

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/366008616>

Magnetische Suszeptibilität von Gesteinen im Einzugsgebiet der Thüringischen Saale

Article · March 2022

CITATIONS

0

READS

183

5 authors, including:



Michael Pirrung

Friedrich Schiller University Jena

69 PUBLICATIONS 560 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jörn Engelhardt

geoplan-ingenieure

9 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Neele van Laaten

Friedrich Schiller University Jena

6 PUBLICATIONS 8 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



T. Voigt

Friedrich Schiller University Jena

115 PUBLICATIONS 1,928 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Fluvimag 5.10. France – Grands bassins sédimentaires [View project](#)



GRACE (GRound water absence in Cretaceous Aquifers of Czech Republic and Saxony) [View project](#)

Magnetische Suszeptibilität von Gesteinen im Einzugsgebiet der Thüringischen Saale

MICHAEL PIRRUNG, JÖRN ENGELHARDT, HANNES GROBE, NEELE VAN LAATEN,
THOMAS VOIGT

Stichworte: Petrophysik, Magnetik, Liefergesteine, fluviatile Sedimente, rezent, geogen, anthropogen, Mitteldeutschland, Thüringen

Kurzfassung

Die magnetische Suszeptibilität von rezenten fluviatilen Sedimenten im Saale Einzugsgebiet wird mit derjenigen potentieller Liefergesteine verglichen. Liefergesteine mit hoher Suszeptibilität sind vor allem paläozoische Basaltoide und ihre metamorphen Produkte sowie stratiforme und gangförmige Vererzungen in Schiefergebirgsarealen. Dabei zeigt sich, dass geogene Quellen für die relativ hohe Suszeptibilität der fluviatilen Sedimente nicht allein verantwortlich sein können. Anthropogene Einträge, z.B. von Eisenabrieb des Straßen- und Schienenverkehrs und künstlich hergestellten Baumaterialien und Schlacken historischer Erzgewinnung, sind in vielen Proben nachweisbar. Vermutlich von besonderer Bedeutung sind Flugaschen, die aus Oberböden abgeschwemmt und in den Vorflutern transportiert und abgelagert werden. Dies dokumentiert, wie stark unsere Gesellschaft in fluviatile Systeme eingreift.

Abstract

Rock magnetic susceptibility in the catchment of River Thuringian Saale.

Magnetic susceptibility of recent fluvial sediments of River Saale is compared to that of potential source rocks. Rocks with high susceptibility are especially palaeozoic basaltoids and their metamorphic products as well as stratiform and vein deposits in slate mountain areas. It is evident that geogenic sources alone cannot be responsible for the relatively high susceptibility values of fluvial sediments. Anthropogenic contributions by e.g. abrasion of metallic Fe from vehicles and trains, artificial building materials and scoria from historical ore mining are present in most samples. Fly ashes eroded from topsoils and transported and deposited within the drainage system are probably of high importance. This documents how strongly society impacts on fluvial systems.

Keywords: physical properties, source rocks, recent fluvial sediments, geogenic, anthropogenic, Central Germany, Thuringia

Diese Arbeit ist Herrn Prof. em. Dr. Georg Büchel, vormals Inhaber des Lehrstuhls für Angewandte Geologie am Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität, aus Anlass seines 70. Geburtstags gewidmet.

This article is dedicated to Prof. em. Dr. Georg Büchel, former professorship for Applied Geology at the Institute of Geosciences of the Friedrich Schiller University Jena, on the occasion of his 70th anniversary.

1. Einleitung

In Sedimenten von Flüssen spiegeln sich klimatische und umweltbezogene Verhältnisse und Veränderungen innerhalb ihrer Einzugsgebiete wider. Die Thüringische Saale, nachfolgend nur als Saale bezeichnet, durchfließt zwischen Fichtelgebirge und Elbetal Gesteine der zentraleuropäischen Oberkruste, die seit dem jüngsten Präkambrium gebildet wurden (SEIDEL 2003, BACHMANN, et al. 2008). Spätestens ab dem 10. Jahrhundert intensivierte sich vor dem Hintergrund der Ungarn Einfälle nach der Burgenbauordnung König Heinrichs des Ersten die Besiedlung und landwirtschaftliche Nutzung des Gebietes, siehe u.a. FREY (2010). Intensivierung von Ackerbau und Holzbedarf führte im Mittelalter zur Bildung der Auelehme.

Im Mittelalter begann auch die montangeologische Erkundung der Mittelgebirgsregionen Harz, Thüringer Schiefergebirge und Erzgebirge, siehe u.a. REH & SCHRÖDER (1974), MOHR (1993), ANONYMUS (2008), STEDINGK (2008), SEBASTIAN (2013). Die Auswirkungen der Erzförderung in Bergwerken mit Aufhaltung der Gangart und Aufbereitung der Erze führen auch heute noch zu Schwermetall-Anomalien in fluviatilen Sedimenten Mitteldeutschlands (ZERLING, et al. 2001, GREIF, et al. 2004, VOS & TARVAINEN 2005, MÖLLER & EINAX 2013) und auch der Böden (SCHRAMM, et al. 1997, POHL 2006, HARTMANN, et al. 2014, KARDEL, et al. 2015).

In vielen Fließgewässern Zentraleuropas lagert sich bei normalem Abfluss an Wehren und kleineren Staudämmen Sediment kurzzeitig ab, das erst bei Hochwasserereignissen remobilisiert und stromabwärts auf dem ‚levee‘ zwischen- und in der Überflutungsebene längerfristig abgelagert wird, siehe z.B. JUNGE (2013). Die mittlere bis untere Saale stellt insofern eine Besonderheit dar, dass als Folge der Saale Kaskade der Transport von Feststoffen aus dem Oberlauf stromauf des Eichicht Damms weitgehend unterbunden ist, von extremen Hochwasserereignissen oder wartungsbedingter Absenkung abgesehen. Dadurch werden derzeit Klasten aus Liefergesteinen des Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirges primär durch Zuflüsse wie Loquitz, Schwarza oder Ilm zugeführt, dazu kommt sekundär die Umlagerung aus älteren fluviatilen Terrassenablagerungen der Saale.

Mit diesem Beitrag sollen die bisherigen Untersuchungen im Forschungsprojekt FluviMag, siehe unter <http://angeo.uni-jena.de/de/team/pirrung-michael.html>, im Einzugsgebiet der Saale regionalgeologisch und unter Umwelt-Aspekten eingeordnet

werden. Diese Arbeit stellt eine Ergänzung der erdgeschichtlichen Entwicklung geochemischer Parameter im Saale Einzugsgebiet (PIRRUNG, et al. 2015, PIRRUNG, et al. 2020) um die der magnetischen Suszeptibilität dar mit Schwerpunkt auf triassischen Gesteinen der Thüringer Mulde.

Die Anregung zu diesem Artikel gab Herr Prof. em. Dr. GEORG BÜCHEL mit seiner Frage, was genau denn nun eigentlich den Parameter magnetische Suszeptibilität in fluviatilen Sedimenten bestimmt. Hierzu werden verschiedene Aspekte diskutiert.

2. Parameter Magnetische Suszeptibilität

Im Folgenden soll eine Übersicht über die Grundlagen des gesteinsphysikalischen Parameters magnetische Suszeptibilität, nachfolgend meist mit MS abgekürzt, gegeben werden. Wird Materie in ein äußeres homogenes Magnetfeld gebracht, so wird in dieser ein Magnetfeld proportional zum äußeren Magnetfeld induziert. Der Proportionalitätsfaktor ist die einheitenlose magnetische Suszeptibilität, auch als Magnetisierbarkeit bezeichnet (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Wird die MS auf das Volumen der Materialprobe bezogen, dann wird sie als volumen-spezifische MS, κ , bezeichnet. Häufig wird sie – obwohl einheitslos – im Einheitensystem 10^{-6} SI angegeben. Bei Division durch die Probendichte erhält man die spezifische MS, χ . Da das Volumen bei porösem Lockermaterial oder bei unregelmäßig geformten, ggfs. ebenfalls porösen, Festgesteinsproben nur über z.B. Pyknometermessungen genauer bestimmbar wäre, berechnet man häufig die masse-spezifische MS, indem die an Proben bestimmte MS durch die Masse der Probe dividiert wird (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Die Angabe der MS erfolgt in dieser Arbeit in der Einheit [10^{-9} m³kg⁻¹].

Die Bestimmung der MS mit Sensoren beruht auf Gleichstromfluss in einer Kupferspule, der mit einer geräteabhängigen Frequenz an- und abgeschaltet wird. Die Spule ist Teil eines Oszillators, dessen Frequenz proportional zur MS der Probe ist. Die Kalibration erfolgt an Materie bekannter MS oder an Standardproben, in der Regel wohl mittels Ein-Punkt-Messung. Neben Messungen an einzelnen Gesteinsproben mit entsprechenden Sensoren, siehe z.B. DEARING (2021), sind Messungen von Kernmaterial mit einem MultiSensorCoreLogger, siehe etwa NIESSEN, et al. (2007), und Messungen im Bohrloch möglich, siehe z.B. <https://iodp.tamu.edu/tools/logging/SPECIAL/mss-b.html>. Die Bestimmung der MS bei zwei unterschiedlichen Frequenzen erlaubt die Abschätzung des Gehaltes superparamagnetischer Magnetominerale (DEARING, et al. 1996), mit Dimensionen im Bereich 20 bis 50 nm für Magnetit (WORM 1998, EVANS & HELLER 2003), aus der relativen Frequenzabhängigkeit der MS, definiert als das Verhältnis $\chi_{fd} = (\chi_{460\text{Hz}} - \chi_{4600\text{Hz}})/(\chi_{460\text{Hz}}) * 100$ [%]. Bei der Pedogenese entstehen im Unterboden feine schlecht kristallisierte Eisenoxide bzw. -hydroxide (BLUME, et al. 2010), so dass dieser Parameter in fluviatilen Ablagerungen ein Maß für Unterbodenabtrag als Folge linien- oder flächenhafter Erosion oder auch für Lösung von Fe-Hydroxiden darstellen kann, vergleiche z.B. COLOMBO, et al. (2016).

Ein Vorteil liegt in der schnellen Bestimmbarkeit des Parameters, die eigentliche Messung der MS dauert nur wenige Sekunden. Ein Nachteil der Methode ist, dass magnetische Eigenschaften unterschiedlicher Komponenten die MS einer Probe beeinflussen, die MS stellt daher eine Art Summenparameter dar. Die insgesamt oder zumindest partiell parallele, antiparallele oder nur annähernd parallele Ausrichtung von Elementarmagneten, sogenannter Weiß'scher Bezirke, WB, mit Dimensionen im Bereich etwa um $1 \mu\text{m}$ (EVANS & HELLER 2003), bestimmt die magnetischen Eigenschaften von Materie: 1. ferro- und ferrimagnetisch bei parallel polarisierten WBs, auch ohne Einwirkung eines aktuellen Magnetfeldes; 2. Antiferromagnetisch mit überwiegend parallelen, zum geringeren Teil antiparallelen WBs auch in Abwesenheit eines Magnetfeldes; 3. paramagnetisch mit annähernd paralleler Ausrichtung der WBs nur in Anwesenheit eines äußeren Feldes; 4. diamagnetisch mit entgegengesetzt zu den Feldlinien des anregenden äußeren Feldes orientierten WBs. Feine Partikel, deren Durchmesser unterhalb der von WBs liegen, können eine induzierte Magnetisierung nur über einen kurzen Zeitraum speichern, sie haben superparamagnetische Eigenschaften.

Über den Vergleich mit weiteren Proben ist nur eine Aussage über den relativen Gehalt ferrimagnetischen Materials möglich, in der Regel aber keine Bestimmung einzelner Minerale. In den meisten Gesteinen bestimmen ferrimagnetische Minerale wie z.B. Magnetit und einige wenige paramagnetische Minerale, z.B. Fe-reiche Ortho- oder Klinopyroxene bzw. Hornblende, die MS, während die meisten paramagnetischen Minerale nur gering und diamagnetische sogar negativ zur Gesteins-MS beitragen. Tabellen mit magnetischen Eigenschaften häufiger Minerale und Gesteine zeigen u.a. YOUNG (2019), THOMPSON & OLDFIELD (1986), HUNT, et al. (1995). Von den gesteinsbildenden Mineralen besitzen Magnetit, Hämatit, Ilmenit und Goethit ferrimagnetische bzw. verwandte Eigenschaften; Pyroxene, Amphibole, Biotit, Muskovit, Siderit und Pyrit sind Beispiele für paramagnetische Minerale; Feldspäte, Kalzit, Dolomit, Gips, Quarz, Apatit, sowie Organik und Wasser weisen diamagnetische Eigenschaften auf (DEKKERS 1978). Liegt die MS einer Probe höher als etwa $1000 [10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}]$, so müssen ferrimagnetische Minerale zu einem erheblichen Anteil präsent sein.

In der „klassischen“ Geologie wird die MS, oft zusammen mit anderen gesteinsphysikalischen Parametern, verwendet: 1. zum Spleißen von Parallelkernen bei Forschungsbohrungen, siehe z.B. VAN PEER, et al. (2014); 2. zum beckenweiten Korrelieren, ein Beispiel zeigen SCHMIEDER, et al. (2000); 3. bei der Provenanzanalyse fluviatiler Sedimente, z.B. (MAHER, et al. 2008). Eine zugrundeliegende Annahme dabei ist, dass Wechsel in der Lithologie, beispielsweise Kleinzyklen als Folge von astronomischen Periodizitäten (BACHMANN & KOZUR 2004), meistens auch Änderungen der gesteinsphysikalischen Parameter bedingen (RAUEN, et al. 2000).

In der Angewandten Geologie wird die MS eingesetzt u.a. 1. bei der Überprüfung der Zementation von Bohrungen, siehe u.a. bei ELTSOV & PATZEK (2019); 2. bei der Suche nach Gold Lagerstätten, z.B. bei SHAHRI, et al. (2010); 3. bei der Kartierung industrieller Stäube, siehe die Studie von HANSARD, et al. (2011); oder 4. für den Nachweis von Partikeln aus dem Straßenverkehr in unterschiedlicher Distanz zu Verkehrswegen, siehe u.a. MATZKA & MAHER (1999).

Die Materialforschung setzt MS ein z.B. 1. für die Qualitätskontrolle von Festgesteinen, siehe z.B. WEIGEL, et al. (2019); 2. in Salzen lassen sich mit MS ferrimagnetische Minerale in Konzentrationen nachweisen, die z.B. für die klassische Röntgendiffraktometrie unter der Nachweisgrenze liegen (HEINRICH, R.C., et al. 2014).

Die Angewandte Geophysik setzt die MS vor allem zur Interpretation von im Gelände gemessenen Anomalien der Totalintensität oder von aeromagnetischen Anomalien ein. Die totale Gesteinsmagnetisierung besteht aus einem induzierten und einem remanenten Anteil. Das relative Verhältnis von remanenter zu induzierter Magnetisierung wird als Königsberger Verhältnis, bzw. Koenigsberger ratio, bezeichnet und häufig als etwa 1 angenommen. Beispiele in der Thüringer Mulde zeigen z.B. PRUTKIN, et al. (2017), im Thüringer Schiefergebirge bei Schleiz STEUER, et al. (2020). In der Regel sind solche Untersuchungen mit petrophysikalischen Labormessungen, z.T. einschließlich Bestimmung der MS, verknüpft, für das Beispiel Schleiz siehe COSTABEL & MARTIN (2019).

Die Archäologie kann aus erhöhter MS in thermisch oxidierten Böden Standorte von abgebrannten, überwiegend aus Holz errichteten, Gebäuden rekonstruieren, beschrieben u.a. bei HOELZMANN, et al. (2012).

3. Material und Methoden

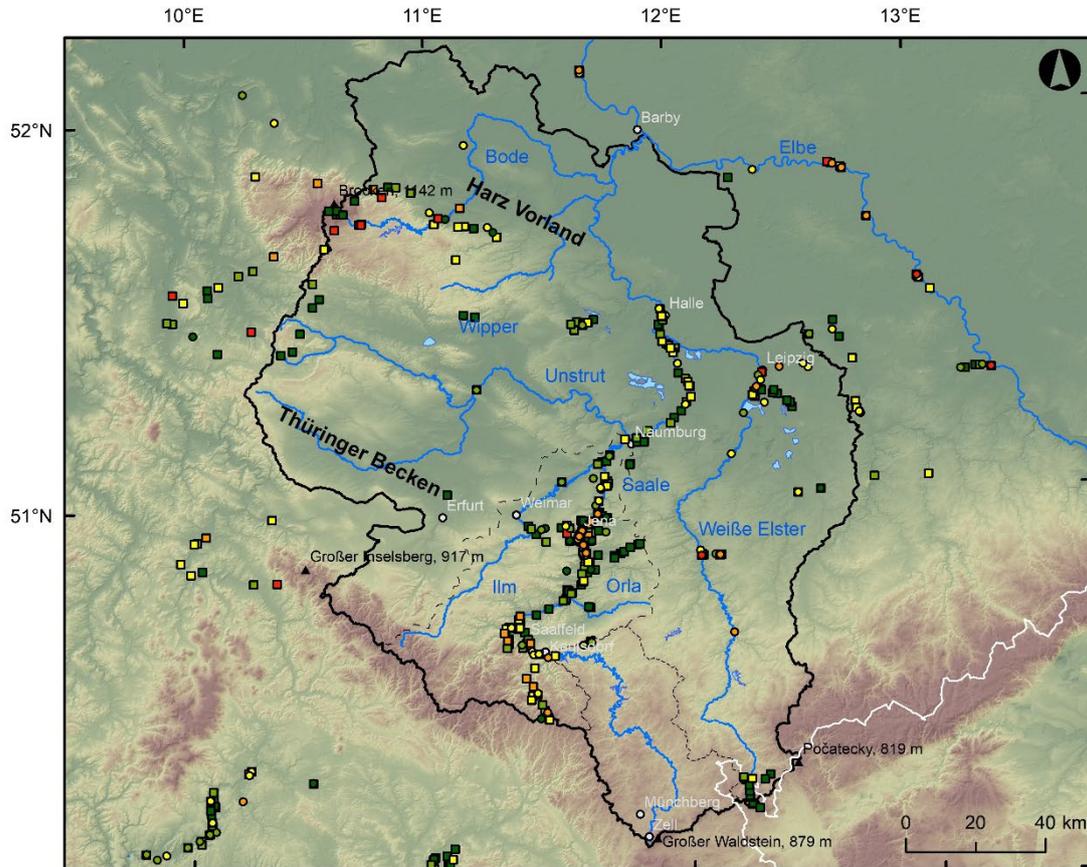
Die Lokationen der Proben rezenter fluviatiler Sedimente im Untersuchungsgebiet zeigt Abb. 1. Die meisten von insgesamt 370 Proben wurden von Loquitz und Mittlerer sowie Unterer Saale im Zeitraum zwischen 2003 und 2021 entnommen und den Kornfraktionen Pelite, 83 Proben, und Sande, 287 Proben, zugeordnet. Nach der untersten Staustufe der Saale Kaskade, dem Eichicht Damm, ist die nahe Lehesten auf dem Kamm des Thüringischen Schiefergebirges entspringende Loquitz der erste größere Zufluss. Daher wird im Folgenden das System Loquitz und Mittel- bis Untersaale, kurz Loquitz-Saale-System, betrachtet, mit einer eigenen Stromkilometrierung als deren Ursprung der Eichicht Damm verwendet wird.

