivämnena (Nicholas 1972).

6.4. Luftbubblor i impregneringslösningen

Luftbubblor i kontakten mellan vätska och ved har visat sig minska permeabiliteten. Före mätningar av permeabiliteten lät till exempel Erickson och Crawford (1959) filtrera vätskorna genom ett finporigt glasfilter. Denna åtgärd ansågs nödvändig för att erhålla konstant flödeshastighet genom vedproverna.

En omfattande undersökning över luftens hindrande effekt på vedens permeabilitet för vätskor har redovisats av Kelso et al. (1963). De fann att luftblokering var en vanlig företeelse, när destillerat vatten passerade genom ved under ett yttre anbringat tryck. Luftblokering antogs vara huvudorsaken till att flödeshastigheten avtog med tiden. En konstant flödeshastighet för destillerat vatten genom torkad ved kunde erhållas om vätskan i förväg passerades genom ett ultrafilter för att avlägsna främmande partiklar. Dessa partiklar täppte inte endast till kapillärerna fysiskt, utan fungerade även som kärnor

Tabell 8. Inverkan av vedextraktivämnen och lösningens åldring på upptagningen (Nicholas 1972).

Effect of wood extractives and aging on treatment retention.

Behandlingslösning Treating solution	Medelupptagning Ave. retention (pcf)
Aged water (initial pH 2.7)	10.98
Fresh water (initial pH 2.7)	13.38
Aged water (initial pH 9.0)[1]	8.60
Fresh water (pH 6.2)	13.33
Fresh FCAP[2] (2 % soln.)	10.18
Aged FCAP[2] (2 % soln.)	6.88

Variansanalys Analysis of variance

Variationsursprung Source of variation	Frihetsgrader Degrees freedom	Kvadratsummor Sum of squares	F
Treating solution	5	134.000	32.20+
Fresh FCAP vs. used FCAP	1	21.775	26.14+
Aged water (pH 2.7) vs. fresh water (pH 2.7)	1	11.520	13.83+
Aged water (pH 6.2) vs. fresh water (pH 6.2)	1	44.650	53.60+
Fresh FCAP vs. aged water (pH 6.2)	1	4.962	5.96+++
Fresh FCAP vs. fresh water (pH 6.2)	1	19.850	23.83+
Aged water (pH 2.7) vs. aged water (pH 6.2)	1	11.287	13.55+
Fresh water (pH 2.7) vs. fresh water (pH 6.2)	1	0.005	0.01
Aged FCAP vs. aged water (pH 6.2)	1	5.950	7.14++
Error	18	15.000	
Total	23	149.000	

1) pH 6.2 after aging.

2) Se tab. 6 not 1. See tab. 6, note 1.

\+ Signifikant vid sannolikhetsnivån 1 %. Significant at the 1 % level of probability.
++ Signifikant vid sannolikhetsnivån 2.5 %. Significant at the 2.5 % level of probability.
+++ Signifikant vid sannolikhetsnivån 5 %. Significant at the 5 % level of probability.

för utdragning av luft från vätskan. De fann också att en mekanisk chockvåg anbringad på vätskan, till exempel vatten, när den passerade genom veden, kunde förmå vätskan att avge luft i veden, varvid permeabiliteten kraftigt avtog.

Borgin och Corbett (1970) undersökte i vilken utsträckning överljudsvågor kunde underlätta inträngning och upptagning av olika vätskor i ved. Överljudsvågor med hög energi är nämligen kända för att frigöra adsorberad eller absorberad luft eller gas från ytan av de flesta fasta material. De mätte upptagningen hos torkade vedprover av Pinus radiata efter nedsänkning i olika vätskor vilka utsattes för överljudsvågor. De fann att upptagningen av icke polära föreningar som paraffin eller aromatiska kolväten inte förbättrades vid behandlingen med överljudsvågor. Men så snart som en rak kolvätekedja innehöll åtminstone en hydrofil grupp, så blev överljudsvågornas effekt positiv. Överraskande var att en negativ effekt erhölls för vatten och utspädda vattenlösningar. När emellertid vattnets ytspänning sänktes med hjälp av ytaktiva medel, blev överljudsvågornas verkan starkt positiv. Den starka hydrofila egenskapen hos vattenlösningar motverkades förmodligen av deras höga ytspänning. För att avlägsna luften från vedens kapillärer och ersätta luft-ved kontakten med en vätska-ved kontakt krävs en viss affinitet mellan vätskan och veden. Denna affinitet är mycket hög för vatten och utspädda vattenlösningar, men den positiva effekten motverkas av motståndet att bilda bubblor i en vätska med hög ytspänning. När ytspänningen nedsättes underlättas bildandet av luftbubblor, vilka sedan snabbt avlägsnas vid den kraftiga omskakningen av vätskan i det starka överljudsfältet (Borgin & Corbett 1970).

7. Faktorer som har samband med impregneringsprocessen

7.1. Tryckets storlek och trycktidens längd

Som generell regel anger Hunt och Garratt (1953) att behandlingsperioden borde vara så lång som det är praktiskt möjligt och tryckets storlek så avpassat att önskad upptagning säkerställes. Undersökningar har visat att måttliga tryck och tämligen långa behandlingsperioder ger bättre resultat än mycket höga tryck och korta behandlingstider. I det senare fallet erhålles ofta oregelbundna inträngningar. Långa trycktider är särskilt viktiga vid impregnering av svårimpregnerade trädslag, eftersom långa perioder medger en mer grundlig uppvärmning av virket (t.ex. vid impregnering med kreosotolja), som sålunda underlättar inträngningen. Ett exempel på detta visas i tabell 9 där lufttorkade, sågade sliprar av Douglas fir från Klippiga bergen impregnerades med en 3 procentig zinkkloridlösning vid 175° F (80° C). Av tabellen framgår att behandlingstider om 6 och 8 timmar gav bättre resultat än de om 2 och 4 timmar. Vidare förbättrades upptagningen och inträngningen mera när behandlingstiden förlängdes 2 timmar än när trycket ökades 50 psi (3,5 kp/cm^2).

