



RAFSVÖRUNARMISÁTTA OG RÖKIN FYRIR ENDATREFJUM: STEFNA RÝMDARÁLAGSLEIÐAR Í SEGULHLUTLAUSUM VIÐARSTOÐUM FYRIR KAPLA



Rafsvörunarmisátta og rökin fyrir endatrefjum: stefna rýmdarálagsleiðar í segulhlutlausum viðarstoðum fyrir kapla

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

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Útdráttur

Viðarstoð undir kapla er einangrandi hlutur í nærsviði merkjaleiðara og framlag hennar til uppsetningarinnar er því dreifð og stefnuháð rýmd samhlíða kaplinum. Í grunnrannsókninni á hlutleysisflokkinum viðar (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) var trefjastefna skilgreind sem hönnunarbreyta og fræsing með lóðréttum endatrefjum valin út frá sameiginlegum vélrænum og rafsvörunarrökum sem voru sett fram í einum kafla. Þessi hliðarrannsókn þróar rökin til fulls. Viður er rafsvörunarlega misátta: bæði hlutfallslegi rafsvörunarstuðullinn ϵ_{ps_r} og taptangens tan delta eru hærri með trefjunum en þvert á þær; lengdarásinn er hærri en þverásarnir tveir vegna þess að bæði pípulaga barkfrumur og æðafrumur og tvíþólar bundins vatns sem ráða skautuninni liggja eftir trefjunum. Við skráum mælingar með varinni samsíða plötusellu og viðnámsgreini á ϵ_{ps_r} og tan delta í miðbaugstekki eftir öllum þremur líffærafræðilegum ásum (lengdarás L, geislaás R, snertiás T) við 8, 12 og 16 prósent rakainnihald frá 20 Hz til 10 MHz og staðfestum misáttuhlutfallið $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ 1.24 til 1.31 við hljóðtíðni og 12 prósent raka. Úr þessum föstum smíðum við líkan af dreifðri rýmd kapals sem hvílir í fræstri vögg yfir viðarsúlu og reiknum rýmdarframlag hvers kubbs fyrir lóðréttar endatrefjar annars vegar og flattrefjafraesing hins vegar: stefnurnar tvær eru mælanlega ólíkar, og endatrefjar gefa lægri kapaltengda rýmd vegna þess að þær leggja þverásana með lágan rafsvörunarstuðul í lárétta planið þar sem kapalsviðið er sterkast en geyma lengdarásinn með háan rafsvörunarstuðul fyrir lóðréttu álagsleiðina, þar sem hann er raflega skaðlaus og vélrænt kjörinn. Mæling yfir trefjahorn staðsetur tengilágmarkið við sannar endatrefjar. Að lokum bendum við á að endatrefjar voru upphaflega tilgreindar vegna þrýstistífleika og að rafsvörunarrökin, sem komu síðar og óháð, eru svo samhljóða þeim vélrænu að þau staðfesta þau.

1. INNGANGUR

Kapalstoð flytur ekki merkið. Hún situr við hlið þess. Einmitt þess vegna er svo auðvelt að afgangið rafhlutverk hennar: viðarkubbur undir kapli er augljóslega ekki í rásinni, og freistandi er að álykta að samsetning hans, trefjar og stefna séu mál trésmíðsins fremur en verkfræðingsins. Grunngreinin um hlutleysisflokkinum (Bosque, Ferro, Park og Tanaka, 2026) setti fram segulhelming málflutningsins -- að stoð í samfelldri snertingu við leiðara sé hluti af nærsviði hans og að magn paraseguldírkra leifa sé mælanleg inntaksstærð uppsetningarinnar fremur en skraut. Rafsvörunarhelmingnum lauk hún í einum kafla. Þessi grein er sá kafla, lengdur að því marki sem eðlisfræðin verðskuldar.

Sú raffræðilega staðreynd að kubburinn situr við hlið kapalsins fremur en inni í honum fjarlægir hann ekki úr rásinni; hún ákveður hvernig hann tengist henni. Einangrandi hlutur í sviði leiðara geymir orku sem rýmd, og dreifð rýmd samhlíða flutningslínu er lítið en raunverulegt álag sem ræðst af rafsvörunarstuðli hlutarins og stefnu hans gagnvart sviðinu. Viður er ekki samsátta einangrunarefni. Rafsvörunarstuðull hans er stefnuháður, og viðarstoð hefur því ekki eitt rafsvörunarframlag heldur þrjú, valin á fræsibeknum með skurðarhorni efnisbútsins.