Bei 337 Liefergesteinsproben, aus insgesamt 1180 gemessenen Teilproben, lag der Schwerpunkt auf triassischen Sedimentiten der Thüringer Mulde im Mittleren Saaletal um Jena. Thüringer Schiefergebirge und westliches Erzgebirge wurden nur lokal beprobt. Ergänzend dazu wurde auf zugekaufte Proben Dritter zurückgegriffen, insbesondere auf Erz, Gangart und Nebengestein ehemaliger Bergwerke in den Mittelgebirgsregionen des Einzugsgebietes der Saale. Zur Lokationsbestimmung wurde zusätzlich zu topographischen Karten (GARMIN 2008) die Datenbank Mineralienatlas – Fossilienatlas, <https://www.mineralienatlas.de/>, eingesetzt. Außerdem wurden 9 Proben von Passivstaubsammlern, 19 Proben von Spinnweben in Brückengeländern, 12 Proben von Verkehrswegen und 15 Proben künstlicher Gesteine, teilweise aus der Dissertation VAN LAATEN (2020), untersucht.

Die Einordnung der Liefergesteinsproben zu einer geologischen Einheit erfolgte nach der Geologischen Übersichtskarte 1:200 000 (EMMERT, et al. 1981, WALDECK &

HAMMERSCHMIDT 1986, HOTH, et al. 1994, KRIEBEL, et al. 1998, SEIDEL, et al. 1998, RADZINSKI, et al. 1999, SEIDEL, et al. 2002, FRANKE 2021) sowie den digitalen Kartendiensten von: 1. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Jena bzw. Weimar; 2. Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Halle an der Saale; 3. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen, Dresden bzw. Freiberg.

Die Einstufung des geologischen Alters von Gesteinsproben in Ma erfolgte in der Regel nach MENNING & HENDRICH (2016) über den Mittelwert aus oberer und unterer Grenze der Formation für sedimentäre Gesteine, siehe auch PIRRUNG, et al. (2020), Tab. 1, bzw. aus publizierten radiometrischen Altersdatierungen, u.a. in ZECH, et al. (2010). Für die metamorphen Gesteine im Westerzgebirge (HOTH, et al. 1994), die zumindest teilweise als Äquivalent zur nicht stärker metamorphisierten paläozoischen Schichtfolge des Thüringischen Schiefergebirges angesehen werden (MINGRAM, et al. 2004), können nur ungefähre Alter angenommen werden, zur Diskussion siehe SEBASTIAN (2013). Für die den Henneberg Granit durchschlagenden Lamprophyre in Steinbruch Fischer bei Weitisberga wurde hier ein um etwa eine Ma jüngerer Intrusivalter als für den Plutonit (LOTH, et al. 1997) angenommen, da die Gänge makroskopisch keine Abschreckung bzw. Kornverkleinerung an den Rändern zeigen. Für die Granite des Westerzgebirges wurden radiometrische Angaben aus FÖRSTER, et al. (2011) verwendet. Bei stratiformen und gangförmigen Vererzungen wurde als Alter vereinfachend das des sedimentären bzw. magmatischen Wirtsgesteins, also das Maximalalter, angenommen, um den Rechercheaufwand zu begrenzen. Außerdem dürfte der Zeitpunkt der Vererzung – spätvariskisch, kretazisch, tertiär? - in den meisten Fällen nicht genau bekannt sein. Gesteinsproben, die nicht genauer stratigraphisch zuzuordnen sind, wurden nur für Abb. 1 und 5 verwendet. Die Messprozedur mit dem hier verwendeten BARTINGTON MS2 Susceptibility Meter mit Sensor B lehnt sich an DEARING (2021) an. Als Korrekturfaktor der MS- Rohwerte für die diamagnetischen 12.5 ml NUNC PS Probendosen wurde ein Faktor 0.6 [SI] bestimmt; mit einer SARTORIUS Feinwaage BP 110 S mit 0.1 mg Ablesbarkeit bestimmte Probengewichte sind auf 10 g normiert. Alle Messungen erfolgten in Doppelbestimmung, die Kalibration erfolgte aus Mehrfachmessungen des BARTINGTON Standard 613 mit $3144 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, der etwa 1 Gew.% Magnetit enthält. Kalibrationsfaktoren hierfür lagen tageweise zwischen 0.9933 und 1.0039. Ein Teil der Beprobungen und Messungen erfolgte im Rahmen von Abschlussarbeiten am Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena: EHRSAM (2014), HEILMAIER (2015), HOPPE (2015), LEY (2011) sowie STENDEBACH (2009).



Legende

Fluviatile Sedimente

Masse-spezifische MS

Pelite

- < 200
- 201 - 400
- 401 - 800
- 801 - 1600
- > 1600

Sande

- < 200
- 201 - 400
- 401 - 800
- 801 - 1600
- > 1600

- Einzugsgebiet Saale
- - - Einzugsgebiet Mittlere Saale
- Einzugsgebiet Obere Saale

Abb. 1: Masse-spezifische MS [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] rezenter fluviatiler Sedimente im Saale Einzugsgebiet. Kartengrundlage: European Commission – DG ENTR, 2012, EU-DEM Version 1, verfügbar: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/gisco_Geographical_information_maps/introduction und <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>. Ausgewählte Ortsnamen und Erhebungen nach Google Earth; hellblaue Flüsse nach <http://download.geofabrik.de/europe/germany>, ursprünglich bezogen vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie; Seen ergänzt auf Basis von Luftbildern von Google Earth. Rand des oberirdischen Saale-Einzugsgebietes bestimmt auf Basis der Topographischen Karte von Deutschland 1:25000 (GARMIN 2008).

Kornverteilungen fluviatiler Sedimente wurden für die Grobfraction mittels Nasssiebung ohne Vibration mit Sieben aus Edelstahl der Siebmaschenweiten 63, 125, 250, 500, 1000, 2000 μm und für die Feinfraktion mit einem Aräometer bestimmt in Anlehnung an NEY (1986). Für einen Teil der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse

erfolgte dies im Rahmen der Abschlussarbeiten von BEYER (2008) und MÖLLER (2009). Für MS Messungen erfolgte eine Abtrennung der Fraktion >2 mm mit einem Nylonsieb, bei sandigen Proben wurde die Feinfraktion vor Ort oder im Labor durch mehrfaches Aufschlänmen und Dekantieren der Suspension weitgehend entfernt.

Für die Extraktion von Magnetomineralen kam ein elektromagnetischer Magnetscheider (BOENIGK 1983) nicht in Betracht, da sowohl sandige als auch pelitische ferrimagnetische Körner extrahiert werden sollten. Die Extraktion der magnetischen Fraktion erfolgte an in deionisiertem Wasser suspendiertem Material mit einem Samarium-Neodym Permanentmagneten an einem Fe-Stab in einer Teflonhülle nach DOBENECK, et al. (1987) an neun ausgewählten Proben. Nach dem Abziehen der Hülle und dem Überführen des Extrakts in eine 12.5 ml NUNC Dose wurde mit einem Strahl entionisierten Wassers aus einer Spritzflasche das innen am schräggehaltenen Dosenboden mit außen angehaltenem Magneten haftende Material gespült, um möglichst nur ferrimagnetische Körner zu erhalten. Die nicht gut kontrollierbare Stärke des Wasserstrahls und die Dicke des Extraktes bedingten dabei eine gewisse Unschärfe. Um diese zu verringern wurde das abgespülte Material mehrfach mit dem Fe-Stab durchmustert und daran anhaftendes Material in die Dose zurückgeführt. Zur Vermeidung der Neubildung von Fe-Hydroxiden wurde das Material abschließend dreifach in Ethanol gespült und dann bei 40 °C getrocknet.

Die visuelle Ansprache der magnetischen Fraktion erfolgte unter einem LEICA Zoom 2000 bei 30-facher Vergrößerung, für Aufnahmen wurde eine PANASONIC DMC-TZ71 Digitalkamera auf das Bionokular aufgesetzt.

Die Farben trockener fluviatiler Sedimente wurden mittels Farbtafel nach MUNSELL visuell bestimmt, mit Hue für Farbfeld, value für Helligkeit und chroma für Farbsättigung (ANONYMOUS 1991).

Zusätzlich wurden für Abb. 5 Literaturdaten verwendet, deren Probenlokationen innerhalb (COSTABEL & MARTIN 2019, GIRARD, et al. 2021, HEINRICH, F.C., et al. 2019, KRAUB, et al. 2016), ganz überwiegend innerhalb (QUEITSCH 2016, ZUNDEL, et al. 2019), teilweise innerhalb (DE WALL, et al. 2019) oder etwas außerhalb (KLÖB 2014) des Saale Einzugsgebietes liegen. Für 208 lokalisierte oder annähernd lokalisierbare Proben wurde die masse-spezif. MS nach den Literaturdaten übernommen oder ggfs. aus vol.-spezif. in masse-spezifische MS umgerechnet. Letzteres erfolgte entweder unter Verwendung aufgeführter Dichtebestimmungen, ansonsten unter Annahme der folgenden, an FUCHS (1862), HUNT, et al. (1995) angelehnten, Dichtewerte: Halit & Gipsstein 2.2; Sandstein 2.3; Sandstein-Mergelstein-Wechselfolge & Gips-Mergelstein-Wechselfolge 2.5; Granit 2.62; Kalkstein 2.7; Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge & Phyllit 2.75; Gneis 2.8; „Diabas“ 2.9; Amphibolit 2.95; Dolerit 3.0; die Angaben jeweils in g/cm³.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Fluviale Sedimente

Bei der Farbvariation rezenter getrockneter Sedimente nach MUNSELL zeigen sich keine generellen Unterschiede zwischen Sanden und Peliten. Das Farbspektrum reicht von Hue 2.5Y bis 10YR, der value von 5 bis 7, chroma von 1.5 bis 3. Im Abschnitt der Loquitz dominiert die Farbe 10YR6/2, ebenso im Bereich der Saale zwischen Eichicht Damm und Rudolstadt, also im Bereich paläozoischer, überwiegend grauer, Liefergesteine. Stromab ändert sich bei Eintritt in die Thüringer Mulde die Farbe im Mittel zu 10YR6.5/2, wird also nur geringfügig heller. Der Grund dafür ist vermutlich die Zunahme quarzreicher Sandsteine des Buntsandsteins und weiter nördlich der hellgrauen Karbonate des Muschelkalks. Dabei lässt sich ein Intervall mit Vorherrschen von 7.5YR6/2 zwischen Kriechau nördlich Weißenfels und Leuna, noch vor dem Zufluss der Weißen Elster, beobachten. Die Farbe ist damit geringfügig gelblicher offenbar aufgrund der Zuflüsse aus quarz-reichen altpleistozänen bis saalekaltzeitlichen Sanden und Kiesen über eozänen Sedimenten des Weiße Elster Beckens (KRIEBEL, et al. 1998), die in mehreren Gruben nordöstlich Weißenfels abgebaut werden, siehe z.B. bei <https://www.google.de/earth/>. Vergleicht man die Farben mit der MS, so lässt sich tendenziell bei etwas dunkleren Proben mit zugleich niedrigerem chroma eine höhere MS beobachten, was auf Anreicherung von Magnetomineralen bei hoher MS hinweist. Dies trifft nur auf sandige Proben zu und die Korrelation ist nicht signifikant.

Die meisten Körner in den am Ufer beprobten rezenten Sedimenten der Saale um Jena, zwischen der Mündung der Leutra bei Maua im Süden und der Brücke Porstendorf-Golmsdorf im Norden, fallen in die Fein- bis Mittelsandfraktion (Abb. 2).

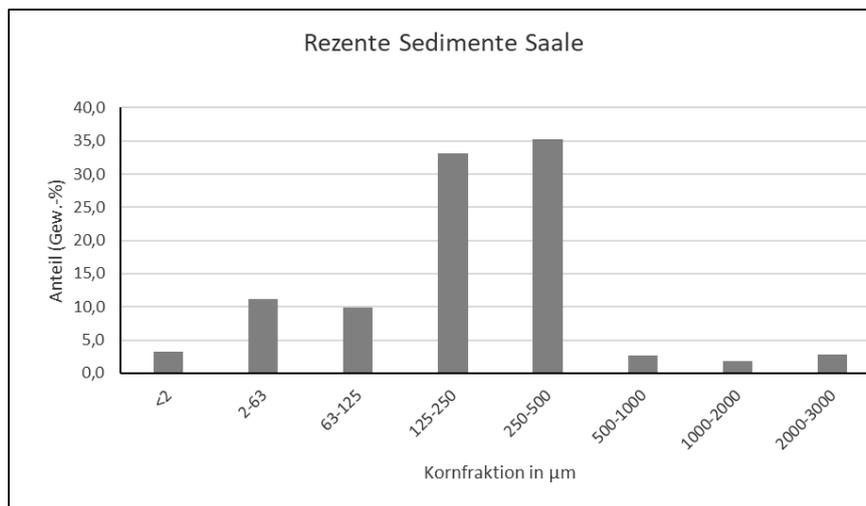


Abb. 2: Gemittelte Kornfraktionen für rezente Sande der Saale um Jena; N = 26. Für 12 Proben, bei denen nur die Fraktion <63 µm bestimmt wurde, wurde der Anteil der Fraktion <2 bzw. 2-63 µm über das mittlere Verhältnis beider Fraktionen in den übrigen 14 Proben abgeschätzt. Die Fraktion <125 µm dürfte überwiegend als Suspension, die Fraktion 125-500 µm springend bis rollend und die Fraktion 500-3000 µm rollend transportiert werden.

Dies erklärt sich bei meist ufernaher Beprobung durch die Ablagerung von ‚levee‘ Sanden am Rand des Gerinnes bei nachlassenden Hochwasserereignissen. In 26 untersuchten Proben fluviatiler Sedimente ist ein Zusammenhang zwischen dem Median der Korngröße und der horizontalen Distanz stromab bzw. stromauf eines Wehres nicht erkennbar, ohne Abbildung, allerdings nimmt die Sortierung, berechnet nach TRASK in TUCKER (1985), mit zunehmender Distanz stromab eines Wehres zu, bei linearer Regression ist hierbei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.41$, ohne Abbildung.

Ein genereller Zusammenhang zwischen der MS oder der Frequenzabhängigkeit χ_{fd} mit dem Median oder der Sortierung der Sedimente der Saale ist nicht erkennbar, ohne Abbildung. Die MS von Kornfraktionen der rezenten Sedimente der Saale um Jena zeigt Abb. 3. Die zweigipflige Verteilung der MS mit Maxima im Bereich Silt und Mittel- bis Grobsand und einem dazwischen liegenden Minimum bei 125 bis 500 μm weist auf unterschiedliche Zusammensetzung als Folge von Variation der Transportlänge und Herkunft der Körner hin:

- die stark magnetisierbare Grobfraction könnte zumindest zum Teil aus dem Eintrag kleiner Zuflüsse in der Umgebung der Probenahme Lokationen, aus der Gerinne Befestigung und beim Passieren von Siedlungen aus anthropogenen Komponenten, wie z.B. Backstein- und Ziegelbruch oder Schrottrfragmente, stammen;
- die noch etwas stärker magnetisierbare Feinfraction leitet sich ab entweder aus Ferntransport paläozoischer Gesteine erhöhter MS aus dem Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge, siehe Abb. 4, aus dem Eintrag feinkörniger Magnetominerale als Folge des Abtrags von Ober- und teilweise auch Unterböden oder aus der mechanischen Kornverkleinerung anthropogener Komponenten bei längerem Transportweg;
- für die Fein- bis Mittelsandfraktion mit geringer MS kommt vor allem der Mittlere Buntsandstein zwischen Rudolstadt und Jena, der ganz überwiegend feldspatführende Quarzsandsteine dieser Fraktion enthält, in Betracht (SEIDEL, et al. 2002), da sowohl Quarz als auch Feldspäte diamagnetisch sind, also einen negativen Beitrag zur MS leisten.

Im Vergleich zu rezenten fluviatilen Sedimenten Zentraleuropas (PIRRUNG 2021e) liegt der Median der MS sandiger Proben der Saale im ähnlichen Bereich, derjenige pelitischer Proben jedoch etwa doppelt so hoch, siehe Tab. 1. Der Grund für letzteres liegt entweder in einem erhöhten Gehalt an feinkörnigen Magnetomineralen der Liefergesteine im Einzugsgebiet der Saale oder in stärkerer anthropogener Beeinflussung.

Die zur Schwermineralfraktion (CORRENS 1941) gehörenden Magnetominerale sollten aufgrund ihrer höheren Dichte eine größere hydrodynamisch effektive Korngröße (BLACK, et al. 2007) aufweisen als die meisten der unter den jeweils herrschenden Strömungsbedingungen transportierten Silikate. Bei springendem oder rollendem

Transport sollten Silikat-Körner daher in einer größeren Fraktion vorliegen als gleichzeitig transportierte Schwer- und Magnetminerale. Oder anders formuliert: In einer abgetrennten Kornfraktion können Körner der silikatischen, dia- oder paramagnetischen Fraktion einerseits und der zumindest teilweise ferrimagnetischen Schwermineral Fraktion andererseits aus verschiedenen Transportprozessen resultieren.

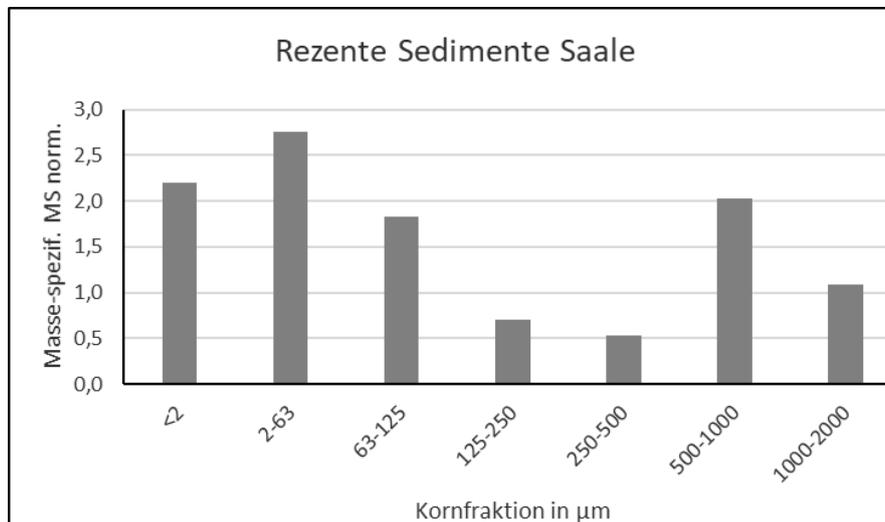


Abb. 3: Mediane der masse-spezif. MS dividiert durch die masse-spezif. MS der Gesamtfraction fluviatiler Sedimente der Saale aus Jena und näherer Umgebung, um lokationsbedingte unterschiedliche absolute Gehalte an Magnetomineralen auszugleichen und relative Gehalte in den Proben wiederzugeben; N = 11 bis 25; verwendet wurden in Abb. 2 und 3 nur Messungen an Fraktionen mit >1 g Gewicht.

Tab. 1: Mediane masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] und Frequenzabhängigkeit χ_{fd} [%] rezenter fluviatiler Sedimente. Aus Kornfraktionen bestimmte Mediane wurden nicht nach dem relativen Anteil in der Probe gewichtet. N = Probenanzahl.

