



DIELEKTRISK ANISOTROPI OCH ARGUMENTET FÖR ÄNDTRÄ: ORIENTERING AV DEN KAPACITIVA LASTVÄGEN I MAGNETISKT NEUTRALA KABELSTÖD AV TRÄ



Dielektrisk anisotropi och argumentet för ändträ: orientering av den kapacitiva lastvägen i magnetiskt neutrala kabelstöd av trä

A. Bosque, Y. Tanaka, M. Ferro, H. Park

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Sammanfattning

Ett kabelstöd av trä är en dielektrisk kropp som hålls i en signalledares närfält, och dess bidrag till installationen är därför en kapacitans som är distribuerad, orienteringsberoende och parallell med kabeln. I huvudstudien om neutralitetsklassning av virke (Bosque, Ferro, Park och Tanaka, 2026) identifierades fiberorientering som en konstruktionsvariabel och fräsning med fibrerna vertikalt valdes utifrån ett kombinerat mekaniskt och dielektriskt argument framställt i ett enda avsnitt. Denna kompletterande artikel utvecklar argumentet fullständigt. Trä är dielektrisk anisotropi: både den relativa permittiviteten ϵ_{ps_r} och förlusttangentsen $\tan \delta$ är högre längs fibrerna än tvärs dem, där längdaxeln överstiger de två tvärsaxlarna eftersom den rörformiga geometrin hos trakeider och kärlceller och de dipoler i bundet vatten som dominerar polarisationen är orienterade med fibern. Vi redovisar mätningar med impedansanalysator och skärmad parallellplattcell av ϵ_{ps_r} och $\tan \delta$ för ekvatoriell teak längs alla tre anatomiska axlar (longitudinell L, radiell R, tangentiell T) vid 8, 12 och 16 procents fukthalt från 20 Hz till 10 MHz, vilka bekräftar ett anisotropiförhållande $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ på 1.24 till 1.31 vid ljudfrekvenser och 12 procents fukthalt. Ur dessa konstanter bygger vi en modell för distribuerad kapacitans hos en kabel som vilar i en fräst vagga ovanför en träpelare och beräknar det kapacitiva bidraget per block för fräsning med ändträet vertikalt respektive fibrerna horisontellt: orienteringarna skiljer sig med en mätbar marginal, där ändträ ger den lägre kabelrelaterade kapacitansen eftersom de tvärgående axlarna med låg permittivitet placeras i det horisontella plan där kabelfältet är starkast och längdaxeln med hög permittivitet reserveras för den vertikala lastväg där den är elektriskt ofarlig och mekaniskt idealisk. En avsökning av fibervinkeln placerar kopplingsminimum vid sant ändträ. Avslutningsvis noterar vi att ändträ ursprungligen specificerades för tryckstyvhet och att det dielektriska argumentet, framtaget oberoende och i efterhand, överensstämmer med det mekaniska till den grad att det bekräftar det.

1. INLEDNING

Ett kabelstöd leder inte signalen. Det står bredvid den. Just därför är dess elektriska roll så lätt att avfärda: ett träblock under en kabel ingår uppenbart inte i kretsen, och det är frestande att dra slutsatsen att dess sammansättning, fibrer och orientering är frågor för möbelsnickaren snarare än ingenjören. Huvudartikeln om neutralitetsklassning (Bosque, Ferro, Park och Tanaka, 2026) lade fram den magnetiska halvan av argumentet -- att ett stöd i ständig kontakt med en ledare är en del av ledarens närfältsmiljö och att dess kvarvarande paramagnetiska innehåll är en mätbar indata till installationen snarare än en dekorativ sådan. Den dielektriska halvan avfärdades i ett enda avsnitt. Denna artikel är det avsnittet, utvidgat till den längd som fysiken förtjänar.

