



DIELEKTRISK ANISOTROPI OG ARGUMENTET FOR ENDEVED: ORIENTERING AV DEN KAPASITIVE BELASTNINGSBANEN I MAGNETISK NØYTRALE KABELSTØTTER AV TRE



Dielektrisk anisotropi og argumentet for endevend: orientering av den kapasitive belastningsbanen i magnetisk nøytrale kabelstøtter av tre

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.

Sammendrag

En kabelstøtte av tre er et dielektrisk legeme som holdes i nærfeltet til en signalleder, og dens bidrag til installasjonen er derfor en kapasitans som er distribuert, orienteringsavhengig og parallell med kabelen. I hovedbehandlingen av nøytralitetsgradering for trevirke (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) ble fiberretningen identifisert som en konstruksjonsvariabel, og fresing med endevenden vertikalt ble valgt ut fra et kombinert mekanisk og dielektrisk argument fremsatt i ett avsnitt. Denne ledsagende artikkelen utvikler argumentet fullt ut. Tre er dielektrisk anisotrop: Både den relative permittiviteten ϵ_{ps_r} og tapstangenten $\tan \delta$ er høyere langs fibre enn på tvers, der langsaksen overstiger de to tverraksene fordi den rørførte geometrien i trakeider og karceller og dipolene i bundet vann som dominerer polarisasjonen, er innrettet med fiberen. Vi rapporterer målinger med impedansanalysator og skjermet parallellplatecelle av ϵ_{ps_r} og $\tan \delta$ for ekvatorial teak langs alle tre anatomiske akser (longitudinal L, radial R, tangential T) ved 8, 12 og 16 prosent fuktinnhold fra 20 Hz til 10 MHz, som bekrefter et anisotropiforhold $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ på 1.24 til 1.31 ved lydfrekvenser og 12 prosent fuktinnhold. Fra disse konstantene bygger vi en modell for distribuert kapasitans i en kabel som hviler i en frest vugge over en tresøyle, og beregner det kapasitive bidraget per blokk for fresing med endevenden vertikalt sammenlignet med sidevedfresing: De to orienteringene skiller seg med en målbar margin, der endevend gir den lavere kabelrefererte kapasitansen fordi den plasserer tverraksene med lav permittivitet i det horisontale planet der kabelfeltet er sterkest, og reserverer langsaksen med høy permittivitet for den vertikale belastningsbanen, der den er elektrisk harmløs og mekanisk ideell. Et sveip over fibervinkelen lokaliserer koblingsminimumet ved ekte endevend. Avslutningsvis bemerker vi at endevend opprinnelig ble spesifisert på grunn av trykkstivheten, og at det dielektriske argumentet, som ble utledet uavhengig og senere, stemmer overens med det mekaniske i en slik grad at det bekrefter dette.

1. INNLEDNING

En kabelstøtte fører ikke signalet. Den står ved siden av det. Nettopp derfor er dens elektriske rolle så lett å avvise: En treblokk under en kabel er åpenbart ikke i kretsen, og det er fristende å konkludere med at sammensetningen, fiberretningen og orienteringen er spørsmål for møbelsnekkeren snarere enn ingeniøren. Hovedartikkelen om nøytralitetsgradering (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) fremla den magnetiske halvdelen av argumentet -- at en støtte i kontinuerlig kontakt med en leder er en del av lederens nærfeltmiljø, og at det gjenværende paramagnetiske innholdet er en målbar inngangsverdi for installasjonen snarere enn en dekorativ egenskap. Den dielektriske halvdelen ble avhandlet i ett avsnitt. Denne artikkelen er det avsnittet utvidet til den lengden fysikken fortjener.

Det elektriske faktum at blokken står ved siden av kabelen i stedet for inne i den, fjerner den ikke fra kretsen; det fastsetter formen for koblingen. Et dielektrisk legeme i feltet til en leder lagrer energi kapasitivt, og en distribuert kapasitans parallelt med en transmisjonslinje er en liten, men reell belastning, hvis størrelse avhenger av legemets permittivitet og hvordan denne permittiviteten er orientert i forhold til feltet. Tre er ikke et isotropt dielektrikum. Permittiviteten avhenger av retningen, og en trestøtte har derfor ikke ett, men tre dielektriske bidrag, som kan velges ved fresebenken gjennom vinkelen emnet skjæres i.

