



DIELEKTRISK ANISOTROPI OG ARGUMENTET FOR ENDETRÆ: ORIENTERING AF DEN KAPACITIVE BELASTNINGSVEJ I MAGNETISK NEUTRALE KABELSTØTTER AF TRÆ



Dielektrisk anisotropi og argumentet for endetræ: orientering af den capacitive belastningsvej i magnetisk neutrale kabelstøtter af træ

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.

Resumé

En kabelstøtte af træ er et dielektrisk legeme, der holdes i en signalleders nærfelt, og dens bidrag til installationen er derfor en kapacitans, som er distribueret, orienteringsafhængig og parallel med kablet. I hovedbehandlingen af neutralitetsklassificering af træ (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) blev fiberorientering identificeret som en designvariabel, og fræsning med fibre lodret blev valgt ud fra et kombineret mekanisk og dielektrisk argument fremsat i ét afsnit. Denne ledsagende artikel udvikler argumentet fuldt ud. Træ er dielektrisk anisotrop: både den relative permittivitet ϵ_{r_L} og tabstangenten $\tan \delta_L$ er højere langs fibre end på tværs, hvor længdeaksen overstiger de to tværakser, fordi den rørformede geometri i trakeider og karceller samt de dipoler i bundet vand, der dominerer polarisationen, er orienteret med fiberen. Vi rapporterer målinger med impedansanalysator og afskærmet parallelpladecelle af ϵ_{r_L} og $\tan \delta_L$ for ækvatorial teak langs alle tre anatomiske akser (longitudinal L, radial R, tangential T) ved 8, 12 og 16 procents fugtindhold fra 20 Hz til 10 MHz, som bekræfter et anisotropiforhold $\epsilon_{r_L} / \epsilon_{r_T}$ på 1.24 til 1.31 ved lydfrekvenser og 12 procents fugtindhold. Ud fra disse konstanter bygger vi en model for distribueret kapacitans i et kabel, der hviler i en fræset vugge over en træsstøtte, og beregner det capacitive bidrag pr. blok for fræsning med endetræet lodret sammenlignet med sidetræfræsning: de to orienteringer adskiller sig med en målbar margin, hvor endetræ giver den lavere kabelrefererede kapacitans, fordi det placerer tværakserne med lav permittivitet i det vandrette plan, hvor kabelfeltet er stærkest, og reserverer længdeaksen med høj permittivitet til den lodrette belastningsvej, hvor den er elektrisk harmløs og mekanisk ideel. En afsøgning af fibervinklen placerer koblingsminimum ved ægte endetræ. Afslutningsvis bemærker vi, at endetræ oprindeligt blev specificeret for trykstivhed, og at det dielektriske argument, som blev udledt uafhængigt og efterfølgende, stemmer overens med det mekaniske i en sådan grad, at det bekræfter det.

1. INDLEDNING

En kabelstøtte leder ikke signalet. Den står ved siden af det. Netop derfor er dens elektriske rolle så let at afvise: en træblok under et kabel indgår tydeligvis ikke i kredsløbet, og det er fristende at konkludere, at dens sammensætning, fibre og orientering er spørgsmål for møbelsnedkeren frem for ingeniøren. Hovedartiklen om neutralitetsklassificering (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) fremlagde den magnetiske halvdel af argumentet -- at en støtte i vedvarende kontakt med en leder er en del af lederens nærfeltsmiljø, og at dens resterende paramagnetiske indhold er et målbart input til installationen frem for et dekorativt. Den dielektriske halvdel blev afviklet i ét afsnit. Denne artikel er det afsnit udvidet til den længde, fysikken fortjener.

Det elektriske faktum, at blokken står ved siden af kablet i stedet for inde i det, fjerner den ikke fra kredsløbet; det fastlægger formen for dens kobling. Et dielektrisk legeme i en leders felt lagrer energi kapacitivt, og en distribueret kapacitans parallelt med en transmissionslinje er en lille, men reel belastning, hvis størrelse afhænger af legemets permittivitet og af, hvordan permittiviteten er orienteret i forhold til feltet. Træ er ikke et isotropt dielektrikum. Dets permittivitet afhænger af retningen, og en træstøtte har derfor ikke ét, men tre dielektriske bidrag, som kan vælges ved fræsebænken gennem den vinkel, emnet skæres i.