Fluss bzw. Einzugsgebiet	sandige Sedimente				pelitische Sedimente			
	MS	N	χ_{fd}	N	MS	N	χ_{fd}	N
Saale zwischen Eichicht und Halle, Gesamtprobe	261	100	1.7	78	534	9	2.3	9
Saale zwischen Eichicht und Halle, Fraktion $<63 \mu$ bzw. $63-2000 \mu$ abgesiebt	248	113			833	26		
Saale Gesamtproben und Fraktionen	254	213			800	35	1.9	28
Saaleinzugsgebiet ohne Saale	193	186	1.4	86	334	55	2.6	30
Zentraleuropa ohne Saale Einzugsgebiet	286	564	1.1	205	388	155	2.3	58

Das Schwermineralspektrum holozäner, pleistozäner und präquartärer Grobklastika der Saale in Kiesgruben zwischen Rudolstadt und südlich Bernburg wurde von ALLENBERG,

et al. (2012) beschrieben. Nach Tabelle 5 in ALLENBERG, et al. (2012) läge in absolute Gehalte der Gesamtfraktion umgerechnet der mediane Schwermineralgehalt bei etwa 0.01 Gew.-%, der Magnetit- + Titanomagnetit-Gehalt bei etwa 0.0006 Gew.-%. Eigene Messungen an 22 Proben natürlicher Magnetite unterschiedlicher Herkunft ergaben einen Median von 351000 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Unter Vernachlässigung dia- und paramagnetischer Anteile ergäbe sich daraus eine mittlere MS rezenter Grobklastika der Saale von nur etwa 2 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Da die MS Werte für rezente Sande der Saale aber wesentlich höher liegen, muss auch der Magnetit- und Titanomagnetit-Gehalt für diese deutlich höher sein als nach Angaben von ALLENBERG, et al. (2012) für ältere fluviatile Sedimente berechnet. Für die Kiessande der Elbe in Sachsen-Anhalt geben ALLENBERG, et al. (2012): S. 120, einen höheren mittleren absoluten Schwermineralgehalt von etwa 0.1 Gew.% an. Die MS von 10 Proben rezenter sandiger Ablagerungen der Elbe im Bereich Sachsen-Anhalts, entnommen im FluviMag Projekt, ergab mit einem Median von 443 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] auch tatsächlich einen höheren Wert als für rezente Sande der Saale mit etwa 250 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] nach Tab. 1.

Der Anteil der extrahierten magnetischen Fraktion von neun rezenten sandigen und pelitischen Proben aus Loquitz und Saale lag im Mittel mit 0.26 Gew.-% der Ausgangsprobe deutlich über den Schwermineralgehalten älterer Sedimente in ALLENBERG, et al. (2012). Die MS des Extrakts lag im Mittel mit 116500 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] nur etwa ein Viertel so hoch wie die MS für Magnetit, siehe oben. Der Grund hierfür ist unter dem Binokular erkennbar: In allen Extrakten sind feinkörnige graue, rötliche oder ockerfarbene Lithoklasten präsent, die den größten Anteil darstellen. Offensichtlich werden also nicht nur einzelne ferrimagnetische Körner extrahiert, sondern vor allem Klasten mit ferrimagnetischen Körnern. In Abb. 4 zeigt sich, dass wie zu erwarten die MS mit dem extrahierten Anteil der ferrimagnetischen Fraktion positiv korreliert, die Streuung resultiert aus dem unterschiedlichen Anteil von Lithoklasten.

In sandigen Proben der Saale liegt der Median für die Frequenzabhängigkeit der MS, χ_{fd} , erwartungsgemäß mit 1.7 % etwas niedriger als in pelitischen Proben mit 2.3 %, siehe Tab. 1. Beide Werte sind durchaus ähnlich zu χ_{fd} Werten der Zuflüsse im Einzugsgebiet der Saale und auch denen in rezenten Flussablagerungen Zentraleuropas. Sie sprechen für einen insgesamt nur geringen Anteil feiner superparamagnetischer Magnetominerale, vergleiche z.B. DEARING, et al. (1996). Der maximale Wert von 7.4 % wurde an einem pleistozänen Sand der Gera bei Stotternheim, nordöstlich Erfurt, beobachtet. Im Einzugsgebiet der Gera liegen Laven und Pyroklastika des Rotliegenden im Thüringer Wald, deren Klasten zumindest teilweise deutlich erhöhte Gehalte feinstkörniger Magnetite enthalten müssen. Minimale Werte um 0 % treten in mehreren Proben auf. Weder für Sande noch Pelite korreliert die MS mit χ_{fd} , ohne Abbildung.

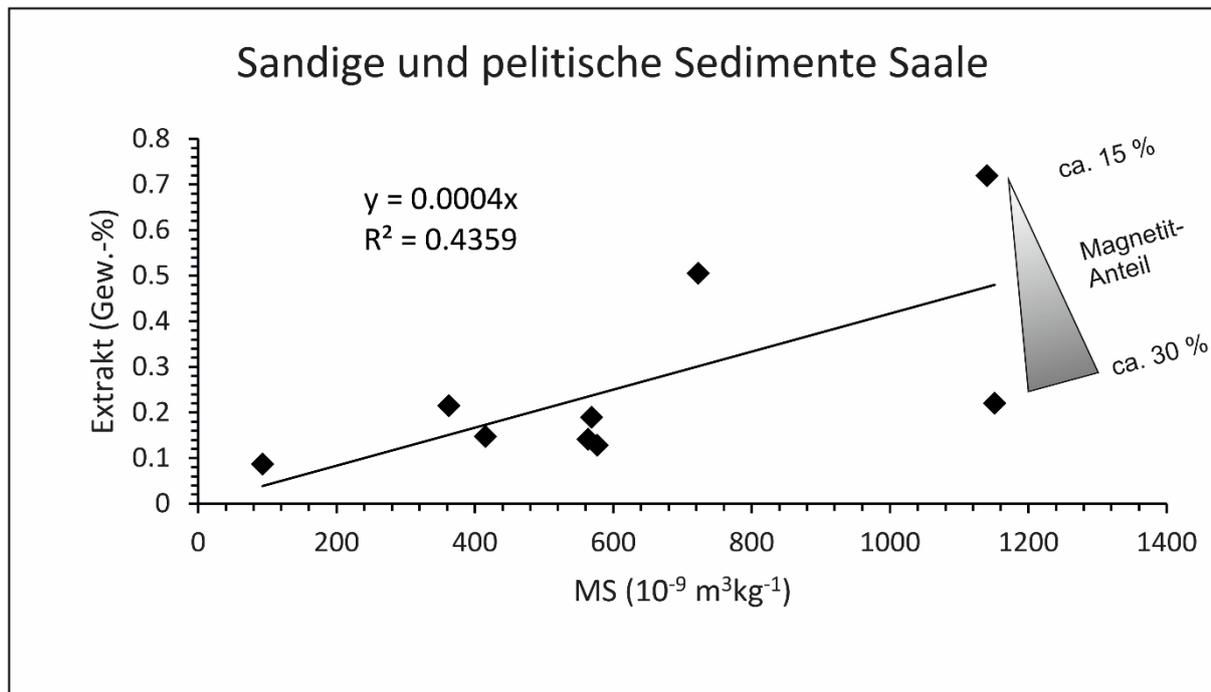


Abb. 4: Masse-spezif. MS der Gesamtfraction aufgetragen gegen extrahierte Masse ferrimagnetischer Komponenten. Die Trendlinie wurde unter Vernachlässigung diamagnetischer Effekte von Lithoklasten durch den Ursprung gezwungen, mit Angabe des Bestimmtheitsmaßes R^2 bei linearer Regression. Das Dreieck zeigt schematisch die generelle Zunahme von Lithoklasten durch helleren Grauton an, daneben Angaben zum - nach Binokular-Auswertung geschätzten - Magnetit-Anteil der Extrakte.

4.2. MS potentieller Liefergesteine

Stellt man die masse-spezifische MS von Liefergesteinen im Saale Einzugsgebiet nach Lithologie-Gruppen getrennt dar, siehe Abb. 5, so sind die Ergebnisse für andere Gebiete vergleich- bzw. im Idealfall übertragbar. Gesteine besonders hoher MS sind Basaltoide, stratiforme oxidische Erze und oxidische Gangvererzungen.

Gesteine besonders niedriger MS sind Sandsteine und Kalksteine sowie Gipse. Vergleicht man die Werte von Abb. 5 mit Angaben zur minimalen und maximalen masse-spezifischen MS in HUNT, et al. (1995), so liegen erstere in allen Fällen im Schwankungsbereich, der allerdings sehr groß ist. So liegen nach HUNT, et al. (1995) z.B. Granite im Bereich 0 bis 19000 [10^{-9} m³kg⁻¹], während in dieser Studie beprobte Granite, 14 Proben, MS Werte zwischen 0.1 und 1124 [10^{-9} m³kg⁻¹] und einen Median von 73 [10^{-9} m³kg⁻¹] aufweisen.

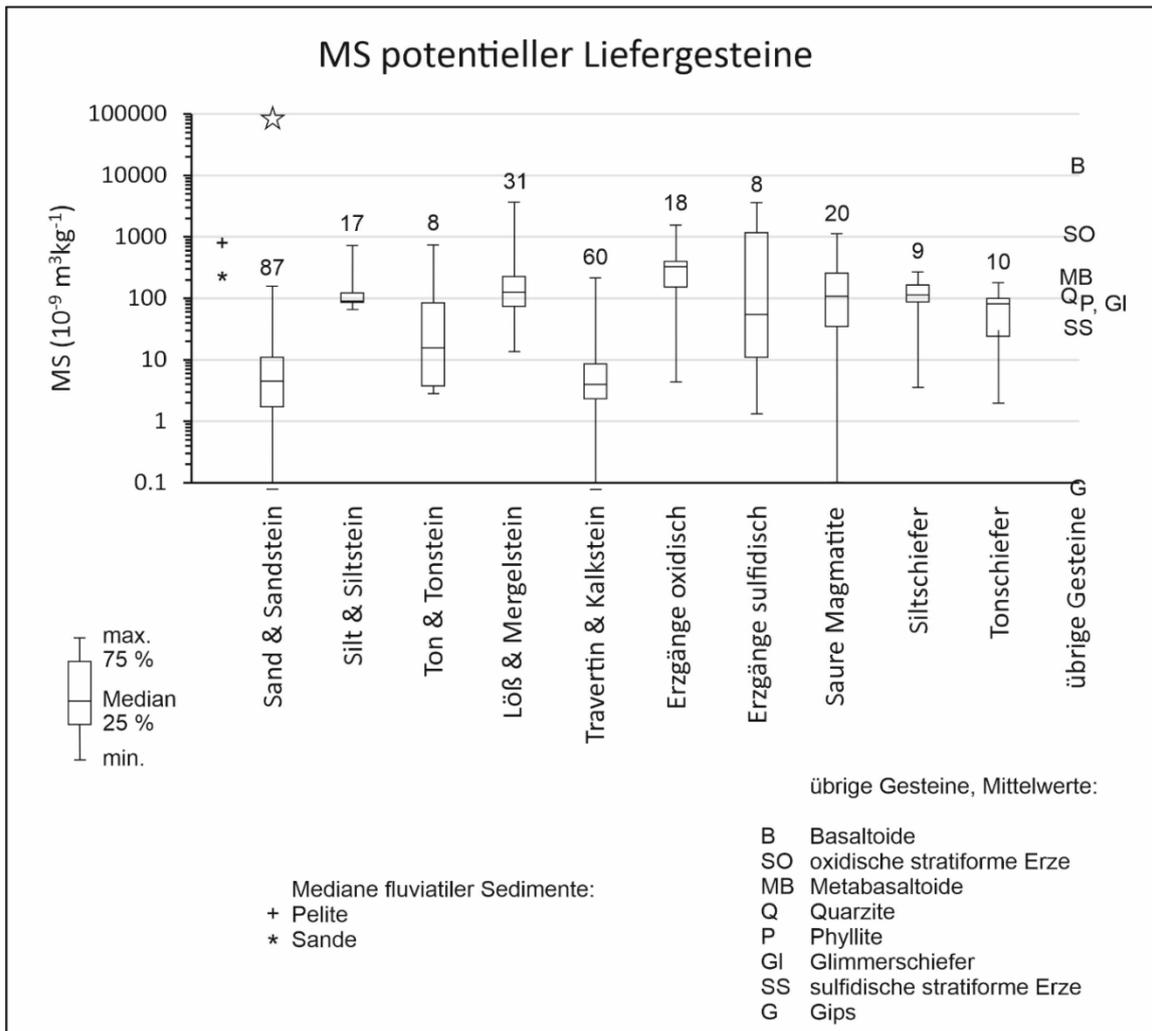


Abb. 5: Box-Whisker Plots der masse-spezif. MS der Liefergesteine im Einzugsgebiet der Saale nach grundlegenden Lithologien klassifiziert. Zahlen über den Kästen geben die Anzahl der untersuchten Proben wieder. Für Gesteine, bei denen weniger als 5 Proben untersucht wurden, sind Mittelwerte angegeben. Mit dem Stern ist eine Probe aus dem oolithischen Magnetitquarzit der Grube Schwarze Crux bei Suhl dargestellt. Bei Sandsteinen, Kalksteinen und Gipsen liegen minimale Werte im negativen Wertebereich aufgrund der Dominanz diamagnetischer Körner. Für rezente fluviatile Sedimente der Mittleren und Unteren Saale sind zum Vergleich die Mediane aus Tab. 1 angegeben.

Erhöhte Gehalte an Magnetomineralen sind für Gesteine hoher MS zu erwarten (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Diese stellen daher potentiell eine geogene Quelle für Magnetominerale fluviatiler Sedimente dar, die durch Verwitterung, Erosion, Transport und Deposition von Material dieser Liefergesteine entstanden sind. Bisher untersuchte potentielle Liefergesteine, von denen die MS mit Werten $>800 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ höher liegt als der Median rezenter pelitischer Sedimente im Saale Einzugsgebiet, siehe Tab. 1, fallen in die folgenden Gesteinseinheiten: im Einzugsgebiet der Ilm eine von drei Proben aus dem Oberen Gipsmergel und eine von drei Proben aus dem Grauen Steinmergel des Mittleren Keupers in der INFLUINS Bohrung (KUNKEL, et al. 2015) im zentralen Bereich der Thüringer Mulde sowie zwei Proben mit Manganvererzung im Oehrenstocker Ignimbrit der Gehren Gruppe des Unterrotliegenden; im Einzugsgebiet der Schwarza eine Probe ordovizischer Fe-Oolithe der Gräfenthal Gruppe in der

Erzgrube Wittmannsgereuth auf der Südostflanke des Schwarzburger Sattels (FALK & WIEFEL 2003); im Einzugsgebiet der Orla der permokarbone Basaltoid des Limbergs nordwestlich Moxa in der Ziegenrück-Teuschnitzer Mulde (MEINEL 2003); im Einzugsgebiet der Weißten Elster ein neogener Basalt bei Bad Elster (PFEIFFER & PILOT 1974) und ein Phyllit (HOTH, et al. 1994), vermutlich eine Meta-Aschenfalllage, der ordovizischen Frauenbach-Gruppe (SEBASTIAN 2013) südlich Bad Elster; im Einzugsgebiet der Bode im Unterharz ein Kulmkieselschiefer vom Schävenholz bei Elbingerode mit Mn-Vererzung (MOHR 1993) und eine Probe mittel- bis oberdevonischer Kalzit-Gänge mit Pyrit-Vererzung der Eisenerzgrube Büchenberg (SCHEFFLER, et al. 2002); im Einzugsgebiet der Oberen Saale oberkarbonische Lamprophyre und sichtbar mit Sulfiden vererzter Granit sowie eine Probe eines nicht erkennbar vererzten Granits am Henneberg bei Weitisberga, vergleiche HEIDE & KREHER (1993), LOTH, et al. 1997, MEINEL 2003), und ein Siderit-Quarz-Gang in der ordovizischen Phycoden-Gruppe bei Bad Lobenstein, siehe auch (REH & SCHRÖDER 1974). Bis auf den neogenen Basalt und die zwei keuperzeitlichen Mergelsteine fallen alle übrigen 11 Proben in das Paläozoikum, siehe auch Abb. 6. Mit zahlreichen Fotos ausgestattete Darstellungen über Gesteine des Saxothuringikums finden sich bei LINNEMANN (2004), für den Harz siehe u.a. LIEBMANN (2018), für den Thüringer Wald z.B. LÜTZNER, et al. (2022) und für das Erzgebirge u.a. SEBASTIAN (2013). Die Verbreitung ausgewählter Gesteine mit hoher MS ist in Abb. 7 dargestellt. Da in dieser Studie nur eine begrenzte Probenanzahl gemessen werden konnte, soll nachfolgend die regionale Literatur zur MS ergänzend berücksichtigt werden.

Insbesondere mafische Magmatite weisen hohe Fe- und Ti-Gehalte, siehe z.B. DIETZE, et al. (2011), und damit in der Regel auch erhöhte Gehalte an ferrimagnetischen Mineralen, auf. Neogene Basalte gibt es neben dem erwähnten Vorkommen südlich Bad Elster nur noch in einem Vorkommen von etwa 2 km Durchmesser im westlichen Erzgebirge zwischen Kirchberg und Reichenbach im Einzugsgebiet der Oberen Weißten Elster, damit sind diese Gesteine nur lokal von Bedeutung für fluviatile Sedimente im Einzugsgebiet der Saale. Permokarbone Basaltoide sind etwas weiter verbreitet im Thüringer Wald um Ilmenau im Einzugsgebiet der Ilm (SEIDEL, et al. 1998), sowie im erwähnten Vorkommen bei Moxa im Einzugsgebiet der Orla, dazu kommen Vorkommen in Ostthüringen südlich Schmölln im Einzugsgebiet der Pleiße bzw. der Weißten Elster (RADZINSKI, et al. 1999). Oberkarbonische Lamprophyre treten in der weiteren Umgebung des Henneberg Granits im Bereich der Nordwest-Südost streichenden sogenannten Frankenwälder Querzone, oder auch Thüringer Granitlinie (MEINEL 2003), im Einzugsgebiet der Oberen Saale auf. Auf geologischen Übersichtskarten sind sie aufgrund geringer Ausstrichbreite nicht verzeichnet und sie spielen als Quelle von Magnetomineralen keine besondere Rolle.

