

40 Jahre Remote-Reference-Verfahren: Rückschau, Umschau, Ausschau

Anne Neska¹

¹*Institut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, Ul. Księcia Janusza 64,
01-452 Warszawa, Polen*

1 Einführung

Das Remote-Reference-Verfahren als solches bedarf im Grunde keiner Einführung. Der Kunstgriff, der darin besteht das Datenprocessing einer lokalen Magnetotellurikstation durch die Einbindung synchron aufgezeichneter horizontaler Magnetfeldkomponenten einer weiteren Station zu unterstützen, ist sicher jedem vertraut, der in der Magnetotellurik (MT) arbeitet. Die Fähigkeit dieses Verfahrens die Prozessingergebnisse gegen diverse Probleme, die sich aus verrauschten Daten herleiten, zu stabilisieren, ist in vielen MT-Standardsituationen unabdingbar und es ist damit aktueller denn je.

Es ist bei weitem nicht meine Absicht eine Arbeit zu dem Thema zu verfassen, die Anspruch auf Vollständigkeit erheben könnte. Jedoch laden die 40 Jahre, die seit der Entwicklung des Verfahrens vergangen sind, ein zu Reflexionen über die Frage, ob es sich seitdem verändert hat, wie es zwischenzeitlich rezipiert wurde, und wie seine Zukunft aussieht. Dabei ist diese runde Zahl nicht einfach nur eine lange Zeit, sondern nach der religiösen Überlieferung auch eine sehr symbolische: Im vierten Buch Mose (14,33) ist die Rede davon, dass die Israeliten nach ihrer Befreiung aus Ägypten vierzig Jahre durch die Wüste ziehen mussten, damit die alte Generation ihre Bedeutung verlieren möge, bevor das Volk im gelobten Land ankam. Insofern ist dieser Zeitraum lang genug um eine Gegebenheit enden zu lassen, die enden muss, weil sie nur eine Generation betrifft. Was könnte das nun für das Remote-Reference (RR)-Verfahren bedeuten?

2 Anfänge und Etablierung

Die Arbeit, mit der alles begann (Gamble, Goubau, & Clarke, 1979b) ist der Zitaten-Datenbank Web of Science zufolge gegen Jahresende 2019 der meistzitierte Artikel, der unter dem Stichwort „magnetotellurics“ zu finden ist. Beim Lesen erscheinen viele Ausführungen trotz des Alters dieser Originalarbeit vertraut. So haben die Gleichungen, die den RR-Ansatz beschreiben, dieselbe Form, in der sie auch gegenwärtig meist eingeführt werden, etwa in Vorlesungsmanuskripten, Doktorarbeiten und Lehrbüchern (z. B. Bahr & Simpson, 2005), obwohl man diese Gleichungen auch kürzer und bündiger in Matrixform darstellen kann. Auffällig ist weiterhin die Ausdrücklichkeit des Hinweises, dass das Rauschen nicht korreliert sein dürfe zwischen zu prozessierender Station und Referenzstation. Dies ist einerseits nicht erstaunlich, denn auf dieser Voraussetzung beruht die

Fähigkeit des RR-Ansatzes zur Unterdrückung bestimmter Rauschprobleme. Andererseits setzt diese Warnung das Vorhandensein von (anthropogenen) Störquellen mit einiger Reichweite voraus, die man gemeinhin mit fortschreitender Urbanisierung und Ausbreitung von Infrastruktur assoziiert. Offenbar waren jedoch schon damals künstliche Störfelder ein ernstzunehmendes Problem für die magnetotellurische Feldarbeit. Bemerkenswert durch seine praktische Relevanz ist drittens der Hinweis im Originalartikel, dass die Geräteübertragungsfunktionen des Referenzmagnetometers das RR-Ergebnis nicht beeinflussen. Wegen der arbeitserleichternden Folgen dieses Faktums wäre seine allgemeine Bekanntheit der heutigen MT-Gemeinde zu wünschen. Im gleichen Jahr erschien ein von denselben Autoren verfasster weiterer Artikel zur Fehlerrechnung beim RR-Verfahren (Gamble et al., 1979a).