Det elektriska faktum att blocket står bredvid kabeln i stället för inuti den avlägsnar det inte ur kretsen; det bestämmer formen för dess koppling. En dielektrisk kropp i en ledares fält lagrar energi kapacitivt, och en distribuerad kapacitans parallellt med en transmissionsledning är en liten men verklig last vars storlek beror på kroppens permittivitet och på hur permittiviteten är orienterad mot fältet. Trä är inget isotropt dielektrikum. Dess permittivitet beror på riktningen, och ett trästöd har därför inte ett utan tre dielektriska bidrag, valbara vid fräsen genom den vinkel i vilken ämnet skärs.

Artikelns påstående är snävt och kvantitativt. Orienteringen som specificeras för Equatorial Elevation Block -- årsringar på ovansidan och fibrer som löper vertikalt ned längs lastvägen -- är den orientering som minimerar blockets kabelrelaterade kapacitans; minimum är mätbart snarare än nominellt och sammanfaller med den orientering som redan valts av mekaniska skäl. Vi påstår inte att effekten är stor. Vi påstår att den har ett tecken, en storlek och en föredragen riktning, och att en tillverkare som fräser blocket åt andra hållet för att få vackrare flatsida har flyttat värdet i fel riktning utan att veta att värdet finns.

2. TRÄETS DIELEKTRISKA ANISOTROPI

Trä är ett cellulärt fast material uppbyggt av långa, ihåliga och axiellt riktade celler -- trakeider i barrträ, fibrer och kärl i lövträ som teak -- vars långaxel definierar fiberriktningen. Geometrin är ursprunget till den mekaniska anisotropi varje träarbetare känner till, och lika mycket ursprunget till en dielektrisk anisotropi som är mindre känd men lika verklig och sedan länge dokumenterad (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tre mekanismer gör permittiviteten rikttningsberoende, och alla tre gynnar längdaxeln. För det första bildar själva cellväggarna kontinuerliga polariserbara vägar längs fibern och avbrutna vägar tvärs den, så gränsskiktspolarisation (Maxwell-Wagner) vid de många gränserna mellan vägg och cellhållighet ackumuleras företrädesvis längs fibrerna. För det andra befinner sig det bundna vattnet i cellväggarna -- det dominerande bidraget till träets permittivitet i alla utom de torraste tillstånden -- i en miljö vars hydroxylställen och mikrofibrillära struktur själva är orienterade med fibern, så orienteringspolarisationen hos det bundna vattnets dipoler sker lättare längs än tvärs fibrerna. För det tredje skiljer sig de två tvärriktningarna, radiell R och tangentiell T, bara obetydligt från varandra och ligger båda klart under det longitudinella värdet L. Resultatet, konsekvent genom litteraturen, är ordningen $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$, med samma ordning i förlusttangentsen och ett anisotropiförhållande $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ som vanligen ligger mellan 1.2 och 1.5 för tempererade och tropiska lövträslag i det hygroskopiska området.



Absolutvärdena är måttliga och fuktdominerade. Ugnstorr trä ligger nära $\epsilon_r = 2$ till 3 och stiger brant och monotont när fukthalten ökar, eftersom varje tillskott av bundet vatten tillför dipoler till det polariserbara beståndet. Denna branthet är skälet till att fukthalten, inte träslaget, är den största hävstången för ett stöds dielektriska bidrag, och den behandlas i avsnitt 5. För anisotropiargumentet är den väsentliga punkten strukturell snarare än numerisk: riktningen med högst permittivitet är fiberriktningen, och den riktningen bestäms av träarbetaren, inte trädet.

3. MÄTNING: PERMITTIVITET OCH FÖRLUST LÄNGS TRE AXLAR

Vi mätte ϵ_r och $\tan \delta$ på bearbetade teakprov skurna längs var och en av de tre anatomiska axlarna, så att det fält som parallellplattcellen applicerade i tur och ordning löpte longitudinellt, radiellt och tangentiellt genom provet. Provbitarna var 40 mm i fyrkant och 3.0 mm tjocka, plan- och parallellbearbetade till +/- 10 mikrometer, och skurna ur tre ekvatoriella ämnen klassade till 5N enligt huvudprotokollet så att magnetisk kontaminering inte kunde förväxlas med den dielektriska avläsningen. Varje provuppsättning konditionerades till jämvikt vid tre fukthalter -- 8, 12 och 16 procent -- i fukt-kammare, och fukten verifierades gravimetriskt mot ugnstorr massa efter körningen.