Ett exempel på trycktidens betydelse för upptagning av saltlösning respektive kreosotlösning (vid 90° C) efter fullcellimpregnering visas i figur 20. Detta försök har tidigare refererats i avsnitten 5.1. och 5.2.1. Förvakuumet varade under 30 min. och trycket var 8 atm. Som framgår av figuren blev skillnaderna i upptagning mellan vattenlagt och icke vattenlagt virke större vid korta trycktider än vid långa. Eller omvänt för obehandlat virke erfordrades längre trycktider för att uppnå samma resultat.

En undersökning där mycket höga tryck användes har rapporterats av Blew Jr (1961). Vedprover av Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) av både kust- och bergstypen impregnerades enligt Lowry-metoden med en 50-50 blandning av kreosot och eldningsolja. Tre olika tryck användes, nämligen 500 psi (35 kp/cm^2), 300 psi (21 kp/cm^2) och 125 psi

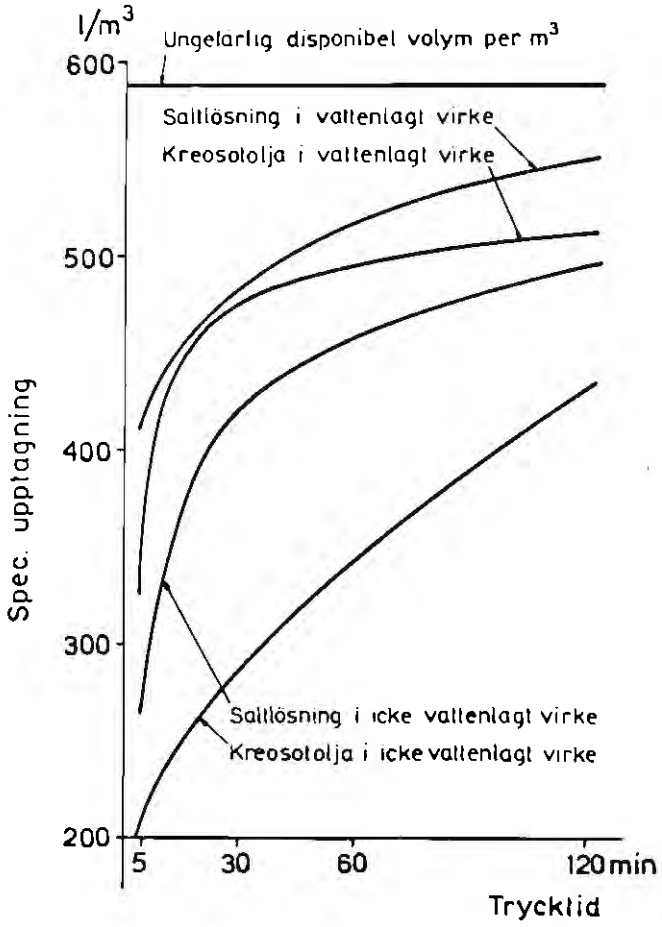
Tabell 9. Inverkan av tryckets storlek och trycktidens längd på upptagningen och inträngningen av zinkkloridlösning i sliprar av Douglas fir, bergstypen (Pseudotsuga menziesii) (Hunt & Garratt 1953).

Relation of intensity and duration of pressure to penetration and absorption in zinc-chloride-treated Rocky Mountain-type Douglas fir ties.

Behandlingstryck Treating pressure psi[1]	Behandlingsperiod Treating period tim. hours	Medelupptagning Ave. absorption lb per f^3 wood	Medelinträngning Ave. penetration tum inches Side	End
100	2	5.5	0.20	6.8
	4	7.8	0.20	8.8
	6	10.2	0.29	13.0
	8	11.5	0.32	15.9
150	2	8.4	0.25	10.5
	4	9.6	0.25	9.4
	6	14.2	0.27	16.1
	8	15.0	0.38	18.2
200	2	9.1	0.25	9.8
	4	11.5	0.31	16.9
	6	13.5	0.39	17.0
250	2	8.9	0.20	13.4
	4	13.3	0.34	19.4
	6	16.0	0.41	30.0

[1] 100 psi ≈ 7 kp/cm^2
200 psi ≈ 14 kp/cm^2

(8,8 kp/cm^2). Trycktiden vid angivet tryck var 5 timmar. Endast vid det lägsta trycket och för några vedprover vid det mellersta trycket uppvärmdes impregneringslösningen till 190° F (88° C). För både kust- och bergstypen av Douglas fir blev medelupptagningen högst vid 500 psi och lägst vid 125 psi. Vid 500 psi blev medelupptagningen 21,3 lb per f^3 (340 kg/m^3) för kusttypen och 4,9 lb per f^3 (78 kg/m^3) för bergstypen. Impregneringsmedlets inträngning i veden blev däremot inte signifikant större vid de högre trycken, utani en del fall faktiskt bättre när de lägsta trycket användes. Vid 500 psi och för uppvärmd impreg-



Figur 20. Specifik upptagning i liter per m^3 splintved av tall (Pinus silvestris) vid vakuum-tryckimpregnering (Holmgren 1952).

Specific retention in litres per m^3 sapwood of Scots pine in full-cell treatment.

neringslösning vid 300 psi noterades kollapser bland en del av vedproverna. Dessa kollapser var mest utmärkande för vedprover av kusttypen.

Blew Jr (1961) prövade också saltimpregnering enligt OPM-metoden på icke torkade splintvedsprover av Douglas fir, båda typerna. För bergstypen erhölls därvid en något förbättrad inträngning jämfört med fullcellimpregnering, medan skillnaderna mellan de två metoderna var mindre för kusttypen. OPM-metoden är som bekant särskilt avsedd för svårimpregnerade trädslag (Hudson & Henriksson 1953).

