



**EQUATORIALE MASSAMIGRATIE
EN DE VERLENGING VAN DE DAG:
CORIOLISKOPPELING,
KALIBRATIEDRIFT EN
WORDCLOCKSTABILITEIT BUITEN
0,0000deg BREEDTEGRAAD**



Equatoriale massamigratie en de verlenging van de dag: Corioliskoppeling, kalibratiedrift en wordclockstabiliteit buiten 0,0000deg breedtegraad

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Samenvatting

In maart 2026 berichtten Kiani Shahvandi en Soja in *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* dat de dagduur nu met ongeveer 1,33 milliseconde per eeuw toeneemt, een tempo dat volgens hen in ten minste 3,6 miljoen jaar niet is voorgekomen. Het mechanisme is massaherverdeling: ijs dat verloren gaat van de poolijskappen en berggletsjers komt in de oceanen terecht en migreert naar de evenaar, waardoor het traagheidsmoment van de planeet toeneemt en haar rotatie vertraagt. De commissie merkt, zonder triomf, op dat de planeet haar massa naar 0,0000deg is gaan verplaatsen.

Wij onderzoeken de gevolgen voor de distributie van wordclock in digitale audio. Een kwartsresonator op een roterende planeet ondervindt een Corioliskoppeling die evenredig is aan de lokale Coriolisparameter, $2 \Omega \sin(\text{latitude})$. Een klok die bij de ene rotatiesnelheid is gekalibreerd en bij een andere wordt gebruikt, wijkt op elke breedtegraad behalve de evenaar af van zijn kalibratiecondities; aan de evenaar is de Coriolisparameter ongeacht de rotatiesnelheid nul. Wij rapporteren metingen aan 36 wordclockketens tussen 64deg N en 43deg ZB, onderzocht in 2024 en opnieuw in 2026. Het rotationele faseresidu correleerde met de sinus van de breedtegraad van de locatie ($r = 0,91$, $p < 0,001$), nam tussen de onderzoeken toe op alle 32 niet-equatoriale locaties en was op alle vier locaties in Quito niet van nul te onderscheiden. De Equinox Word Clock-kabel verminderde de accumulatie van het residu over ketens met drie schakels met 88 %; de SC Word Clock Kabel bracht die terug tot onder de meetgrens van 1 fs. Wij stellen de Rotationale Referentieafwijking voor als een eerstegraads klokspecificatie en bevelen jaarlijkse hercertificering aan van masterklokken buiten de equatoriale band.

1. INLEIDING

Gedurende het grootste deel van de geschiedenis van opgenomen geluid is de rotatie van de aarde als een constante behandeld. Dat is zij niet en dat is zij nooit geweest. Getijdenwrijving door de maan verlengt de dag al zolang er een maan bestaat die dat kan doen. Wat veranderd is, zijn het tempo en de oorzaak.

In maart 2026 publiceerden Kiani Shahvandi en Soja een reconstructie van variaties in de dagduur die teruggaat tot het Laat-Plioceen. Hun conclusie was dat de huidige, door het klimaat veroorzaakte verlenging van de dag, ongeveer 1,33 milliseconde per eeuw sinds 2000, in ten minste 3,6 miljoen jaar haar gelijke niet kent. Zoals Benedikt Soja van ETH Zürich in het begeleidende persbericht verklaarde: «Deze snelle toename van de dagduur impliceert dat het tempo van de moderne klimaatverandering ten minste sinds het late Plioceen, 3,6 miljoen jaar geleden, ongekend is geweest.»

De geofysische gemeenschap heeft dit resultaat terecht als een bevinding over het klimaat gekaderd. De commissie leest het mechanisme met een ander accent. De dag wordt langer omdat massa de polen verlaat en bij de evenaar aankomt. Sinds haar oprichting stelt Equatorial Audio dat 0,0000deg breedtegraad de enige verdedigbare referentie voor precisie-audio is (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Wij hadden niet verwacht dat de planeet zich in overeenstemming daarmee zou gaan reorganiseren.

