



DIËLEKTRISCHE ANISOTROPIE EN DE ZAAK VOOR KOPSHOUT: ORIËNTATIE VAN HET CAPACITIEVE BELASTINGSPAD IN MAGNETISCH NEUTRALE HOUTEN KABELSTEUNEN



Diëlektrische anisotropie en de zaak voor kopshout: oriëntatie van het capacitieve belastingspad in magnetisch neutrale houten kabelsteunen

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.

Samenvatting

Een houten kabelsteun is een diëlektrisch lichaam dat in het nabijveld van een signaalgeleider wordt gehouden, zodat zijn bijdrage aan de installatie een verdeelde en oriëntatieafhankelijke capaciteit parallel aan de kabel is. In de hoofdbehandeling van de neutraliteitsclassificatie van hout (Bosque, Ferro, Park en Tanaka, 2026) werd de vezeloriëntatie als ontwerpvariabele aangewezen en werd frezen met verticaal kopshout aangenomen op grond van een gecombineerd mechanisch en diëlektrisch argument dat in één sectie werd uiteengezet. Dit aanvullende artikel werkt dat argument volledig uit. Hout is diëlektrisch anisotroop: zowel de relatieve permittiviteit ϵ_{rL} als de verliesfactor $\tan \delta_L$ is langs de vezel hoger dan dwars erop. De langsvezelas overtreft de twee dwarse assen, omdat de buisvormige celgeometrie van tracheïden en vaten en de dipolen van het gebonden water die de polarisatie beheersen, met de vezel zijn uitgelijnd. Wij rapporteren metingen met een impedantieanalysator en bewaakte parallelle platen van ϵ_{rL} en $\tan \delta_L$ voor equatoriaal teak langs alle drie anatomische assen -- longitudinaal L, radiaal R en tangentieel T -- bij een vochtgehalte van 8, 12 en 16 procent en van 20 Hz tot 10 MHz. Deze bevestigen bij audiofrequenties en 12 procent vocht een anisotropieverhouding $\epsilon_{rL} / \epsilon_{rT}$ van 1.24 tot 1.31. Uit deze constanten bouwen wij een model van de verdeelde capaciteit van een kabel die in een gefreesde cradle boven een houten kolom rust en berekenen wij de capacitieve bijdrage per blok voor frezen met verticaal kopshout tegenover vlakshout. De twee oriëntaties verschillen meetbaar: kopshout biedt de lagere naar de kabel gerefereerde capaciteit, omdat het de dwarse assen met lage permittiviteit in het horizontale vlak plaatst waar het kabelveld het sterkst is en de longitudinale as met hoge permittiviteit reserveert voor het verticale belastingspad, waar zij elektrisch onschadelijk en mechanisch ideaal is. Een vezelhoekscan lokaliseert het koppelingsminimum bij echt kopshout. Tot slot merken wij op dat kopshout oorspronkelijk wegens zijn drukstijfheid werd gespecificeerd en dat het diëlektrische argument, onafhankelijk en naderhand verkregen, zozeer met het mechanische overeenstemt dat het dit bevestigt.

1. INLEIDING

Een kabelsteun voert het signaal niet. Hij staat ernaast. Precies daarom wordt zijn elektrische rol zo gemakkelijk terzijde geschoven: een blok hout onder een kabel bevindt zich duidelijk niet in de schakeling, en het is verleidelijk te concluderen dat zijn samenstelling, vezel en oriëntatie zaken zijn voor de meubelmaker in plaats van de ingenieur. Het hoofdartikel over neutraliteitsclassificatie (Bosque, Ferro, Park en Tanaka, 2026) behandelde de magnetische helft van het betoog -- dat een steun die voortdurend met een geleider in contact staat deel uitmaakt van de nabijveldomgeving van die geleider en dat zijn resterende paramagnetische gehalte een meetbare installatieparameter is in plaats van een decoratieve. Het deed de diëlektrische helft in één sectie af. Dit artikel is die sectie, uitgebreid tot de lengte die de fysica verdient.

Het elektrische feit dat het blok naast de kabel staat in plaats van erin, verwijdt het niet uit de schakeling; het bepaalt de manier waarop het koppelt. Een diëlektrisch lichaam in het veld van een geleider slaat capacitief energie op, en een verdeelde capaciteit parallel aan een transmissielijn is een kleine maar werkelijke belasting waarvan de grootte afhangt van de permittiviteit van het lichaam en van de oriëntatie van die permittiviteit ten opzichte van het veld. Hout is geen isotroop diëlektricum. Zijn permittiviteit hangt af van de richting en een houten steun levert daarom niet één maar drie diëlektrische bijdragen, die op de freesbank worden gekozen door de hoek waaronder de balk wordt gezaagd.