Für mafische Vulkanite liegen bei vier untersuchten feinkörnigen mittel- bis oberdevonischen Meta-Basalten die MS Werte unter 340 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], siehe Abb. 5. Der Grund für niedrigere Werte gegenüber postkarbonischen Basalten könnten autohydrothermale Mineralumwandlungen bei der Platznahme (OLIVA-URCIA, et al. 2011) oder hochtemperierte Fluide während der variskischen Orogenese sein (SEBASTIAN 2013). Hier wird der Begriff Meta-Basalt bevorzugt und nicht die in

geologischen Karten häufig verwendete Bezeichnung „Diabas“, da nach LE MAITRE, et al. (2002) nach heutiger Nomenklatur Diabas mit Mikrogabbro gleichzusetzen ist, was für viele sogenannte „Diabase“ nicht zutrifft. Der Median der MS Werte von neun oberdevonischen „Diabas“-Vorkommen des Münchberger Massifs um Hof im Einzugsgebiet der Obersaale oder wenig außerhalb (DE WALL, et al. 2019), von volumenspezifischer in masse-spezifische MS bei Annahme einer Dichte von 2.9 g/ccm umgerechnet, liegt bei 324 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$], wobei Einzelwerte bis zu 19000 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] betragen. Daneben zeigen Meta-Pyroklastika und Meta-Laven (DE WALL, et al. 2019) MS Werte bis zu umgerechnet 10250 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$]. Bezogen auf die heutige Ausbissfläche sind mittel- bis oberdevonische Meta-Basalte im Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge am weitesten verbreitet. Sogenannte „Schalsteine“ treten auf der Nordwestflanke des Bergaer Sattels in schmalen Streifen zwischen Lichtenberg und Zeulenroda und in weiter Verbreitung auf der Südostflanke zwischen Selbitz und Reichenbach im Vogtland im Einzugsgebiet von Oberer Saale und Weißer Elster auf (EMMERT, et al. 1981, RADZINSKI, et al. 1999). Lokal könnten in waldarmen Einzugsgebieten durch rasches Einschneiden der Vorfluter angeschnittene frische Bereiche von „Diabas“ und assoziierten basischen Meta-Vulkaniten zu erhöhter MS der Sedimente der Vorfluter beitragen.

Im Schorgasttal bei Wirsberg, in der Randamphibolit-Serie der Münchberger Gneismasse (WURM 1961), wenige Kilometer südlich des Saale-Einzugsgebiets gelegen, wurde an einem grobkörnigen Amphibolit ein Wert von 290 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] gemessen, was in etwa dem Median von bei Annahme einer Dichte von 3.0 g/ccm berechneten masse-spezifischen MS Werten von DE WALL, et al. (2019) entspricht. Die MS des Eklogits vom Weißenstein bei Stammbach, ein Hochdruck-Meta-Basalt (STETTNER, et al. 1960, GEIGNER & KEIL 2002), liegt mit < 260 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] relativ niedrig. Amphibolite finden sich in relativ schmalen Arealen der Rand-Amphibolit-Serie am Nordostrand der Münchberger Gneismasse (EMMERT, et al. 1981, MESCHÉDE 2015), im Einzugsgebiet der Oberen Saale zwischen Schwarzenbach an der Saale und Oberkotzau bei Hof. Eklogit-Vorkommen der Hangendserie im Nordosten der Münchberger Gneismasse sind noch kleinräumiger. Damit können diese Gesteine einen geringen Beitrag zur MS fluvialer Ablagerungen der Oberen Saale liefern, ihre Abtragungsprodukte dürften aber zum überwiegenden Teil in der Saale Kaskade festgelegt werden.

Stratiforme oxidische Fe-Erze, siehe Abb. 6 und Abb. 7, kommen in mehreren stratigraphischen Niveaus mit Mächtigkeiten bis 50 m vor: 1. zwischen der ordovizischen Frauenbach- und Phycodengruppe der Untere und Obere Magnetitquarzit, beide Horizonte sind im Nordostbereich der Südostflanke des Schwarzbürger Sattels, südwestlich Saalfeld im Einzugsgebiet der Schwarza ausgebildet und beide Horizonte treten auch im Kern des Bergaer Sattels zwischen Eula und Kleinkundorf im Einzugsgebiet der Oberen Weißen Elster auf (FALK & WIEFEL 2003); 2. der Untere und vor allem der Obere Erzhorizont der ordovizischen Gräfenthalgruppe mit oolithischen Fe-Erzen ist zwischen Schmiedefeld und Saalfeld im Einzugsgebiet der Schwarza verbreitet (SEIDEL, et al. 1998, SEIDEL, et al. 2002). Außerdem treten Fe-Erze im mitteldevonischen Vulkankomplex am Büchenberg bei

Elbingerode im Unterharz (LUTZENS 1972, SCHEFFLER, et al. 2002) sowie in Ton- und Mergelsteinen des Lias im Subherzyn auf (BACHMANN, et al. 2008). Den höchsten in dieser Studie gemessenen masse-spezif. MS Wert zeigte eine Probe eines massigen Magnetitskarns aus der Grube Schwarze Crux bei Suhl aus der kambrischen Vesser Gruppe (BANKWITZ 2003) mit $85000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$. Diese Probe liegt im Einzugsgebiet der Werra, sie wurde hier stellvertretend für andere Magnetitminerale betrachtet. Im Ausstrichbereich stratiformer Erze ist aufgrund der, in Abb. 5 dargestellten, hohen MS Werte mit einem bedeutenden Eintrag von Magnetomineralen in Vorfluter zu rechnen. Sulfidische stratiforme Erze des Kupferschiefers sind magnetisch ohne Bedeutung.

Gangförmige Vererzungen finden sich im Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge, Erzgebirge und Harz an vielen Lokationen, eine Auflistung findet sich u.a. bei (REH & SCHRÖDER 1974, STEDINGK, et al. 2002, STEDINGK 2008). In Abb. 7 sind Lokationen historischer Bergwerke eingetragen, die mit Ausnahme des Ronneburger Horstes nahezu ausschließlich in den Mittelgebirgsarealen aufgeföhren wurden. Aufgrund erhöhter MS Werte gangförmiger Erze könnten in Tälern angelegte Halden des Erzbergbaus dort lokal von Bedeutung sein für eine erhöhte MS rezenter fluviatiler Sedimente.

Neben oxidischen und sulfidischen Erzen können durch Mineralumwandlungen beim Rösten der Roherze abhängig von Fe-Gehalt und Sauerstoffzufuhr auf Halden des historischen und neuzeitlichen Erzbergbaus noch deutlich höhere MS Werte auftreten: Vierzehn industriell erzeugte Schlacken der Verhüttung von Kupferschiefer im Mansfelder Revier zeigten eine MS bis $3500 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$.

Saure Magmatite haben in der Regel nur geringe Fe-Gehalte und meist niedrige bis mittlere MS Werte (HUNT, et al. 1995, THOMPSON & OLDFIELD 1986), was auch für das Saale Einzugsgebiet zutrifft, siehe Abb. 5. Auch für von DE WALL, et al. (2019) untersuchte Granitvorkommen des Fichtelgebirges liegen berechnete masse-spezifische MS Werte mit einem Median von $19 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, bei Annahme einer Dichte von 2.7 g/ccm , niedrig. Granite sind auf den Bereich Henneberg und Sormitztal im Einzugsgebiet der Oberen Saale sowie auf das Fichtelgebirge und westliche Erzgebirge zwischen Waldstein und Bad Brambach (DE WALL, et al. 2019) in den Einzugsgebieten der Oberen Saale und Weißen Elster sowie Brocken und Ramberg Granite im Einzugsgebiet der Bode beschränkt. Bis auf vererzte Zonen sind saure Magmatite keine Quelle für Magnetominerale fluviatiler Sedimente.

Sedimentäre Anreicherungen von Schwermineralen im Einzugsgebiet der Saale wurden beschrieben aus einigen Tonsteinen des Oberen Buntsandsteins (VOIGT 2007) sowie aus Grobklastika des Eozäns (MIGALK, et al. 2019). Diese Ablagerungen können nur lokal von Bedeutung für die MS der Sedimente der Vorfluter sein.

Betrachtet man die zeitliche Verteilung der MS von Liefergesteinen in Abb. 6, so fällt zunächst die relativ große Streuung von Werten auf. Ein Zeitabschnitt insgesamt hoher MS Werte ist offensichtlich der Übergang Karbon-Perm, in dem das Maximum magmatischer Aktivität in Thüringer Wald, Erzgebirge und Harz liegt. Auf der geomagnetischen Karte von Deutschland (GABRIEL, et al. 2010) sind großräumige Bereiche positiver Anomalien insbesondere im nordwestsächsischen Vulkanitgebiet mit

– zumindest in Oberflächennähe ganz überwiegend sauren – permischen Vulkaniten um Leipzig (FÖRSTER, et al. 2011) evident.

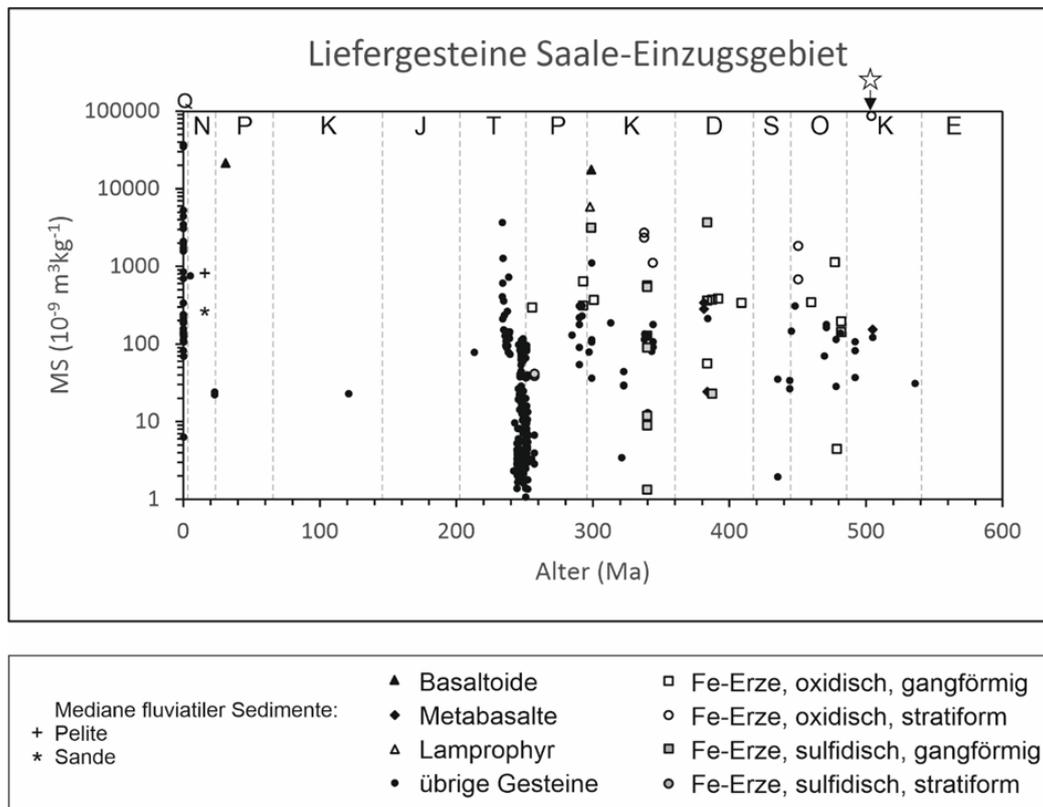
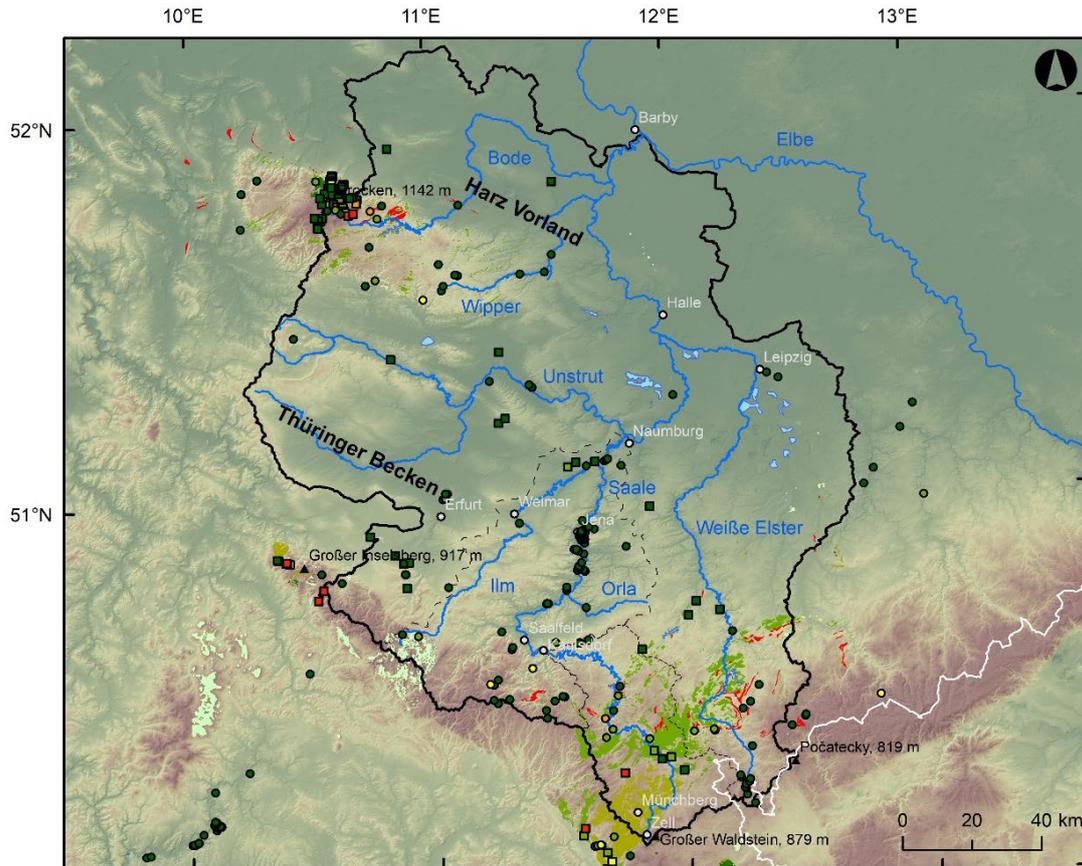


Abb. 6: Masse-spezif. magnetische Suszeptibilität gegen Alter der Liefergesteine dargestellt. Der Stern weist auf das Magnetitierz der Grube Schwarze Crux hin. Erdgeschichtliche Perioden sind abgekürzt, Einteilung nach (MENNING & HENDRICH 2016). Für rezente fluviatile Sedimente der Mittleren und Unteren Saale sind zum Vergleich wieder die Mediane aus Tab. 1 angegeben.

In Abb. 8 wird ein zusammengesetztes Profil der masse-spezifischen MS aus Proben im Saaletal für den Abschnitt Buntsandstein und Muschelkalk und in der Bohrung INFLUINS bei Erfurt für den Abschnitt Keuper gezeigt. Im höheren Teil des Unteren Buntsandsteins und im Mittleren Buntsandstein zeigen sich in Mittelsandsteinen mit MS Werten um $20 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ niedrige, in Feinsandsteinen mit Werten bis etwa $100 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ generell etwas höhere Werte der MS auf. Der insgesamt deutlich Ton-reichere Obere Buntsandstein zeichnet sich durch geringfügig höhere Werte um $50 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ aus. Die Karbonate des Unteren Muschelkalks liegen mit einer Ausnahme deutlich niedriger. Dieser Ausreißer mit $99 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ tritt in einer einen Zentimeter mächtigen grünen tonigen Schicht an der Basis der Unteren Oolithbank im Profil am Jenzig (VOIGT & LINNEMANN 1996) bei Jena auf, bei der es sich um eine alterierte vulkanische Asche handeln könnte. Im Mittleren Muschelkalk dürften die Werte bei Residualböden wieder etwas höher liegen.



Legende

Liefergesteine Literatur

Masse-spezifische MS

- < 200
- 201 - 400
- 401 - 800
- 801 - 1600
- > 1600

Liefergesteine gemessen

Masse-spezifische MS

- < 200
- 201 - 400
- 401 - 800
- 801 - 1600
- > 1600

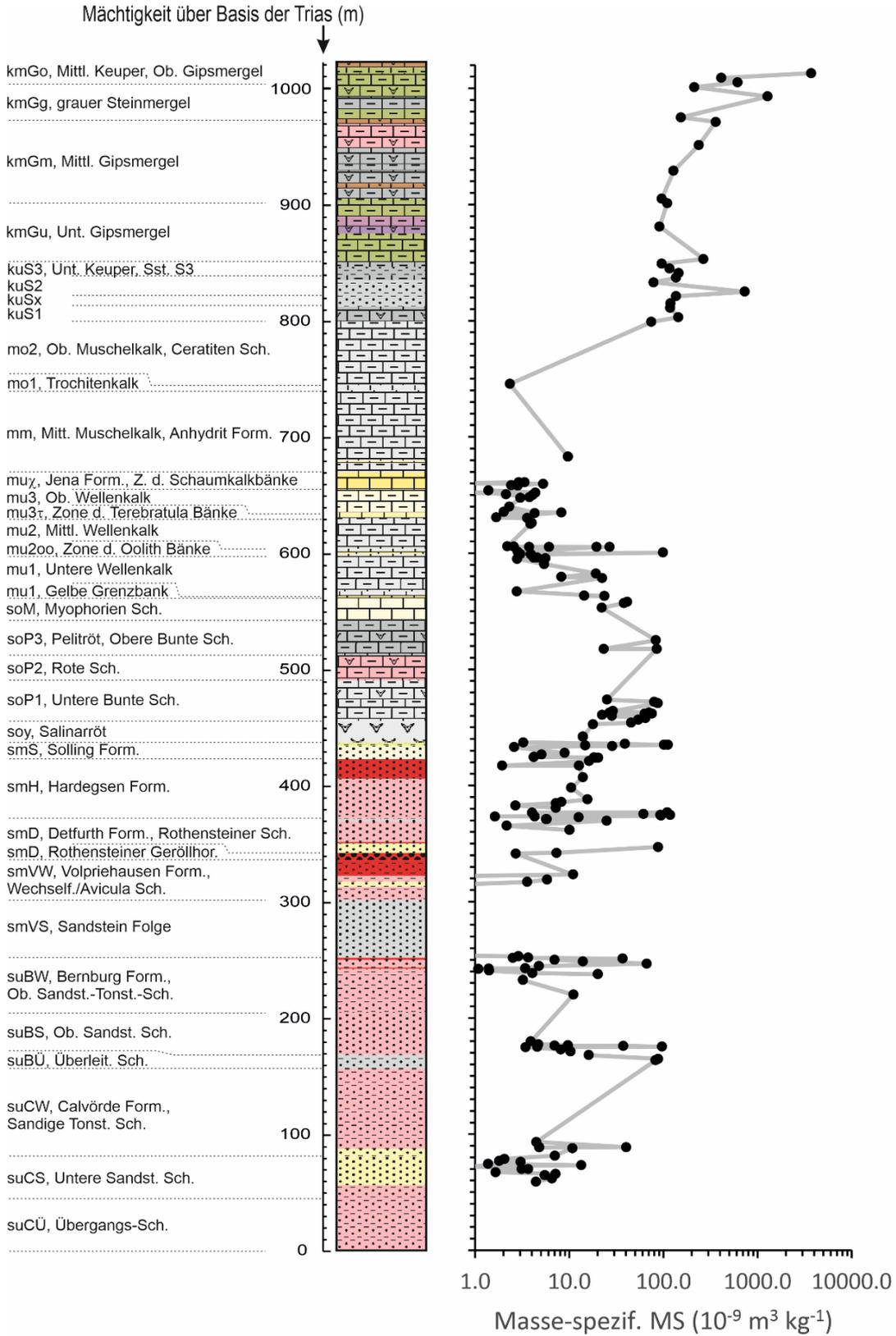
- Basaltoide
- Diorit+Gabbro
- Meta-Basite
- Amphibolite
- Eisenerz

Abb. 7: Masse-spezifische MS [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] potentieller Liefergesteine mit hoher MS, historische Erzbergwerke und Verbreitung potentieller Liefergesteine. Die MS Daten sind entweder in dieser Arbeit erhoben worden oder sie wurden, z.T. umgerechnet, Literatur Daten entnommen von COSTABEL & MARTIN (2019), GIRARD, et al. (2021), KLÖB (2014), QUEITSCH (2016), DE WALL, et al. (2019), ZUNDEL, et al. (2019), und weiteren im Abschnitt Material und Methoden aufgeführten Quellen. Kartengrundlage: siehe Abb. 1; Gesteinseinheiten auszugsweise nach GÜK200 Blatt 4726 Goslar (WALDECK & HAMMERSCHMIDT 1986), 4734 Leipzig (KRIEBEL, et al. 1998), 5526 Erfurt (SEIDEL, et al. 1998), 5534 Zwickau (RADZINSKI, et al. 1999), 6334 Bayreuth (EMMERT, et al. 1981), jeweils © Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover; mafische Ganggesteine sind aufgrund ihrer geringen Ausbissbreite nicht dargestellt; historische Erzbergwerke nach REH & SCHRÖDER (1974).