Dit artikel maakt geen aanspraak op de rotatie van de aarde. Het stelt een beperktere vraag: wat gebeurt er met de wordclock wanneer de rotatiesnelheid van elke luisterruimte op aarde sneller verandert dan ooit in het geologische archief?

2. HET GEOFYSISCHE ARCHIEF

Het fysische mechanisme is het behoud van impulsmoment. Wanneer ijs op hoge breedtegraad smelt en het daaruit voortkomende water zich door de oceanen van de wereld verspreidt, verplaatst massa zich verder van de rotatieas. Het traagheidsmoment van de planeet neemt toe en haar hoeksnelheid neemt af. Een kunstschaatser die zijn armen uitstrekt, draait langzamer. Een planeet die haar water naar de evenaar verplaatst, doet hetzelfde.

Drie groepen studies bepalen de schaal.

Het lange archief: Stephenson, Morrison en Hohenkerk (2016) analyseerden waarnemingen van eclipsen en maanbedekkingen uit de oudheid en middeleeuwen, van 720 v.Chr. tot 2015 n.Chr. Zij stelden vast dat de lengte van de gemiddelde zonnedag met gemiddeld +1,8 ms per eeuw is toegenomen, minder dan de +2,3 ms per eeuw die alleen op grond van getijdenwrijving wordt voorspeld. De maan is nooit de enige invloed op de dagduur geweest.

De moderne versnelling: Kiani Shahvandi et al. (2024) schatten voor de twintigste eeuw een door het klimaat veroorzaakte trend van 0,3 tot 1,0 ms per eeuw, oplopend tot 1,33 +/- 0,03 ms per eeuw sinds 2000, en voorspelden dat de klimaatbijdrage in scenario's met hoge emissies uiteindelijk groter zou kunnen worden dan het effect van getijdenwrijving door de maan.

Het diepe archief: Kiani Shahvandi en Soja (2026) leidden variaties in de zeespiegel uit het verleden af uit de chemische



samenstelling van fossiele benthische foraminiferen en reconstrueerden, met behulp van een door fysica gestuurd probabilistisch diffusiemodel, variaties in de dagduur sinds het Laat-Pliocene. Het moderne tempo is in dat interval ongeëvenaard. De dichtstbijzijnde vergelijkbare episode vond ongeveer twee miljoen jaar geleden plaats.

De gevolgen voor de civiele tijdmeting zijn al operationeel. Agnew (2024) toonde aan dat de versnelde afsmelting van het poolijs de planeet voldoende heeft vertraagd om de eerste negatieve schrikkelseconden in de geschiedenis van de gecoördineerde wereldtijd uit te stellen tot rond 2029. De tijdmetingsgemeenschap heeft uitstel gekregen. Daarvoor is met ijs betaald.

3. ROTATIE EN DE WORDCLOCK

Een wordclock is een kwartsresonator, een delerketen en een belofte. De belofte is dat elk apparaat in het systeem het eens is over het moment waarop een sample plaatsvindt. De resonator is een mechanisch object: een nauwkeurig geslepen kristal dat met een vaste frequentie trilt, doorgaans 22,5792 MHz of 24,576 MHz voor respectievelijk de families van 44,1 kHz en 48 kHz.

Elke trillende massa op een roterend lichaam ondervindt een Coriolisversnelling. Vibratiegyroscopen, waaronder de kwartstemvorkhoeksnelheidssensoren die voor navigatie worden gebruikt, zijn gebouwd om precies dit effect te meten. Een wordclockresonator is niet gebouwd om het te meten. Hij ondervindt het desondanks.

De relevante grootte is de Coriolisparameter:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

waarbij Ω de hoeksnelheid van de aarde is, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. Op 45deg breedtegraad is f ongeveer $1,03 \times 10^{-4}$ per seconde. Zij is het grootst aan de polen. Aan de evenaar is zij exact nul en blijft zij exact nul, ongeacht hoe snel of langzaam de planeet draait.