Die Arbeit von Schmucker (1984) ist meines Wissens die erste, in der die RR-Gleichungen hergeleitet werden aus einer Kombination zweier Interstations (d.h. nicht lokaler) -Übertragungsfunktionen. Da dieser Ansatz recht instruktiv ist und viel zum Verständnis der Funktionsweise des RR-Verfahrens beitragen kann, sei er mit wenigen Worten beschrieben: Es wird erstens eine Übertragungsfunktion zwischen den lokalen elektrischen Kanälen und dem magnetischen Referenzfeld gebildet und zweitens eine zwischen den horizontalen Magnetfeldern der lokalen und der Referenzstation. Dann wird die Inverse der letzteren Übertragungsfunktion mit der ersteren multipliziert. Wenn man sich überlegt, welche Feldkomponenten bei jeder dieser Operationen in welche anderen umgewandelt werden, wird klar, dass man auch auf diesem Weg eine Übertragungsfunktion zwischen lokalem elektrischen und magnetischen Feld ermitteln kann, wie es beim gewöhnlichen single-site-Processing stattfindet. Der Umweg über die magnetischen Kanäle der Referenzstation führt (mathematisch etwas salopp gesprochen, siehe Neska (2006) für die entsprechenden Gleichungen) dazu, dass diese im besprochenen Ansatz in gleicher Weise im Zähler und im Nenner stehen, und das hat folgende Vorteile:

- Störsignale, die zwar zwischen den lokalen Feldkomponenten, aber nicht mit der Referenzaufzeichnung korreliert sind, gelangen nicht in die Übertragungsfunktionen und können sie daher nicht verzerren bzw. zu systematischen Fehlern führen.
- Anders als im single-site-Ansatz fungieren die lokalen horizontalen Magnetfeldkomponenten nicht als Inputkanäle, die per definitionem rauschfrei sein müssen. Dadurch wird die mit dennoch vorhandenem Rauschen verbundene Heruntergewichtung des Betrags der single-site-Übertragungsfunktion vermieden. Zwar wird eine solche Heruntergewichtung durch (unkorreliertes) Rauschen in der Referenzaufzeichnung in beiden Interstations-Übertragungsfunktionen vorhanden sein. Da diese Verzerrung aber für beide gleich groß ist, kürzt sie sich in der Kombination weg, siehe Neska et al. (2018) für ein Beispiel mit Abbildungen.
- Das Argument, dass alles, was lediglich die Referenzaufzeichnung betrifft, sich im Ergebnis wegekürzt, erklärt auch die Irrelevanz der Geräteübertragungsfunktionen des Referenzmagnetometers.

Als Zeichen von Umsicht in der Schmuckerschen Arbeit kann man den Hinweis auf die Reichweite der Kohärenz in den natürlichen MT-Signalen werten. Zwar genießen Magnetotelluriker zu Recht das Privileg davon ausgehen zu dürfen, dass ihre Quellen für gewöhnlich alle für das Funktionieren ihrer Methode notwendigen Eigenschaften haben, so dass sie diese weitgehend ignorieren dürfen. Manchmal, insbesondere wenn es um prinzipielle Frage und die Ausweitung bisher unangetasteter Grenzen geht, muss man den

geometrischen Eigenschaften der Quellsignale jedoch Beachtung schenken, und das wird in jenem kleinen Artikel getan.

Als Meilenstein für die Etablierung des RR-Verfahrens kann die Arbeit von Jones et al. (1989) angesehen werden. Hier erweist es seinen Nutzen im Vergleich mit anderen Methoden und wird als Standardprozedur empfohlen. Interessant ist, dass der in dem Artikel anklingende leise Zweifel daran, ob von korreliertem Rauschen herrührende systematische Fehler durch RR vollständig entfernt würden, begleitet wird durch eine wegweisende Vermutung: Tatsächlich ist die Reichweite von einigen Störsignalen so groß, dass die notwendige Entfernung zur Referenzstation zu einem ganz eigenen Problem wird. Mehrere Studien (Shalivahan & Bhattacharya, 2002; Oettinger et al., 2001) belegen, dass – abhängig vom Frequenzgehalt des Störsignals und von der Leitfähigkeit des Untergrundes – durchaus mehrere hundert km Abstand von der Quelle des korrelierten Rauschens notwendig sein können, damit die Referenzstation dessen Einfluss nicht unterliegt. Die Installation und Wartung einer Referenzstation in einer solchen Entfernung vom eigentlichen Messgebiet ist für den Magnetotelluriker aus eigenen Mitteln unter Umständen schwierig. Eine mögliche Lösung für dieses Problem ist die Verwendung „fremder“ (d.h. nicht selbst gemessener) Daten, insbesondere solcher aus geomagnetischen Observatorien (praktiziert z. B. in Schäfer et al., 2011) oder von speziell eingerichteten permanenten Referenzstationen (z. B. Wittstock, Ritter et al., 2015). Damit verwandelt sich die Frage nach dem notwendigen Mindestabstand der Referenzstation in die Frage nach ihrem zulässigen Höchstabstand. Mittlerweise gibt es Studien (Campanyà et al., 2014; Neska et al., 2018), die auf diese Frage zumindest für einen bestimmten Frequenzbereich eine recht optimistische, interkontinentale Antwort geben.