De stelling van dit artikel is beperkt en kwantitatief. Zij luidt dat de voor het Equatorial Elevation Block gespecificeerde oriëntatie met verticaal kopshout -- groeiringen op het bovenvlak, vezels die verticaal door het belastingspad lopen -- de oriëntatie is die de naar de kabel gerefereerde capaciteit van het blok minimaliseert, dat het minimum meetbaar en niet slechts theoretisch is en dat het samenvalt met de oriëntatie die al op mechanische gronden werd gekozen. Wij beweren niet dat het effect groot is. Wij beweren dat het een teken, een grootte en een voorkeursrichting heeft, en dat een maker die het blok omwille van mooier vlakshout anders freest, het getal in de verkeerde richting heeft verplaatst zonder te weten dat het getal bestaat.

2. DIËLEKTRISCHE ANISOTROPIE VAN HOUT

Hout is een cellulaire vaste stof die is opgebouwd uit lange, holle, axiaal uitgelijnde cellen -- tracheïden in naaldhout en vezels en vaten in hardhout zoals teak -- waarvan de lange as de vezelrichting bepaalt. Deze geometrie ligt aan de oorsprong van de mechanische anisotropie die iedere houtbewerker kent, en eveneens aan die van een diëlektrische anisotropie die minder algemeen wordt onderkend maar even werkelijk is en al lang is gedocumenteerd (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Drie mechanismen maken de permittiviteit richtingsafhankelijk en alle drie bevoordelen de longitudinale as. Ten eerste vormen de celwanden langs de vezel doorlopende polariseerbare paden en dwars erop onderbroken paden, zodat grensvlakpolarisatie (Maxwell-Wagner) aan de talrijke grenzen tussen celwand en lumen zich bij voorkeur langs de vezel ophoopt. Ten tweede bevindt het gebonden water in de celwanden -- bij alle behalve de droogste toestanden de voornaamste bijdrage aan de permittiviteit van hout -- zich in een omgeving waarvan de hydroxylplaatsen en het microfibrillaire raamwerk zelf met de vezel zijn uitgelijnd, zodat de



oriëntatiepolarisatie van de dipolen van het gebonden water langs de vezel gemakkelijker verloopt dan dwars erop. Ten derde verschillen de twee dwarse richtingen, radiaal R en tangentieel T, slechts weinig van elkaar en liggen beide ruim onder de longitudinale waarde L. Het resultaat is in de hele literatuur consequent de volgorde $\epsilon_{\text{L}} > \epsilon_{\text{R}} \sim \epsilon_{\text{T}}$, met dezelfde volgorde in de verliesfactor en een anisotropieverhouding $\epsilon_{\text{L}} / \epsilon_{\text{T}}$ die voor hardhout uit gematigde en tropische streken in het hygroscopische bereik gewoonlijk 1.2 tot 1.5 bedraagt.

De absolute waarden zijn bescheiden en worden door vocht beheerst. Ovendroog hout ligt rond $\epsilon_{\text{r}} = 2$ tot 3 en stijgt snel en monotoon naarmate het vochtgehalte toeneemt, omdat iedere extra hoeveelheid gebonden water dipolen aan de polariseerbare inventaris toevoegt. Deze sterke stijging is de reden waarom het vochtgehalte, niet de houtsoort, de grootste hefboom vormt op de diëlektrische bijdrage van een steun; dit wordt in sectie 5 behandeld. Voor het anisotropieargument is het wezenlijke punt structureel in plaats van numeriek: de richting met de hoogste permittiviteit is de vezelrichting, en die richting wordt door de houtbewerker bepaald, niet door de boom.

3. METING: PERMITTIVITEIT EN VERLIES LANGS DRIE ASSEN

Wij maten ϵ_{r} en $\tan \delta$ op bewerkte teakproefstukken die langs ieder van de drie anatomische assen waren gesneden, zodat het door de parallelle-plaatcel aangelegde veld achtereenvolgens longitudinaal, radiaal en tangentieel door het monster liep. De proefstukken waren vierkant met zijden van 40 mm en 3.0 mm dik; hun vlakken waren vlak en parallel afgewerkt tot binnen +/- 10 micrometer. Zij werden gezaagd uit drie volgens het hoofdprotocol geselecteerde, als 5N geclassificeerde equatoriale balken, zodat magnetische verontreiniging de diëlektrische meting niet kon verstoren. Iedere reeks proefstukken werd in klimaatkamers tot evenwicht geconditioneerd bij drie vochtgehalten -- 8, 12 en 16 procent -- en aan het einde van de meetreeks werd het vocht gravimetrisch ten opzichte van de oven-droge massa geverifieerd.