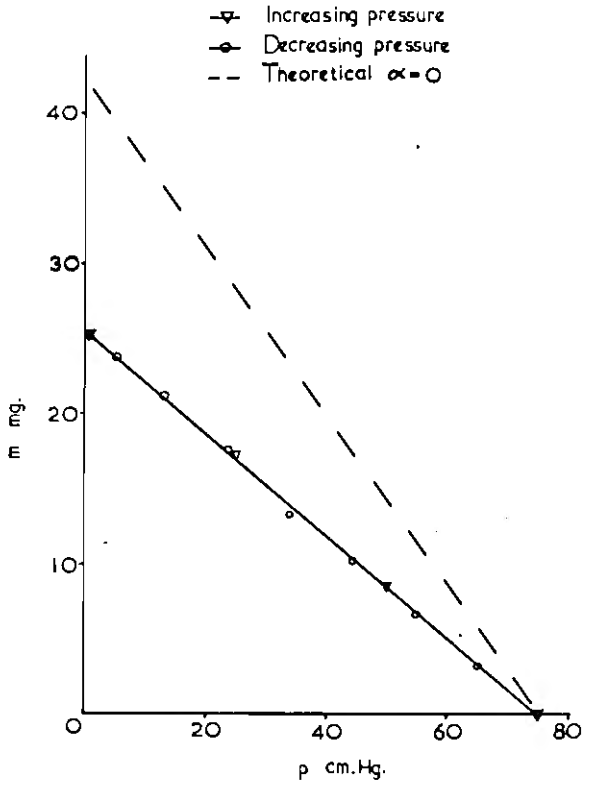
7.2. Förvakuumet

Från praktiken är det känt att ett högt förvakuum förbättrar inträngningen. Någon studie över hur impregneringsresultatet påverkas av förvakuumets höjd och utsträckning i tiden har dock inte påträffats. Däremot har undersökningar över evakuering av luft från ved rapporterats av bland andra Schmitt och Bauer (1966), Resch (1967) och Petty och Preston (1969).

Evakuering av luft från små torkade vedprover av olika trädslag under vakuum studerades av Petty och Preston (1969) med gravimetriska och barometriska metoder. Den mängd luft som avlägsnades blev i de flesta fall lägre än den som beräknades vara innesluten i vedens tomrum. Ett exempel på teoretisk och verklig viktsförlust av luft vid olika vakuum visas i figur 21. Den inneslutna volymen luft i procent av den totala volymen luft, betecknad α, visade sig vara större för vedprover med lägre permeabilitet. Kärnved visade genomgående högre α-värden än splintved för alla de undersökta trädslagen. Hos kärnved av tall (Pinus silvestris) till exempel, varierade α-värdet mellan 6 och 8 %, medan det hos splintved varierade mellan 0 och 1 %. För kärnved av Douglas fir (Pseudotsuga menziesii) var α-värdet 22-24 %. Höga värden på α antyder att alla ringporer i en del av trakeiderna är fullständigt tillslutna.

Petty och Preston (1969) studerade också evakuering av luft ur vedprover av Sitkagran (Picea sitchensis) vilka torkats och återfuktats till olika fuktkvoter. Variationen hos α visas i figur 22. Diagrammet visar en brant ökning av α mellan fuktkvoterna 20 och 30 %. Vid fuktkvoter större än 30 % kunde ingen luft evakueras. Detta förklarades med att luft/vatten menisker blokerade öppningarna i ringporernas membraner.

Resch (1967) mätte den tid det tog att evakuera luft från lufttorkade vedklampar av Douglas fir, 5-8 fot långa och 8 tum i diameter. Klamparna placerades i ett tryckkärl och sattes under tryck. Sedan trycket stabiliserats en tid sänktes det plötsligt till en lägre bestämd nivå. Med hjälp av tryckgivare kunde tryckförändringar registreras inne i vedklamparna. Givarna var vanligen placerade på halva radien. Försöket visade att den erforderliga tiden för att sänka trycket inne i ved-

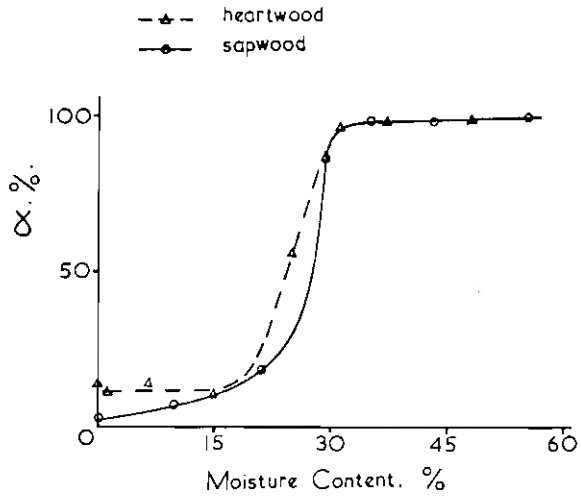


Figur 21. Viktsminskningens variation (m) med jämviktslufttrycket (p) hos ugnstorkad kärnved av Eucalyptus maculata. Den prickade linjen visar den förutsagda variationen om ingen inneslutning av luft hade inträffat (Petty & Preston 1969).

The variation of weight loss (m) with equilibrium air pressure (p) for oven-dry Eucalyptus maculata heartwood. The discontinous line shows the predicted variation if no trapping of air had occurred.

klamparna ökade signifikant med lägre trycknivåer i tryckkärlet. Således tog det endast några minuter att minska trycket inne i vedklamparna med 30 psi (2,1 kp/cm^2), när startpunkten låg på 150 eller 120 psi (10,5 resp. 8,4 kp/cm^2) medan det tog timmar att tänka trycket när ett vakuum på 22 tum (559 mm, 74 %) Hg sattes som slutpunkt.

Schmitt och Bauer (1966) mätte den tid det tog att evakuera luft från torkade, runda och i ändytorna förseglade vedprover av tall (Pinus silvestris) och gran (Picea abies). De använde två tryckkärl förenade över en kran. Vedprovet placerades i det ena kärlet och trycket i hela systemet avlästes på en manometer. Kranen stängdes och det tomma kärlet evakuerades till under 1 Torr. Därefter öppnades kranen och tryck-



Figur 22. Variationen hos ∝ med ökande fuktkvot för splint och kärnved av Sitkagran (Picea sitchensis). Proverna ugnstorkades och återfuktades (Petty & Preston 1969).