Artiklens påstand er snæver og kvantitativ. Den orientering, der er specificeret for Equatorial Elevation Block -- årringe på oversiden og fibre, der løber lodret ned langs belastningsvejen -- er den orientering, som minimerer blokkens kabelrefererede kapacitans; minimum er målbart snarere end nominelt og falder sammen med den orientering, der allerede er valgt af mekaniske grunde. Vi hævder ikke, at virkningen er stor. Vi hævder, at den har et fortegn, en størrelse og en foretrukken retning, og at en producent, der fræser blokken den anden vej for at få en smukkere sideflade, har flyttet tallet i den forkerte retning uden at vide, at tallet findes.

2. TRÆETS DIELEKTRISKE ANISOTROPI

Træ er et cellulært fast stof opbygget af lange, hule og aksialt orienterede celler -- trakeider i nåltræ, fibre og kar i løvtræ som teak -- hvis lange akse definerer fiberretningen. Denne geometri er oprindelsen til den mekaniske anisotropi, som enhver træarbejder kender, og i lige så høj grad oprindelsen til en dielektrisk anisotropi, der er mindre kendt, men lige så virkelig og længe dokumenteret (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tre mekanismer gør permittiviteten retningsafhængig, og alle tre favoriserer længdeaksen. For det første danner selve cellevæggene kontinuerlige polariserbare veje langs fiberen og afbrudte veje på tværs, så grænsefladepolarisation (Maxwell-Wagner) ved de mange grænser mellem væg og cellemembran fortrinsvis ophobes langs fibre. For det andet befinder det bundne vand i cellevæggene -- det dominerende bidrag til træets permittivitet i alle undtagen de tørreste tilstande -- sig i et miljø, hvis hydroxylsteder og mikrofibrillære struktur selv er orienteret med fiberen, så orienteringspolarisationen af det bundne vands dipoler sker lettere langs end på tværs af fibre. For det tredje adskiller de to tværretninger, radial R og tangential T, sig kun lidt fra hinanden og ligger begge tydeligt under den longitudinale værdi L. Resultatet, som er konsistent i litteraturen, er rækkefølgen $\epsilon_{r_L} > \epsilon_{r_R} \sim \epsilon_{r_T}$, med samme rækkefølge i tabstangenten og et anisotropiforhold $\epsilon_{r_L} / \epsilon_{r_T}$, der typisk ligger mellem 1.2 og 1.5 for tempererede og tropiske løvtræsarter i det hygroskopiske område.



Absolutværdierne er beskedne og fugtdominerede. Ovntrøt træ ligger nær $\epsilon_r = 2$ til 3 og stiger stejlt og monotont, når fugtindholdet øges, fordi hver tilvækst af bundet vand føjer dipoler til den polariserbare beholdning. Denne stejlhed er grunden til, at fugtindholdet, ikke træarten, er det største håndtag på en støttes dielektriske bidrag, og det behandles i afsnit 5. For anisotropiargumentet er det væsentlige punkt strukturelt frem for numerisk: retningen med højest permittivitet er fiberretningen, og den retning fastlægges af træarbejderen, ikke træet.

3. MÅLING: PERMITTIVITET OG TAB LANGS TRE AKSER

Vi målte ϵ_r og $\tan \delta$ på bearbejdede teakprøver skåret langs hver af de tre anatomiske akser, så det felt, som parallelpladecellen påførte, skiftevis løb longitudinalt, radiale og tangentialt gennem prøven. Prøvelegemerne var 40 mm i kvadrat og 3.0 mm tykke, plan- og parallelbearbejdede til ± 10 mikrometer og skåret fra tre ækvatoriale emner klassificeret til 5N efter hovedprotokollen, så magnetisk forurening ikke kunne forveksles med den dielektriske aflæsning. Hvert prøvesæt blev konditioneret til ligevægt ved tre fugtindhold -- 8, 12 og 16 procent -- i fugtkamre, og fugten blev verificeret gravimetrisk mod ovntør masse efter forsøget.