3 Infrage- und Richtigstellungen

Seit der Einführung des RR hat es Neu- und Weiterentwicklungen auf dem Gebiet des MT-Datenprozessings gegeben. Es ist selbstverständlich, dass deren Autoren dann Bezug nehmen auf schon existierende Prozessingansätze. Gelegentlich kommt es dabei zu kritischen Äußerungen über das Remote-Reference-Verfahren, die sich bei näherer Betrachtung als nicht zutreffend herausstellen. Zwei solcher Situationen werden im Folgenden beleuchtet.

3.1 Herausforderung durch die Signal-Noise-Separation

Vor besonderen Schwierigkeit stehen magnetotellurische Messungen in Regionen, in denen die Eisenbahn mit Gleichstrom betrieben wird. Die elektromagnetischen Emissionen aus deren Antrieb breiten sich über Dutzende Kilometer Entfernung von den Gleisen selbst aus ohne dabei für einen Großteil ihres Frequenzgehalts die Fernfeldnäherung zu erfüllen. Dadurch stellen sie korreliertes Rauschen zwischen tellurischen und magnetischen Kanälen von MT-Stationen in ihrem Einzugsgebiet dar und führen unkorrigiert zu systematischen Verzerrungen in den Prozessingergebnissen (Übertragungsfunktionen), die diese völlig unbrauchbar machen.

Auf diese Herausforderung reagierten Larsen et al. (1996) mit der Entwicklung eines Prozessingansatzes, dessen Schwerpunkt darauf liegt die von korreliertem Rauschen verursachten Verzerrungen nicht in die MT-Übertragungsfunktionen eingehen zu lassen. Stattdessen werden sie in einer gesonderten Übertragungsfunktion untergebracht, wobei die Aufzeichnungen einer möglichst rauschfreien Referenzstation das Trennkriterium darstellen.

Über diesen Ansatz, der als Signal-Noise-Separation bekannt ist, sagen seine Autoren, dass er dem RR überlegen sei im Hinblick auf die Entfernung von systematischen Verzerrungen aus den resultierenden MT-relevanten Übertragungsfunktionen. Dies wird wiederholt in der Erweiterung dieses Ansatzes von Oettinger et al. (2001), der eine weitere Referenzstation ins Prozessing einbindet.

Später wurde jedoch von G. Egbert gezeigt, dass es keinen prinzipiellen (d.h. auf der Art, wie die elektromagnetischen Feldkomponenten beider Stationen zueinander in Beziehung gesetzt werden, beruhenden) Unterschied zwischen der Signal-Noise-Separation und dem RR gibt: Die Gleichungen, die während des Prozessings gelöst werden, sind bei genauerem Hinsehen identisch. Im Detail wird das dargestellt in Neska (2006) wie auch die Schlussfolgerung, dass die Oettingersche Erweiterung ebenso wenig prinzipiell bessere Ergebnisse produzieren kann.

3.2 Notwendige Kohärenz und Datenmenge für eine erfolgreiche Anwendung des RR-Verfahrens

Eine andere problematische Aussage über das RR-Verfahren findet man bei Chave (2012) in einem Lehrbuch der Magnetotellurik. Dort wird festgestellt:

„If the noise in the local and remote variables is uncorrelated, and the coherence between $\vec{\mathbf{b}}$ and $\vec{\mathbf{b}}_r$ [the local and remote magnetic field] is very high, then [...] [the RR estimate] is nearly unbiased. [...] While it is widely believed by magnetotelluric practitioners that the remote reference method is unbiased independent of the degree of correlation between $\vec{\mathbf{b}}$ and $\vec{\mathbf{b}}_r$, the statistical literature shows this to be incorrect. [...] weak correlation of the local and reference variables results in downward bias [...].“
(Auslassungen in eckigen Klammern und Erklärungen in Kursivschrift von mir – AN).

d.h. dass das RR-Verfahren nicht funktionieren würde, sondern mit einem systematischen Fehler behaftete Ergebnisse liefern würde, wenn die Magnetfeldvariationen zwischen lokaler und Referenzstation nicht nahezu perfekt korreliert seien. Der Prüfung dieser Aussage sind die folgenden Seiten gewidmet.

