

Bearbeitungsstand: 21.10.2021, V. 2*

Forschungsprojekt FluviMag: Fluviatiler Transport von Magneto-Mineralen

Michael Pirrung¹, Martina Kunz-Pirrung², Jörn Engelhardt³

¹: Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität Jena,
 Burgweg 11, D-07749 Jena, E-Mail: michael.pirrung@uni-jena.de

²: Helmholtzzentrum für Umweltforschung UFZ,
 Permoser Straße 15, D-04318 Leipzig, E-Mail: martina.kunz-pirrung@ufz.de

³: Geoplan Ingenieure, Cranachstraße 46, D-99423 Weimar, E-Mail:
engelhardt@geoplanweb.de

*: eine frühere Version bezog sich nur auf Deutschland.

5.5. Zusammenfassende Darstellung über die magnetische Suszeptibilität rezenter fluviatiler und litoraler Sedimente in Zentraleuropa

Im Forschungsprojekt FluviMag werden Proben fluviatiler und litoraler Sedimente aus Zentraleuropa untersucht, d.h. bezogen auf die Probenlokationen vor allem aus Deutschland, Frankreich, und einigen angrenzenden Regionen.

[Tab. 5.5-1](#) gibt den Stand der Probenanzahl zum Zeitpunkt dieses Berichtes wieder. Weitere Proben aus Malta, Rußland und Zypern sowie den kanarischen Inseln, Madeira, Mallorca, La Réunion und vom Baikalsee sind hier nicht aufgeführt, bereitgestellt z.T. von T. Voigt und G. Wählen. **An dieser Stelle möchten wir uns bei allen herzlich bedanken, die uns durch die Entnahme von Proben und Dokumentation der Lokationen unterstützt haben!**

Tab. 5.5-1: Probenanzahl N nach Ländern aufgeführt und Namen der Probenehmer*innen, ein * steht für die Autorin und Autoren dieser Studie.

Land	N	Probeentnahme durch
Dänemark	2	N. van Laaten
Frankreich	212	D. Merten, B. & E. Paulus, *
Niederlande	2	Marc Pirrung
Deutschland	1053	D. Beyer, M. Böhm, R. Dietrich, H. Grobe, P. Frenzel, C. Hanfland, S. Hupfer, B. Kreher-Hartmann, T. Lange, R. Ley, A. Märten, D. Merten, B. & E. Paulus, R. Sieger, B. Stendebach, S. Tetzke, T. Voigt, G. Weinzierl, *
Schweiz	71	F. Bode, Marc Pirrung, W. & J. Pirrung, *
Österreich	6	D. Nägelein & J. Buschhardt, *
Italien	5	D. Nägelein & J. Buschhardt
Polen	3	*
Tschechien	8	*
Gesamt	1362	

Zu mehreren Teilgebieten des FluviMag Projektes finden sich auf der website www.angeo.uni-jena.de Fallstudien. Im Folgenden sollen einige generelle Ergebnisse vorgestellt werden, die auf dem gesamten bisher bestehenden Datensatz basieren.

[5.5.1. Generelles zur Geologie im Untersuchungsgebiet](#)

[5.5.2. Magnetische Suszeptibilität rezenter Sedimente](#)

[5.5.3. Magnetische Suszeptibilität der Sedimente und ihrer Liefergesteine](#)

[5.5.4. Magnetische Suszeptibilität und Schwermetallgehalte](#)

[5.5.5. Ausblick](#)

[5.5.6. Zitierte Literatur](#)

5.5.1. Generelles zur Geologie im Untersuchungsgebiet

Geologisch umfasst der hier untersuchte Bereich mehrere Großstrukturen:

1. Annähernd ovale Becken: Norddeutsch-Polnisches Becken, Pariser Becken, Becken von Aquitanien, mit einer relativ einheitlich ausgebildeten Füllung von permisch-mesozoisch-känozoischen Sedimentiten und Sedimenten, siehe u.a. (WALTER & DORN 2007), (ANONYMUS 1980b). Entlang der Täler finden sich die meisten größeren Siedlungen, auf tonig-mergeligen Hochflächen und in Tälern liegen häufig landwirtschaftlich genutzte Gebiete, Wälder liegen meist auf Steilstufen und Ausbissbereichen nährstoffarmer sandiger oder kalkiger Sedimentite oder saurer kristalliner Gesteine.
2. Große langgestreckte Grabenstrukturen: Limagne-, Bresse-, Rhône-Graben, Oberrheingraben, Niederrheinische Senkungszone, Egergraben, mit größeren Siedlungen und Industrieregionen neben landwirtschaftlich genutzten Gebieten.
3. Mittelgebirgsregionen mit variskischer Faltung und Metamorphose, im Wesentlichen vor rund 360 bis 300 Ma im Karbon aufgefaltet, im Perm weitgehend eingeebnet, im späten Mesozoikum und im Känozoikum gehoben: Armorikanisches Massif, Massif Central, Montagne Noire, Rheinischer Schild, Harz, Thüringisch-Vogtländisch-Fränkisches Schiefergebirge, Thüringer Wald, Erzgebirge, Böhmisches Masse. Die meisten Erzlagerstätten liegen im Bereich der Mittelgebirge, die – verglichen mit Becken und Gräben – meist relativ dünn besiedelt, nur lokal durch Großindustrie geprägt und in der Regel in Höhenlagen stärker bewaldet, in Talungen und auf Hochflächen landwirtschaftlich genutzt sind.
4. Hochgebirge, langgestreckte, zum Teil gebogene Faltengebirge: kretazisch-paläogene Kollisionszonen der Pyrenäen, aufgefaltet um rund 90 Ma, und der Alpen, um 60 Ma, meist relativ dünn besiedelt und außerhalb der Täler bis zur Baumgrenze oft stark bewaldet.
5. Känozoische Vulkangebiete, d.h. jünger als 66 Ma: u.a. Auvergne, Eifel, Siebengebirge, Westerwald, Kaiserstuhl, Vogelsberg, Rhön, Hessische Senke, Hegau, Oberlausitz, Egergraben, meist dünn besiedelt und bewaldet.

Zusammenfassende geologische Literatur zu Ländern oder größeren Teilen davon findet sich u.a. bei (WALTER & DORN 2007), (ANONYMUS 1980b), (WATERLOT, et al. 1973), (HENNINGSEN 1981), (EBERLE, et al. 2010), (LABHART 1992), (BERES, et al. 2013), (SCHÖNLAUB & HOFMANN 2007), zu Vulkangebieten bei (BROUSSE & LEFEVRE 1990), (ANONYMUS 2003), (BRULÉ-PEYRONIE & LEGROS 1996), (SCHMINCKE 2009), (FRECHEN 1976), (ROTH 1993); z.T. sind neuere Auflagen verfügbar. Zur Stratigraphie Deutschlands geben (MENNING & HENDRICH 2016) eine tabellarische Übersicht.

5.5.2. Magnetische Suszeptibilität fluviatiler und litoraler Sedimente

In [Abb. 5.5-1](#) wird für sandige und siltig-tonige Gesamtgesteinsproben aus Fließgewässern, einigen stehenden Gewässern, und litoralen Ablagerungen die masse-spezifische magnetische Suszeptibilität, **MS**, gezeigt, die Frequenzabhängigkeit der MS findet sich in [Abb. 5.5-2](#).

Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes kann eine Beprobung im Rahmen eines Forschungsprojektes nicht flächendeckend sondern nur stichprobenartig erfolgen. In [Abb. 5.5-1](#) wird die unterschiedliche Anzahl von einerseits sandigen, andererseits pelitischen Proben deutlich: mit nur 313 Proben konnten tonig-siltige Proben relativ selten entnommen werden gegenüber 1082 sandigen Proben. Grund dafür ist vor allem, dass die Proben mit wenigen Ausnahmen von den Ufern der Gewässer aus entnommen wurden und nur relativ selten frische Überflutungsebenen-Sedimente beprobt werden konnten. Oft erfolgte die Entnahme von Proben unter Brücken, wo die Bodenoberfläche vor Abspülung und Durchwühlung geschützt ist. Die Frequenzabhängigkeit wurde an 312 neueren Proben bestimmt, siehe [Abb. 5.5-2](#), bei Rohwerten $>20 [10^{-6} \text{ cgs}]$, bei geringfügig negativen Werten wurde eine „0“ eingetragen; eine Reihe älterer Proben könnte hier ggfs. noch nachgemessen werden.