Fullyrðing þessarar greinar er þröng og magnbundin. Hún er að stefna með lóðréttum endatrefjum sem tilgreind er fyrir Equatorial Elevation Block -- áhringir á efra borði, trefjar lóðréttar niður álagsleiðina -- lágmarki kapaltengda rýmd kubbsins, að lágmarkið sé mælanlegt fremur en huglægt og að það falli saman við stefnuna sem þegar var valin af vélrænum ástæðum. Við fullyrðum ekki að áhrifin séu stór. Við fullyrðum að þau hafi formerki, stærð og æskilega stefnu og að framleiðandi sem fræsir kubbinu öfugt vegna fallegri hliðartrefja hafi fært töluna í ranga átt án þess að vita að talan væri til.

2. RAFSVÖRUNARMISÁTTA VIÐAR

Viður er frumuuppbyggt fastefni úr löngum, holum frumum sem liggja eftir sama ás -- barkfrumum í mjúkvíði og trefjum og æðum í harðvíði eins og tekki -- og lengdarás þeirra skilgreinir trefjastefnuna. Þessi lögun er uppspretta vélrænu misáttunnar sem sérhver trésmíður þekkir, og einnig uppspretta rafsvörunarmisáttu sem er síður þekkt en jafn raunveruleg og löngu skjalfest (James, 1975; Torgovnikov, 1993).

Þrjú ferli gera rafsvörunarstuðulinn stefnuháðan og öll þrjú styðja lengdarásinn. Í fyrsta lagi mynda frumuveggirnir samfelldar skautanlegar leiðir eftir trefjunum en rofnar leiðir þvert á þær, svo skilflatar-(Maxwell-Wagner-)skautun við hin mörgu mörk veggjar og frumuhols safnast helst með trefjunum. Í öðru lagi situr bundna vatnið í frumuveggjunum -- stærsta framlagið til rafsvörunarstuðuls viðar nema í þurrasta ástandi -- í umhverfi þar sem hýdroxýlstaðir og örtrefjagrind liggja sjálf eftir trefjunum, þannig að stefnuskautun tvíþóla bundins vatns á auðveldara með að fylgja trefjunum en fara þvert á þær. Í þriðja lagi eru þverásarnir tveir, geislaás R og snertiás T, aðeins lítillega ólíkir hvor öðrum og báðir vel undir lengdargildinu L. Niðurstaðan er, stöðugt í fræðiritum, röðin $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$, með sömu röð í taptangens og misáttuhlutfall $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T}$ sem er yfirleitt 1.2 til 1.5 fyrir harðvið úr tempruðu og hitabeltisloftslagi á rakadræga bilinu.

Algild gildi eru hófleg og ráðast af raka. Öfnþurr viður liggur nærri $\epsilon_{ps_r} = 2$ til 3 og gildið hækkar hratt og einhæft með rakainnihaldi,



Því hver aukning bundins vatns bætir tvíþólum við skautanlega safnið. Þessi bratti er ástæðan fyrir því að rakainnihald, ekki viðartegund, er stærsti áhrifavaldurinn á rafsvörunarframlag stoðar, og er tekið fyrir í kafla 5. Fyrir misátturörkin skiptir uppbyggingin meira máli en talan: stefnan með hæsta rafsvörunarstuðulinn er trefjastefnan, og trésmiðurinn ákveður þá stefnu, ekki tréð.

3. MÆLING: RAFSVÖRUNARSTUÐULL OG TAP EFTIR ÞREMUR ÁSUM

Við mældum ϵ_{ps_r} og $\tan \delta$ á vélunarsýnum úr tekki, skorum eftir hverjum hinna þriggja líffærafræðilegu ása þannig að sviðið frá samsíða plötusellunni fór til skiptis eftir lengdarás, geislaás og snertiás gegnum sýnið. Prófstykkinn voru 40 mm á kant og 3.0 mm þykk, flöt og samsíða innan ± 10 míkrometra, skorið úr þremur 5N-flokkuðum miðbaugsefnibútum sem voru valdir samkvæmt grunnverklaginu svo segulmengun gæti ekki ruglað rafsvörunarmælinguna. Hver sýnahópur var jafnaður við þrjú rakainnihald -- 8, 12 og 16 prósent -- í rakaklefum, og rakinn var sannprófaður með þyngdarmælingu miðað við öfnþurran massa í lok mælingarinnar.