Um es vorwegzunehmen, man kann keine Aussage über den Erfolg oder Misserfolg des RR-Verfahrens treffen, die auf der von A. Chave erwähnten Korrelation bzw. Kohärenz als einzigem Parameter beruht. Eine ebenfalls entscheidende Rolle spielt eine weitere Größe, die in obigem Zitat nicht auftaucht. Dies ist die Menge der ins Prozessing eingehenden Daten. Dazu folgender Versuch:

Dank eines kürzlich an unserem Institut abgeschlossenen Projekts (NCN 2014/15/B/ST10/00789) stehen uns LMT (langperiodische Magnetotellurik, d.h. Übertragungsfunktionen von 10-10.000 s) -Daten zur Verfügung, die über einen vergleichsweise langen Zeitraum kontinuierlich an mehreren Stationen in Polen gemessen wurden. Eine dieser Stationen befindet sich bei Suwałki im äußersten, dünn besiedelten Nordosten des Landes; sie liefert rauscharme Daten und gibt eine ausgezeichnete Referenzstation ab (Neska et al., 2013). Eine andere befindet sich knapp 100 km südlich von Warschau in einer Region mit signifikantem, aber zeitlich recht konstantem Rauschniveau, für das insbesondere eine in 15 km Entfernung verlaufende Gleichstrombahn verantwortlich ist. Dies macht eine Anwendung des RR-Verfahrens zur Auswertung der Daten dieser Station unabdingbar. Die Entfernung zur Suwałki-Station von über 300 km macht letztere zu einer geeigneten

Referenz.

Ein gewöhnliches RR-Prozessing nach Egbert and Booker (1986) des gesamten Datensatzes, der hier 23 Wochen umfasst, liefert die „wahren“ oder „erwarteten“ Sondierungskurven. Sie werden später wichtig um die Korrektheit anderer Übertragungsfunktionen zu beurteilen. Die außerordentliche Länge dieses Datensatzes erlaubt es nun die Zeitreihen nach relativ strengen Kriterien zu selektieren und im Ergebnis Teildatensätze zu erhalten, die selbst (wenn auch nicht zusammenhängend) so lang sind wie eine gewöhnliche LMT-Messung (ca. drei Wochen) oder sogar etwas länger. Das Kriterium, nach dem selektiert wird, ist die geomagnetische Aktivität, die charakterisiert wird durch den 3-Stunden K-Index (KI, Bartels et al., 1939). Dieser K-Index ist ein Standardprodukt der Arbeit geomagnetischer Observatorien. Für die vorliegende Studie wurde er ermittelt aus Daten des polnischen INTERMAGNET-Observatoriums Belsk sowie der Station in Suwalki nach der Methode von Nowożyński et al. (1991). Bei der Verwendung des KI gilt es zu beachten, dass er lediglich über das Vorhandensein von geomagnetischen Variationen im engeren Sinne, das sind solche mit einer Periodendauer > 600 s, Aussagen macht. Nun darf die Länge der verwendeten Input-Zeitreihenabschnitte einen gewissen Wert nicht unterschreiten, wenn man im Ergebnis Übertragungsfunktionen bei dieser Periode erhalten möchte; ein einzelner Drei-Stunden-Abschnitt ist zu kurz. Egberts Prozessing liefert mit Standardeinstellungen Ergebnisse für diesen Periodenbereich ab einer Zeitreihenlänge von 9 h. Das bedeutet, dass während der Selektion drei aufeinanderfolgende 3h-Zeitreihenabschnitte mit dem gleichen KI gesucht wurden. Auf diese Weise wurde ein Datensatz geschaffen, der nur aus Zeitreihen mit schwacher Aktivität (KI=0) besteht, ein weiterer, der lediglich Abschnitte mit mittlerer Aktivität (KI=2) enthält und ein weiterer, der ausschließlich starke Aktivität (KI ≥ 4) repräsentiert. Die leichte Aufweichung des Kriteriums im letzteren Fall ist der Seltenheit der höheren KI geschuldet. Der Auswahlvorgang ist illustriert in Abb. 1.