De cel was een bewaakte parallelle-plaatfixtuur van het eerder beschreven type (Tanaka en Park, 2022), aangedreven door een Keysight E4990A-impedantieanalysator van 20 Hz tot 10 MHz. De beschermring onderdrukt randvelden, zodat de gemeten capaciteit met een bepaald elektrodeoppervlak overeenkomt en de daaruit afgeleide permittiviteit de bulkwaarde van het materiaal is in plaats van een door randeffecten verontreinigde schatting; de verliesfactor wordt rechtstreeks als de dissipatiefactor van de fixtuur afgelezen. Het contact werd gemaakt via dunne, geleidende elastomeertussenlagen om de resterende oppervlakteruwheid van de gefreesde vlakken op te nemen zonder een lijm te gebruiken die haar eigen polarisatie zou bijdragen.

Bij een vochtgehalte van 12 procent en 1 kHz leverde teak $\epsilon_{\text{L}} = 2.64$, $\epsilon_{\text{R}} = 2.09$ en $\epsilon_{\text{T}} = 2.02$ op, met een anisotropieverhouding $\epsilon_{\text{L}} / \epsilon_{\text{T}}$ van 1.31 en $\epsilon_{\text{L}} / \epsilon_{\text{R}}$ van 1.26; de twee dwarse assen kwamen zoals verwacht tot binnen 4 procent overeen. De verliesfactor volgde dezelfde volgorde: $\tan \delta$ bedroeg 0.021 langs de vezel en 0.014 tot 0.015 dwars erop. Over de audioband van 20 Hz tot 20 kHz bleven de permittiviteiten vlak tot binnen 3 procent en bleef de anisotropieverhouding tussen 1.24 en 1.31. Het verhogen van het vochtgehalte tot 16 procent tilde iedere waarde op -- ϵ_{L} bereikte 3.08 -- en vergrootte de anisotropie merkbaar, omdat het toegevoegde gebonden water bij voorkeur langs de bevooroordeelde as polariseert. Drogen tot 8 procent verkleinde zowel de absolute waarden als de verhouding. De anisotropie is dus geen vaste materiaalconstante, maar wordt door vocht gemoduleerd: zij is het sterkst waar zij het minst ter zake doet (nat) en het zwakst wanneer het materiaal het droogst is; bij de leveringsspecificatie van 12 +/- 1 procent is zij ruimschoots meetbaar en stabiel.

4. VERDEELD-CAPACITEITSMODEL VAN CRADLE, KABEL EN KOLOM

Om drie permittiviteiten in een ontwerpbeslissing om te zetten, hebben wij de geometrie van de koppeling nodig. De kabel ligt niet op een vlak blok; hij rust in een cradle, een ondiepe afgeronde groef die in het bovenvlak is gefreesd, zodat een eindige boog van de kabelmantel slechts door de dikte van die mantel van het hout wordt gescheiden. Het hout direct onder die boog -- een korte verticale kolom die vanaf de bodem van de cradle naar beneden door het lichaam van het blok loopt -- is de plaats waar het veld tussen de geleider en een eventuele verre aardretour het sterkst is en waar het overgrote deel van de kabel-naar-steuncapaciteit wordt opgeslagen. Hout dat verder naar buiten en beneden ligt, draagt met snel afnemend gewicht bij naarmate het veld zich verspreidt en verzwakt.

Wij modelleren dit als een verdeelde capaciteit per lengte-eenheid van de kabelrun, waarbij de lokale veldenergie door het houtvolume onder en rond de cradle wordt geïntegreerd en de permittiviteitstensor van het hout als voor as wordt ingevoerd. De constructie is standaard voor een anisotroop diëlektricum: de verticale veldcomponent bemonstert de permittiviteit van de verticale as, de horizontale componenten bemonsteren de permittiviteiten van de horizontale assen, en omdat de cradle het veld concentreert in het bijna verticale gebied vlak onder de geleider terwijl de retourpaden die de capaciteit sluiten naar buiten en beneden door de flanken van de kolom lopen, dragen de horizontale permittiviteiten het grootste deel van de opgeslagen energie. De uitvoer van het model is één technisch relevante grootheid: de capaciteit die het blok aan de kabel toevoegt, in picofarad per blok, als functie van de oriëntatie van de permittiviteitstensor.