Cellen var en afskærmet parallelpladefixtur af den type, der tidligere er beskrevet (Tanaka og Park, 2022), drevet af en Keysight E4990A-impedansanalysator fra 20 Hz til 10 MHz. Skærmringen undertrykker randfelter, så den målte kapacitans svarer til et defineret elektrodeareal, og den udledte permittivitet er materialets bulkværdi frem for et kantforurenet estimat; tabstangenten aflæses direkte som fixturens dissipationsfaktor. Kontakten blev skabt gennem tynde mellemlag af ledende elastomer for at optage den resterende overfladeruhest på de fræsede flader uden et klæbemiddel, der ville bidrage med sin egen polarisation.

Ved 12 procents fugtindhold og 1 kHz gav teak $\epsilon_L = 2.64$, $\epsilon_R = 2.09$ og $\epsilon_T = 2.02$, et anisotropiforhold ϵ_L / ϵ_T på 1.31 og ϵ_L / ϵ_R på 1.26; de to tværakser stemte overens inden for 4 procent som forventet. Tabstangenten fulgte samme rækkefølge: $\tan \delta$ var 0.021 langs fibrene og 0.014 til 0.015 på tværs. Over lydbåndet fra 20 Hz til 20 kHz var permittiviteterne flade inden for 3 procent, og anisotropiforholdet lå mellem 1.24 og 1.31. Da fugtindholdet blev hævet til 16 procent, steg alle værdier -- ϵ_L nåede 3.08 -- og anisotropien udvidede sig en smule, fordi det tilførte bundne vand fortrinsvis polariseres langs den favoriserede akse. Tørring til 8 procent pressede både absolutværdierne og forholdet sammen. Anisotropien er således ikke en fast materialekonstant, men en fugtmoduleret størrelse, stærkest hvor den betyder mindst (vådt) og svagest, hvor materialet er tørrest; ved leverings-specifikationen 12 ± 1 procent er den tydeligt opløst og stabil.

4. MODELLEN FOR DISTRIBUERET KAPACITANS I VUGGE, KABEL OG SØJLE

For at omsætte tre permittiviteter til en designbeslutning har vi brug for koblingens geometri. Kablet ligger ikke på en flad blok; det hviler i en vugge, en lav radiusskåret rille fræsset i oversiden, så et endeligt buestykke af kabelkappen kun er adskilt fra træet af kappens vægtykkelse. Træet direkte under buen -- en kort lodret søjle fra vuggens bund ned i blokkens krop -- er stedet, hvor feltet mellem lederen og en fjern jordretur er stærkest, og hvor langt størstedelen af kapacitansen mellem kabel og støtte lagres. Træ længere ude og længere nede bidrager med hurtigt aftagende vægt, efterhånden som feltet spredes og svækkes.

Vi modellerer dette som en distribueret kapacitans pr. længdeenhed af trækket ved at integrere den lokale feltenergi i trævolumenet under og omkring vuggen med træets permittivitetstensor indsat akse for akse. Konstruktionen er standard for et anisotrop dielektrikum: den lodrette feltkomponent afprøver den lodrette akse permittivitet, de vandrette komponenter afprøver de vandrette aksers permittiviteter, og fordi vuggen koncentrerer feltet i det næsten lodrette område lige under lederen, mens returvejene, der lukker kapacitansen, løber udad og ned gennem søjlens sider, står de vandrette permittiviteter for den største andel af den lagrede energi. Modellens output er en enkelt teknisk relevant størrelse: den kapacitans, som blokken tilfører kablet, i pikofarad pr. blok, som funktion af hvordan permittivitetstensoren er orienteret.