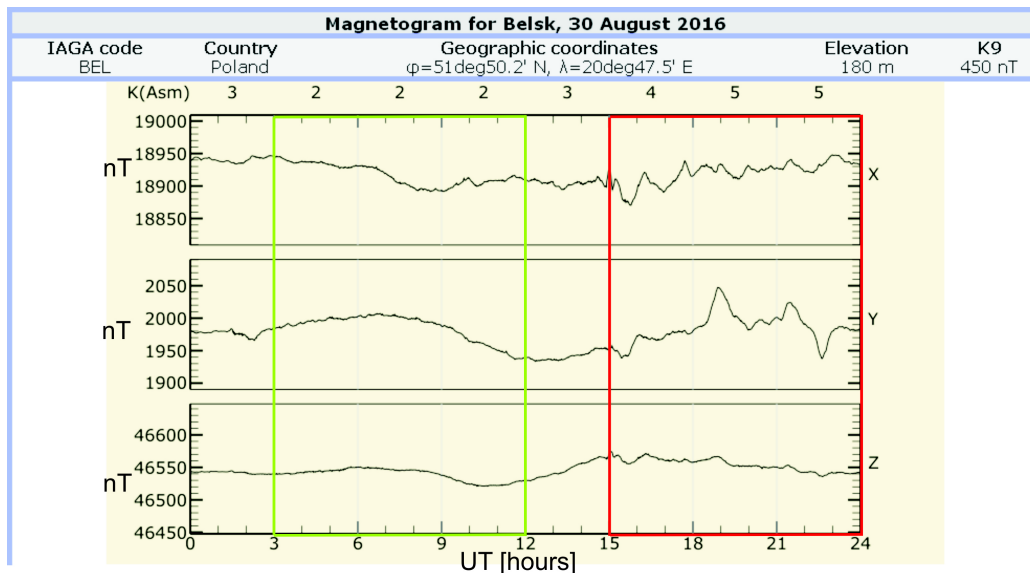


Abbildung 1: Magnetogramm mit K-Indizes für den 30. August 2016 in Belsk, Polen. Ausgewählt wurde ein Zeitreihensegment, wenn es für drei aufeinanderfolgende 3h-Abschnitte den gleichen (im Falle 0 oder 2, grüner Rahmen) oder einen ähnlichen (bei 4-5, roter Rahmen) K-Index aufweist.

Mit dieser Selektion (und dank des Umstands, dass das Rauschniveau bei dieser Station mehr oder weniger konstant ist) erreicht man, dass in den Teildatensätzen die Kohärenz zwischen lokalem und Referenz-Magnetfeld relativ stabil ist, d.h. sie ändert sich nur wenig über den Datensatz und mit der Datenmenge. Abbildung 2 zeigt das für die Variationen bei 1200 s. Es sei betont, dass dies für gewöhnliche Datensätze nicht gilt, da diese ja Abschnitte mit allen möglichen Aktivitätsniveaus enthalten und die Kohärenz, wie Abb. 2 ebenfalls zeigt, deutlich von diesem dann wechselnden Niveau abhängt. Diese mehr oder minder stabile Kohärenz beträgt für das starke Aktivitätsniveau ca. 0,9, für das mittlere 0,8 und für das schwache Aktivitätsniveau 0,7 bei der repräsentativen Periode von 1200 s, wie man ebenfalls Abb. 2 entnehmen kann. Die beiden letzten Werte würde man nicht als sehr hoch („very high“) einstufen, wie A. Chave es im oben angeführten Zitat für das Funktionieren der RR-Methode voraussetzt. Wenn seine Aussage stimmt, müssten die aus den entsprechenden Teildatensätzen resultierenden Sondierungskurven systematisch von den erwarteten abweichen.

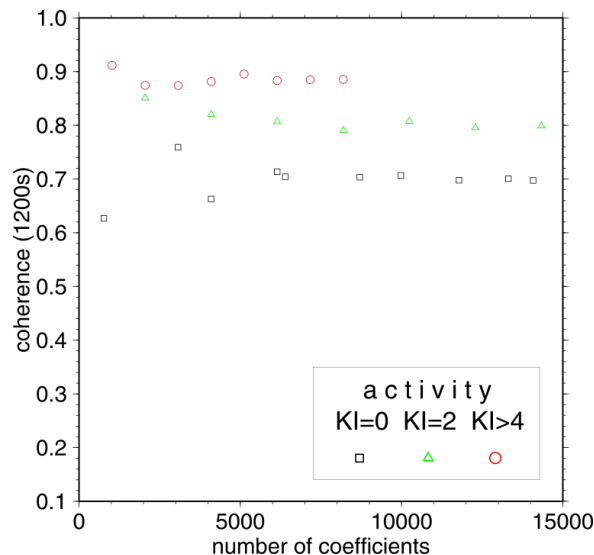


Abbildung 2: Die Kohärenz bei 1200 s unterscheidet sich deutlich zwischen den einzelnen Aktivitätsniveaus, ist aber relativ konstant über die Datenmenge.