Påstanden i artikkelen er snever og kvantitativ. Orienteringen som er spesifisert for Equatorial Elevation Block -- årringer på toppflaten og fibre som løper vertikalt ned langs belastningsbanen -- er den orienteringen som minimerer blokkens kabelrefererte kapasitans; minimumet er målbart snarere enn nominelt og sammenfaller med orienteringen som allerede er valgt på mekanisk grunnlag. Vi hevder ikke at virkningen er stor. Vi hevder at den har et fortegn, en størrelse og en foretrukket retning, og at en produsent som freser blokken den andre veien for å få en penere sidevedflate, har flyttet tallet i feil retning uten å vite at tallet finnes.

2. TREETS DIELEKTRISKE ANISOTROPI

Tre er et cellulært faststoff bygget opp av lange, hule, aksialt innrettede celler -- trakeider i bartre, fibre og kar i hardtre som teak -- der den lange akselen definerer fiberretningen. Denne geometrien er opphavet til den mekaniske anisotropien enhver trearbeider kjenner, og i like stor grad opphavet til den dielektrisk anisotropi som er mindre kjent, men like reell og lenge dokumentert (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Tre mekanismer gjør permittiviteten retningsavhengig, og alle tre favoriserer langsaksen. For det første danner selve celleveggene kontinuerlige polariserbare baner langs fiberen og avbrutte baner på tvers, slik at grenseflatepolarisasjon (Maxwell-Wagner) ved de tallrike grensene mellom vegg og cellelumen akkumuleres fortrinnsvis langs fibre. For det andre befinner det bundne vannet i celleveggene -- det dominerende bidraget til treets permittivitet i alle bortsett fra de tørreste tilstandene -- seg i et miljø der hydroksylsetene og det mikrofibrillære stillaset selv er innrettet med fiberen, slik at orienteringspolarisasjonen av dipolene i det bundne vannet skjer lettere langs fibre enn på tvers. For det tredje skiller de to tverrretningene, radial R og tangential T, seg bare svakt fra hverandre, og begge ligger tydelig under den longitudinale verdien L. Resultatet, som er konsistent i litteraturen, er



rekkefølgen $\epsilon_L > \epsilon_R \sim \epsilon_T$, med samme rekkefølge i tapstangenten og et anisotropiforhold ϵ_L / ϵ_T som typisk ligger mellom 1.2 og 1.5 for tempererte og tropiske hardtreslag i det hygroskopiske området.

Absoluttverdiene er beskjedne og dominert av fuktighet. Ovnstørt tre ligger nær $\epsilon_r = 2$ til 3 og stiger bratt og monotont når fuktinnholdet øker, fordi hvert tilskudd av bundet vann tilfører dipoler til det polariserbare inventaret. Denne brattheten er grunnen til at fuktinnholdet, ikke treslaget, er det største virkemiddelet for å påvirke en støttes dielektriske bidrag, og det behandles i avsnitt 5. For anisotropiargumentet er det vesentlige poenget strukturelt snarere enn numerisk: Retningen med høyest permittivitet er fiberretningen, og denne retningen fastsettes av trearbeideren, ikke av treet.

3. MÅLING: PERMITTIVITET OG TAP LANGS TRE AKSER

Vi målte ϵ_r og $\tan \delta$ på maskinerte teakprøver skåret langs hver av de tre anatomiske aksene, slik at feltet fra parallelplatecellen vekselvis løp longitudinalt, radially og tangentialt gjennom prøven. Prøvelegemene var 40 mm i kvadrat og 3.0 mm tykke, plan- og parallellbearbeidet til ± 10 mikrometer og skåret fra tre ekvatoriale emner gradert til 5N etter hovedprotokollen, slik at magnetisk forurensning ikke kunne forveksles med den dielektriske avlesningen. Hvert prøvesett ble kondisjonert til likevekt ved tre fuktinnhold -- 8, 12 og 16 prosent -- i fuktkamre, og fuktigheten ble verifisert gravimetrisk mot ovnstørr masse etter måleserien.