Im Keuper liegen minimale MS Werte um 100 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], dabei treten gegenüber niedrigen Werten in Gipsmergeln und Sandsteinen etwas erhöhte MS Werte in Siltsteinen auf, nach oben ist eine generelle Zunahme zu erkennen. Die insgesamt deutlich höhere MS im Unteren und Mittleren Keuper weist auf ein gegenüber Ablagerungen zur Zeit des Muschelkalks und Buntsandsteins abweichendes Liefergebiet mit erhöhten Gehalten mafischer bis intermediärer Magmatite hin, das im Baltischen Schild liegen dürfte (PIRRUNG, et al. 2015). Generell deutet sich an, dass triassische Gesteine in der Feinfraktion deutlich mehr Magnetminerale führen als in der Sandfraktion.

Am Top der in der INFLUINS Bohrung angetroffenen Keuper-Abfolge liegt im Oberen Gipsmergel bei 24-25 m Teufe der MS Wert mit 3720 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] sehr hoch in „Mergelstein, dolomitisch-kalzitisch, anhydrit-führend, grau bis olivgrau, lokal rotbraun“, siehe KUNKEL, et al. (2015) und Schichtenverzeichnis INFLUINS Bohrung. Eine zweite Probe bei 44 m Teufe im Grauen Steinmergel zeigt mit 1285 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] ebenfalls eine hohe MS. In diesen Proben könnte eine nicht makroskopisch erkennbare Anreicherung aus Schwermineralen hoher MS wie z.B. Ilmenit, Orthopyroxen, Pyrrhotit, Maghemit oder Magnetit vorliegen. In beiden Proben zeigen die Fe- und Ti-Gehalte jedoch keine Anomalien (PIRRUNG, et al. 2015) gegenüber weiteren Proben derselben Formationen. Abrieb von Verrohrung oder Bohrwerkzeugen ist daher auszuschließen und der Grund für die hohen MS Werte muss vorerst offenbleiben.

Magnetit als Hauptträger des MS Signals in Gesteinen ist unter bestimmten pH- und Redox-Bedingungen bei der Diagenese instabil. In lakustrinen Ablagerungen ist die reduktive Lösung von Magnetit bekannt, siehe u.a. XU, et al. (2020). Durch Brände kann Magnetit thermisch zu Maghemit oxidiert werden (LÖHR, et al. 2017). Da insbesondere bei porösen Sandsteinen die Möglichkeit reduktiver Lösung von Magnetit als Folge der Migration von Kohlenwasserstoffen, siehe z.B. XIE, et al. (2021), nicht auszuschließen ist und Migration reduzierender Fluide für Ablagerungen des Buntsandsteins der Thüringer Mulde nachgewiesen ist (AEHNELT, et al. 2020), wurde in Abb. 8 zusätzlich zur MS auch die dominierende Farbe der Sedimentite dargestellt. Für braune bis orange Färbung sind v.a. primärer oder sekundärer Goethit bzw. Limonit oder Maghemit, für rote Färbung Hämatit und bei grauer oder grünlicher Färbung Sulfide und ggfs. Magnetit zu vermuten (TIECHER, et al. 2015, STATHAM, et al. 2019). Dabei ergibt sich für triassische Sedimentite keine Tendenz von Bereichen grauer bis grünlicher Färbung, für die Eisenreduktion zu Fe^{2+} zu vermuten ist, zu niedrigeren MS Werten gegenüber gelbrötlich gefärbten Bereichen mit anzunehmender Dominanz von Fe^{3+} . Damit gibt es zumindest makroskopisch keine Anzeichen für reduktive Magnetit Lösung in den beprobten Sandsteinen des Untersuchungsgebietes. Auffallend ist im Muschelkalk die etwas erhöhte MS in gelben dolomitischen Horizonten, die offenbar neben diamagnetischem Kalzit und Dolomit auch paramagnetischen Siderit oder Ankerit durch spätdiagenetische Verdrängung enthalten. Dies ist bisher im Untersuchungsgebiet offenbar nicht beobachtet worden, aber es gibt Hinweise darauf z.B. im Weserbergland (BÜCHNER & SERAPHIM 1977).



Lithologie

	Kalkstein		Mergelstein		Gips
	Silt-, Tonstein		Sandstein		Konglomerat

Farben

	grüngrau		hellgrau		hellbeigegrau		rötlich
	dunkelgrau		beige		braun		rot

Abb. 8 (vorherige Seite): Masse-spezifische MS der triassischen Liefergesteine in der zentralen und östlichen Thüringer Mulde. Daten für Buntsandstein und Muschelkalk aus (PIRRUNG 2018), um weitere Proben ergänzt, für den Unteren und Mittleren Keuper aus PIRRUNG, et al. (2015). Lithologie und vorherrschende Sedimentfarbe vereinfacht nach SEIDEL (1993), LIPPMANN, et al. (2005), KUNKEL, et al. (2015), ELLENBERG (2012) und eigenen Beobachtungen. Die oberste Probe im Mittleren Keuper mit $3700 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ liegt außerhalb des dargestellten Skalenbereichs. Angaben zu Mächtigkeiten wurden übernommen für den Keuper aus KUNKEL, et al. (2015) und für Buntsandstein und Muschelkalk aus SEIDEL (1993); für die stratigraphische Einordnung der Proben im Gelände wurden außerdem Angaben in ACHILLES, et al. (2016), ELLENBERG (2012), MAAß, et al. (2010), LANGBEIN & SEIDEL (2003), LIPPMANN, et al. (2005), MÄGDEFRAU (1957), PUFF & LANGBEIN (2003), PUFF & KLEIN (2011), VOIGT & LINNEMANN (1996) verwendet.

4.3. Gegenüberstellung rezente fluviatile Sedimente und Liefergesteine

Die fluviatile Probe mit der höchsten MS, FM_Bode2003-1, Grobsand, wurde im Unterharz in der Bode bei Thale mit einem Wert von $15397 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ gemessen. Auch drei weitere Proben der Bode zwischen Thale und Quedlinburg weisen mit einem minimalen Wert von $735 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ die höchsten MS-Werte für Ablagerungen eines Zuflusses der Saale auf. Im Einzugsgebiet der Kalten Bode gibt es bei Mandelholz nahe Elbingerode und stromab bei Treseburg Halden des mittelalterlichen Eisenerz Bergbaus, deren Material sich in der Grobfraction fluviatiler Sande durch Schlackenfragmente erkennen lässt. Die Schlacken haben eine grünliche bis bläuliche Farbe und sind teilweise gebändert, siehe auch unter <https://www.steine-und-minerale.de/atlas.php?f=2&l=B&name=Bodeachat>. Dieses Material ist extrem hart und reagiert mit Absplittern feinsten Schuppen bei Schlageinwirkung, mit hohem Verletzungspotential.

Die Probe mit der niedrigsten MS war mit $-1.9 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ ein Sand des Naschhausener Baches bei Orlamünde, ein Vorfluter der Mittleren Saale. Die Sandfraktion besteht hier überwiegend aus Quarzkörnern, deren Herkunft im Unteren und Mittleren Buntsandstein des vorwiegend bewaldeten Einzugsgebietes liegt.

Die Unstrut entwässert mit Ausnahme permokarboner Vulkanite im nordöstlichen Thüringer Wald und des nur kleinräumig verbreiteten Kristallins im Kyffhäuser keine Gebiete mit Gesteinen hoher MS und sollte daher relativ niedrige geogene MS-Gehalte aufweisen. Beprobte fluviatile Sedimente der Unstrut, sandig und pelitisch, haben mit Werten von etwa $200 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ bei Heldringen auch tatsächlich eine relativ niedrige MS. Die Orla entwässert vor allem Ablagerungen von Trias und Zechstein am Südostrand der Thüringer Mulde und sollte eine noch geringere MS aufweisen. Sande der Orla bei Freienorla liegen mit $320 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ etwas über dem Median sandiger Proben der Saale, der Grund hierfür könnte in anthropogenen Einträgen liegen.

Für 106 prätriassische Liefergesteine des Schiefergebirges ergibt sich ein Median von $112 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, vergleiche Abb. 6. Für 205 triassische, ausschließlich sedimentäre, Liefergesteine liegt der Median bei $7 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, vergleiche Abb. 8. Der Median der MS Werte für sandige bzw. pelitische Sedimente der Saale liegt bei $260 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ bzw. $800 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, siehe Tab. 1. Damit stellt sich die Frage, wodurch die im

Vergleich zu den Liefergesteinen deutlich höheren MS Werte der rezenten pelitischen Sedimente der Saale resultieren.

In den oberen Einzugsgebieten von Saale, Weißer Elster, Bode und Ilm sind paläozoische Gesteine hoher MS relativ weit verbreitet, siehe Abb. 7. Daher sollte in diesen Flüssen ab Verlassen der Mittelgebirge der geogene Anteil der MS abnehmen aufgrund der zunehmenden Beimischung von Gesteinen geringer MS aus Buntsandstein und Muschelkalk der Thüringer Mulde. Dies ist für das Loquitz-Saale-System angedeutet für sandige Sedimente mit einem Abfall der MS stromab Rudolstadt in Abb. 9, etwa beim Übergang Schiefergebirge zu Thüringer Mulde. Dies gilt jedoch nicht für pelitische Sedimente.

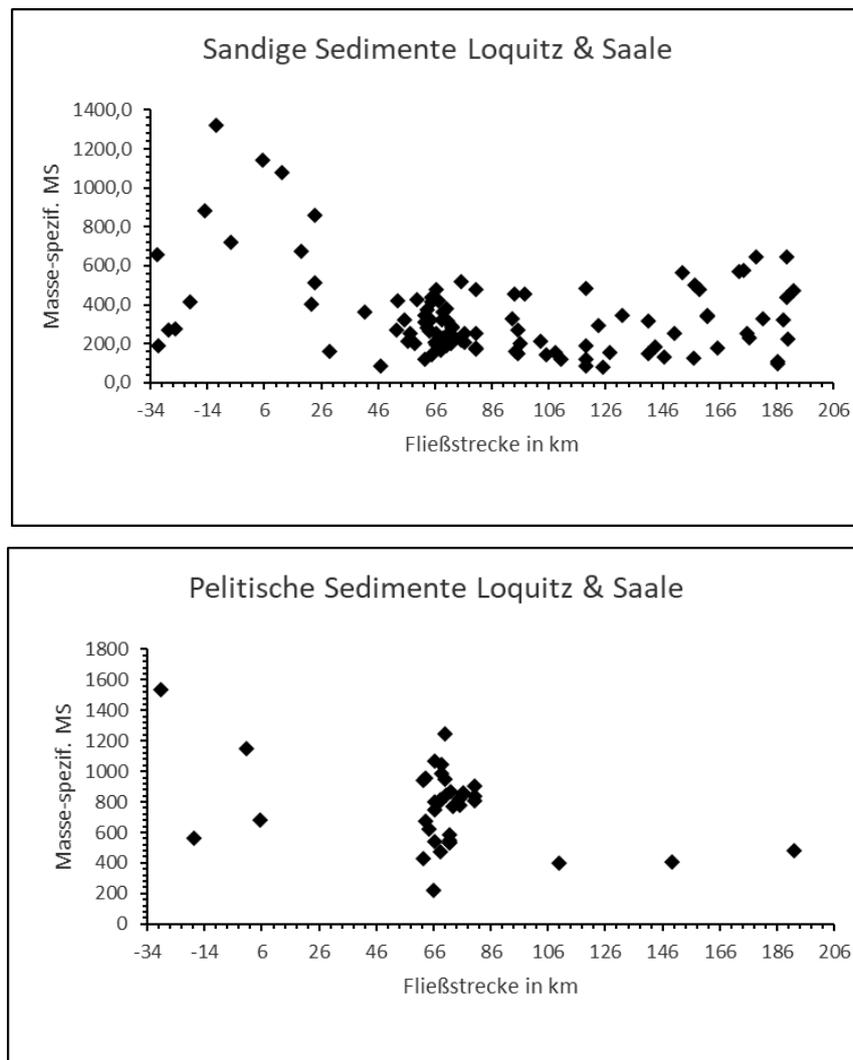


Abb. 9: Masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] der Fein- und Grobfraktion im Loquitz-Saale-System gegen die Fließstrecke aufgetragen, oben für rezente sandige, unten für pelitische Sedimente. Negative x-Achsenwerte = Loquitz, positive = mittlere und untere Saale stromab Eichicht Damm. Die Schwarza mündet bei Rudolstadt bei einer Fließstrecke von etwa 24 km. Die Südgrenze der Saale Vereisung schneidet das Saaletal bei Jena-Göschwitz bei etwa 66 km.

Für Sedimente in Oberläufen von Vorflutern mit Einzugsgebieten, in denen eine naturnahe Landnutzung in Form von Wald vorherrscht, lassen sich MS-Werte mit denen ihrer Liefergesteine vergleichen. Hierfür kommt allerdings nur die Sandfraktion in Frage, da in der Pelitfraktion pedogene Minerale enthalten sein können (BLUME, et al. 2010). Von 287 Sandproben im Einzugsgebiet der Saale liegen 28 Proben aus Gebieten ohne offensichtlichen anthropogenen Einfluss vor. Für diese beträgt der Median der MS 115 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Wählt man hiervon nur diejenigen Proben mit – abgesehen von Löß- und Hanglehm-/Hangschutt-Bedeckung – ausschließlich prätriassischen Gesteinen im Liefergebiet aus, so ergibt sich für 22 Proben ein Median der MS von 132 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], also nur wenig höher als der oben genannte Median für prätriassische Liefergesteine. Für 5 sandige fluviatile Proben mit ausschließlich triassischen Gesteinen im Einzugsgebiet liegt der Median der MS mit 58 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] dagegen deutlich über demjenigen für triassische Liefergesteine.

Als Ursache der relativ hohen MS Werte der rezenten Sedimente der Mittleren und Unteren Saale kommen mehrere Ursachen in Frage, die sich in geogene und anthropogene Faktoren unterteilen lassen.

Geogene Faktoren, die zu einer erhöhten MS fluviatiler Sedimente führen können, sind:

1. für die Sandfraktion eine Herkunft eines großen Teils der Körner aus Liefergesteinen mit hohen Gehalten an Magnetomineralen;
2. Bildung von Schwermineraleisfen am ‚levee‘, aus dem die meisten Proben entnommen wurden;
3. für die Silt- und Tonfraktion Freisetzung feinkörniger Magnetominerale aus mechanisch aufgearbeiteten Klasten paläozoischer Sedimentite und Metasedimente und Vererzungen der Schiefergebirgsareale;
4. in nordischen Geschieben, die während der pleistozänen Elster- und Saale-Kaltzeit in glazio-fluviatilen Sedimenten abgelagert wurden, sind überwiegend kristalline Gesteine enthalten, die stärker magnetisierbar sind.

Zu 1.: In ferrimagnetischen Extrakten von überwiegend sandigen Proben, die zwischen Breternitz und Schkopau entnommen wurden, finden sich unter dem Binokular, siehe Abb. 10, hellgraue bis beigefarbene Klasten von verkieseltem Siltstein bis Feinsandstein, in denen gelegentlich schwarze Körner, vermutlich Magnetite, zu sehen sind. Diese Klasten müssen relativ beständig gegen Abrasion sein, da sie unabhängig von der Entfernung zum Schiefergebirge in großen Anteilen auftreten. Hierbei dürfte es sich um Magnetitquarzite aus dem Grenzbereich Frauenbach- zu Phycodengruppe des Ordoviziums handeln. Weiterhin treten unter dem Binokular in allen Proben in geringerem Anteil schwarze halbmetallisch glänzende kantengerundete Körner mit Durchmesser zwischen etwa 40 und 100 μm auf. Hierbei dürfte es sich um isolierte Magnetite oder Titanomagnetite handeln, siehe auch Abb. 4.

Zu 2.: Im Schwappbereich treten gelegentlich dunkle, wasserspiegelparallele Streifen durch relativ grobkörnige Schwermineralanreicherungen auf, so zum Beispiel im Mai

2003 am ‚levee‘ im Bereich der Straßenbrücke Golmsdorf – Porstendorf, mit einem nicht außergewöhnlich hohen MS Wert des Grobsands von 255 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Dies könnte lokal einen Effekt bedingen, aber sicherlich nicht für größere Bereiche des ‚levees‘.

Zu 3.: Die Feinfraktion der Saale Sedimente müsste dann mit zunehmender Transportlänge ansteigende MS Werte aufweisen. In Abb. 9 ist für die Feinfraktion kein genereller Trend mit zunehmender Fließstrecke ablesbar, vielmehr zeigt sich eine starke Streuung in Bereichen mit enger Beprobung. Der Grund hierfür liegt zumindest zum Teil in dem unterschiedlichen Verhältnis von Ton- zu Siltfraktion mit jeweils unterschiedlicher MS, siehe Abb. 3.

Zu 4.: Dies kann nur nördlich der Südgrenze der maximalen Vereisung, meist mit der Feuersteinlinie zusammenfallend, auftreten. Die für das Saaletal relevante Südgrenze der Elster Kaltzeit wurde nach SEIDEL, et al. (2002) in Abb. 9 angegeben. Um den möglichen Beitrag nordischer Geschiebe zu testen wurde in Leipzig-Stötteritz die Grundmoräne des Drenthe-Stadiums der Saale-Kaltzeit (KRIEBEL, et al. 1998) auf 135 m^2 in der Fraktion 2 bis 3 cm beprobt. Für 100 Geschiebe betrug der Median 0 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Dieser niedrige Wert lässt sich vor allem aus dem Anteil von 32 % kantengerundeten bis gut gerundeten Gangquarzen aus lokal aufgearbeiteten Kiesen des Weißelsterbeckens erklären, ohne diese läge der Median bei 7 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Zwei Proben von Saalekaltzeit-lichem fluviatilen Mergel bei Leuna und von Geschiebelehm in Leipzig-Zentrum haben eine MS von 92 bzw. 127 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. Vier vermutlich Weichseleiszeit-liche Lößproben im mittleren Saaletal weisen einen Median von 136 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] auf. Daher können grobklastische glazigene Ablagerungen und durch subglaziale Aufarbeitung bzw. Auswehung daraus hervorgegangene Feinklastika stromab von Jena keinen wesentlichen Anteil an Magnetomineralen in rezenten fluviatilen Sedimenten beisteuern.