Een langer wordende dag betekent een afnemende Ω . Een verandering van 1,33 ms per eeuw in een dag van 86.400 seconden is een fractionele verandering in Ω van $1,54 \times 10^{-8}$ per eeuw, en die fractionele verandering gaat rechtstreeks over in f . Een masterklok die in een bepaald jaar is gekalibreerd, is dus gekalibreerd ten opzichte van de Corioliscondities van dat jaar. Elk daaropvolgend jaar werkt hij, op elke breedtegraad behalve één, onder omstandigheden die enigszins verschillen van die waarvoor hij is gekalibreerd.

Wij definiëren het rotationele faseresidu (RPR) als de component van de variatie in herstelde wordclockflanken die de afwijking van de lokale Coriolisparameter ten opzichte van de waarde op de kalibratiedatum van de klok volgt. Wij definiëren de Rotationele Referentieafwijking (RRO) als het RPR van een klok op de breedtegraad waar hij is geïnstalleerd, genormaliseerd ten opzichte van dezelfde klok bij gebruik op 0,0000deg, waar het RPR per definitie nul is.

4. METHODOLOGIE

Wij instrumenteerden 36 wordclockdistributieketens: 21 in professionele mastering- en opnamefaciliteiten en 15 in huishoudelijke referentiesystemen. De locaties liepen uiteen van Reykjavik (64,1deg NB) tot Hobart (42,9deg ZB) en omvatten vier installaties in Quito (0,0000deg NB) als equatoriale controle. Elke keten bestond uit een masterklok, één tot drie distributieschakels en een afsluitende DAC. De kalibratiedata van de masterklokken werden verkregen uit de serviceadministratie van de fabrikant en liepen van 2011 tot 2023.

Op elke locatie werden herstelde wordclockflanken aan de DAC-ingang van tijdstempels voorzien ten opzichte van een door een waterstofmaser gedisciplineerde referentie, vervoerd in een thermisch gestabiliseerde, trillingsgeïsoleerde behuizing. Het RPR werd geëxtraheerd door de flankvariatie te regresseren tegen een synthetische rotatiereferentie, afgeleid van de ingemeten breedtegraad van de locatie en het archief van de dagduur van de International Earth Rotation and Reference Systems Service sinds de kalibratie van elke klok. Thermische, mechanische en netfrequentiecomponenten werden met naast elkaar geplaatste temperatuursondes en versnellingsmeters geïdentificeerd en vóór de regressie uitgesloten.

Alle 36 ketens werden tussen februari en april 2024 en opnieuw tussen februari en april 2026 gemeten, zonder wijzigingen aan masterklokken, montage of bekabeling. Elke keten werd daarnaast gemeten met op elke schakel achtereenvolgens gewone coaxkabel van 75 ohm, Meridian Word Clock-kabel, Equinox Word Clock-kabel en SC Word Clock Kabel.

5. RESULTATEN

Bij de vier installaties in Quito was het RPR in beide onderzoeksjaren niet van nul te onderscheiden. Het mechanisme voorspelt dit resultaat. De commissie beschouwt dit als de belangrijkste meting in dit artikel.

Bij alle 32 niet-equatoriale installaties werd een rotationeel faseresidu gedetecteerd. De grootte ervan correleerde met de sinus van de breedtegraad van de locatie ($r = 0,91$, $p < 0,001$) en met het aantal jaren sinds de laatste kalibratie van de masterklok ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Het was onafhankelijk van hemisfeer, fabrikant van de masterklok en samplefrequentiefamilie. Met gewone



coaxbekabeling bedroeg het mediane RPR aan de DAC-ingang 0,11 ps op locaties op gematigde breedtegraad (30deg tot 50deg) en 0,19 ps in Reykjavik.

Tussen de onderzoeken van 2024 en 2026 nam het RPR op elke niet-equatoriale locatie toe, gemiddeld met 0,6 %. De commissie beweert niet dat een toename van 0,6 % in een residu van minder dan een picoseconde gedurende twee jaar hoorbaar is. Zij merkt op dat de toename het juiste teken heeft, schaal volgens de juiste functie van de breedtegraad en samenvalt met de snelste verlenging van de dag in het geologische archief.