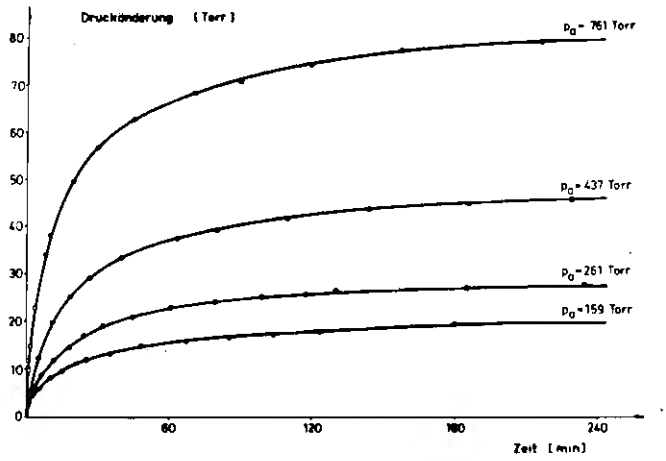
The variation of ∝ with increasing moisture content for sapwood and heartwood of Sitka spruce. The specimens were oven-dried and rewetted.

ändringen i hela systemet avlästes under en viss tid. Figur 23 visar att luften mycket snabbt lämnar det kärl, där vedprovet finns, dvs. trycket stiger snabbt i systemet, men efter ca 30 min. stiger trycket mycket långsamt mot ett mättnadsvärde. I början lämnar luften veden i förhållande till roten ur evakueringstiden, senare mycket långsammare. För att karaktärisera vedens evakuerbarhet definierades en kompensationstid (Ausgleichszeit) med vilken luftutträdets tidsmässiga förlopp blev entydigt bestämbart. Om kompensationstiden sättes till en timme så har efter denna tid 70 % av den evakuerbara luften i veden avlägsnats. Redan efter 15 min. avlägsnas 50 % av luften medan det tar omkring 10 timmar att avlägsna 90 %.

Schmitt och Bauer (1966) lät också evakuera vedprover med varierande fuktkvot. Det visade sig därvid att fuktig ved var svårare att evakuera än torr ved och att gran var mindre evakuerbar än tall.

För att så snabbt som möjligt uppnå ett önskat förvakkum av 30 Torr (96 % enl. tyska riktlinjer för stolpimpregnering) framhåller

Schmitt och Bauer (1966), att man bör välja en vakuumpump med största möjliga sugförmåga.



Figur 23. Luftavgång från granved (Picea abies) (180 mm diam. x 200 mm), mätt som tryckändring, som funktion av tiden för olika begynnelsetryck (P_a) (Schmitt & Bauer 1966).

Withdrawal of air from wood of Norway spruce (180 mm diam. x 200 mm), measured as pressure change, as a function of time for different initial pressures (P_a).

Litteratur

Anonym (1962) Timber seasoning. Drying studies. Extr. from Ann. Rep. Div. For. Prod. Melbourne 1961/1962 p. 24.

Anonym (1964) Increasing permeability by delayed seasoning. Brit. Wood Pres. Ass. Ann. Conv. 1964, 180-183.

Anonym (1965) Variation in the permeability of Baltic redwood sapwood. Brit. Wood Pres. Ass. Ann. Conv. 1965, 195-197.

Arganbright, D.G., Wilcox, W.W. Comparison of parameters for predicting permeability of White Fir. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 65 (1969), 57-62.

Back, E.L. Intercellular spaces along the ray parenchyma. - The gas canal system of living wood? Wood Science 2 (1969):1, 31-34.

Bailey, I.W. The preservative treatment of wood. Forestry Quarterly 11 (1913):1, 5-20.

Bailey, P.J. (1965 a) The permeability of softwood. J. Inst. Wood Sci. 1965, No. 15, 44-55.

Bailey, P.J. (1965 b) Some studies on the permeability of wood in relation to timber preservation. Brit. Wood Pres. Ass. Ann. Conv. 1965, 31-66.

Bailey, P.J. Preston, R.D. Some aspects of softwood permeability. I. Structural studies with Douglas Fir sapwood and heartwood. Holzforschung 23 (1969):4, 113-120.

Bailey, P.J., Preston, R.D. Some aspects of softwood permeability. II. Flow of polar and non-polar liquids through sapwood and heartwood of Douglas Fir. Holzforschung 24 (1970):2, 37-45.

Balatinecz, J.J., Kennedy, R.V. Maturation of ray parenchyma cells in pine. For. Prod. J. 17 (1967):10, 57-64.

Bamber, R.K., Johnstone, R.S. The effect of pressure pre-steaming on the ray parenchyma cell walls of Pinus radiata wood. J. Inst. Wood Sci. 4 (1968) No. 21, 21-24.

Banks, W.B. A technique for measuring the lateral permeability of wood. J. Inst. Wood Sci. 4 (1968) No. 20, 35-41.

Banks, W.B. (1970 a) Some factors affecting the permeability of Scots Pine and Norway Spruce. J. Inst. Wood Sci. 5 (1970) No. 25, 10-17.

Banks, W.B. (1970 b) The effect of temperature and storage on the phenomenon of increased sapwood permeability about wet storage. J. Inst. Wood Sci. 5 (1970) No. 26, 16-19.

Bauch, J., Liese, W., Scholz, F. Uber die Entwicklung und stoffliche Zusammensetzung der Hoftüpfelmembranen von Längstracheiden in Coniferen. Holzforschung 22 (1968):5, 144-152.

Bauch, J., Liese, W., Berndt, H. Biological investigations for the improvement of the permeability of softwoods. Holzforschung 24 (1970):6, 199-205.

Bauch, J., Liese, W., Schultze, R. The morphological variability of the bordered pit membranes in Gymnosperms. Wood Science and Technology 6 (1972), p. 165-184.

Becker, G., Starfinger, K. Der Einfluss von Holzeigenschaften und Holzart auf die Flüssigkeitsaufnahme beim Kurztauchen von Kiefern- und Fichtenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 14 (1956):1, 1-8.