Twee oriëntaties zijn in de praktijk van belang. Frezen met verticaal kopshout plaatst de longitudinale as L verticaal, langs het belastingsspad, en laat de twee lage dwarse assen R en T in het horizontale vlak liggen. Frezen als vlakshout -- vlak gezaagd, met horizontale vezels -- legt de longitudinale as L in het horizontale vlak, waar zij door de sterke horizontale veldcomponenten wordt bemonsterd, en zet één dwarse as verticaal. Wanneer de gemeten constanten bij 12 procent in het model worden ingevoerd voor



een representatieve cradle-geometrie -- een kabeldiameter van 12 mm, een afgeronde cradle van 3 mm, een blokhoogte van 60 mm en een nominale aardretour op chassisafstand -- levert dit ongeveer 1.9 pF per blok voor de kopshoutoriëntatie en ongeveer 2.3 pF per blok voor de vlakshoutoriëntatie op: een verschil van bijna 0.4 pF, ongeveer 18 procent, dat uitsluitend voortkomt uit de hoek van de snede. Per blok is dit klein. Het is ook werkelijk, herhaalbaar, steeds van hetzelfde teken en gratis: het kost de maker alleen de beslissing de balk juist te oriënteren en het stapelt zich op over de verschillende blokken van een volledige kabelrun.

5. VEZELHOEKSCAN EN VOCHTGEVOELIGHEID

De twee genoemde oriëntaties zijn de eindpunten van een continuüm, en het is de moeite waard te bevestigen dat kopshout een werkelijk minimum is en niet alleen de beste van twee willekeurige keuzen. Wij freesden een reeks proefstukken met vezelhoeken van 0 deg -- vezels verticaal, echt kopshout -- via 30, 45 en 60 tot 90 deg -- vezels horizontaal, vlakshout -- ten opzichte van de belastingssas en maten elk proefstuk in de geometrie van het cradle-model met een erboven bekrachtigde geleider. De naar de kabel gerefereerde capaciteit steeg monotoon met de vezelhoek, van het kopshoutminimum bij 0 deg tot het vlakshoutmaximum bij 90 deg, en volgde nauwgezet de cosinuskwadraatweging die het tensormodel voorspelt wanneer de longitudinale as met hoge permittiviteit geleidelijk het horizontale veld in draait. De curve is vlak nabij 0 deg -- enkele graden freesfout kosten vrijwel niets -- en het steilt in het midden van de scan, zodat de straf voor een werkelijk achteloze snede groter is dan die voor een onvolmaakte maar goed bedoelde. Het minimum ligt bij echt kopshout en het is een minimum, geen buigpunt.

Het vochtgehalte verschuift de hele curve verticaal zonder de plaats van het minimum te veranderen. Omdat de permittiviteit sterk met gebonden water stijgt, voegt een blok waarvan het vocht van 12 naar 16 procent is gedreven in absolute termen meer capaciteit toe dan het volledige verschil tussen kopshout en vlakshout bij een vast vochtgehalte -- de vochtregelaar is groter dan de oriëntatieregelaar. De twee zijn echter onafhankelijk: het bevochtigen van het hout verhoogt de bodem, maar verandert niet welke oriëntatie het laagst is. Oriëntatie en conditionering zijn daarom aanvullende beheersmaatregelen en beide moeten worden toegepast. Dit is de gemeten grondslag voor het bij de herkomst ovendrogen van iedere geclassificeerde balk tot 12 +/- 1 procent en voor de jaarlijkse vochtmeting in het onderhoudsschema: de oriëntatie wordt permanent ingefreesd en kan niet verlopen, maar het vocht dat haar schaal kan dat wel, en een steun die men met een vochtige kamer in evenwicht laat komen, geeft langzaam de marge prijs die de freesbank heeft veiliggesteld.

Terzijde merken wij op dat de in sectie 3 gemeten overeenstemming van de dwarse assen betekent dat de keuze tussen een radiale en tangentiële presentatie in het horizontale vlak binnen de meetonzekerheid niet van belang is; het blok mag om zijn verticale as worden gedraaid om de ringen op het bovenvlak zo fraai mogelijk te tonen, zolang de vezels verticaal blijven.

6. BESPREKING: TWEE ARGUMENTEN, ÉÉN ORIËNTATIE

De kopshoutoriëntatie werd niet wegens haar diëlektrische gedrag aangenomen. Zij werd aangenomen omdat kopshout de stijfste en sterkste manier is om hout op druk te belasten: met de vezels verticaal wordt een neerwaartse belasting in hun sterkste richting langs de buisvormige cellen gedragen en weerstaat het blok het statische gewicht van een kabelrun en het zetten van een installatie met de minste kruip en de kleinste maatverandering. Dat is een oud en onomstreden gegeven uit de houtbouwkunde, en het legde de freesspecificatie vast voordat enige permittiviteit was gemeten.