Sellan var varin samsíða plötusella af áður lýstri gerð (Tanaka og Park, 2022), keyrð af Keysight E4990A-viðnámsgreini frá 20 Hz til 10 MHz. Varhringurinn dregur úr jaðarsviði svo mælda rýmdin samsvari skilgreindu rafskautsflatarmáli og reiknaður rafsvörunarstuðull sé heildargildi efnisins fremur en mat mengað af brúnum; taptangens er lesið beint sem tapstuðull sellunnar. Snerting fékkst með þunnum leiðandi teygjuefnislögum sem jöfnuðu leifar af yfirborðsgrófleika fræstu flatanna án líms sem myndi leggja til eigin skautun.

Við 12 prósent rakainnihald og 1 kHz gaf tekk $\epsilon_{ps_L} = 2.64$, $\epsilon_{ps_R} = 2.09$ og $\epsilon_{ps_T} = 2.02$, misáttuhlutfall $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_T} = 1.31$ og $\epsilon_{ps_L} / \epsilon_{ps_R} = 1.26$; þverásarnir tveir féllu saman innan 4 prósentna eins og búist var við. Taptangens fylgdi sömu röð: $\tan \delta$ var 0.021 með trefjunum og 0.014 til 0.015 þvert á þær. Yfir hljóðbandið frá 20 Hz til 20 kHz héldust rafsvörunarstuðlarnir innan 3 prósentna og misáttuhlutfallið milli 1.24 og 1.31. Þegar rakainnihald var hækkað í 16 prósent hækkuðu öll gildi -- ϵ_{ps_L} náði 3.08 -- og, eftirtektarvert, jókst misáttan lítillega, vegna þess að viðbótarbundna vatnið skautast helst eftir hagstæðari ásnum. Þurrkun í 8 prósent dró saman bæði algild gildi og hlutfallið. Misáttan er því ekki fastur efnisstuðull heldur rakastýrður, sterkust þar sem hún skiptir minnstu máli (í bleytu) og veikust þegar efnið er þurrast; við afhendingarforskriftina 12 $\pm$ 1 prósent er hún skýrt mælanleg og stöðug.

4. LÍKAN DREIFÐRAR RÝMDAR VÖGGU, KAPALS OG SÚLU

Til að breyta þremur rafsvörunarstuðlum í hönnunarákvörðun þurfum við rúmfræði tengingarinnar. Kapallinn liggur ekki á flötum kubbi; hann hvílir í vögg, grunnri rúnnaðri rauf sem er fræst í efra borðið, þannig að endanlegur bogi kapalkápuinn er aðeins aðskilinn frá viðnum af þykkt kápuinnar. Viðurinn beint undir boganum -- stutt lóðrétt súla frá botni vöggunnar niður í kubbin -- er þar sem sviðið milli leiðarans og fjarlægjar jarðskilarásar er sterkast og þar sem mestur hluti rýmdar kapalsins að stoðinni geymist. Viður lengra út og niður leggur til með ört minnkandi vægi þegar sviðið breiðist og veikist.

Við setjum þetta upp sem dreifða rýmd á lengdareiningu lagnar og heildum staðbundna sviðsorku í gegnum viðarrúmmálið undir og umhverfis vögguna með rafsvörunartensor viðarins settan inn ás fyrir ás. Uppsetningin er hefðbundin fyrir misátta einangrunarefni: lóðrétti sviðspátturinn tekur sýni úr rafsvörunarstuðli lóðréttu ássins, lárétta þættirnir úr stuðlum lárétta ásanna, og vegna þess að vaggan þéttir sviðið í næstum lóðréttu svæðinu rétt undir leiðaranum en bakleiðirnar sem loka rýmdinni liggja út og niður um hliðar súlunnar bera lárétta rafsvörunarstuðlarnir stærri hluta geymdu orkunnar. Úttak líkansins er ein verkfræðilega gagnleg tala: rýmdin sem kubburinn bætir við kapalinn, í pF á kubb, sem fall af stefnu rafsvörunartensorsins.