Cellen var en skärmad parallellplattfixtur av den typ som tidigare beskrivits (Tanaka och Park, 2022), driven av en impedansanalysator av modell Keysight E4990A från 20 Hz till 10 MHz. Skyddsringen undertrycker randfält, så att den uppmätta kapacitansen motsvarar en definierad elektrodyta och den extraerade permittiviteten är materialets bulkvärde snarare än en kantkontaminerad uppskattning; förlusttangenter avläses direkt som fixturens dissipationsfaktor. Kontakten skapades genom tunna mellanskikt av ledande elastomer för att ta upp kvarvarande ojämnheter hos de frästa sidorna utan ett lim som skulle bidra med egen polarisation.

Vid 12 procents fukthalt och 1 kHz gav teak $\epsilon_L = 2.64$, $\epsilon_R = 2.09$ och $\epsilon_T = 2.02$, ett anisotropiförhållande ϵ_L / ϵ_T på 1.31 och ϵ_L / ϵ_R på 1.26; de två tväraxlarna överensstämde inom 4 procent, som väntat. Förlusttangenter följde samma ordning: $\tan \delta$ var 0.021 längs fibrerna och 0.014 till 0.015 tvärs dem. Över ljudbandet från 20 Hz till 20 kHz var permittiviteterna plana inom 3 procent och anisotropiförhållandet låg mellan 1.24 och 1.31. När fukthalten höjdes till 16 procent steg alla värden -- ϵ_L nådde 3.08 -- och anisotropin vidgades märkbart något, eftersom det tillkommande bundna vattnet polariseras företrädesvis längs den gynnade axeln. Torkning till 8 procent pressade samman både absolutvärdena och förhållandet. Anisotropin är alltså ingen fast materialkonstant utan en fuktmodulerad sådan, starkast där den betyder minst (vått) och svagast där materialet är som torrast; vid leveransspecifikationen 12 +/- 1 procent är den tydligt upplöst och stabil.

4. MODELLEN FÖR DISTRIBUTERAD KAPACITANS HOS VAGGA, KABEL OCH PELARE

För att omvandla tre permittiviteter till ett konstruktionsbeslut behöver vi kopplingens geometri. Kabeln ligger inte på ett plant block; den vilar i en vagg, ett grunt radiespår fräst i ovasidan, så att en ändlig båge av kabelmanteln skiljs från träet endast av mantelns väggjocklek. Träet omedelbart under bågen -- en kort vertikal pelare från vaggans botten ned i blockets kropp -- är den plats där fältet mellan ledaren och en avlägsen jordretur är starkast och där den stora merparten av kapacitansen mellan kabel och stöd lagras. Trä längre ut och längre ned bidrar med snabbt avtagande vikt när fältet breddas och försvagas.

Vi modellerar detta som en distribuerad kapacitans per längdenhet av dragningen genom att integrera den lokala fältenergin i trävolymen under och kring vaggan, med träs permittivitetstensor införd axel för axel. Konstruktionen är standard för ett anisotrop dielektrikum: den vertikala fältkomponenten samplar den vertikala axelns permittivitet, de horisontella komponenterna samplar de horisontella axlarnas permittiviteter, och eftersom vaggan koncentrerar fältet till det nästan vertikala området strax under ledaren medan returvägarna som sluter kapacitansen löper utåt och nedåt genom pelarens sidor står de horisontella permittiviteterna för den större andelen lagrad energi. Modellens utdata är en enda tekniskt relevant storhet: den kapacitans som blocket tillför kabeln, i pikofarad per block, som funktion av hur permittivitetstensor är orienterad.