Bei der masse-spezif. **MS sandiger Proben**, [Abb. 5.5-1](#) oben, liegen viele Proben erhöhter MS im Bereich der variskisch deformierten Mittelgebirge, auf die sich der historische Erzbergbau z.B. in Harz, Thüringer Schiefergebirge und Erzgebirge konzentrierte. Im Satellitenbild sind Mittelgebirge durch dunklere Grüntöne infolge der stärkeren Bewaldung zu erkennen. Lediglich in der Bretagne und westlichen Normandie ist das ebenfalls variskisch geprägte Armorikanische Massif, das nur Höhen $<400 \text{ m ü.M.}$ aufweist, nicht erkennbar, da es überwiegend landwirtschaftlich genutzt wird. Einige erhöhte Werte hängen mit den neogenen Vulkaniten von Eifel, Siebengebirge und Vogelsberg und den permischen Vulkaniten im Saar-Nahe-Becken zusammen. Dagegen liegen litorale Sande der Bretagne ganz überwiegend bei auffallend niedrigen MS Werten. Der Grund hierfür dürfte der hohe Anteil saurer Granite im Armorikanischen Massif sein. Anomal hohe Werte auf Langeoog, ostfriesische Inseln, und Usedom, Ostseeseite, hängen mit Strandseifen zusammen. Ein hoher Wert in Cancale am Ärmelkanal könnte durch den Hafenbetrieb bzw. Austernfischerei beeinflusst sein. Weitere punktuell erhöhte Werte, z.B. am Nohain in Burgund, sind durch Ziegelbruchstücke und andere anthropogene Stoffe verursacht.

Die masse-spezif. **MS pelitischer Proben**, [Abb. 5.5-1](#) unten, zeigt insgesamt eine ähnliche Verteilung wie die der sandigen Proben, wobei im Litoral abseits von Ästuaren nur wenige Proben, meist auf der Landseite der Inseln im Rückseitenwatt, entnommen werden konnten. Erhöhte Werte treten an der Unterweser um Bremerhaven auf, dafür könnten der Schiffbau bzw. der Hafenbetrieb verantwortlich sein. Pelite der Elbe zeigen im Mittellauf ausgesprochen hohe Werte, der Grund hierfür ist noch unklar. Ebenfalls erhöhte Werte um Gera dürften zumindest teilweise mit dem Erzbergbau im Vogtland und Westerzgebirge sowie im Ronneburger Uranbergbauggebiet zusammenhängen. Insgesamt ist die Ansicht dadurch beeinflusst, dass höher magnetische Proben zuoberst geplottet werden und benachbarte Punkte niedrigerer MS verdecken können.