Cellen var en skjermet parallelplatefiksatur av typen som tidligere er beskrevet (Tanaka og Park, 2022), drevet av en Keysight E4990A-impedansanalysator fra 20 Hz til 10 MHz. Skjermringen undertrykker randfelt, slik at den målte kapasitansen svarer til et definert elektrodeareal og den utledede permittiviteten er materialets bulkverdi snarere enn et kantforurensset estimat; tapstangenten leses direkte som fiksturens dissipasjonsfaktor. Kontakten ble opprettet gjennom tynne mellomag av ledende elastomer for å ta opp den gjenværende overflateruheten på de freste flatene uten et lim som ville bidratt med sin egen polarisasjon.

Ved 12 prosent fuktinnhold og 1 kHz ga 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 tverraksene samsvarte innenfor 4 prosent, som forventet. Tapstangenten fulgte samme rekkefølge: $\tan \delta$ var 0.021 langs fibre og 0.014 til 0.015 på tvers. Over lydbåndet fra 20 Hz til 20 kHz var permittivitetene flate innenfor 3 prosent, og anisotropiforholdet holdt seg mellom 1.24 og 1.31. Da fuktinnholdet ble hevet til 16 prosent, steg alle verdiene -- ϵ_L nådde 3.08 -- og anisotropien økte noe, fordi det tilførte bundne vannet fortrinnsvis polariseres langs den favoriserte aksene. Tørking til 8 prosent presset sammen både absoluttverdiene og forholdet. Anisotropien er dermed ikke en fast materialkonstant, men en fuktmodulert størrelse, sterkest der den betyr minst (vått) og svakest der materialet er tørrest; ved leveringsspesifikasjonen på 12 $\pm$ 1 prosent er den tydelig oppløst og stabil.

4. MODELLEN FOR DISTRIBUERT KAPASITANS I VUGGE, KABEL OG SØYLE

For å omsette tre permittiviteter til en konstruksjonsbeslutning trenger vi geometrien til koblingen. Kabelen ligger ikke på en flat blokk; den hviler i en vugge, et grunt, radiusformet spor frest inn i toppflaten, slik at en endelig bue av kabelkappen bare er skilt fra treet av kappens veggtykkelse. Treet rett under denne buen -- en kort vertikal søyle som løper fra bunnen av vuggen og ned i blokken -- er stedet der feltet mellom lederen og en fjern jordretur er sterkest, og der det store flertallet av kapasitansen mellom kabel og støtte lagres. Tre lenger ut og lenger ned bidrar med raskt avtakende vekt etter hvert som feltet sprer og svekker seg.

Vi modellerer dette som en distribuert kapasitans per lengdeenhet av kabelstrekket ved å integrere den lokale feltenergien gjennom trevolumet under og rundt vuggen, med treets permittivitetstensor innsatt akse for akse. Konstruksjonen er standard for et anisotrop dielektrikum: Den vertikale feltkomponenten av søker permittiviteten på den vertikale aksene, de horisontale komponentene av søker permittivitetene på de horisontale aksene, og fordi vuggen konsentrerer feltet i det nær vertikale området rett under lederen, mens returbanene som lukker kapasitansen løper utover og ned gjennom sidene av søylen, står de horisontale permittivitetene for den største andelen av den lagrede energien. Modellens utdata er én størrelse av teknisk interesse: kapasitansen blokken tilfører kabelen, i pikofarad per blokk, som funksjon av hvordan permittivitetstensoren er orientert.