Två orienteringar är praktiskt relevanta. Fräsning med ändträet vertikalt ställer längdaxeln L lodrätt, längs lastvägen, och lämnar de två låga tväraxlarna R och T i det horisontella planet. Fräsning med flatsidan upp (flatsågat, fibrer horisontellt) lägger längdaxeln L i det horisontella planet, där den samplas av de starka horisontella fältkomponenterna, och ställer en tväraxel vertikalt. Med de uppmätta konstanterna vid 12 procent inmatade i modellen för en representativ vagggeometri (12 mm kabeldiameter, 3 mm radiespår, 60 mm blockhöjd, en nominell jordretur på chassiavstånd) fås ungefär 1.9 pF per block för ändträorienteringen och ungefär 2.3 pF per block för flatsideorienteringen -- en skillnad nära 0.4 pF, cirka 18 procent, som enbart uppstår ur snittvinkeln. Per block är detta litet. Det är också verkligt, reproducerbart, har ett entydigt tecken och är gratis: det kostar tillverkaren bara beslutet att orientera ämnet rätt och ackumuleras över de flera blocken i en fullständig dragning.

5. AVSÖKNING AV FIBERVINKEL OCH FUKTKÄNSLIGHET

De två namngivna orienteringarna är ändpunkter i ett kontinuum, och det är värt att bekräfta att ändrä är ett verkligt minimum snarare än bara det bättre av två godtyckliga val. Vi bearbetade en serie provbitar med fibervinklar från 0 deg (fibern vertikal, sant ändrä), genom 30, 45 och 60, till 90 deg (fibern horisontell, flatsida) relativt lastaxeln och mätte var och en i vaggmodellens geometri med en spänningssatt ledare ovanför. Den kabelrelaterade kapacitansen steg monotont med fibervinkeln, från ändräminimum vid 0 deg till flatsidemaximum vid 90 deg, och följde nära den cosinuskvadrattviktning som tensormodellen



förutsäger när längdaxeln med hög permittivitet gradvis roteras in i det horisontella fältet. Kurvan är flack nära 0 deg -- några graders fräsfel kostar nästan ingenting -- och brantast genom avsökningens mitt, så straffet för ett genuint vårdslöst snitt är större än för ett ofullkomligt men välmenande. Minimum ligger vid sant ändrä och är ett minimum, inte en inflektionspunkt.

Fukthalten förskjuter hela kurvan vertikalt utan att flytta minimipunkten. Eftersom permittiviteten stiger brant med bundet vatten tillför ett block som vandrat från 12 till 16 procents fukthalt mer kapacitans i absoluta tal än hela skillnaden mellan ändrä och flatsida vid konstant fukt -- fukthävsstängen är större än orienteringshävsstängen. Men de två är oberoende: att vata träet höjer golvet, det förändrar inte vilken orientering som är lägst. Orientering och konditionering är därför kompletterande kontroller, och båda måste utövas. Detta är den uppmätta grunden för att ugnstorka varje klassat ämne vid ursprunget till 12 +/- 1 procent och för den årliga fuktkontrollen i underhållsschemat: orienteringen fräses in permanent och kan inte driva, men den fukt som skalar den kan göra det, och ett stöd som lämnas för att nå jämvikt med ett fuktigt rum ger långsamt upp den marginal som säkrades vid fräsen.

Vi noterar i förbigående att överensstämmelsen mellan tväraxlarna i avsnitt 3 innebär att valet mellan radiell och tangentiell visning i horisontalplanet saknar betydelse inom mätosäkerheten; blocket kan vridas kring sin vertikallaxel för bästa utseende på årsringarna på ovansidan utan dielektrisk följd, förutsatt att fibrerna förblir vertikala.

6. DISKUSSION: TVÅ ARGUMENT, EN ORIENTERING

Ändräorienteringen valdes inte för sitt dielektriska beteende. Den valdes eftersom ändrä är det styvaste och starkaste sättet att belasta trä i tryck: när fibrerna står vertikalt bärs en nedåtriktad last längs de rörformiga cellerna i deras starkaste riktning, och blocket motstår den statiska vikten från en kabeldragning och installationens sättning med minst krypning och minst dimensionsförändring. Detta är ett gammalt och okontroversiellt stycke träteknik, och det fastställde frässpecifikationen innan någon permittivitet hade mätts.