Behr, E.A., Sachs, I.B., Kukachka, B.F., Blew, J.O. Microscopic examination of pressure-treated wood. For. Prod. J. 19 (1969):2, 31-40.

Bellman, H. Pretreatment of wood for pressure impregnation. J. Inst. Wood Sci. 4 (1968), No. 21, 54-62.

Blew, Jr, O.J. Results of preservative treatment of Douglas-Fir from different areas. Amer. Wood. Pres. Ass. Proc. 57 (1961), 200-212.

Borgin, K., Corbett, K. Improvement of capillary penetration of liquids into wood by use of supersonic waves. Wood Science and Technology 4 (1970), p. 189-194.

Bramhall, G. Permeability of Douglas fir heartwood from various areas of growth in B.C. B.C. Lumberm. 50 (1966), 98-102.

Bramhall, G. Longitudinal permeability within Douglas Fir (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) growth increments. Thesis abst. Wood and Fiber 1 (1969):2, 172.

Bramhall, G. The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood. Wood Science and Technology 5 (1971), p. 121-124.

Bramhall, G., Wilson, J.W. Axial gas permeability of Douglas-Fir microsections dried by various techniques. Wood Science 3 (1971):4, 223-230.

Browning, B.L. The chemistry of wood. Interscience publishers, John Wiley & Sons, 1963.

Buro, A., Buro, E-A. (1959 a). Beitrag zur Kenntnis der Eindringwege für Flüssigkeiten in Kiefernholz. Holzforschung 13 (1959):3, 71-77.

Buro, A., Buro, E-A. (1959 b). Untersuchungen über die Durchlässigkeit von Kiefernholz. Holz als Roh- und Werkstoff 17 (1959):12, 462-474.

Choong, E.T., Kimbler, O.K. A technique of measuring water flow in wood of low permeability. Wood Science 4 (1971):1, 32-36.

Choong, E.T., Fogg, P.J. Variation in permeability and tretability in Shortleaf pine and Yellow poplar. Wood and Fiber 4 (1972):1, 1-12.

Comstock, G.L. Longitudinal permeability of green Eastern Hemlock. For. Prod. J. 15 (1965):10, 441-449.

Comstock, G.L. Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids. For. Prod. J. 17 (1967):10, 41-46.

Comstock, G.L., Côté, Jr, W.A. Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood. Wood Science and Technology 2 (1968), p. 279-291.

Comstock, G.L. Directional permeability of softwoods. Wood and Fiber 1 (1969):4, 283-289.

Cop, D., Reginác, L. Die Permeabilität des Holzes für Flüssigkeiten und Gase. Holztechnologie 12 (1971):1, 29.

Côté, W.A., Krahmer, R.L. The permeability of coniferous pits demonstrated by electron microscopy. Tappi 45 (1962):2, 119-122.

Courtois, H. Uber den Zellwandabbau durch Bakterien im Nadelholz. Holzforschung 20 (1966):5, 148-154.

De Groot, R.C. Changes in sapwood of longleaf pine logs stored under water sprays. Proceed. IUFRO Sympos. Protection of wood in storage, Roy. Coll. For., Sthlm, Dep. For. Prod. Res. note R 83, 1973.

De Zeeuw, C. Variability in Wood. Cellular Ultrastructure of Woody Plants, Editor W.A. Cotê, Syracuse University Press, 1965, p. 457-471.

Dostal, E.J., Marraccini, L.M., Kleinert, T.N. Rapid forced penetration of dilute alkali into wood. Holzforschung 14 (1960):1, 21-25.

Dunleavy, J.A., McQuire, A.J. The effect of water storage on the cell-structure of Sitka Spruce with reference to its permeability and preservation. J. Inst. Wood Sci. 5 (1970), No. 26, 20-28.

Dunleavy, J.A., Fogarty, W.M. The preservation of spruce poles using a biological pretreatment. Brit. Wood Pres. Ass. Ann. Conv. 1971.

Dunleavy, J.A., Fogarty, W.M. Studies on the permeability increase of refractory spruce wood during water storage. Biodeter. of Mat. Vol. 2, Appl. Sci. Pub., London 1972, p. 330-335.

Ellwood, E.L., Ecklund, B.A. Bacterial attack of pine logs in pond storage. For. Prod. J. 9 (1959):9, 283-292.

Erickson, H.D., Schmitz, H., Gortner, R.A. The permeability of woods to liquids and factors affecting the rate of flow. Tech. Bull. Univ. Minn. Agr. Exp. Sta. No. 122, 1937, 42 p.

Erickson, H.D. The flow of liquid through radial resin canals. J. of Forestry, 36 (1938), P. 417-423.

Erickson, H.D., Crawford, R.J. The effects of several seasoning methods on the permeability of wood to liquids. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 55 (1959), 210-220.

Erickson, H.D., Estep, E.M. Permeability of Douglas fir heartwood from western Washington. For. Prod. J. 12 (1962):7, 313-324.

Erickson, H.D., Balatinecz. Liquid flow paths into wood using polymerization techniques. - Douglas-Fir and Styrene. For. Prod. J. 14 (1964):7, 293-299.

Erickson, H.D., Schmidt, R.N. Rupture of pit membranes during embedding procedures. Wood Science and Technology 3 (1969), p. 194-202.

Erickson, H.D. Permeability of southern pine wood. - A review. Wood Science 2 (1970):3, 149-158.

Fengel, D., Wolfsgruber, H. Untersuchung von imprägniertem Kiefern-Splintholz mit elektronenoptischen Methoden. Holz als Roh- und Werkstoff 29 (1971):2, 67-76.

Fengel, D. Structure and function of the membrane in softwood bordered pits. Holzforschung 26 (1972):1, 1-9.

Fogg, P.J. Longitudinal air permeability of four species of southern pine wood. Wood Science 2 (1969):1, 35-43.

Frey-Wyssling, A., Bosshard, H.H. Uber den Feinbau der Schliesshäute im Hoftüpfeln. Holz als Roh- und Werkstoff 11 (1953), p. 417-420.

Gerstetter, P.A., Liese, W. Untersuchungen über einige Eigenschaften von Fichtenholz nach dreijähriger Wasserlagerung. Holzforschung 26 (1972):1, 18-25.