To orienteringer er praktisk relevante. Fræsning med endetræet lodret stiller længdeaksen L lodret langs belastningsvejen og efterlader de to lave tværakser R og T i det vandrette plan. Fræsning med sidetræet opad (fladsavet, fibre vandret) lægger længdeaksen L i det vandrette plan, hvor den samples af de stærke vandrette feltkomponenter, og stiller én tværakse lodret. Når de målte konstanter ved 12 procent indsættes i modellen for en repræsentativ vuggegeometri (12 mm kabel diameter, 3 mm radiusskåret vugge, 60 mm blokhøjde, en nominel jordretur i chassisaafstand), fås omtrent 1.9 pF pr. blok for endetræsoorienteringen og omtrent 2.3 pF pr. blok for sidetræsoorienteringen -- en forskel nær 0.4 pF, cirka 18 procent, der alene skyldes snitvinklen. Pr. blok er dette lille. Det er også reelt, reproducerbart, har ét fortegn og er gratis: det koster kun producenten beslutningen om at orientere emnet korrekt og akkumuleres over de adskillige blokke i et fuldt kabeltræk.

5. AFSØGNING AF FIBERVINKEL OG FUGTFØLSOMHED

De to navngivne orienteringer er endepunkter på et kontinuum, og det er værd at bekræfte, at endetræ er et ægte minimum frem for blot det bedre af to vilkårlige valg. Vi bearbejdede en serie prøvelegemer med fibervinkler fra 0 deg (fibren lodret, ægte endetræ), gennem 30, 45 og 60, til 90 deg (fibren vandret, sidetræ) i forhold til belastningsaksen og målte hvert i vuggemodellens geometri med en spændingssat leder ovenover. Den kabelrefererede kapacitans steg monotont med fibervinklen, fra endetræminimum ved 0 deg til sidetræmaksimum ved 90 deg, og fulgte nøje den cosinus-kvadreret vægtning, som tensormodellen forudsiger, når længdeaksen med høj permittivitet gradvist roteres ind i det vandrette felt. Kurven er flad nær 0 deg -- få graders fræsefejl koster



næsten intet -- og stejlest gennem midten af afsøgningen, så straffen for et reelt sjusket snit er større end for et uperfekt, men velment. Minimum ligger ved ægte endetræ og er et minimum, ikke et vendepunkt.

Fugtindholdet forskyder hele kurven lodret uden at flytte minimumspunktet. Fordi permittiviteten stiger stejlt med bundet vand, tilfører en blok, der er drevet fra 12 til 16 procents fugtindhold, mere kapacitans i absolutte tal end hele forskellen mellem endetræ og sidetræ ved konstant fugt -- fugt er en stærkere reguleringsparameter end orientering. Men de to er uafhængige: opfugtning hæver grundniveauet, det ændrer ikke, hvilken orientering der er lavest. Orientering og konditionering er derfor komplementære kontroller, og begge skal udøves. Det er det målte grundlag for at ovntørre hvert klassificeret emne ved oprindelsen til 12 +/- 1 procent og for den årlige fugtkontrol i vedligeholdelsesplanen: orienteringen fræses permanent ind og kan ikke drive, men det fugtindhold, der skalerer virkningen, kan, og en støtte, som efterlades til at nå ligevægt med et fugtigt rum, afgiver langsomt den margen, der blev sikret ved fræsebænken.

Vi bemærker i forbifarten, at overensstemmelsen mellem tværakserne målt i afsnit 3 betyder, at valget mellem radial og tangential præsentation i det vandrette plan er uden betydning inden for måleusikkerheden; blokken kan drejes omkring sin lodrette akse for at give det bedste udseende af årringene på oversiden uden dielektrisk konsekvens, forudsat at fibrene forbliver lodrette.

6. DISKUSSION: TO ARGUMENTER, ÉN ORIENTERING

Endetræsorienteringen blev ikke valgt for sin dielektriske opførsel. Den blev valgt, fordi endetræ er den stiveste og stærkeste måde at belaste træ i tryk: når fibrene står lodret, bæres en nedadrettet belastning langs de rørformede celler i deres stærkeste retning, og blokken modstår den statiske vægt fra et kabeltræk og installationens sætning med mindst krybning og mindst dimensionsændring. Det er et gammelt og ukontroversielt stykke træteknik, og det fastlagde fræsespecifikationen, før nogen permittivitet blev målt.