De hier gerapporteerde diëlektrische metingen werden naderhand uitgevoerd en hadden de mechanische keuze in beginsel kunnen tegenspreken -- de langsvezelas had de as met lage permittiviteit kunnen zijn, in welk geval haar verticale plaatsing mechanisch juist en elektrisch onjuist zou zijn geweest en een compromis noodzakelijk was geworden. Zij spraken haar niet tegen. De langsvezelas is de as met hoge permittiviteit, zodat haar verticale plaatsing haar verwijdt uit het horizontale vlak waar het kabelveld het sterkst is, precies wat het capaciteitsmodel verlangt. De oriëntatie die mechanisch ideaal is, is onafhankelijk daarvan de diëlektrisch stilste oriëntatie. De twee argumenten werden opgebouwd uit verschillende fysica, op verschillende momenten, door mensen die verschillende problemen oplosten, en zij selecteren dezelfde snede.

Wij kennen aan deze overeenstemming geen mystiek gewicht toe; bij anisotrope materialen zijn de stijve as en de as met hoge permittiviteit vaak uitgelijnd, omdat beide eigenschappen op dezelfde uitgelijnde microstructuur teruggaan, en teak is zo'n materiaal. De praktische consequentie blijft echter staan. Een maker die alleen het mechanische argument volgt, komt bij kopshout uit en minimaliseert zonder dit te bedoelen ook de capaciteits koppeling. Een maker die het mechanische argument omwille van decoratief vlakshout terzijde schuift, verliest op beide punten tegelijk. De convergentie is minder een toeval om over te verwonderen dan een reden om de specificatie te vertrouwen: wanneer twee onafhankelijke redeneringen bij hetzelfde getal eindigen, is de kans groter dat het getal juist is.

7. CONCLUSIE

Hout is een diëlektrisch anisotroop lichaam en een houten kabelsteun is dat lichaam dat in het nabijveld van een geleider wordt gehouden. Zijn bijdrage aan de installatie is een kleine verdeelde capaciteit waarvan de grootte, bewust of onbewust, door de maker op de freesbank wordt bepaald. Wij maten de permittiviteit en het verlies van equatoriaal teak langs drie assen, bevestigden bij het leveringsvochtgehalte de verwachte volgorde $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ met een anisotropieverhouding rond 1.3 en voerden deze constanten door een capaciteitsmodel van cradle en kolom naar een kengetal -- picofarad per blok -- dat meetbaar verschilt



tussen frezen als kopshout en als vlakshout. Kopshout is de laagste van de twee, met ongeveer 0.4 pF en 18 procent in een representatieve geometrie, en een vezelhoekscan bevestigt dat het een werkelijk minimum is.

De marge per blok is klein en wij weigeren haar te overdrijven. Wij stellen alleen dat zij werkelijk is, een voorkeursrichting heeft en dat die voorkeursrichting al op mechanische gronden was gespecificeerd. Het Equatorial Elevation Block wordt met verticaal kopshout gefreesd omdat kopshout de stijfste manier is om een drukbelasting te dragen; de hier gerapporteerde diëlektrische analyse werd naderhand uitgevoerd en bevestigt dat dezelfde snede ook diëlektrisch het stilst is. Ieder blok wordt geleverd met het kopshout boven, bij de herkomst ovengedroogd tot 12 +/- 1 procent, onafgewerkt en met zijn graad en gemeten constanten op het certificaat. Wij nodigen de lezer uit iedere andere maker van houten steunen te vragen in welke richting zijn vezels lopen en waarom.

REFERENTIES

- [1] James, W. L. (1975). Diëlektrische eigenschappen van hout en hardboard: variatie met temperatuur, frequentie, vochtgehalte en vezeloriëntatie. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Diëlektrische eigenschappen van hout en houtmaterialen. Springer-Verlag, Berlijn.
- [3] Skaar, C. (1988). Hout-waterrelaties. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlijn.
- [4] Norimoto, M. (1976). Diëlektrische eigenschappen van hout. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Classificatie van de magnetische neutraliteit van constructiehout: een N-graadzuiverheidsclassificatie voor audiodragermaterialen. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Permittiviteitsmeting met bewaakte parallelle platen aan anisotrope, verliesarme vaste stoffen. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.