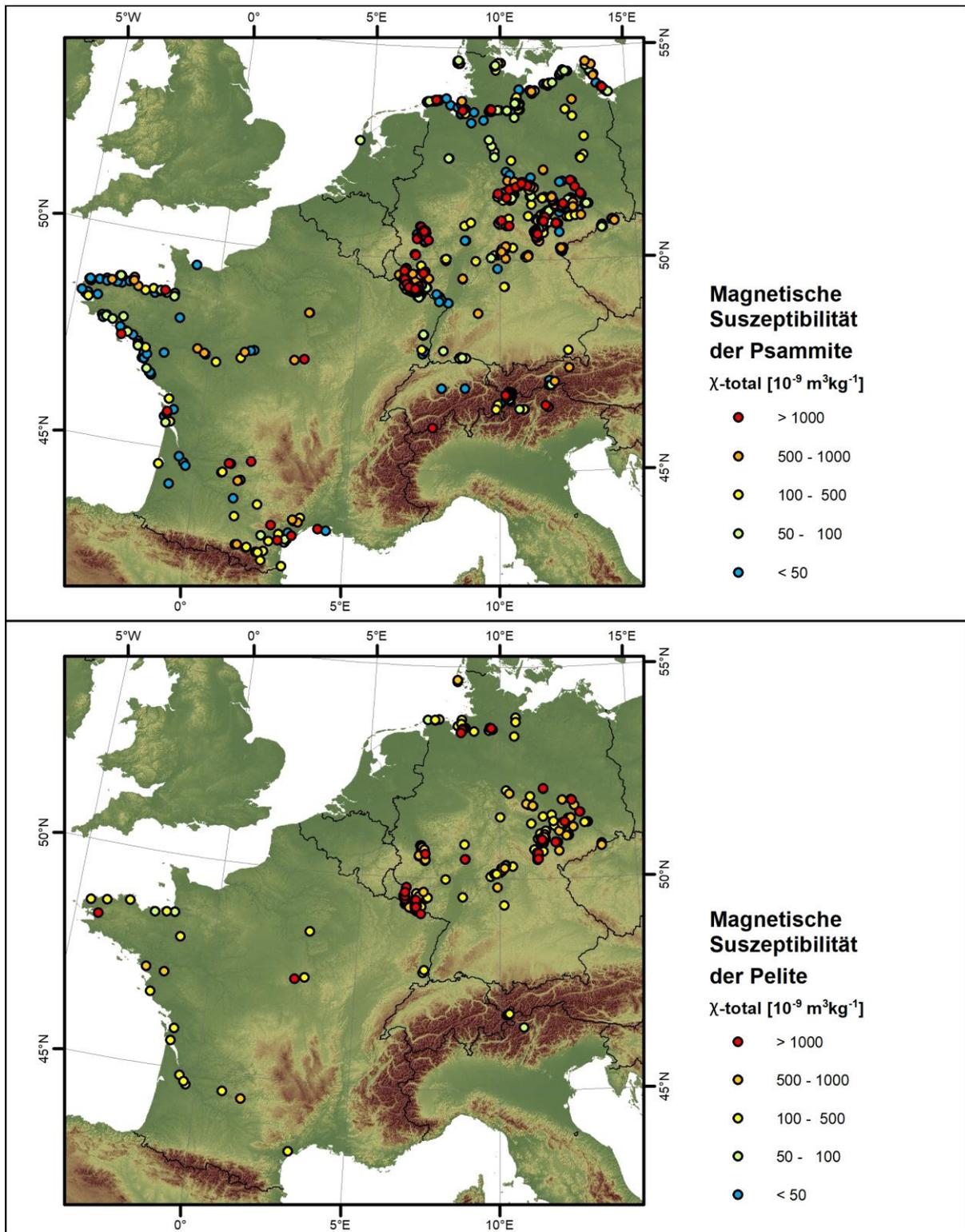


Abb. 5.5-1: Masse-spezifische magnetische Suszeptibilität, MS in [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], fluviatiler, lakustriner und litoraler rezenter Sedimente, oben vorwiegend sandiger Proben bzw. der Sandfraktion, unten vorwiegend pelitischer Proben bzw. der Ton- und Siltfraktion. © Geländemodell: "EU-DEM v1", European Commission – DG ENTR, 2012, EU-DEM Version 1, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eu-dem>; © Grenzen: "Countries, 2020": EuroGeographics, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/countries>.

Beim Vergleich beider Fraktionen fällt weiterhin auf, dass es kaum siltig-tonige Proben niedriger Magnetisierbarkeit, etwa $<100 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, gibt. Dies überrascht wenig, da die meisten umweltmagnetischen Studien tonige Partikel als primäre Träger stärker magnetisierbaren Materials ansehen.