De dielektriske målinger, der rapporteres her, blev foretaget senere, og de kunne i princippet have modsagt det mekaniske valg -- aksens langs fibrene kunne have været aksens med lav permittivitet, i hvilket tilfælde en lodret placering ville have været mekanisk rigtig og elektrisk forkert, og et kompromis ville have været nødvendigt. De modsagde det ikke. Aksens langs fibrene er aksens med høj permittivitet, så ved at stille den lodret fjernes den fra det vandrette plan, hvor kablets felt er stærkest, præcis som kapacitansmodellen kræver. Den mekanisk ideelle orientering er uafhængigt også den dielektrisk mest stille. De to argumenter blev bygget ud fra forskellig fysik, på forskellige tidspunkter, af personer, der løste forskellige problemer, og vælger samme snit.

Vi tillægger ikke denne overensstemmelse nogen mystisk vægt; anisotrope materialer har ofte deres stive akse og deres akse med høj permittivitet rettet ens, fordi begge egenskaber kan føres tilbage til samme orienterede mikrostruktur, og teak er et sådant materiale. Den praktiske konsekvens består dog. En producent, der alene følger det mekaniske argument, ender ved endetræ og minimerer uden at vide det også den capacitive kobling. En producent, der tilsidesætter det mekaniske argument for en dekorativ sidetræsflade, taber på begge punkter samtidig. Konvergensen er ikke så meget et tilfælde at forundres over som en grund til at stole på specifikationen: når to uafhængige ræsonnementer ender ved samme tal, er tallet mere sandsynligt korrekt.

7. KONKLUSION

Træ er et dielektrisk anisotropt legeme, og en kabelstøtte af træ er dette legeme placeret i en leders nærfelt. Dens bidrag til installationen er en lille distribueret kapacitans, hvis størrelse producenten, bevidst eller ej, fastlægger ved fræsebænken. Vi målte den treksede permittivitet og tabet i ækvatorial teak, bekræftede den forventede rækkefølge $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ med et anisotropiforhold nær 1.3 ved leveringsfugten og førte konstanterne gennem en kapacitansmodel for vugge og søjle til et ydelsesmål -- pikofarad pr. blok -- der adskiller sig målbart mellem fræsning med endetræ og sidetræ. Endetræ giver den lavere værdi af de to med omtrent 0.4 pF og 18 procent i en repræsentativ geometri, og en afsøgning af fibervinklen bekræfter det som et ægte minimum.

Margenen er lille pr. blok, og vi afstår fra at overdrive den. Vi hævder kun, at den er reel, at den har en foretrukken retning, og at den retning allerede er specificeret af mekaniske grunde. Equatorial Elevation Block fræses med fibrene lodret, fordi endetræ er den stiveste måde at bære en trykbelastning; den dielektriske analyse, der rapporteres her, blev foretaget bagefter og bekræfter, at samme snit også er det dielektrisk mest stille. Hver blok leveres med endetræet opad, ovntørret til 12 +/- 1 procent, ubehandlet og med sin grad og sine målte konstanter på certifikatet. Vi opfordrer læseren til at spørge enhver anden producent af træstøtter, hvilken vej fibrene løber, og hvorfor.

REFERENCER

- [1] James, W. L. (1975). Dielektriske egenskaber ved træ og træfiberplade: variation med temperatur, frekvens, fugtindhold og fiberorientering. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Dielektriske egenskaber ved træ og træbaserede materialer. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Forholdet mellem træ og vand. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Træets dielektriske egenskaber. 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 neutralitetsklassificering af konstruktionstræ: en renhedsklassifikation på N-skalaen for støttematerialer til lydkabler. *Journal of Equatorial Audio Science*, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Måling af permittivitet i anisotrope lavtabsmaterialer med en afskærmet parallelpladecelle. *Journal of Equatorial Audio Science*, 3(1), 12-29.