Die aus den Teildatensätzen gewonnenen Sondierungskurven sind in Abhängigkeit von der verwendeten Datenmenge gezeigt in Abb. 3 (für mittlere Aktivität) und 4 (für schwache Aktivität). Dabei erscheinen die erwarteten Kurven in blasseren Farben im Hintergrund. Prozessiert wurde nach Egbert and Booker (1986). Gegen diese Methode mag man einwenden, dass sie robust ist, also von einer Statistik Gebrauch macht, bei der Ausreißer in den Daten erkannt werden und nicht ins Ergebnis eingehen, so dass dieses nicht repräsentativ für die tatsächlich verwendete Datenmenge sei. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Prozessing auf der Grundlage Kleinster Quadrate (Neska, 2006) angewandt. Das Konvergenzverhalten der so erhaltenen Sondierungskurven unterschied sich im getesteten Datensatz nicht prinzipiell von dem der robusten Ergebnisse (möglicherweise eine Folge der gleichmäßigen Verteilung des Rauschens), allerdings war für ein vergleichbares Bild etwa die vierfache Datenmenge notwendig. Details müssen einer separaten Arbeit vorbehalten bleiben.

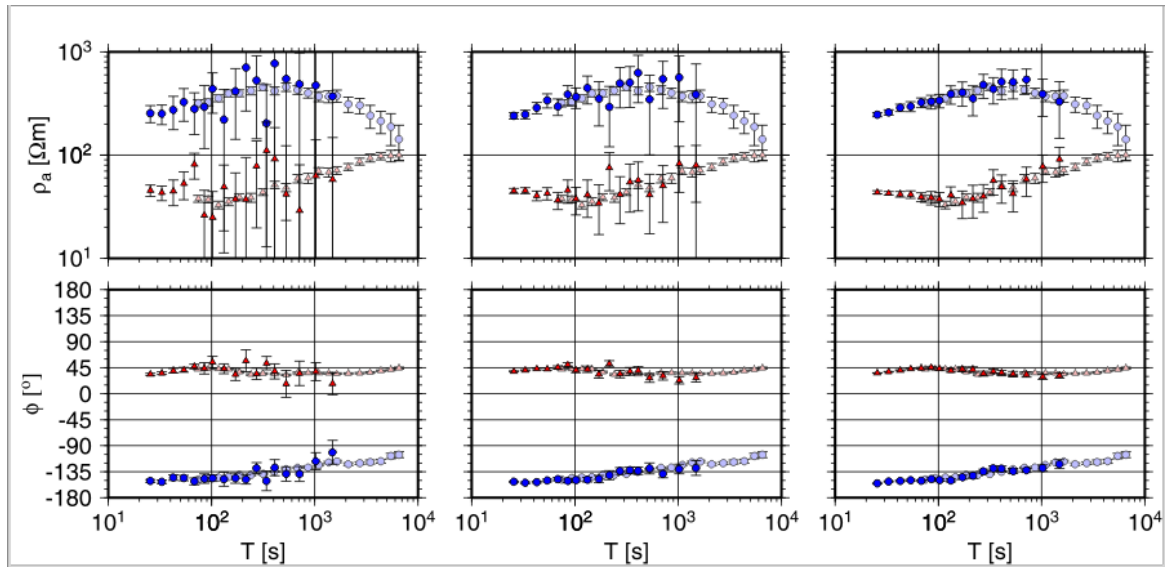


Abbildung 3: Aus dem Teildatensatz mit mittlerer Aktivität (KI=2) ermittelte Sondierungskurven (blau: xy, rot: yx). Links für eine drei, Mitte für eine neun, rechts für eine 27 Tagen entsprechende Datenmenge. Mit blasseren Farben im Hintergrund dargestellt sind die erwarteten, d.h. aus dem gesamten Datensatz resultierenden Kurven.