Gertjejansen, R. Longitudinal water permeability of gamma irradiated Sitka Spruce heartwood. Wood Science 2 (1970):3, 168-170.

Giertz, H.W., Rölland, K. The influence of impregnation on kraft cooking. Meddelelse No. 68 fra institutt for treforedlings kjemi, Norge 1963.

Gjovik, L.R., Roth, H.G., Lorenz, L.F. Quantitative differences in preservative penetration and retention in summerwood and springwood of Longleaf pine. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 1970, 260-263.

Goring, D.A.I. The structure of water in relation to the properties of wood constituents. Pulp and Paper Mag. Can. 1966: 11, T 519-524.

Graham, R.D. The preservative treatment of Douglas fir post sections infected with Trichoderma mold. J. For. Prod. Res. Soc. 4 (1954), 164.

Greaves, H., Levy, J.F. Comparative degradation of the sapwood of Scots Pine, Beech and Birch by Lenzites trabea, Polystictus versicolor, Chaetomium globosum and Bacillus polymyxa. J. Inst. Wood Sci. 1965, No. 15, 55-63.

Greaves, H. Micromorphology of the bacterial attack of wood. Wood Science and Technology 3 (1969) p. 150-166.

Greaves, H. The effect of some wood-inhabiting bacteria on the permeability characteristics and microscopic features of Eucalyptus regnans and Pinus radiata sapwood and heartwood. Holzforschung 24 (1970):1, 6-14.

Greaves, H. The bacterial factor in wood decay. Wood Science and Technology 5 (1971) p. 6-16.

Harada, H. Coté, Jr, W.A. Cell wall organization in the pit border region of softwood tracheids. Holzforschung 21 (1967):3, 81-85.

Hart, C.A., Thomas, R.J. Mechanism of bordered pit aspiration as caused by capillarity. For. Prod. J. 17 (1967):11, 61-68.

Hillis, W.E. Wood Extractives. Academic Press New York, London 1962.

Hillis, W.E. Heartwood formation and its influence on utilization. Wood Science and Technology 2 (1968), P. 260-267.

Hof, T. Water storage as cause of occasional paint failure on preservative treated spruce in the Netherlands. (Proceedings from the Sumposium of IUFRO section 41 23. Nov. 1970.) Mitteilungen der Bundesforsungs-anstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Reinbek bei Hamburg Nr. 83 1971, 59-69.

Holmgren, H. Om impregneringens beroende av furuvirkets förbehandling med hänsyn till barkningsmetoder och vattenläggning. Svensk Flottledsförb. årsskrift 26 (1952).

Holmgren, H. Impregnation of water-logged pine. Brit. Wood Pres. Ass. Ann. Conv. 1961, P. 187-199.

Howard, E.T., Manwiller, F.G. Anatomical characteristics of southern pine stemwood. Wood Science 2 (1969):2, 77-86.

Hudson, M.S., Henriksson, S.T. The oscilliating pressure method of wood impregnation. For. Prod. J. 6 (1956):10, 381-386.

Hunt, G.M., Garratt, G.A. Wood Preservation. Chapter 7: Factors affecting penetration and absorption. Second edition, McGraw Hill Inc, New York 1953.

International Association of Wood Anatomists. Multilingual glossary of terms used in wood anatomy. Verlagsanst. Buchdruckerei Konkordia Winterthur 1964, 186 p.

Jayme, G., Hunger, G., Fengel, D. Das eletronenmikroskopische Bild des Cellulosefeinbaues verschlossener und unverschlossener Hoftüpfel der Nadelhölzer. Holzforschung 14 (1960):4, 97-105.

Jensen, W., Fogelberg, B.C., Johanson, M. Studies on the possibilities of using radioactive tracers to follow the penetration of cooking liquors into wood. Paperi ja Puu 1960:7, 393-400.

Johnson, B.R., Gjovik, L.R. Effect of Trichoderma viride and a contaminating bacterium on microstructure and permeability of Loblolly Pine and Douglas-Fir. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 1970, 234-242.

Jutte, S.M., Spit, B.J. The submicroscopic structure of bordered pits on the radial walls of tracheids in Parana Pine, Kauri and European Spruce. Holzforschung, 17 (1963): 6, 168-175.

Jutte, S.M. Wood structure in relation to excessive absorption. - A literature survey. Houtinstituut TNO, Sept. 1971, Delft Netherlands, 29 p.

Karnop, G. (1972 a) Morphologie, Physiologie und Schadbild der Nicht-Cellulose-Bakterien aus wasserlagerndem Nadelholz. Material und Organismen 7 (1972):2, 119-132.

Karnop, G. (1972 b). Celluloseabbau und Schadbild an einzelnen Holzkomponenten durch Clostridium omelianskii im wasserlagerndem Nadelholz. Material und Organismen 7 (1972):3, 189-203.

Kelso, Jr, W.C., Gertjejansen, R.O., Hossfeld, R.L. The effect of air blockage upon the permeability of wood to liquids. Univ. Minn. Agr. Exp. Sta. Tech. Bull. No. 242, 1963, 40 p.

Klem, G.G., Halvorsen, B. Undersökelse av enkelte kvalitetsegenskaper hos brunntömmer. (Investigation of certain qualitative properties of sunken timber.) Meddelelser fra Det Norske Skogforsøksvesen 18 (1963), 309-377.

Knuth, D.T., McCoy, E. Bacterial deterioration of pine logs in pond storage. For. Prod. J. 1962, Sept. 437-442.

Koljo, B. Die Abhängigkeit det Tränkmittelaufnahme des Holzes von verschiedenen Faktoren unter besonderer Bedrücksichtigung von Kiefer und Fichte. Holz als Roh- und Werkstoff 11 (1953), p. 303-311.

Koran, Z. Air permeability and creosote retention of Douglas Fir. For. Prod. J. 14 (1964):4, 159-166.

Krahmer, R.L. Anatomical features of permeable and refractory Douglas-Fir. For. Prod. J. 11 (1961):9, 439-441.