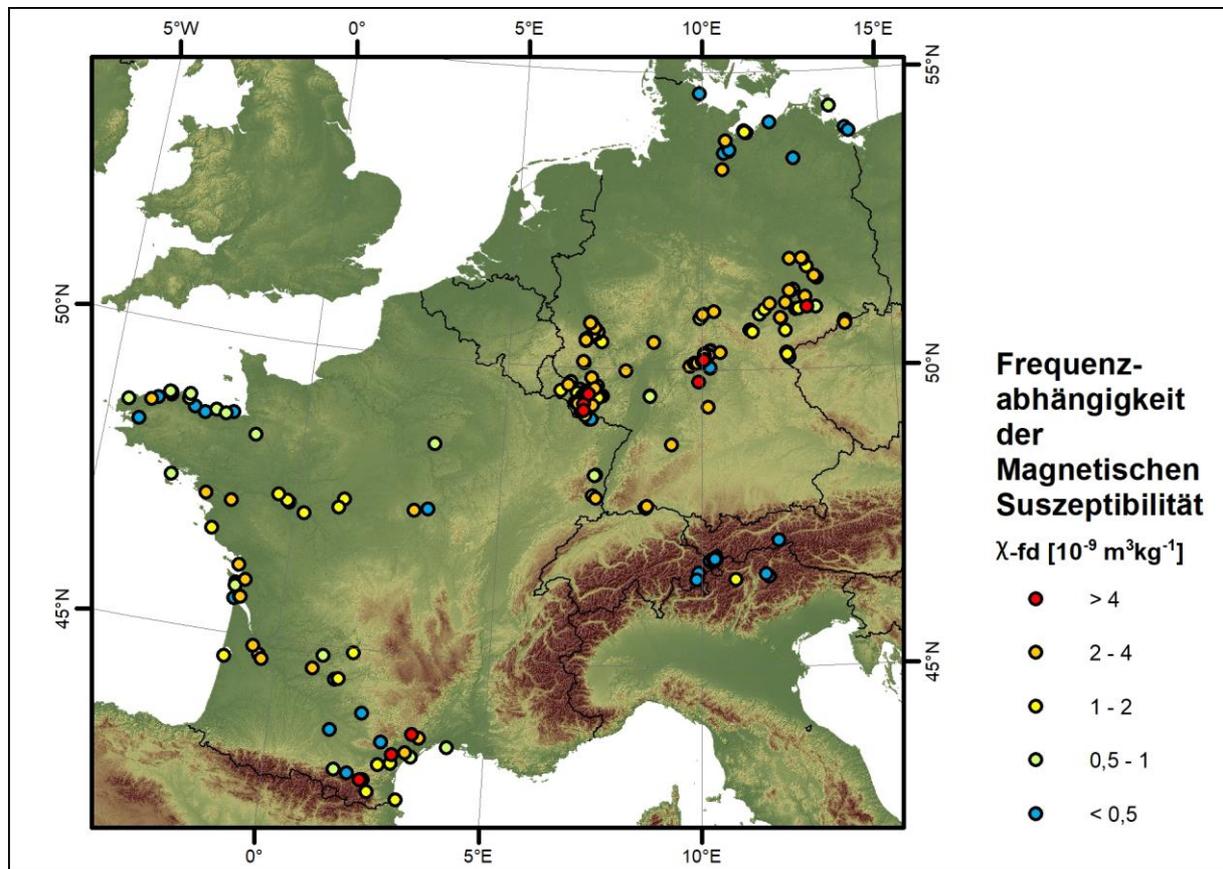


Abb. 5.5-2: Frequenzabhängigkeit der masse-spezifischen magnetischen Suszeptibilität [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] fluviatiler, lakustriner und litoraler rezenter Sedimente. © der Kartengrundlage: siehe [Abb. 5.5-1](#).