Anthropogene Faktoren, die zu einer erhöhten MS fluviatiler Sedimente führen können, sind:

1. Abrasion von Material der künstlichen Uferbefestigung und vom Bereich hinter Wehren, in dem häufig Beton- oder Gesteinsblöcke zur Aufzehrung der Strömungsenergie liegen;
2. anthropogene Kontamination mit Baumaterial wie Beton, Backstein, und anderen künstlichen Materialien wie z.B. Glas, Metallschrott;
3. Abtrag von Boden mit erhöhtem Gehalt an pedogenen Fe-Oxiden und -Hydroxiden, insbesondere aus landwirtschaftlich genutzten Flächen nach der Ernte und von Flächen exponierter Kammlagen unter forstwirtschaftlicher Nutzung nach Abholzung bzw. Windbruch;
4. Abtrag von Halden des historischen Erzbergbaus mit Gangart und Rückständen der Verhüttung;
5. Abspülung von Stahlabrieb aus Straßen- und Schienenfahrzeugen, insbesondere auf Brücken über direkten Abfluss durch Fallrohre; Freisetzung von Armierstahl

aus Beton; Rost von Stahlgitterbrücken; auch Spundwände an Wehren könnten eine Rolle spielen;

6. Direkter äolischer Eintrag magnetischer Spherulen, kugelähnliche Partikel aus Magnetit aus der Verbrennung fossiler Energieträger vor allem in Kraftwerken, bzw. indirekter Eintrag durch Abtrag des kontaminierten Oberbodens.

Zu 1.: Dann sollte sich mit zunehmender Horizontaldistanz stromab zu einem Wehr ein Abfall der MS Werte beobachten lassen. Dies ist weder für die Sand- noch die Pelitfraktion erkennbar, ohne Abb..

Zu 2.: Roter Ziegel- und Backsteinbruch und graue Beton- oder Putzbruchstücke sind gelegentlich makroskopisch in fluviatilen Sanden der Saale erkennbar, so z.B. in Probe FM_Saale2011-30 von Breternitz. In drei Backstein Proben aus mehreren Teilproben wurde ein maximaler Mittelwert der masse-spezif. MS von 1750 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] gemessen, aus sechs Proben anderer Regionen ergaben sich Werte bis $>6000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$. Zwei Proben von Betonfragmenten ohne Armierungsreste, jeweils aus mehreren Teilproben bestehend, ergaben im Mittel MS Werte bis 790 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$]. In zehn Hämatit-Proben weltweiter Herkunft, dessen Vorhandensein in Ziegeln und Backsteinen die rote Färbung nahelegt, wurde ein Mittelwert der masse-spezif. MS von 559 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] beobachtet. Noch stärker magnetisierbarer Maghemit könnte in braunen Ziegeln bzw. Backsteinen enthalten sein (EVANS & HELLER 2003). Baumaterial kann also fallweise zu lokalen Anomalien der MS in Flusssedimenten führen.

Zu 3.: Nach Starkregenfällen lässt sich durch braunrote Trübung der Saale in Jena die Folge des Oberflächenabtrags von Bodenmaterial auf Sedimentiten des Buntsandsteins anschaulich beobachten. Unter gemäßigt-humidem Klima sind gelblicher, orange bis ocker gefärbter Goethit und Limonit als häufig bei Bodenbildungsprozessen chemisch bzw. biochemisch generierte, schlecht kristalline bzw. feinkörnige Fe-Hydroxide im B-Horizont angereichert (BLUME, et al. 2010). Für Goethit wurde an 4 Proben ein Mittelwert von 614 und für Limonit an 3 Proben von 325 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] bestimmt. Damit können diese beiden Minerale nicht allein die hohen Werte der MS pelitischer Sedimente der Saale verursachen.

Ein Indiz für die Präsenz pedogener Fe-Oxide bzw. -Hydroxide ist der Parameter Frequenzabhängigkeit der MS, χ_{fd} , da dieser bei erhöhten Werten auf feinkörnige superparamagnetische Partikel hinweist, siehe u.a. DEARING, et al. (1996). Der Mittelwert für Oberböden, 5-25 cm unter Geländeoberfläche, in England und Wales liegt bei 4.1 bzw. 5.6 %. Die relativ niedrigen Werte der Frequenzabhängigkeit der MS, siehe oben, sprechen nicht für einen bedeutenden Anteil pedogener Fe-Oxide bzw. -Hydroxide in rezenten Sedimenten der Saale. Mit zunehmender Fließstrecke des Loquitz-Saale-Systems ergibt sich keine Zunahme für κ_{fd} , d.h. im Unterlauf gibt es gegenüber dem Oberlauf keinen Anstieg des Anteils am Rinnenrand sedimentierter superparamagnetischer Körner. Das ist insofern erstaunlich, da sowohl die zu erwartende transportbedingte Kornverkleinerung als auch der zur Mündung in die Elbe hin zunehmende Anteil von intensiv landwirtschaftlich genutzten Böden dies erwarten ließe. Dies spricht dafür, dass entweder die meisten sehr feinen superparamagnetischen

Partikel bei normalem Abflussregime mindestens bis zur Mündung in die Elbe in Suspension verbleiben oder dass sie bei Hochwasserereignissen in distalen Bereichen der Talauen zwischengelagert werden, die hier nur vereinzelt beprobt wurden. Ein Einfluss von Wehren lässt sich im Parameter χ_{fd} in Abhängigkeit zur Wehrdistanz nicht erkennen, ohne Abbildung.

Zu 4.: Dass stratiforme oder gangförmige oxidische Eisenerze einen Beitrag zur MS fluviatiler Sedimente liefern können zeigt einerseits Abb. 6, andererseits liegt der Median sandiger Sedimente der unteren Schwarza mit $510 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ deutlich über dem Median der Saale Sande. In magnetischen Extrakten der Probe FM_Saale2011-30 bei Breternitz treten Klaster von oxidischen Vererzungen und Schlackenbruchstücke auf, siehe Abb. 10. Die bereits erwähnten hohen MS Werte in Sanden der Bode hängen eindeutig mit dem Vorkommen von Gläsern und Schlacken aus Haldenabtrag zusammen. Damit wird der Erzbergbau einen deutlichen Anteil an der MS fluviatiler Sedimente in Schiefergebirgsarealen haben.

Zu 5.: Spinnennetze eignen sich zum Monitoring von urbanem Staub, siehe u.a. VAN LAATEN, et al. (2021). In 19 Proben von Spinnweben aus den Bereichen Greiz, Jena, Leipzig, Harzvorland bei Nienhagen wurde ein Median von $2150 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ beobachtet, dabei liegen zwei Proben von Nienhagen in ländlicher Umgebung bei etwa $650 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ und der höchste MS Wert wurde an der von Fahrzeugen stark befahrenen Straßenbrücke Burgaupark in Jena gemessen mit $5600 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$. Aufgrund des nicht abgetrennten organischen und damit diamagnetischen Materials der Spinnweben ist eine noch deutlich höhere MS für minerogene und / oder anthropogene Partikel zu erwarten. RACHWAŁ, et al. (2018) nennen einen Median der MS von $570 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ für Spinnennetze in Warschau, Polen, wobei in ländlichen Regionen nur ein Viertel so hohe MS Werte auftreten. Die höheren MS Werte in Jena dürften der Tallage geschuldet sein. In fünf gemessenen Eisenfragmenten unterschiedlicher Herkunft beträgt der Maximalwert der MS $196000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, was noch unter dem von HUNT, et al. (1995) angegebenen Mittelwert von $500000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ liegt. Feine Partikel konnten von VAN LAATEN (2020) in Spinnennetzen in Jena mit REM-EDX (Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie) nachgewiesen werden.

In Proben von Ablagerungen am Fahrbahnrand in Jena und Leipzig wurden Werte der MS $>1500 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ und in zwei Proben aus Straßenbahngleisen von $>3000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ beobachtet. Unter dem Binokular sind in einem Extrakt der ferrimagnetischen Fraktion von Gleisabrieb neben dominierenden Lithoklasten auch einige blättchenartige, scharfkantig begrenzte rostfarbene Metallfragmente unterschiedlichster Dimension erkennbar. In Auspuffablagerungen von Benzin-getriebenen Kraftfahrzeugen fanden sich unregelmäßig polygonale, scharfkantige ferrimagnetische Partikel. Ein blättchenförmiges rostfarbenes Fragment mit $240 \mu\text{m}$ Länge findet sich in Probe FM_Saale2011-30, was auf Eintrag von Metallschrott am Gewässerrand spricht. An Proben von Kraftfahrzeugen wurden in Ablagerungen in Auspuff und Radkästen und im Bremsabrieb MS Werte bis zu $111000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ beobachtet. Damit leisten Partikel des straßen- bzw. schienengebundenen Verkehrs, die entweder direkt durch

Oberflächenabfluss ohne Passage einer Kläranlage oder indirekt über Staubdeponiten und oberflächliche Abschwemmung in Vorfluter gelangen, einen deutlichen Beitrag zur MS von fluviatilen Sedimenten. Dies gilt insbesondere in urbanen Räumen und dort wo Fließgewässer abschnittsweise parallel zu Verkehrswegen verlaufen, wie z.B. die Saale neben der Bahnstrecke Jena-Naumburg mit der teilweise parallel verlaufenden Bundesstraße 88.

Zu 6.: BOURLIVA, et al. (2016) beschrieben magnetische Spherulen in Straßenstaub, WANG & QIN (2005) wiesen sie in Stadtböden, und JORDANOVA, et al. (2004) in Flusssedimenten nach. Als Herkunft wird die Verbrennung fossiler Kraftstoffe in Kraftwerken zu Flugaschen angenommen. Bei der Mikroskopie des „NIST 1633 Standard Reference Material (SRM) Trace Elements in Coal Fly Ash“ sind schwarze Spherulen mit Durchmessern von 10 bis 30 μm erkennbar (VAN LAATEN 2020). In vier Proben, FM_Loquitz2011-10 und FM_Loquitz2011-11 nahe der Mündung in die Saale, sowie in Probe FM_Saale2011-30 bei Breternitz nahe Saalfeld und FM_Saale2011-18 nördlich Rudolstadt, sind mehrere graue, nicht metallisch glänzende „Pseudospherulen“ von etwa 125 μm Durchmesser, möglicherweise sehr gut gerundete Magnetitquarzit Fragmente, erkennbar, siehe Abb. 10. Mindestens in zwei Proben, FM_Loquitz2011-10 und FM_Saale2012-19 bei Schkopau nahe der Raffinerie Leuna, finden sich schwarze, metallisch glänzende Spherulen mit dem typischen Durchmesser von 50 bis 60 μm . Der weitaus größte Anteil von Spherulen dürfte durch Bodenabtrag in die Vorfluter gelangen. Wenn ein mittlerer Gehalt von Spherulen in Oberböden bekannt wäre könnte man die Intensität des Bodenabtrags in Teileinzugsgebieten der Saale prinzipiell aus der Analyse von Spherulen in fluviatilen Sedimenten ableiten.

Bei in den Jahren 2017 bis 2018 betriebenen passiven Staubsammlern (VAN LAATEN 2020), zwei für trockene, sieben für nasse Deposition, im Raum Jena – Leipzig – Nienhagen wurde an ganz überwiegend stark organisch geprägtem Material ein Median der MS von 175 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] gemessen. Der höchste MS Wert trat in einem Sammler in einem Wohngebiet in Leipzig mit 2490 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] auf. Zusammen mit den Beobachtungen von Spinnweben, siehe unter 5., spricht das dafür, dass großflächig Deposition von Magnetomineralen auf der Landoberfläche über den Luftpfad stattfindet, mit bisher unbekanntem Verhältnis von geogenen zu anthropogenen Partikeln. Bei Starkregen-induziertem Oberflächenabfluss gelangt also stark magnetisches Material anthropogener Herkunft großflächig in die Vorfluter.

Zu 2 bis 5: Der Nachweis von ferro-, ferri- und antiferromagnetischen Materialien, wie metallisches Fe, Magnetit, Hämatit und Goethit, wäre über weitere umweltmagnetische Messungen, z.B. über eine Bestimmung der Curie Temperatur an der Gesamt- oder Kornfraktion bzw. der extrahierten ferrimagnetischen Fraktion, möglich.



Abb. 10: Ferrimagnetische Extrakte unter dem Binokular. Oben links: Schlecht sortierter feinsandiger Siltstein mit Erzkörnern, vermutlich ein Magnetitquarzit aus dem Ordovizium des Schwarzburger Sattels. Oben rechts: feinsandige Magnetitquarzite im linken Bildteil und vermutlich ein brauner Glaskopf aus einer Gangvererzung rechts der Bildmitte. Mitte links: kantengerundete bis gut gerundete, durch den Extraktionsvorgang bedingt aneinander haftende, schwarze Magnetitkörner liegen auf einem grauen Magnetitquarzit Klast. Mitte rechts: schwarze Schlacke der historischen Erzverhüttung. Unten links: Siltsteine, ein Gangquarz mit Erz, Pfeil zeigt auf eine graue nicht metallisch glänzende „Pseudospherule“, vermutlich abgerundeter Magnetitquarzit. Unten rechts: Vier magnetische metallisch glänzende schwarze Spherulen sind mit Pfeilen angezeigt.

5. Zusammenfassende Diskussion

In Abb. 11 sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zur MS rezenter fluviatiler Sedimente im Saale Einzugsgebiet zusammen mit derjenigen potentieller geogener und anthropogener Quellen zusammengefasst. Rezente fluviatile Sande des Loquitz-Saale-Systems liegen noch im oberen Variationsbereich von Liefergesteinen. Für die relativ hohen MS Werte fluviatiler pelitischer Sedimente mit einem Median von $800 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ können jedoch nicht allein geogene Faktoren die Ursache sein:

1. fast alle postpermischen Liefergesteine, im Bereich der Thüringer Mulde von Saale und Nebenflüssen durchströmt, weisen eine niedrigere MS auf;
2. bisher untersuchte unvererzte prätriassische Liefergesteine weisen bis auf wenige Ausnahmen eine niedrigere MS auf;
3. stratiforme paläozoische Eisenerze und Metabasite treten nur in begrenzten Schiefergebirgsarealen auf, insbesondere die relativ stabilen ordovizischen Magnetitquarzite machen jedoch einen hohen Anteil an ferrimagnetischen Komponenten in den Flusssedimenten aus.

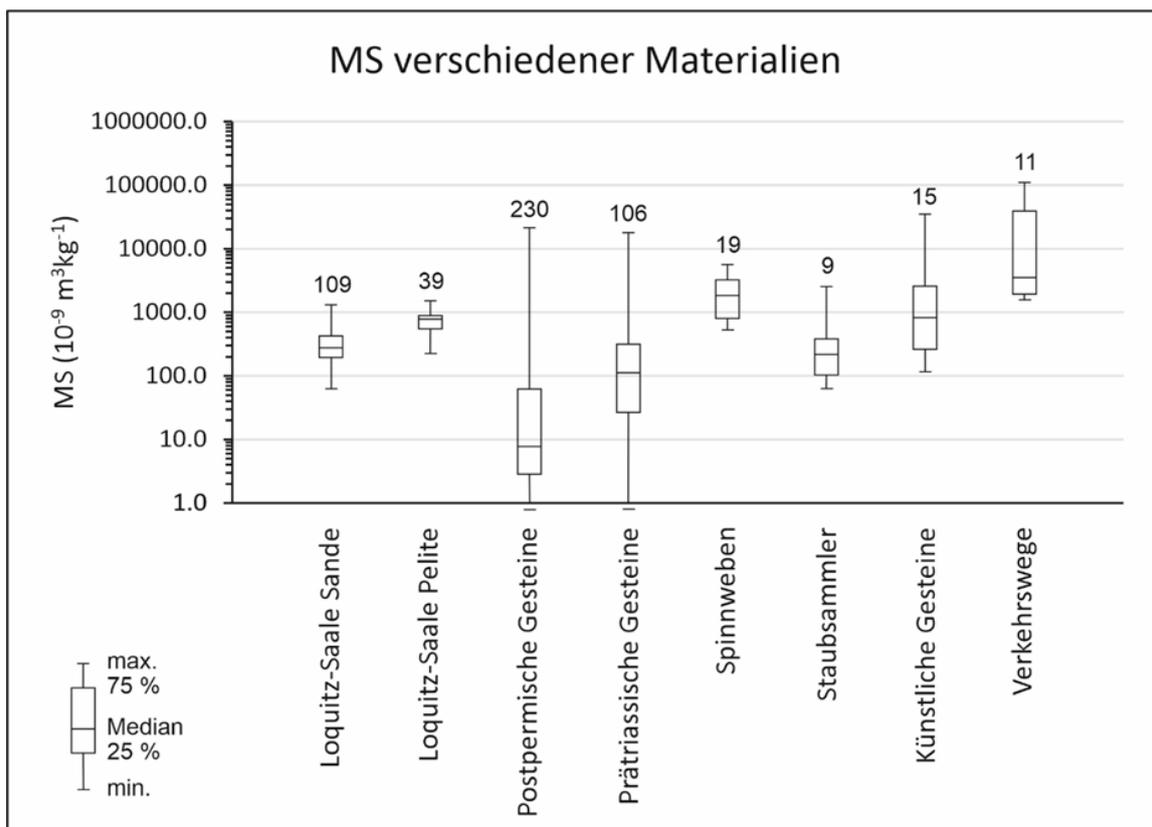


Abb. 11: Box-Whisker Plots der masse-spezif. MS rezenter fluviatiler Sedimente im Loquitz-Saale System im Vergleich zu der MS potentieller Quellen für ferrimagnetische Komponenten. Bei Liefergesteinen liegen die minimalen Werte bei Vorherrschen diamagnetischer Minerale im negativen Bereich. Zahlen über den Kästen geben die Probenanzahl wieder.

Es gibt mehrere Beobachtungen, die für einen deutlichen anthropogenen Anteil an der Magnetomineralogie fluviatiler Sedimente sprechen:

1. Material der Erzgewinnung und -verhüttung ist in mehreren Proben fluviatiler Sedimente nachweisbar;
2. Abrieb des straßen- bzw. schienengebundenen Fahrzeugverkehrs, der nicht über Kläranlagen gesammelt und entzogen wird, kann durch die hohe MS auch in geringen Volumenanteilen die Gesamt-MS fluviatiler Sedimente beeinflussen;
3. über den Luftpfad in Böden eingetragene und aus diesen abgespülte Flugaschen können in fluviatilen Sedimenten nachgewiesen werden.

Sieht man von der generellen Problematik von lungengängigen Staubpartikeln $<10\ \mu\text{m}$ ab, siehe u.a. RYBAK, et al. (2022), so sind ferrimagnetische Partikel mit Partikel-größen $>10\ \mu\text{m}$ als dominante Träger des MS Signals in fluviatilen Sedimenten vermutlich nicht von großer Umweltrelevanz. Die hierbei vorherrschenden Metalle Eisen und Titan, die vor allem in den stabilen Mineralen der Titanomagnetit-Magnetit-Mischungsreihe bzw. weiter gefasst in der Spinellgruppe, einerseits und als, z.B. in der Lebensmittelindustrie als Farbgeber verwendeten, pedogenen Eisenoxiden bzw. -hydroxiden andererseits vorliegen, weisen keine besondere Toxizität auf. Sie stellen aber einen guten Indikator für die zunehmenden Eingriffe des Menschen in natürliche Flusssysteme dar, wenn man geogene Hintergrundwerte bei der Interpretation berücksichtigt. Vor dem Hintergrund des Klimawandels kann die MS damit indirekt wertvolle Hinweise auf Veränderungen im Bodenabtrag liefern.