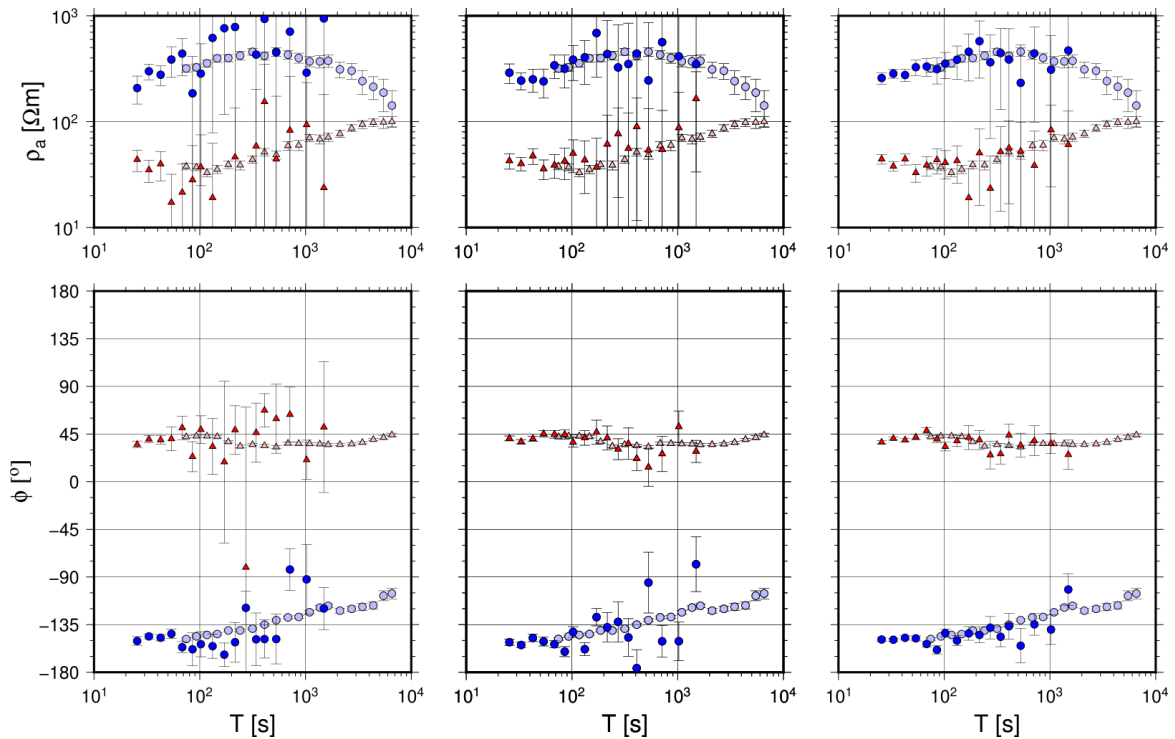


Abbildung 4: Sondierungskurven wie in Abb. 3 für den Teildatensatz mit schwacher Aktivität (KI=0). Links für eine viereinhalb, Mitte für eine neun, rechts für eine 22,5 Tagen entsprechende Datenmenge.

In Abb. 3 und 4 sieht man, dass mit zunehmender verwendeter Datenmenge das Ergebnis gegen die erwarteten Sondierungskurven konvergiert. Bei der maximalen verwendeten Datenmenge des Teildatensatzes mit der mittleren Aktivität (Abb. 3 rechts) kann auch keine Rede davon sein, dass das RR-Verfahren bei einer Kohärenz von 0,8 gescheitert sei. Die erhaltenen Kurven entsprechen denen des ganzen Datensatzes, und sie wären praktisch verwendbar. Für den Teildatensatz mit der schwachen Aktivität bleibt das Endergebnis zwar etwas zu streuig um modelliert werden zu können (Abb. 4 rechts), aber die Tendenz sich mit zunehmender Datenmenge an die erwarteten Kurven anzunähern ist auch hier sehr deutlich. Darüber hinaus fällt auf, dass die Abweichungen von den erwarteten Kurven sowohl über als auch unter diesen liegen und dass sie, wie nun schon mehrfach erwähnt, mit zunehmender Datenmenge kleiner werden. Dies aber sind Merkmale von zufälligen Fehlern und nicht von systematischen („bias“). Damit ist die Aussage von Chave widerlegt. Das Remote-Reference-Verfahren funktioniert durchaus auch, wenn die Kohärenz zwischen lokalen und Referenz-Magnetfeldvariationen nicht sehr hoch ist. Eben dadurch ist auch eine RR-Anwendung mit einer sehr weit entfernten Referenz möglich, wenn nur genügend Daten ins Processing eingehen, wie gezeigt in Neska et al. (2018) zwischen Stationen in Polen und den USA.

4 Ausblick

Der Umkehrschluss zur Botschaft der eingangs erwähnten Bibelstelle würde für das RR-Verfahren bedeuten, dass uns diese Methode, da sie nach 40 Jahren keine Tendenz zeigt zu verschwinden, erhalten bleiben wird. Ich glaube auch, dass sie über ihren gegenwärtigen Gebrauch hinaus noch modifizierte Anwendungen finden kann. Die erfolgreiche Nutzung von Observatoriumsdaten als MT-Referenzen zeigt, dass diese Methode einfach, flexibel und stabil genug ist um sogar (streng genommen) fachfremde Daten zu integrieren und von ihnen zu profitieren. Da wir in einer Zeit leben, in der es immer einfacher wird Zugang zu den verschiedenartigsten Daten zu bekommen, sind weitere Versuche dieser Art wahrscheinlich ein lohnendes Unterfangen.