De dielektriska mätningar som redovisas här gjordes senare, och de kunde i princip ha motsagt det mekaniska valet -- axeln längs fibrerna kunde ha varit axeln med låg permittivitet, i vilket fall en vertikal placering skulle ha varit mekaniskt rätt och elektriskt fel och en kompromiss hade tvingats fram. De motsade det inte. Axeln längs fibrerna är axeln med hög permittivitet, så genom att ställa den vertikalt avlägsnas den ur det horisontella plan där kabelns fält är starkast, exakt vad kapacitansmodellen kräver. Den mekaniskt idealiska orienteringen är oberoende även den dielektriskt tystaste. De två argumenten byggdes ur olika fysik, vid olika tidpunkter, av personer som löste olika problem, och väljer samma snitt.

Vi tillmäter inte denna överensstämmelse någon mystisk vikt; anisotropa material har ofta sin styva axel och sin högpermittiva axel riktade lika, eftersom båda egenskaperna kan spåras till samma orienterade mikrostruktur, och teak är ett sådant material. Den praktiska följden kvarstår dock. En tillverkare som enbart följer det mekaniska argumentet når ändrä och minimerar utan avsikt även den kapacitiva kopplingen. En tillverkare som åsidosätter det mekaniska argumentet för en dekorativ flatsida förlorar på båda punkterna samtidigt. Konvergensen är inte så mycket ett sammanträffande att förundras över som ett skäl att lita på specifikationen: när två oberoende resonemang slutar vid samma värde är värdet sannolikt korrekt.

7. SLUTSATS

Trä är en dielektriskt anisotrop kropp, och ett kabelstöd av trä är denna kropp placerad i en ledares närfält. Dess bidrag till installationen är en liten distribuerad kapacitans vars storlek tillverkaren, medvetet eller inte, bestämmer vid fräsen. Vi mätte den treaxliga permittiviteten och förlusten i ekvatoriell teak, bekräftade den väntade ordningen $\epsilon_{\text{L}} > \epsilon_{\text{R}} \sim \epsilon_{\text{T}}$ med ett anisotropiförhållande nära 1.3 vid leveransfukten och förde konstanterna genom en kapacitansmodell för vagga och pelare till ett prestandamått -- pikofarad per block -- som skiljer sig mätbart mellan fräsning med ändrä och flatsida. Ändräalternativet ger det lägre värdet, med ungefär 0.4 pF och 18 procent i en representativ geometri, och en avsökning av fibervinkeln bekräftar det som ett verkligt minimum.

Marginalen är liten per block och vi avstår från att överdriva den. Vi hävdar bara att den är verklig, att den har en föredragen riktning och att den riktningen redan specificerats av mekaniska skäl. Equatorial Elevation Block fräses med fibrerna vertikalt eftersom ändrä är det styvaste sättet att bära en trycklast; den dielektriska analys som redovisas här gjordes efteråt och bekräftar att samma snitt också är det dielektriskt tystaste. Varje block levereras med ändräet uppåt, ugnstorkat till 12 +/- 1 procent, obehandlat och med sin grad och sina uppmätta konstanter på certifikatet. Vi uppmanar läsaren att fråga valfri annan tillverkare av trästöd åt vilket håll fibrerna i deras stöd löper och varför.

REFERENSER

- [1] James, W. L. (1975). Dielektriska egenskaper hos trä och träfiberskiva: variation med temperatur, frekvens, fukthalt och fiberorientering. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Dielektriska egenskaper hos trä och träbaserade material. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Förhållandet mellan trä och vatten. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Träets dielektriska egenskaper. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.



- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Magnetisk neutralitetsklassning av konstruktionsvirke: en renhetsklassificering enligt N-skalan för stödmaterial till ljudkablar. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Mätning av permittivitet i anisotropa lågförlustmaterial med skärmad parallellplattcell. *Journal of Equatorial Audio Science*, 3(1), 12-29.