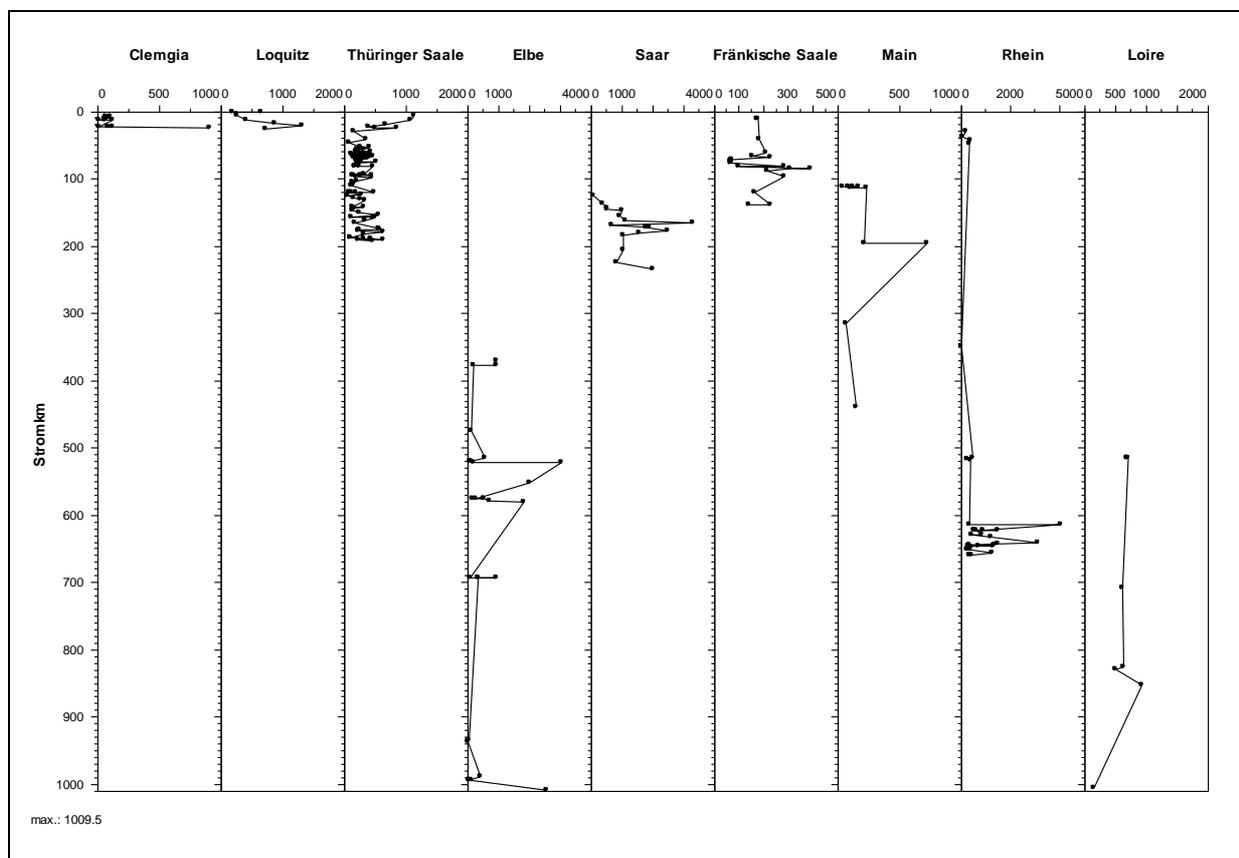
Bei der **Frequenzabhängigkeit der MS**, [Abb. 5.5-2](#), die den Anteil sehr feiner superparamagnetischer Minerale widerspiegelt, zeichnet sich das Litoral generell durch ganz überwiegend niedrige Werte aus. Dies ist mit der leichten Mobilisierbarkeit feiner Partikel durch die Brandung zu erklären. Erhöhte Werte finden sich vor allem im ehemaligen Saarkohlenbergbau-Revier, was mit den hier aufgeschlossenen feinkörnigen paläozoischen Siliziklastika zusammenhängen dürfte.

Tab. 5.5-2: Auflistung der Mediane für in dieser Studie bestimmte magnetische Parameter rezenter fluviatiler, lakustriner und litoraler Sedimente; N = Probenanzahl.

MS Sande [$10^{-9}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$]	N	MS Pelite [$10^{-9}\text{m}^3\text{kg}^{-1}$]	N	χ_{fd} [%]	N	Einfluß des Menschen
276	727	461	247	1.5	240	Ortschaften, Bergbau etc. stromauf oder nahe Probe
88	411	220	66	0.6	72	vernachlässigbar bzw. natürliche Umgebung
204	1082	412	313	1.2	312	undifferenziert, d.h. gesamter Datensatz