Tvær stefnur skipta máli í framkvæmd. Fræsing með lóðréttum endatrefjum setur lengdarásinn L lóðréttan eftir álagsleiðinni og skilur lágu þverásana R og T eftir í lárétta planinu. Flattrefjafræsing (flatsagað, trefjar láréttar) leggur lengdarásinn L í lárétta planið þar sem sterku lárétta sviðspættirnir taka sýni úr honum og reisir einn þverás lóðréttan. Þegar mældu 12 prósent fastarnir eru settir inn í líkanið fyrir dæmigerða vöggurúmfræði (12 mm kapallþvermál, 3 mm rúnnað vagma, 60 mm kubbhæð, nafnjarðskil í fjarlægð tækjagrindar) fást um 1.9 pF á kubb fyrir endatrefjastefnuna og um 2.3 pF á kubb fyrir flattrefjastefnuna -- munur nærri 0.4 pF, um 18 prósent, sem stafar eingöngu af skurðarhorninu. Þetta er lítið á hvern kubb. Það er einnig raunverulegt, endurtakanlegt, hefur alltaf sama formerki og er ókeypis: það kostar framleiðandann aðeins þá ákvörðun að snúa efnisbútnum rétt og safnast saman yfir kubbana í heilli lögn.

5. TREFJAHORNSMÆLING OG RAKANÆMI

Stefnurnar tvær eru endapunktur samfellds bils, og rétt er að staðfesta að endatrefjar séu raunverulegt lágmark en ekki aðeins betri af tveimur handahófskenndum kostum. Við fræstum röð prófstykkja við trefjahorn frá 0 deg (trefjar lóðréttar, sannar endatrefjar) gegnum 30, 45 og 60 til 90 deg (trefjar láréttar, flattrefjar) miðað við álagsásinn og mældum hvert þeirra í rúmfræði vöggulíkansins með spennusetnum leiðara fyrir ofan. Kapaltengda rýmdin hækkaði einhægt með trefjahorninu frá endatrefjalágmarki við 0 deg að flattrefjahámarki við 90 deg og fylgdi náði kósínus-kvaðratvæginu sem tensorlíkanið spáir þegar lengdarásinn með háan rafsvörunarstuðul snýst smám saman inn í lárétta sviðið. Ferillinn er grunnur nærri 0 deg -- fáeinar gráður af fræsivillu kosta nánast ekkert -- og brattastur um miðja mælinguna, svo refsingin fyrir raunverulega hirðulausan skurð er meiri en fyrir öfullkominn en vel meintan. Lágmarkið er við sannar endatrefjar, og það er lágmark, ekki vendipunktur.

Rakainnihald færir allan ferilinn lóðrétt án þess að færa lágmarkið. Þar sem rafsvörunarstuðull hækkar hratt með bundnu vatni bætir



kubbur sem hefur færst úr 12 í 16 prósent raka við meiri rýmd í algildi en allur munurinn milli enda- og flattrefja við sama raka -- rakastýringin er áhrifameiri en stefnustýringin. Þær eru þó óháðar: væting viðarins hækkar grunninn en breytir ekki hvaða stefna er lægst. Stefna og rakajöfnun eru því samverkandi stýringar og beita verður báðum. Þetta er melda forsenda þess að ofnþurrka hvern flokkaðan efnisbút við uppruna í 12 +/- 1 prósent og krefjast árlegrar rakamælingar í viðhaldsáætluninni: stefnan er fræst varanlega inn og getur ekki rekið, en rakinn sem skalar hana getur það, og stoð sem jafnast hægt við rakt herbergi gefur smám saman eftir því forskoti sem fræsibekkurinn tryggði.

Við bendum í framhjálaupi á að samræmi þverásanna í kafla 3 þýðir að val milli geisla- og snertistefnu í lárétta planinu skiptir engu innan mælióvissu; snúa má kubbum um lóðrétta ásinn til að fá fallegasta mynstur áhringa á efra borði án rafsvörunarafleiðinga, svo lengi sem trefjarnar haldast lóðréttar.

6. UMRÆÐA: TVENN RÖK, EIN STEFNA

Endatrefjastefnan var ekki valin vegna rafsvörunarhegðunar. Hún var valin vegna þess að endatrefjar eru stífasta og sterkasta leiðin til að hlaða við í þrýstingi: með trefjarnar lóðréttar berst álag niður eftir pípulaga frumunum í sterkustu stefnu þeirra, og kubburinn þolir kyrrstöðupunga kapallagnar og sig uppsetningar með minnstu skriði og minnstum málbreytingum. Þetta er gömul og óumdeild staðreynd í timburverkfræði og hún ákvarðaði fræsiforskriftina áður en nokkur rafsvörunarstuðull var mældur.