Krahmer, R.L., Cotê, Jr, W.A. Changes in coniferous wood cells associated with heartwood formation. Tappi 46 (1963):1, 42-49.

Kremers, R.E. The chemistry of developing wood. The chemistry of wood, Editor B.L. Browning, Interscience publishers, John Wiley & Sons 1963 p. 369-404.

Liese, W. Uber die Eindringung von öligen Schutzmitteln in Fichtenholz. Holz als Roh- und Werkstoff 9 (1951):10, 374-378.

Liese, W. Fine structure of bordered pits in softwoods. Cellular Ultrastructure of Woody Plants, Editor W.A. Côtê, Syracuse University Press 1965 p. 271-290.

Liese, W., Bauch, J. (1967 a). On the closure of bordered pits in conifers. Wood Science and Technology, 1 (1967) p. 1-13.

Liese, W., Bauch, J. (1967 b). On anatomical causes of refractory behaviour of spruce and Douglas Fir. J. Inst. wood Sci. 4 (1967). No. 19, 3-14.

Liese, W., Karnop, G. Uber den Befall von Nadelholz durch Bakterien. Holz als Roh- und Werkstoff 26 (1968):6, 202-208.

Lin, R.T. Air permeability of wood measured by a pseudo-steady-state method. Wood Science 5 (1972):2, 125-131.

Lindgren, R.M., Harvey, G.M. Decay control and increased permeability in Southern pine sprayed with fluoride solutions. J. For. Prod. Res. Soc. 1952, Dec. 250-256.

Lindgren, R.M., Wright, E. Increased absorptiveness of molded Douglas fir posts. J. For. Prod. Res. Soc. 4 (1954), 162.

Mac Peak, M.D. Is control at the log pond feasible? For. Prod. J 13 (1963), April 142-146.

Markstrom, D.C., Hann, R.A. Seasonal variation in wood permeability and stem moisture content of three Rocky Mountain softwoods. U.S.D.A. For. Ser. Res. Note RM 212, 1972, 7 p.

McQuire, A.J. Interference microscopy as a technique for studying the cross-field pits of softwoods. J. Inst. Wood Sci. 4 (1969) No. 22, 48-55.

Meyer, R.W. Influence of pit aspiration on earlywood permeability of Douglas-Fir. Wood and Fiber 2 (1970):4, 328-339.

Miller, D.J. Permeability of Douglas-Fir in Oregon. For. Prod. J. 11 (1961):1, 14-16.

Moltesen, P., Borsholt, E., Bang, L. Forsøg med impraegnering af sprinkler- og vandlagrede granmaster. Dansk Skovforenings Tidsskrift 57 (1972), p. 279-303.

Morgan, J.W. (Skärning av spår i träet för att förbättra granvirkets tryckimpregnering.) Lahontorjunta 1972:4, 10-12.

Murmanis, L., Sachs, I.B. Structure of pit border in Pinus strobus L. Wood and Fiber 1 (1969):1, 7-17.

Nicholas, D.D. Structure and chemical composition of the pit membrane in relation to permeability of Loblolly pine (Pinus taeda L.) Abstr. of thesis, in Diss. Abstr. 1967 27 B (11) 3756-B.

Nicholas, D.D., Thomas, R.J. (1968 a). The influence of enzymes on the structure and permeability of Loblolly Pine. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 1968 p. 70-76.

Nicholas, D.D., Thomas, R.J. (1968 b). Influence of steaming on ultrastructure of boardered pit membrane in loblolly pine. For. Prod. J. 18 (1968):1, 57-59.

Nicholas, D.D. Characteristics of preservative solutions which influence their penetration into wood. For. Prod. J. 22 (1972):5, 31-36.

Panek, E. Influence of fungus infection associated with chemipeeling on pressure impregnation and cold soaking of jack pine posts. For. Prod. J. 7 (1957), 124.

Petty, J.A., Preston, F.R.S. The removal of air from wood. Holzforschung 23 (1969):1, 9-14.

Petty, J.A., Puritch, G.S. The effects of drying on the structure and permeability of wood of Abies grandis. Wood science and Technology 4 (1970) p. 140-154.

Phillips, E.W.J. Movement of the pit membrane in coniferous woods, with special reference to preservative treatment. Forestry 7 (1933), p. 109-120.

Prak, A. Unsteady-state gas permeability of wood. Wood Science and Technology 4 (1970) p. 50-69.

Redding, L.W. Resistance of timbers to impregnation with creosote. F.P.R.L. Princes Risborough, Bull. No 54, 1971.

Resch, H., Ecklund, B.A. Permeability of wood exemplified by measurement on Redwood. For. Prod. J. 14 (1964):5, 199-206.

Resch, H. Unsteady-state flow of compressible fluids through wood. For. Prod. J. 17 (1967):3, 48-54.

Schmitt, K. H., Bauer, D. Untersuchungen an Holz im Vakuum - ein Beitrag zur Imprägnierung im Vakuum-druckverfahren. Mitt. Deutsch. Ges. Holzforsch. 1966 No. 53, 31-36.

Schulz, G. Exploratory tests to increase preservative penetration in spruce and aspen by mold infection. For. Prod. J. 6 (1956), 77.

Schulz, G. Imprägnierung von Fichtenmasten nach Wasserlagerung. Material und Organismen 12 (1968):3, 177-184.

Sebastian, L. P., Côté, Jr, W.A., Skaar, C. Relationship of gas phase permeability to ultrastructure of White Spruce wood. For. Prod. J. 15 (1965):9, 394-404.

Seifert, K. Uber den Holzabbau durch Bakterien. Holz als Roh- und Werkstoff 25 (1967):10, 377-379.

Seifert, K. Zut Systematik der Holzfäulen, ihre chemischen und physikalischen Kennzeichen. Holz als Roh- und Werkstoff 26 (1968):6, 208-215.

Siau, J.F., Shaw, J.S. The treatability of refractory softwoods. Wood and Fiber 3 (1971):1, 1-12.

Smith, D.N., Lee, E. The longitudinal permeability of some hardwoods and softwoods. Dep. Sci. and Ind. Res. For. Prod. Res. Spec. Report No. 13 1958.