Berechnet man **Mediane** für die drei Datensätze, so ergeben sich in [Tab. 5.5-2](#) deutlich niedrigere MS-Werte für nach Geländeeindruck, Luftbildbefund und Bergbau-Recherche als natürlich bzw. naturnah einzustufende Probenlokationen im Vergleich zu vermutlich stärker anthropogen beeinflussten Proben. **Damit eignet sich die Methode der MS-Messung tendenziell als Nachweis für anthropogene Kontaminationen der Gewässersedimente.** Einschränkend gilt jedoch, dass bei hohen geogenen MS-Gehalten diese Unterscheidung kaum möglich sein wird, etwa in Vulkanfeldern oder kristallinen Gebieten mit vorrangig mafischer Lithologie. Ein Material, das **häufig zu beobachten** ist und vermutlich **wesentlich zu erhöhten Werten der MS in Gewässersedimenten** führt, sind **Ziegel- und Backsteinbruchstücke** mit einem Median von $1361 [10^{-9}m^3kg^{-1}]$, $N = 6$. Für bisher zwei Betonproben liegen die Werte etwa ähnlich.

Für einige Flüsse liegen auf die **Stromlänge** bezogene Daten vor, und zwar für die Distanz ab Quelle, nur für den Rhein ab alter Konstanzer Rheinbrücke stromab Ausfluß des Obersees des Bodensees, siehe Wikipedia, und für die Thüringer Saale stromab der Loquitz Mündung. Teilweise zählt die offizielle Stromkilometrierung ab Grenze oder ab Mündung, dies wurde jeweils berücksichtigt. Für die Loire gibt es keine im Gelände offensichtliche offizielle Kilometrierung, aus Wikipedia ergibt sich die Fließlänge zu 1006 km. Mittels Google Earth wurden die Längen von Flußabschnitten der Loire bestimmt, wobei hier die Trübung zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme teilweise das Festlegen der Mitte der Hauptrinne, sofern überhaupt unterscheidbar, unmöglich macht und aufgrund der zahlreichen, sicher auch zeitlich variablen, Untiefen ohnehin nur eine grobe Abschätzung der Fließstrecke möglich ist, die einzelnen Angaben haben hier sicher Fehler im Kilometer-Bereich. In [Abb. 5.5-3](#) sind die MS-Werte gegen Fließstrecke für einige Flüsse dargestellt.