Rafsvörunarmælingarnar sem hér eru skráðar voru gerðar síðar og hefðu fræðilega getað verið ósammála vélræna valinu -- lengdarásinn hefði getað verið ás lágs rafsvörunarstuðuls, en þá hefði verið vélrænt rétt og raflega rangt að reisa hann lóðrétt og málamiðlun óhjákvæmileg. Þær voru ekki ósammála. Lengdarásinn er ás hás rafsvörunarstuðuls, þannig að með því að reisa hann lóðrétt er hann fjarlægður úr lárétta planinu þar sem kapalsviðið er sterkast, nákvæmlega eins og rýmdarlíkanið krefst. Stefnan sem er vélrænt kjörin er óháð því einnig rafsvörunarlega hljóðlátust. Rökin tvenn voru byggð á ólíkri eðlisfræði, á ólíkum tímum, af fólki sem leysti ólík vandamál, og þau velja sama skurðinn.

Við leggjum enga dulræna merkingu í þetta samkomulag; í misátta efnum liggja stífi ásinn og ás hás rafsvörunarstuðuls oft saman, því báðir eiginleikar rekja uppruna sinn til sömu samstilltu örbyggingar, og tekk er slíkt efni. Hagnýta afleiðingin stendur samt. Framleiðandi sem fylgir aðeins vélrænu rökunum endar við endatrefjar og lágmarkar óafvitandi rýmdartenginguna líka. Framleiðandi sem hunsar vélrænu rökin fyrir skrautlegar flattrefjar tapar á báðum vígstöðvum í einu. Samleitnin er síður tilviljun til að undrast en ástæða til að treysta forskriftinni: þegar tvær óháðar röksemdaleiðir enda á sömu tölu er líkleggra að talan sé rétt.

7. NIÐURSTAÐA

Viður er rafsvörunarlega misátta hlutur, og viðarstoð undir kapital er sá hlutur í nærsviði leiðara. Framlag hennar til uppsetningarinnar er lítill dreifð rýmd sem framleiðandinn ákveður, vitandi eða óafvitandi, á fræsibeknum. Við mældum rafsvörunarstuðul og tap miðbaugstekks eftir þremur ásum, staðfestum væntu röðina $\epsilon_{ps_L} > \epsilon_{ps_R} \sim \epsilon_{ps_T}$ með misáttuhlutfalli nærri 1.3 við afhendingarraka og bárum fastana gegnum rýmdarlíkan vögg og súlu að kennistærð -- pF á kubbi -- sem er mælanlega ólík milli enda- og flattrefjafræsingar. Endatrefjar eru lægra gildið af tveimur, um það bil 0.4 pF og 18 prósent í dæmigerðri rúmfræði, og trefjahornsmæling staðfestir þær sem raunverulegt lágmark.

Munurinn er lítill á hvern kubbi og við neitum að ýkja hann. Við fullyrðum aðeins að hann sé raunverulegur, hafi æskilega stefnu og að sú stefna sé sú sem þegar var tilgreind af vélrænum ástæðum. Equatorial Elevation Block er fræstur með endatrefjarnar lóðréttar vegna þess að þannig bera þær þrýstiálág með mestri stífni; rafsvörunargreiningin hér var gerð síðar og staðfestir að sami skurður er einnig rafsvörunarlega hljóðlátastur. Hver kubbur er afhentur með endatrefjarnar upp, ofnþurrkaður í 12 +/- 1 prósent og ómeðhöndlaður; gráða hans og mældir fastar eru skraddir á vottorðið. Við bjóðum lesandanum að spyrja hvern annan framleiðanda viðarstoða í hvaða átt trefjarnar liggi og hvers vegna.

HEIMILDIR

- [1] James, W. L. (1975). Rafsvörunareiginleikar viðar og harðplötu: breytileiki með hitastigi, tíðni, rakainnihaldi og trefjastefnu. USDA Forest Service Research Paper FPL-245, Forest Products Laboratory, Madison.
- [2] Torgovnikov, G. I. (1993). Rafsvörunareiginleikar viðar og viðarefna. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Skaar, C. (1988). Tengsl viðar og vatns. Springer Series in Wood Science, Springer-Verlag, Berlin.
- [4] Norimoto, M. (1976). Rafsvörunareiginleikar viðar. Wood Research: Bulletin of the Wood Research Institute, Kyoto University, 59/60, 106-152.
- [5] Bosque, A., Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2026). Flokkun segulhlutleysis burðarviðar: hreinleikaflokkun á N-kvarða fyrir burðarefni hljóðkapla. Journal of Equatorial Audio Science, 7(2), 44-71.
- [6] Tanaka, Y., Park, H. (2022). Mæling rafsvörunarstuðuls misátta, taplittla fastefna með varinni samsíða plötusellu. Journal of Equatorial Audio Science, 3(1), 12-29.