6. Fazit und Ausblick

Nach Auffassung der Autorin und der Autoren ist diese Studie die bislang umfangreichste, bei der die magnetische Suszeptibilität fluviatiler Sedimente im Vergleich zu der von Liefergesteinen untersucht wurde. Kehrt man zur eingangs gestellten Frage nach der Bedeutung der MS in fluviatilen Sedimenten zurück, so lässt sich im Kern folgendes aussagen: Der MS Wert einer fluviatilen Sedimentprobe hängt im Wesentlichen ab

- primär von der dominierenden Korngröße; sekundär von der Kornverteilung;
- von dem Gehalt an stark magnetischen Lithoklasten, für das Beispiel Saale Einzugsgebiet v.a. aus dem ordovizischen Magnetitquarzit des Schwarzbunger und Bergaer Antiklinoriums und von mitteldevonischen Erzen des Elbingeroder Vulkankomplexes im Unterharz;
- vom Abtrag von Halden des Erzbergbaus v.a. in Schiefergebirgsarealen;
- vom Anteil der Flugaschen aus Kraftwerken fossiler Brennstoffe und von Partikeln aus dem Straßen- und Schienenverkehr sowie dem Eintrag von Schrott und Kunstgesteinen wie Backstein und Beton.

Die Methode magnetische Suszeptibilität ließe sich mit anderen Methoden kombinieren, um über Variationsplots Gesteine zu klassifizieren. Zusammen mit weiteren zerstörungsfreien Verfahren wie Bestimmung von Farbspektren und Gamma-spektrometrischen Messungen könnte sie einen Beitrag leisten zur Bauarchäologie, aber auch zur Feststellung von Sanierungsbedarf. In Teileinzugsgebieten der Thüringischen Saale könnte die MS an heutigen fluviatilen Sedimenten nach Kalibration mit Gehalten ausgewählter Elemente zur Suche nach Kontaminanten eingesetzt werden. Interessant wäre eine Bestandsaufnahme der MS in Oberböden des Saale Einzugsgebietes, um aus fluviatilen Ablagerungen die Dimension von lokalem bis regionalem Bodenabtrag als Folge zunehmender Starkregenereignisse abschätzen zu können. Außerdem wäre es interessant, Informationen über ehemalige Hüttenstandorte zu recherchieren und in deren Umgebung gezielt Sedimentproben aus Vorflutern zu nehmen.

Für eine Charakterisierung der Magnetomineralogie fluviatiler Sedimente sind bereits einige thermomagnetische Messungen erfolgt. Die Diskussion dieser und weiterer Daten soll zusammen mit mikroskopischen Ergebnissen in einem künftigen Beitrag erfolgen.

Danksagung

Frau Dr. Stefanie Schumacher, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, danken wir für die Bereitschaft, erneut Daten in PANGAEA einzupflegen. Herr Frank Linde, Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität Jena, war mit Rat und Tat bei der Korngrößenfraktionierung behilflich. Den Staatlichen Geologischen Landesdiensten von Thüringen, Sachsen-Anhalt und Sachsen danken wir für die Bereitstellung von digitalem Karten- und Luftbildmaterial und weiteren hilfreichen Informationen.

Den Autorinnen und Autoren mehrerer Publikationen danken wir für die Übermittlung unveröffentlichter Metadaten.

Literatur

- ACHILLES, F., DANIGEL, M., FREY, V.S., VOIGT, T. & BÜCHEL, G. (2016): Verkarstungs- und Subrosionserscheinungen des Oberen Buntsandsteins nahe Jena. – Beitr. Geol. Thüringen N.F., **23**: 125-136; Jena.
- AEHNELT, M., HILSE, U., PUDLO, D., HEIDE, K. & GAUPP, R. (2020): On the origin of bleaching phenomena in red bed sediments of Triassic Buntsandstein deposits in Central Germany. – Geochemistry - Inter disc. J. chem. probl. Geosci. Geoecol., **2020**: 1-18; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125736>
- ALLENBERG, A., WOLF, D., ANDERSEN, J., ROLLINSON, G., BORG, G., PRÄGERR, R. & STEDINGK, K. (2012): 5.3 Untersuchung der Schwermineral-Spektren in Terrassenablagerungen der Elbe, Saale und Weißen Elster (Sachsen-Anhalt). – Mitt. Geol. Bergw. Sachsen-Anhalt, **17**: 95-127;
- ANONYMOUS (1991): Rock color chart with genuine Munsell color chips. – Geological Society of America;

- ANONYMUS (2008): Neubewertung von Spat- und Erzvorkommen im Freistaat Sachsen - Steckbriefkatalog. – 143 S.; Freiberg (Sächs. Landes-A. Umwelt, Landw., Geologie).
https://www.bergbau.sachsen.de/download/bergbau/Rohstoffkatalog_Spat-Erzvorkommen.pdf
- BACHMANN, G.H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M. (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt. – 1-689 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- BACHMANN, G.H. & KOZUR, H.W. (2004): The Germanic Triassic: correlations with the international chronostratigraphic scale, numerical ages and Milankovitch cyclicity. – Hallesches Jb. Geowiss., **B 26**: 17-62; Halle an der Saale.
- BANKWITZ, P. (2003): Zur Geologie der Magnetitlagerstätte Schwarze Crux, nördlich von Vesser (Thüringer Wald). – Veröff. Naturhist. Museum Schleusingen, **18**: 31-44; Schleusingen.
- BEYER, D. (2008): Analyse von Korngrößenvariationen in Saalesedimenten im Raum Jena. – 76 S.; Forschungspraktikum F.-Schiller-Univ.; Jena.
- BLACK, K.S., ATHEY, S., WILSON, P. & EVANS, D. (2007): The use of particle tracking in sediment transport studies: a review. – In: BALSON, P.S. AND COLLINS, M.B. (Hrsg.): Coastal and Shelf Sediment Transport. 73-91; London (Geological Society, Special Publications).
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.274.01.09>
- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. – 570 S.; Wiesbaden (Springer, Spektrum).
- BOENIGK, W. (1983): Schwermineralanalyse. – 158 S.; Stuttgart (Enke).
- BOURLIVA, A., PAPADOPOULOU, L. & AIDONA, E. (2016): Study of road dust magnetic phases as the main carrier of potentially harmful trace elements. – Sci. total Environ., **553**: 380-391; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.149>
- BÜCHNER, M. & SERAPHIM, E.T. (1977): Mineralneubildungen im saxonischen Bruchfaltengebirge des lnteren Weserberglandes. Teil 3 (Schluß): Nachträge zu den Lagerstätten und Kausalfrage. – Bericht des Naturwissenschaftlichen Vereins Bielefeld, **23**: 9-89; Bielefeld.
- COLOMBO, C., PALUMBO, G., DI IORIO, E., RUSSO, F., TERRIBILE, F., JIANG, Z. & LIU, Q. (2016): Soil development in a Quaternary fluvio-lacustrine paleosol sequence in Southern Italy. – Quaternary Int., **418**: 195-207; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.004>
- CORRENS, C.W. (1941): Zur Methodik der Schwermineraluntersuchung. – Z. angew. Min., **1941/2**: 1-11; Berlin.
- COSTABEL, S. & MARTIN, T. (2019): Petrophysikalische Untersuchungen zum Befliegungsgebiet Schleiz/Greiz im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes DESMEX. – BGR Report, Archives, **0135855**: 1-56; Hannover.
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Geophysik/Aerogeophysik/Downloads/Technischer-Bericht-DESMEX-2019-Petrophysik.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- DE WALL, H., SASSENSCHIEDT, M., SCHAARSCHMIDT, A., SCHARFENBERG, L., DIETL, C. & ROLF, C. (2019): Gesteinsmagnetische Untersuchungen an Einheiten des fränkischen Grundgebirges in NO Bayern - Rock magnetic studies of basement units in NE Bavaria. – Geol. Blätter NO-Bayern, **69**: 11-29; Erlangen.
- DEARING, J. (2021): Environmental magnetic susceptibility - using the Bartington MS2 system. – 43 S.; Kenilworth, UK (Chi Publishing). <https://bartingtondownloads.com/wp-content/uploads/OM0409.pdf>
- DEARING, J.A., DANN, R.J.L., HAY, K., LEES, J.A., LOVELAND, P.J., MAHER, B.A. & O'GRADY, K. (1996): Frequency-dependant susceptibility measurements of environmental materials. – Geophys. J. Int., **124**: 228-240; Oxford. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06366.x>
- DEKKERS, M.J. (1978): Magnetic properties of sediments. – In: FAIRBRIDGE, R.W. AND BOURGEOIS, J. (Hrsg.): Sedimentology. Encyclopedia of Earth Science. 684-692; Berlin, Heidelberg (Springer).
https://doi.org/10.1007/3-540-31079-7_130
- DIETZE, F., KONTNY, A., HEYDE, I. & VAHLE, C. (2011): Magnetic anomalies and rock magnetism of basalts from Reykjanes (SW-Iceland). – Stud. Geophys. Geod., **55**: 109-130; Praha.
<https://doi.org/10.1007/s11200-011-0007-4>
- DOBENECK, T.V., PETERSEN, N. & VALI, H. (1987): Bakterielle Mikrofossilien - palaeomagnetische und palaeontologische Spuren einer ungewöhnlichen Bakteriengruppe. – Geowiss. uns. Zeit, **5**: 27-35; Weinheim.

- EHRMANN, J. (2014): Bach- und Flußsedimente um Ronneburg. – S.; Ber. M.Sc. Biogeowiss. Projektmodul F.-Schiller-Univ.; Jena.
- ELLENBERG, J. (2012): Geologie erleben - Saale-Holzland und Jena. – 132 S.; Jena (Jenzigverlag).
- ELTSOV, T. & PATZEK, T.W. (2019): Beyond carbon steel: Detecting wellbore shape and cavities, and cement imperfections in cased wells. – *Energies*, **12**: 4211, 1-16; Basel, Schweiz.
<https://doi.org/10.3390/en12214211>
- EMMERT, U., VON HORSTIG, G., STETTNER, G., EDER, F. & HAMMERSCHMIDT, M. (1981): Blatt CC 6334 Bayreuth. – Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Hannover.
- EVANS, M.E. & HELLER, F. (2003): Environmental magnetism - principles and applications of enviromagnetics. – 299 S.; Amsterdam, Boston etc. (Academic Press).
- FALK, F. & WIEFEL, H. (2003): 4.3.2 Ordovizium. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen. 108-129; Stuttgart (Schweizerbart).
- FÖRSTER, H.-J., TISCHENDORF, G., PÄLCHEN, W., BENEK, R. & SELTMANN, R. (2011): 3.4 Spätvariszischer Magmatismus. – In: PÄLCHEN, W. (Hrsg.): Geologie von Sachsen I. 257-296, Tab. 498-510; Stuttgart (Schweizerbart).
- FREY, C. (2010): Die Burgen Heinrichs I. - "urbes ad salutem regni". – In: GROSSMANN, G.U. AND OTTOMEYER, H. (Hrsg.): Die Burg. 50-55; Dresden (Sandstein Verlag).
- FUCHS, C.W.C. (1862): Der Granit des Harzes und seine Nebengesteine (Hornfels, Gneiss, Diorit, Syenit etc.). – *Neues Jahrbuch Mineralogie*, **1862**: 769-859, 897-989;
- GABRIEL, G., VOGEL, D. & SCHEIBE, R. (2010): Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000. – 1 S.; Hannover (Leibniz Institut für Angewandte Geophysik). https://www.leibniz-liag.de/fileadmin/user_upload/S1/arbeitsbereiche/gravi_mag/magnetikkarte.pdf
- GARMIN (2008): Deutschland Digital 25 - Topographische Karte 1:25 000, Rasterkarte auf DVD zur Tourenplanung auf PC und PDA. – Garmin Deutschland GmbH; Gräfelfing.
- GEIGNER, W. & KEIL, B.H. (2002): Geologisch-Mineralogischer Wander und Exkursionsführer Eklogit - Die Eklogite der Münchberger Gneismasse, Augenzeugen der frühen Erdgeschichte. – 144 S.; Dettelbach (Verlag Conventus Musicus).
- GIRARD, C., FEIST, R., MOSSONI, A., CORNÉE, J.-J., CAMPS, P., CHARRUAULT, A.-L. & CORRADINI, C. (2021): North-Gondwana – Laurussia dynamic paleogeography challenged by magnetic susceptibility through the Famennian. – *Gondwana Res.*, **97**: 263-272; Amsterdam.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.06.002>
- GREIF, A., PÄLCHEN, W., RANK, G. & WEIDENSCHÖRNER, H. (2004): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen Teil 2: Spurenelementgehalte in Bachsedimenten. – 66 S.; (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie). <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12168>
- HANSARD, R., MAHER, B.A. & KINNERSLEY, R. (2011): Biomagnetic monitoring of industry-derived particulate pollution. – *Environm. Poll.*, **159**: 1673-1681; Amsterdam.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.039>
- HARTMANN, K.-J., KAINZ, W., JAHN, R. & LANGER, U. (2014): Anorganische Hintergrundwerte für Böden des Landes Sachsen-Anhalt. – *Mitt. Geol. Bergw. Sachsen-Anhalt*, **18**: 21-28;
https://lagb.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/LaGB/boden/pdf/bodenbericht_2014.pdf
- HEIDE, K. & KREHER, B. (1993): Chemismus, Spurenelementgehalt und Paragenese einiger Erzminerale aus dem Granit des Henneberges bei Wurzbach (Thüringen). – *Jenaer Geogr. Schriften*, **1**: 23-35; Jena.
- HEILMAIER, W. (2015): Seltene Erden Muster an triassischen Sedimenten der Forschungsbohrung INFLUINS. – S.; Ber. M.Sc. Geowiss. Projektmodul, F.-Schiller-Univ.; Jena.
- HEINRICH, F.C., SCHMIDT, V., SCHRAMM, M. & MERTINEIT, M. (2019): Anisotropy of magnetic susceptibility in salt rocks from the German Zechstein Basin, Sondershausen mine. – *Geophys. J. Int.*, **219**: 690-712; Oxford. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz326>
- HEINRICH, R.C., SCHMIDT, V. & BERNDT, J. (2014): Magnetic properties and their mineralogical origin of salt rocks. – *Castle Meeting: New trends on Paleo, Rock and Environmental Magnetism*, 1-2; Évora.
https://ciencias.ulisboa.pt/sites/default/files/fcul/public/14Castle_meeting/Heinrich_Castle%20Meeting_Abstract.pdf
- HOELZMANN, P., RAUCHFUß, B., ULLRICH, B., BEBERMEIER, W., KAUFMANN, G., SCHÜTT, B. & MEYER, M. (2012): Coupling of geomorphological, geophysical, geochemical and

- archaeological spatial data for a study of the interface of the Latène and Przeworsk Cultures in NE Germany. – In: BEBERMEINER, W., HEBENSTREIT, R., KAISER, E. AND KRAUSE, J. (Hrsg.): Landscape archaeology. Proceedings of the International Conference held in Berlin, 6th – 8th June 2012. 399-403; Berlin (Excellence Cluster Topoi). <http://www.topoi.org/wp-content/uploads/2013/06/138-585-1-PB.pdf>
- HOPPE, E. (2015): Geochemie der Siliziklastika des unteren Buntsandsteins im Saaletal. – 82 S.; B.Sc. Arb. Geowiss., F.-Schiller Universität Jena; Jena.
- HOTH, K., WASTERACK, J., BERGER, H.-J., BREITER, K., MLČOCH, B. & SCHOVÁNEK, P. (1994): Geologische Karte Erzgebirge / Vogtland 1 : 100 000. – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Dresden.
- HUNT, C.P., MOSKOVITZ, B.M. & BANERJEE, S.K. (1995): Magnetic properties of rocks and minerals. – In: AHRENS, T.J. (Hrsg.): Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants. 189-204; Washington, D.C. (American Geophysical Union).
- JORDANOVA, D., HOFFMANN, V. & FEHR, K.T. (2004): Mineral magnetic characterization of anthropogenic magnetic phases in the Danube river sediments (Bulgarian part). – Earth Planet. Sci. Lett., **221**: 71-89; Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00074-3)
- JUNGE, F.W. (2013): Abschlußbericht zum Projekt "Schadstoffsenke Muldestausee - Aktuelles Potenzial und jüngste Entwicklung seit 2002" - Baustein 29 des Sedimentmanagementkonzeptes der FGG Elbe als nationaler Beitrag zum IKSE-Sedimentmanagementkonzept. – 95 S.; Hamburg/Taucha (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Umweltschutz Hamburg,).
http://daten.transparenz.hamburg.de/Dataport.HmbTG.ZS.Webservice.GetRessource100/GetRessource100.svc/00ea898d-4b42-4838-ad07-bae06528bb03/Akte_UW843.99-10_82.pdf
- KARDEL, K., MÜLLER, I., KAUFMANN-BOLL, C. & KASTLER, M. (2015): Hintergrundwerte für sächsische Böden - Angaben für Stoffgehalte, differenziert nach Substrat, Nutzung und Horizont. Teil 1: Gesamtgehalte (Königswasserextrakt). – 26 S.; Dresden (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)).
- KLÖB, V. (2014): Geländebasierte geomagnetische Untersuchungen im Thüringer Wald auf der Grundlage von aeromagnetischen SQUID-Daten. – 130 S.; M.Sc. Arbeit, Friedrich-Schiller-Universität; Jena.
- KRAUß, L., ZENS, J., ZEEDEN, C., SCHULTE, P., ECKMEIER, E. & LEHMKUHL, F. (2016): A multi-proxy analysis of two loess-paleosol sequences in the northern Harz Foreland, Germany. – Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., **461**: 401-417; Amsterdam.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.09.001>
- KRIEBEL, U., MARTIKLOS, G., STANDKE, G., KNOTH, W., BELLENBERG, S., FLEIG, S. & UNGER, H. (1998): Blatt CC 4734 Leipzig. – Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Hannover.
- KUNKEL, C., ABRATIS, M., MÜLLER, B., HOFMANN, J., TIEPNER, T., AEHNELT, M., VOIGT, T., GAUPP, R., KUKOWSKI, N., TOTSCHKE, K.U. & INFLUINS, U.D.W.B.V. (2015): Die INFLUINS-Forschungsbohrung EF-FB 1/12: Einführung und erste stratigraphische Ergebnisse zur neuen Tiefbohrung im Herzen der Thüringer Mulde. – Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F., **N.F. 21**: 67-83; Jena.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (2003): 4.5.1.2 Muschelkalk. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen. 342-357; Stuttgart (Schweizerbart).
- LE MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B., LE BAS, M.J., BONIN, B., BATEMAN, P., BELLINI, G., DUDEK, A., EFREMOVA, S., KELLER, J., LAMEYRE, J., SABINE, P.A., SCHMID, R., SØRENSEN, H. & WOOLLEY, A.R. (2002): Igneous rocks - A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. – 236+XVI S.; Cambridge, U.K. (Cambridge University Press). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>
- LEY, R. (2011): Petrographische und hydrologische Untersuchungen im Raum Erdeborn – 179 S.; Diplomarb. , F.-Schiller-Univ.; Jena.
- LIEBMANN, W. (2018): Steinreicher Harz - eine Gesteinskunde für Einsteiger und Fortgeschrittene. – 284 S.; Wiebelsheim (Quelle und Meyer Verlag) .
- LINNEMANN, U. (2004): Das Saxothuringikum - Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen. – 159 S.; Dresden (Staatl. Naturhistor. Sammlungen Dresden, Museum für Min. und Geol.).