To orienteringer er praktisk relevante. Fresing med endevenden vertikalt stiller den longitudinale aksene L vertikalt ned langs belastningsbanen og lar de to lave tverraksene R og T ligge i det horisontale planet. Fresing med sideved (flatskåret, fibre horisontalt) legger den longitudinale aksene L i det horisontale planet, der den av søkes av de sterke horisontale feltkomponentene, og stiller én tverrakse vertikalt. Når de målte konstantene ved 12 prosent føres inn i modellen for en representativ vuggegeometri (12 mm kabel diameter, 3 mm radiusformet vugge, 60 mm blokkhøyde, en nominell jordretur i chassisavstand), gir den omtrent 1.9 pF per blokk for endevendorienteringen og omtrent 2.3 pF per blokk for sidevedorienteringen -- en forskjell nær 0.4 pF, omtrent 18 prosent, som utelukkende skyldes snittvinkelen. Per blokk er dette lite. Det er også reelt, reproducerbart, har ett fortegn og er gratis: Det koster bare produsenten beslutningen om å orientere emnet riktig, og det akkumuleres over de flere blokkene i et fullstendig kabelstrekk.

5. SVEIP OVER FIBERVINKEL OG FUKTFØLSOMHET

De to navngitte orienteringene er endepunkter på et kontinuum, og det er verdt å bekrefte at endevend er et ekte minimum snarere enn bare det bedre av to vilkårlige valg. Vi maskinerte en serie prøvelegemer med fibervinkler fra 0 deg (fibren vertikalt, ekte



endeved), gjennom 30, 45 og 60, til 90 deg (fibren horisontalt, sideved) i forhold til belastningsaksen, og målte hvert av dem i vuggemodellens geometri med en spenningssett leder over. Den kabelrefererte kapasitansen steg monotont med fibervinkelen, fra endevedminimumet ved 0 deg til sidevedmaksimumet ved 90 deg, og fulgte tett cosinus-kvadrert-vektingen tensormodellen forutsier når langsaksen med høy permittivitet gradvis roteres inn i det horisontale feltet. Kurven er grunn nær 0 deg -- noen få graders fresefeil koster nesten ingenting -- og brattest gjennom midten av sveipet, slik at straffen for et genuint skjødesløst snitt er større enn for et ufullkomment, men velment et. Minimumet ligger ved ekte endeved, og det er et minimum, ikke et vendepunkt.

Fuktinnholdet forskyver hele kurven vertikalt uten å flytte minimumspunktet. Fordi permittiviteten stiger bratt med bundet vann, tilfører en blokk som har drevet fra 12 til 16 prosent fuktinnhold, mer kapasitans i absolutte tall enn hele forskjellen mellom endeved og sideved ved konstant fuktighet -- fuktigheten er et sterkere virkemiddel enn orienteringen. Men de to er uavhengige: Oppfukning hever grunnnivået; den endrer ikke hvilken orientering som er lavest. Orientering og kondisjonering er derfor komplementære kontroller, og begge må utøves. Dette er det målte grunnlaget for å øvnstørke hvert gradert emne ved opprinnelsen til 12 +/- 1 prosent og for den årlige fuktighetskontrollen i vedlikeholdsplanen: Orienteringen freses permanent inn og kan ikke drive, men fuktigheten som skalerer virkningen, kan gjøre det, og en støtte som får stå og nå likevekt med et fuktig rom, gir langsomt fra seg marginen som ble sikret ved fresebenken.

Vi bemerker i forbifarten at samsvaret mellom tverraksene målt i avsnitt 3 betyr at valget mellom radial og tangential presentasjon i det horisontale planet er uten betydning innenfor måleusikkerheten; blokken kan indeksere rotasjonelt rundt den vertikale aksene for å gi det peneste utseendet til åringene på toppflaten uten dielektrisk konsekvens, forutsatt at fibre forbli vertikale.

6. DISKUSJON: TO ARGUMENTER, ÉN ORIENTERING

Orienteringen med endeved ble ikke valgt på grunn av den dielektriske oppførselen. Den ble valgt fordi endeved er den stiveste og sterkeste måten å belaste tre i kompresjon: Når fibre står vertikalt, bæres en nedadrettet last langs de rørformede cellene i deres sterkeste retning, og blokken motstår den statiske vekten av et kabelstrekk og setningen i en installasjon med minst kryp og minst dimensjonsendring. Dette er et gammelt og ukontroversielt stykke trekonstruksjonslære, og det fastsatte fresespesifikasjonen før noen permittivitet ble målt.