Smith, D.N., Redding, L.W. A technique for observing the penetration of preservatives into wood during treatment. For. Prod. J. (1964):4, 149-151.

Stamm, A.J. Permeability of wood to fluids. For. Prod. J. 13 (1963):11, 503-507.

Stamm, A.J. Wood and Cellulose Science. Ronald Press Co. New York 1964.

Stamm, A.J. (1967 a) Flow of fluids in wood. Wood Science and Technology 1 (1967) p. 122-141.

Stamm, A.J. (1967 b) Diffusion. Wood Science and Technology 1 (1967) p. 205-230.

Stamm, A.J. (1970 a) Maximum effective pit pore radii of the heartwood and sapwood of six softwoods as affected by drying and resoaking. Wood and Fiber 1 (1970):4, 263-269.

Stamm, A.J. (1970 b) Variations of maximum tracheid and pit pore dimensions from pith to bark for Ponderosa Pine and Redwood before and after drying determined by liquid displacement. Wood Science and Technology 4 (1970) p. 81-96.

Stemsrud, F. Uber die Feinstruktur der Hoftüpfel-Schliesshaut von Nadelhölzern. Holzforschung 10 (1956):3, 69-75.

Stemsrud, F. Uber die Feinstruktur der Hoftüpfel-Schliesshaut von Nadelhölzern II. Holzforschung 13 (1959):1, 16-20.

Stone, J.E., Green, H.V. Penetration and diffusion into hardwoods. Pulp and Paper Mag. of Canada 1958:10, 223-232.

Suolahti, O. Effect of barking and storage time on the impregnability of poles. Finnish Paper and Timber 1954:1, 8-9.

Suolahti, O., Wallén, A. Der Einfluss der Nasslagerung auf das Wasseraufnahmevermögen des Kiefernsplintholzes. Holz als Roh- und Werkstoff 16 (1958):1, 8-17.

Soulahti, O. Der Einfluss einer Nasslagerung auf die Imprägnierbarkeit von Holz. Mitt. Deutsch. Ges. Holzforsch. 1961 No. 48, 89-92.

Sutherland, J.H., Johnston, H.W., Maass, O. Further investigation of the penetration of liquids into wood. Can. Journ. of Research. 10 (1934):1, 36-72.

Tesoro, F.O., Choong, E.T., Skaar, C. Transverse air permeability of wood as an indicator of treatability with creosote. For. Prod. J. 16 (1966):3, 57-59.

Thomas, R.J., Nicholas, D.D. Pit membrane structure in Loblolly Pine as influenced by solvent exchange drying. For. Prod. J. 16 (1966):3, 53-56.

Thomas, R.J. The structure of the pit membranes in Longleaf Pine: An electron microscope study. Amer. Wood Pres. Ass. Proc. 1967.

Thomas, R.J. The ultrastructure of southern pine bordered pit membranes as revealed by specialized drying techniques. Wood and Fiber 1 (1969):2, 110-123.

Thomas, R.J., Kringstad, K.P. The role of hydrogen bonding in pit aspiration. Holzforschung 25 (1971):5, 143-149.

Thompson, W.S. Effect of steaming and kiln drying on the properties of southern pine poles. Part I: Mechanical properties. For. Prod. J. 19 (1969):1, 21-28.

Tsoumis, G. Light and electron microscopic evidence on the structure of the membrane of bordered pits in tracheids of Conifers. Cellular Ultrastructure of Woody Plants, Editor W.A. Côté, Syracuse University Press 1965 p. 305-317.

Unligil, H.H. Effect of water storage and Trichoderma infection on penetrability of wood. For. Prod. Lab. Ottawa Can. Inform. Rep. OP-X-12, 1969.

Unligil, H.H. Penetrability of White spruce wood after water storage. J. Inst. Wood Sci. Vol. nr 5 (1971) No. 30, p. 30-35.

Unligil, H.H. Penetrability and strength of White spruce after ponding. For. Prod. J. 22 (1972):9, 92-100.

Vakin, A.T., Sokolov, D.V., Tarkahanova, R.U., Tsvetkolova, C.D. (Research on methods of reliable impregnation of Spruce wood with preservatives.) Nauč. Trud. Leningr. Lesoteh. Akad. No. 110, 1968. For. Abstr. 30 (1969) No. 3182.

Wardrop, A.B., Davies, G.W. Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood. Holzforschung 15 (1961):5, 129-141.

Vasilev, O.A. (Effect of micro-organisms on Pine and Spruce wood kept in water.) Lesn. Z. Arhangel'sk 8 (1965):5, 110-118, For. Abstr. 28 (1967) No. 1457.

Willeitner, H. Praxisnahe Untersuchungen über den Einfluss einer Hitzebehandlung auf die Tränkfähigkeit von Bauholz. Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960):7, 250-260.

Summary

This report summarizes the factors which affect the permeability of softwood. Section 2 describes flow measurement in wood and its correlation with retention and penetration of preservatives. The microscopic wood elements which have a direct bearing on permeability are tracheids, rays, resin canals and bordered pits (section 3). Among these the bordered pits seem to have the greatest importance. Their anatomy and closing mechanism (aspiration) have therefore been described in detail. Section 4 describes how such factors as the locality of the tree, the density of the wood, the annual ring width, springwood - summerwood and sapwood - heartwood affect the result of impregnation. The treatment of wood before preservation also has a great influence on the retention and penetration of preservative (section 5). Various drying methods of the wood have been examined with a view to improving permeability, as well as water storage and water sprinkling of the wood and treatment with steam and chemicals. Water storage and water spraying seem to give the best results. This treatment causes bacterial attack on the rays and the bordered pits, with the result that the permeability increases drastically. Various types of preservative solutions give different penetration results (section 6). Nonpolar solvents (oils) usually penetrate into the wood easier than polar solvents (water). Aged solutions and solutions which contain air bubbles show bad penetration. Moderate pressures and rather long periods of treatment generally give better penetration results than very high pressures and short periods of treatment (section 7). In order to obtain an effective vaccum in the wood it must be well dried.