- LIPPMANN, R., VOIGT, T., BAUNACK, C., FÖHLISCH, K. & LÜTZNER, H. (2005): Geochemische Zyklen im Unteren Muschelkalk (Typus-Profil der Jena Formation, Steudnitz). – *Z. geol. Wiss.*, **33**: 27-50; Berlin. <http://www.zgw-online.de/en/media/027-051.pdf>
- LÖHR, S.C., MURPHY, D.T., NOTHDURFT, L.D., BOLHAR, R., PIAZOLO, S. & SIEGEL, C. (2017): Maghemite soil nodules reveal the impact of fire on mineralogical and geochemical differentiation at the Earth's surface. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, **200**: 25-41; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.12.011>
- LOTH, G., HÖLL, R., RITTER, A. & KENNEDY, A. (1997): U-Pb-SHRIMP-dating of zircons from the Henneberg intrusion (Thuringia). – *Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **2**: 78; Jena.
- LUTZENS, H. (1972): Metallogenetische Untersuchungen an mitteldevonischen oxidischen Eisenerzen des Elbingeröder Komplexes (Harz). – *Z. angew. Geol.*, **18**: 481-491; Hannover.
- LÜTZNER, H., VIERECK, L., HANEMANN, R. & LINDNER, A. (2022): Lithofaziesanalyse der Vulkaniklastika der Oberhof-Formation im Rotliegenden des Thüringer Waldes. – 83+149 S.; Jena (Thüringischer Geologischer Verein).
- MAAB, K., VOIGT, T. & GAUPP, R. (2010): Äolische und fluviatile Sedimentation im Unteren Buntsandstein (Calvörde-Formation) Ostthüringens. – *Beitr. Geol. Thüringen N.F.*, **17**: 169-199; Jena.
- MÄGDEFRAU, K. (1957): *Geologischer Führer durch die Trias um Jena*. – 74 S.; Jena (VEB Gustav Fischer Verl.).
- MAHER, B.A., WATKINS, S.J., BRUNSKILL, G., ALEXANDER, J. & FIELDING, R. (2008): Sediment provenance in a tropical fluvial and marine context by magnetic 'fingerprinting' of transportable sand fractions. – *Sedimentology*, **56**: 841-861; <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.00999.x>
- MATZKA, J. & MAHER, B.A. (1999): Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. – *Atmospheric Environm.*, **33**: 4565-4569; Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00229-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00229-0)
- MEINEL, G. (2003): 4.3.7 Magmatismus und Metamorphose. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. 207-214; Stuttgart (Schweizerbart).
- MENNING, M. & HENDRICH, A. (2016): STD 2016 - Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Deutsche Stratigraphische Kommission; GeoforschungsZentrum Potsdam; Potsdam. http://www.stratigraphie.de/std/Bilder/5_2.pdf
- MESCHÉDE, M. (2015): *Geologie Deutschlands - ein prozessorientierter Ansatz*. – 249 S.; Heidelberg (Springer Spektrum Verlag). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45298-1>
- MIGALK, A., MENNICKE, J. & DÖBELT, R. (2019): Ergebnisse der Schwermineraluntersuchungen von eozänen Sand- und Kiessandvorkommen in den Tagebauen Prießnitz, Schkölen-Nautschütz, Osterfeld, Grana, Klausä und Profen (Sachsen-Anhalt und Thüringen). – *Hallesches Jb. Geowiss.*, **42**: 25-66; Halle an der Saale.
- MINGRAM, B., KRÖNER, A., HEGNER, E. & KRENTZ, O. (2004): Zircon ages, geochemistry, and Nd isotopic systematics of pre-Variscan orthogneisses from the Erzgebirge, Saxony (Germany), and geodynamic interpretation. – *Geologische Rundschau*, **93**: 706-727; Stuttgart. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0414-7>
- MOHR, K. (1993): *Geologie und Minerallagerstätten des Harzes*. – 496 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- MÖLLER, S. (2009): Schwermetallgehalt in fluvialen Sedimenten im Stadtgebiet Jena. – 109, Anh. 18 S.; B.Sc. Arb. Biogeowiss., F.-Schiller-Univ.; Jena.
- MÖLLER, S. & EINAX, J.W. (2013): Metals in sediments - spatial investigation of Saale River applying chemometric tools. – *Microchemical J.*, **110**: 233-238; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.03.017>
- NEY, P. (1986): *Gesteinsaufbereitung im Labor*. – 157 S.; Stuttgart (Enke).
- NIESSEN, F., MAGENS, D. & GEBHARDT, A.C. (2007): Physical Properties of the AND-1B Core, ANDRILL McMurdo Ice Shelf Project, Antarctica. – *Terra Antarctica*, **14**: 155-166; Genua. <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=andrilrespublish>
- OLIVA-URCIA, B., KONTNY, A., VAHLE, C. & SCHLEICHER, A.M. (2011): Modification of the magnetic mineralogy in basalts due to fluid-rock interactions in a high-temperature geothermal system (Krafla, Iceland). – *Geophys. J. Int.*, **186**: 155-174; <https://doi.org/doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05029.x>

- PFEIFFER, L. & PILOT, J. (1974): Zum Alter tertiärer Effusivgesteine im Erzgebirge. – Z. geol. Wiss., **2**: 1337-1338; Berlin.
- PIRRUNG, M. (2018): Forschungsprojekt FluviMag: Fluviatiler Transport von Magnetomineralen. 5.3. Mittelgebirge und Vorland - Loquitz und mittlere Thüringische Saale. V. 3;
- PIRRUNG, M. (2021e): Forschungsprojekt FluviMag: Fluviatiler Transport von Magnetomineralen. 5.5 Zusammenfassende Darstellung über die magnetische Suszeptibilität rezenter fluviatiler und litoraler Sedimente in Zentraleuropa; <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27443.14885>
- PIRRUNG, M., HÄNDEL, M., MERTEN, D., ENGELHARDT, J., PUDLO, D., TOTSCHKE, K. & VOIGT, T. (2015): Zur Geochemie der Sedimente des Unteren und Mittleren Keupers der zentralen Thüringer Mulde. – Beitr. Geol. Thüringen N.F., **22**: 185-215; Jena. Daten: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.858878>
- PIRRUNG, M., LÜTZNER, H., BAUER, A., ENGELHARDT, J., GAUPP, R., MERTEN, D., PUDLO, D., TOTSCHKE, K.-U., VIREECK, L. & VOIGT, T. (2020): Anorganische Sedimentgeochemie im Einzugsgebiet der Thüringer Saale in den letzten ca. 600 Ma. – Beitr. Geol. Thüringen N.F., **26**: 51-104; Jena. Daten: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935055>
- POHL, A. (2006): Ausstattung und Belastbarkeit Thüringer Böden mit Schwermetallen und As unter Berücksichtigung geogener Grundgehalte und anthropogener Einträge. – 133, Anl. S.; Dissertation TU Cottbus; Cottbus. <https://opus4.kobv.de/opus4-btu/frontdoor/index/index/year/2006/docId/29>
- PRUTKIN, I., VAJDA, P., JAHR, T., BLEIBINHAUS, F., NOVÁK, P. & TENZER, R. (2017): Interpretation of gravity and magnetic data with geological constraints for 3D structure of the Thuringian Basin, Germany. – Journal of Applied Geophysics, **136**: 35-41; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.039>
- PUFF, P. & KLEIN, H. (2011): Die Solling-Formation des Buntsandsteins bei Jena / Ostthüringen. – Beiträge zur Geologie von Thüringen, N.F., **18**: 5-24;
- PUFF, P. & LANGBEIN, R. (2003): 4.5.1.1 Buntsandstein. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen. 326-341; Stuttgart (Schweizerbart).
- QUEITSCH, M. (2016): Modeling and inversion of airborne full tensor magnetic gradiometry data in the Thuringian Basin and Forest. – 159 S.; Promotion, Friedrich-Schiller-Universität; Jena.
- RACHWAŁ, M., RYBAK, J. & ROGULA-KOZŁOWSKA, W. (2018): Magnetic susceptibility of spider webs as a proxy of airborne metal pollution. – Environm. Poll., **234**: 543-551; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.088>
- RADZINSKI, K.-H., KÄSTNER, H., SEIDEL, G., WIEFEL, H., BERGER, H.-J., BELLENBERG, S., FLEIG, S. & SENNHOLZ, M. (1999): Blatt CC 5534 Zwickau. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- RAUEN, A., SOFFEL, H.C. & WINTER, H. (2000): Statistical analysis and origin of the magnetic susceptibility of drill cuttings from the 9.1-km-deep KTB drill hole. – Geophys. J. Int., **142**: 83-94; Oxford. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00141.x>
- REH, H. & SCHRÖDER, N. (1974): 6.1 Erze. – In: HOPPE, W. AND SEIDEL, W. (Hrsg.): Geologie von Thüringen. 867-897; Gotha/Leipzig (VEB Hermann Haack, Geogr.-Kartogr. Anst.).
- RYBAK, J., WRÓBEL, M., KRZYŻYŃSKA, R., ROGULA-KOZŁOWSKA, W. & OLSZOWSKI, T. (2022): Genotoxicity and Toxicity of Urban Road Dust - a Comparison Study for Lower and Upper Silesia in Poland. – Social Science Research Network, 1-20; Amsterdam. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4048726>
- SCHEFFLER, H., ZANGE, H., FLÜGEL, H. & MAHLKE, M. (2002): Das Elbingeröder Besucherbergwerk "Drei Kronen & Ehrh". – 96 S.; Elbingerode (Förderverein Besucherbergwerk "Drei Kronen & Ehrh").
- SCHMIEDER, F., DOBENECK, T.V. & BLEIL, U. (2000): The Mid-Pleistocene climate transition as documented in the deep South Atlantic Ocean: initiation, interim state and terminal event. – Earth Planet. Sci. Lett., **179**: 539-549; Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00143-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00143-6)
- SCHRAMM, H., POHL, A., WUNDERLICH, J. & BISCHOFF, R. (1997): Atlas der Schwermetallgehalte Thüringer Böden 1 : 400 000, Hintergrundwerte für Schwermetalle und Arsen in Oberböden und bodenbildenden Substraten typischer Bodengesellschaften. – 58 S.; Weimar (Thür. LA Geol.).
- SEBASTIAN, U. (2013): Die Geologie des Erzgebirges. – 268 S.; Berlin (Springer).

- SEIDEL, G. (1993): Geologie von Jena. – 68 S.; Jena (Thüringischer Geologischer Verein).
- SEIDEL, G. (2003): Geologie von Thüringen. – 601 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- SEIDEL, G., KÄSTNER, H., WIEFEL, H., BOLSMANN, D. & UNGER, H. (1998): Blatt CC 5526 Erfurt. – Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Hannover.
- SEIDEL, G., KÄSTNER, H., WIEFEL, H., HEUSE, T., HUCKRIEDE, H., KATZSCHMANN, L., WUCHER, K., SCHRÖDER, A., KÜMPEL, P., GÜNTHER, M. & HAGEMEISTER, H. (2002): Geologische Übersichtskarte von Thüringen 1 : 200 000. – Thür. L.A. Umwelt Geologie; Jena.
- SHAHRI, H., KARIMPOUR, M.H. & MALEKZADEH, A. (2010): The exploration of gold by magnetic method in Hired Area, South Khorasan, a case study. – *J. Earth Space Phys.*, **35**: 33-44; Tehran, Iran.
- STATHAM, P.J., HOMOKY, W.B., PARKER, E.R., KLAR, J.K., SULBURN, B., POULTOND, S.W., KRÖGER, S., PEARCE, R.B. & HARRIS, E.L. (2019): Extending the applications of sediment profile imaging to geochemical interpretations using colour. – *Cont. Shelf Res.*, **185**: 16-22; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.12.001>
- STEDINGK, K. (2008): 6.7 Erze und Spate. – In: BACHMANN, G.H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. AND SCHWAB, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. 525-543; Stuttgart (Schweizerbart).
- STEDINGK, K., RENTZSCH, J., KNITZSCHKE, G., SCHENKE, G., HEINRICH, K. & SCHEFFLER, H. (2002): Potenziale der Erze und Spate in Sachsen-Anhalt. – *Mitteilungen zur Geologie von Sachsen-Anhalt, Beiheft*, **5**: 75-131;
- STENDEBACH, B. (2009): Schwermetallbelastung rezenter Bachsedimente im Gessenbach bei Ronneburg. – 43, Anh. 19 S.; B.Sc. Arb. Biogeowiss., F.-Schiller-Univ.; Jena.
- STETTNER, G., BERGER, K. & KOHL, F. (1960): Blatt Nr. 5836 Münchberg. – Bayer. Geol. LA München.
- STEUER, A., SMIRNOVA, M., BECKEN, M., SCHIFFLER, M., GÜNTHER, T., ROCHLITZ, R., YOGESHWAR, P., MÖRBE, W., SIEMON, B., COSTABEL, S., PREUGSCHAT, B., IBS-VON SEHT, M., SANTE ZAMPA, L. & MÜLLER, F. (2020): Comparison of novel semi-airborne electromagnetic data with multi-scale geophysical, petrophysical and geological data from Schleiz, Germany. – *Journal of Applied Geophysics*, **182**: 1-20; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104172>
- THOMPSON, R. & OLDFIELD, F. (1986): Environmental magnetism. – 227 S.; London (Allen & Unwin).
- TIECHER, T., CANER, L., GOMES MINELLA, J.P. & RHEINHEIMER DOS SANTOS, D. (2015): Combining visible-based-color parameters and geochemical tracers to improve sediment source discrimination and apportionment. – *Sci. total Environm.*, **527-528**: 135-149; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.103>
- TUCKER, M.E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrographie. – 265 S.; Stuttgart (Enke).
- VAN LAATEN, N. (2020): Metals in urban dust: Potentials of spider web biomonitoring and statistical approaches to identify anthropogenic sources of urban particulate matter. – 110+64 S.; Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität; Jena.
- VAN LAATEN, N., VON TÜMLING, W., MERTEN, D., BRO, R., SCHÄFER, T. & PIRRUNG, M. (2021): Spider web biomonitoring: A cost-effective source apportionment approach for urban particulate matter. – *Environm. Poll.*, **286**: 117328; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117328>
- VAN PEER, T.E., LIEBRAND, D., XUAN, C., LIPPERT, P., AGNINI, C., BLUM, N., BLUM, P., BOHATY, S.M., BOWN, P.R., GREENOP, R., KORDESCH, W.E.C., LEONHARDT, D., FRIEDRICH, O. & WILSON, P.A. (2014): Data report: revised composite depth scale and splice for IODP Site U1406. – *Proc. IODP*, **342**: 1-23; Boulder, Colorado. <https://doi.org/10.2204/iodp.proc.342.202.2017>
- VOIGT, T. (2007): Schwermineralseifen im Oberen Buntsandstein Thüringens. – *Beitr. Geol. Thüringen N.F.*, **14**: 33-54; Jena.
- VOIGT, T. & LINNEMANN, U. (1996): Resedimentation im Unteren Muschelkalk – das Profil am Jenzigt bei Jena. – *Beitr. Geol. Thüringen N.F.*, **3**: 153–167; Jena.
- VOS, W.D. & TARVAINEN, T. (2005): Geochemical Atlas of Europe - Part 2: Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures. maps and related publications. – 429 S.; Helsinki (Ass. Geol. Surveys European Union (EuroGeoSurveys) / Geol. Survey Finland). <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/part2.php>

- WALDECK, H. & HAMMERSCHMIDT, M. (1986): Blatt CC 4726 Goslar. – Bundesanst. Geowiss. Rohstoffe; Hannover.
- WANG, X.S. & QIN, Y. (2005): Correlation between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoil: a case study from the city of Xuzhou, China. – *Environm. Geol.*, **49**: 10-18; Berlin. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0015-1>
- WEIGEL, C., VOGLER, K.C., PLOCH, A. & TUDESHKI, H. (2019): Online quality control of aggregates based on the measurement of magnetic susceptibility. – In: LITVINENKO, V. (Hrsg.): *Topical Issues of rational use of natural resources 2019*. 1-10; London (Taylor & Francis eBooks). <https://doi.org/10.1201/9781003014577-39>
- WORM, H.-U. (1998): On the superparamagnetic—stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. – *Geophys. J. Int.*, **133**: 201-206; Oxford. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.1331468.x>
- WURM, A. (1961): *Geologie von Bayern - Frankenwald, Münchberger Gneismasse, Fichtelgebirge, Nördlicher Oberpfälzer Wald*. – 555 S.; Berlin (Borntraeger).
- XIE, D., YAO, S., CAO, J., HU, W., WANG, X. & ZHU, N. (2021): Diagenetic alteration and geochemical evolution during sandstones bleaching of deep red-bed induced by methane migration in petroliferous basins. – *Mar. Petrol. Geology*, **127**: 104940; Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104940>
- XU, X., QUIANG, X., ZHAO, H. & FU, C. (2020): Magnetic mineral dissolution recorded in a lacustrine sequence from the Heqing Basin, SW China, and its relationship with changes in the Indian monsoon. – *J. Asian Earth Sci.*, **188**: 104081; Amsterdam. Xinwen Xua,b, Xiaoke Qiangb,*, Hui Zhaob, Chaofeng Fuc
- YOUNG, C.A. (2019): *SME mineral processing and extractive metallurgy handbook*. – 2312 S.; Englewood, Colorado (Society for Mining, Metallurgy & Exploration).
- ZECH, J., JEFFRIES, T., FAUST, D., ULLRICH, B. & LINNEMANN, U. (2010): U/Pb-dating and geochemical characterization of the Brocken and the Ramberg Pluton, Harz Mountains, Germany. – *Geologica Saxonica*, **56**: 9-24; https://www.senckenberg.de/wp-content/uploads/2019/08/02_zech.pdf
- ZERLING, L., MÜLLER, A., JENDRYSCHIK, K., HANISCH, C. & ARNOLD, A. (2001): Der Bitterfelder Muldestausee als Schadstoffsenke. – *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-naturwiss. Klasse*, **59**: 1-69;
- ZUNDEL, M., FRIEDEL, C.-H. & GRIMMER, J.C. (2019): Magnetic fabric constraints for syn-magmatic doming of the laccolithic Brocken granite pluton (Harz Mountains, northern Germany). – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)*, **108**: 799-816; <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01679-w>

Autorenanschriften:

PD DR. MICHAEL PIRRUNG¹,
DR. HANNES GROBE²,
JÖRN ENGELHARDT³,
PD DR. THOMAS VOIGT⁴,
DR. NEELE VAN LAATEN⁵

^{1, 4, 5} Friedrich-Schiller-Universität Jena, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät, Institut für Geowissenschaften, Burgweg 11, 07749 Jena

² Alfred-Wegener-Institut und Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung,
Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven

³ Geoplan Ingenieure Dr. Köhler GmbH, Kantstr. 2, 04275 Leipzig

E-Mail:

Michael.Pirrung@uni-jena.de

Hannes.Grobe@awi.de

Engelhardt@geoplanweb.de

Thomas.Voigt@uni-jena.de

Neele.Van-Laaten@uni-jena.de