Danksagung

In dieser Arbeit wurden Daten verwendet, die im Rahmen des Projekts NCN 2014/15/B/ST 10/00789 gemessen wurden. Sie gibt teilweise Gedanken wieder, die im Autorenreferat meiner Habilitation (<https://www.igf.edu.pl/download.php?id=1356>) ausformuliert sind. Diese fand am Institut für Geophysik der Polnischen Akademie der Wissenschaften statt, dessen Budget über die Subvention des Ministeriums für Wissenschaft und Hochschulbildung in Polen ich auch die Möglichkeit zur Teilnahme am 28. Schmucker-Weidelt-Kolloquium verdanke. Meine Stelle wurde während der Vorbereitung dieser Arbeit aus dem EPOS-PL-Projekt (No.POIR.04.02.0014A003/16) finanziert. Ich danke Volker Haak und Szymon Oryński, die das Manuskript vor Einreichung gelesen haben.

Literatur

Bahr, K., & Simpson, F. (2005). *Practical magnetotellurics*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Bartels, J., Heck, N. H., & Johnston, H. F. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 44(4), 411–454.
- Campanyà, J., Ledo, J., Queralt, P., Marcuello, A., & Jones, A. G. (2014). A new methodology to estimate magnetotelluric (MT) tensor relationships: Estimation of Local transfer-functions by Combining Interstation Transfer-functions (ELICIT). *Geophysical Journal International*, 198(1), 484.
- Chave, A. (2012). Estimation of the magnetotelluric response function. In A. D. Chave & A. G. Jones (Eds.), *The magnetotelluric method: Theory and practice* (pp. 165–218). Cambridge University Press.
- Egbert, G. D., & Booker, J. R. (1986). Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophysical Journal International*, 87(1), 173.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., & Clarke, J. (1979a). Error analysis for remote reference magnetotellurics. *Geophysics*, 44(5), 959–968.
- Gamble, T. D., Goubau, W. M., & Clarke, J. (1979b). Magnetotellurics with a remote magnetic reference. *Geophysics*, 44(1), 53–68.
- Jones, A. G., Chave, A. D., Egbert, G., Auld, D., & Bahr, K. (1989). A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation. *Journal of Geophysical Research*, 94 (B10), 14201–14213.
- Larsen, J. C., Mackie, R. L., Manzella, A., Fiordelisi, A., & Rieven, S. (1996). Robust Smooth Magnetotelluric Transfer Functions. *Journal of Geophysical Research*, 124, 801–819.
- Neska, A. (2006). *Remote Reference versus Signal-Noise Separation: A least-square based comparison between magnetotelluric processing techniques*. PhD thesis, Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität Berlin.
- Neska, A., Reda, J., Neska, M., & Sumaruk, Y. (2013). On the influence of DC railway noise on variation data from Belsk and Lviv geomagnetic observatories. *Acta Geophysica*, 61(2), 385–403.
- Neska, A., Reda, J. T., Neska, M. L., & Sumaruk, Y. P. (2018). On the relevance of source effects in geomagnetic pulsations for induction soundings. *Annales Geophysicae*, 36(2), 337347.
- Nowożyński, K., Ernst, T., & Jankowski, J. (1991). Adaptive smoothing method for computer derivation of K-indices. *Geophysical Journal International*, 104(1), 85.
- Oettinger, G., Haak, V., & Larsen, J. C. (2001). Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal–noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif. *Geophysical Journal International*, 146(3), 659–669.
- Ritter, O., Muñoz, G., Weckmann, U., Klose, R., Rulff, P., Rettig, S., et al. (2015). *Permanent Magnetotelluric Reference Station in Wittstock (Datasets)*. GFZ Data Services, (DOI: <http://doi.org/10.5880/GFZ.2.2.2015.001>).
- Schäfer, A., Haupt, L., Brasse, H., & Hoffmann, N. (2011). The North German Conductivity Anomaly revisited. *Geophysical Journal International*, 187(1), 85.
- Schmucker, U. (1984). EM Übertragungsfunktionen aus Beobachtungen mit mehreren gleichzeitig registrierenden Stationen. In *10. Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Grafrath in Oberbayern* (pp. 35–36).
- Shalivahan, & Bhattacharya, B. B. (2002). How remote can the far remote reference site for magnetotelluric measurements be? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B6), ETG 1–1–ETG 1–7.