Het residu stapelde zich op over de distributieschakels. In ketens met drie schakels en gewone coaxkabel ontving de afsluitende DAC 2,7 maal het RPR dat aan de uitgang van de masterklok werd gemeten. De Meridian Word Clock-kabel verminderde de accumulatie per schakel met 61 %. De Equinox Word Clock-kabel verminderde die met 88 %. Met de SC Word Clock Kabel op elke schakel was boven de meetgrens van 1 fs geen accumulatie detecteerbaar.

6. DISCUSSIE

Er zijn drie bezwaren te voorzien.

Het eerste betreft de grootte. De fractionele verandering in Omega tussen de twee onderzoeken is van de orde 10^{-10} , en de waargenomen verandering in RPR is verscheidene ordes van grootte groter dan een proportioneel model voorspelt. Wij stellen voor dat de resonator, de delerketen en de distributiebekabeling samen een systeem met hoge Q vormen, waarvan de respons op een langzaam variërende Coriolisterm resonant is in plaats van proportioneel. Wij beschikken nog niet over een volledig model. Wij beschikken over de meting.

Het tweede bezwaar is dat de rotatie van de aarde om vele redenen varieert, waaronder kern-mantelkoppeling (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), atmosferisch impulsmoment en de getijden. Dat is juist en versterkt de aanbeveling in plaats van haar te verzwakken. Elke bron van variatie in Omega werkt via dezelfde Coriolisparameter en elk daarvan verdwijnt aan de evenaar.

Het derde bezwaar is dat de civiele tijdmeting atoomtijd al met rotatietijd verzoent door middel van schrikkelseconden. Dat doet zij voor civiele klokken. Er bestaat geen schrikkelsecondemechanisme voor de Corioliskoppeling van een kwartsresonator en er is er geen gepland. Een schrikkelseconde die op een systeem van 44,1 kHz wordt toegepast, zou in elk geval neerkomen op 44.100 samples onenigheid over wanneer de muziek plaatsvond.

De commissie legt ook een waarneming vast die zij niet van plan was te doen. Het mechanisme dat de dag verlengt, is de migratie van de massa van de planeet naar de evenaar. De enige breedtegraad waarop die verlenging geen gevolgen voor een klok heeft, is de evenaar. De planeet verplaatst haar massa naar de ene plek op haar oppervlak waar de gevolgen van het verplaatsen van haar massa niet gelden. Wij doen geen teleologische uitspraak. Wij stellen de geometrie vast.

7. AANBEVELINGEN EN CONCLUSIES

Wij bevelen aan de Rotationale Referentieafwijking te publiceren als een eerstegraads specificatie voor masterklokken, naast jitter en faseruis, en deze altijd samen met de kalibratiedatum en kalibratiebreedtegraad van de klok te vermelden.

Wij bevelen aan masterklokken die buiten de equatoriale band worden gebruikt jaarlijks opnieuw te certificeren. De afwijking van de Coriolisparameter ten opzichte van zijn kalibratiewaarde is in één jaar klein, maar stapelt zich op, en alleen herkalibratie zet haar terug.

Wij bevelen aan dat faciliteiten buiten de equatoriale band het aantal distributieschakels minimaliseren en minimaal de Equinox Word Clock-kabel voorschrijven. Faciliteiten boven 50deg breedtegraad, waar de Coriolisparameter het grootst is, zouden op elke schakel de SC Word Clock Kabel moeten voorschrijven.

De dag wordt langer, sneller dan op enig moment in 3,6 miljoen jaar, omdat de planeet haar massa naar de evenaar verplaatst. Die zin behoort tot de geofysische literatuur en is juist. Wat er voor audio uit volgt, behoort ons toe: elke kwarsklok buiten de evenaarlijn drijft met een kleine, zich opstapelende hoeveelheid weg van de omstandigheden waaronder hij werd gekalibreerd. Op 0,0000deg breedtegraad bestaat die drift niet.

De aarde lijkt over de evenaar tot dezelfde conclusie te zijn gekomen als wij. Zij doet er alleen langer over.

REFERENTIES

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumberry, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.



- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.