De dielektriske målingene som rapporteres her, ble foretatt senere, og de kunne i prinsippet ha motsagt det mekaniske valget -- aksene langs fibre kunne ha vært aksene med lav permittivitet, og i så fall ville det vært mekanisk riktig og elektrisk galt å stille den vertikalt, slik at et kompromiss hadde vært nødvendig. De motsa det ikke. Aksene langs fibre er aksene med høy permittivitet, så ved å stille den vertikalt fjernes den fra det horisontale planet der kabelens felt er sterkest, nøyaktig slik kapasitansmodellen krever. Orienteringen som er mekanisk ideell, er uavhengig av dette også den dielektrisk stilleste. De to argumentene ble bygget fra forskjellig fysikk, på forskjellige tidspunkter, av personer som løste forskjellige problemer, og de velger det samme snittet.

Vi legger ikke dette samsvaret noen mystisk vekt; anisotrope materialer har ofte den stive aksene og aksene med høy permittivitet innrettet likt, fordi begge egenskapene kan føres tilbake til den samme innrettede mikrostrukturen, og teak er et slikt materiale. Den praktiske konsekvensen står likevel fast. En produsent som følger det mekaniske argumentet alene, ender ved endeved og minimerer uten å vite det også den kapasitive koblingen. En produsent som overstyrer det mekaniske argumentet for å få en dekorativ sidevedflate, taper på begge punkter samtidig. Konvergensen er ikke så mye et sammentreff å undres over som en grunn til å stole på spesifikasjonen: Når to uavhengige resonnementer ender ved samme tall, er tallet med større sannsynlighet riktig.

7. KONKLUSJON

Tre er et dielektrisk anisotropt legeme, og en kabelstøtte av tre er dette legemet plassert i nærfeltet til en leder. Dens bidrag til installasjonen er en liten distribuert kapasitans med en størrelse produsenten, bevisst eller ubevisst, fastsetter ved fresebenken. Vi målte permittiviteten og tapet langs tre akser i ekvatorial teak, bekreftet den forventede rekkefølgen $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ med et anisotropiforhold nær 1.3 ved leveringsfuktigheten og førte konstantene gjennom en kapasitansmodell for vugge og søyle til et ytelsesmål -- pikofarad per blokk -- som skiller seg målbart mellom fresing med endeved og sideved. Endeved gir den laveste verdien av de to med omtrent 0.4 pF og 18 prosent i en representativ geometri, og et sveip over fibervinkelen bekrefter at dette er et ekte minimum.

Marginen er liten per blokk, og vi avstår fra å overdrive den. Vi hevder bare at den er reell, at den har en foretrukket retning, og at denne retningen allerede er spesifisert på mekanisk grunnlag. Equatorial Elevation Block freses med endeveden vertikalt fordi endeved er den stiveste måten å bære en trykklast på; den dielektriske analysen som rapporteres her, ble foretatt senere og bekrefter at det samme snittet også er det dielektrisk stilleste. Hver blokk leveres med endeveden opp, øvnstørket til 12 +/- 1 prosent, ubehandlet og med graden og de målte konstantene på sertifikatet. Vi oppfordrer leseren til å spørre enhver annen produsent av trestøtter hvilken vei fibre løper, og hvorfor.

REFERANSER

- [1] James, W. L. (1975). Dielektriske egenskaper ved tre og trefiberplater: variasjon med temperatur, frekvens, fuktinnhold og fiberretning. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.



- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Dielektriske egenskaper ved tre og trebaserte materialer. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Forholdet mellom tre og vann. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Treets dielektriske 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 nøytralitetsgradering av konstruksjonsvirke: en renhetsklassifisering med N-grader for støttematerialer for lydkabler. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Måling av permittivitet i anisotrope lavtapsmaterialer med skjermet parallelplatecelle. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.