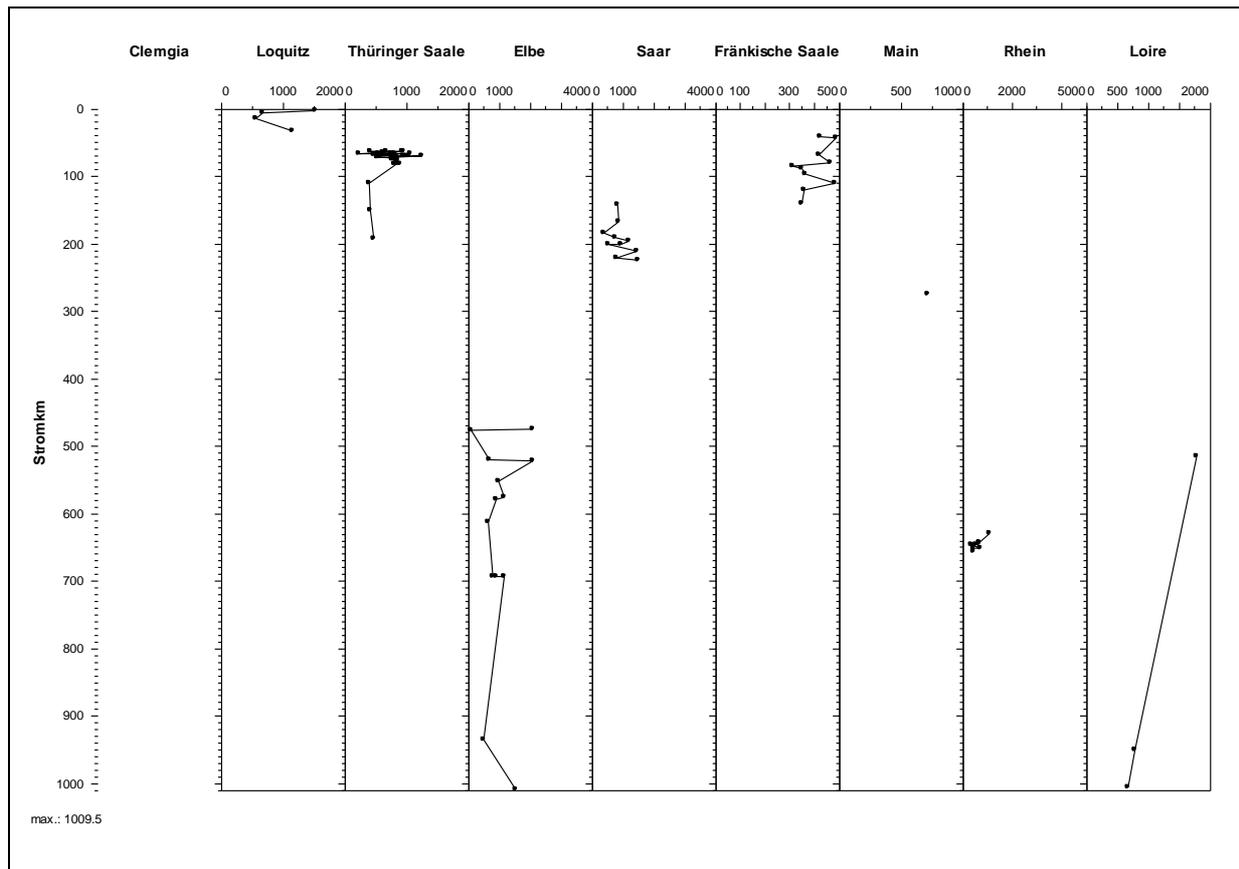


Abb. 5.5-3: Oben bzw. vorherige Seite masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] sandiger, unten pelitischer Proben gegen die Fließstrecke aufgetragen.

Bei Betrachtung **sandiger Sedimente gegen Fließstrecke** sieht man bei der Clemgia im Unterengadin, Schweiz, im Unterlauf sehr gut den Übergang von Metagranitoiden und Karbonaten des Ostalpins mit niedrigen MS-Werten zu Ophiolithen des Penninischen Ozeans mit hohen Werten. Die Loquitz im Thüringischen Schiefergebirge zeigt keinen einheitlichen Trend der MS, unterhalb der Loquitz-Mündung liegt die MS der Sedimente der Thüringischen Saale, deren Kilometrierung in dieser Darstellung mit der Loquitz-Mündung beginnt, zunächst vergleichbar hoch. Sobald die Thüringische Saale aus dem Schiefergebirge in die Thüringer Mulde eintritt sinken die MS Werte, da permische Karbonate und triassische Sandsteine Material niedriger MS zuliefern, die auftretenden Schwankungen hängen mit Korngrößenschwankungen je nach Probennahmesituation zusammen. Die Elbe zeigt starke Wechsel der MS-Werte, die auf lokale anthropogene Einträge hindeuten. Bei der Saar liegen die Werte über triassischen Sedimentiten zunächst niedrig, ab dem Eintritt in das Kohlebergbaurevier des karbonischen Saarbrücker Hauptsattels mit Stahlindustrie steigen die Werte deutlich an und verbleiben im Unterlauf mit Schwankungen im Schiefergebirge mit unterdevonischen Siliziklastika auf hohem Niveau. Die Fränkische Saale zeigt im Oberlauf mittlere MS Werte in Tonsteinen und Sandsteinen des Keupers, im Mittellauf gibt es um Bad Kissingen starke Schwankungen in triassischen Sedimentiten, und im Unterlauf liegen über immer noch triassischen Sedimentiten die Werte wieder im mittleren Bereich. Der Main zeigt ähnlich abrupte Schwankungen der MS wie die Elbe. Der Rhein weist überwiegend niedrige Werte auf, aber ab dem Eintritt in die Niederrheinische Bucht neben dem Siebengebirge liegen die Werte hoch, offenbar bedingt durch Vulkanite der Eifel und des Siebengebirges. Für die Loire lässt sich noch kein Trend ableiten. Beim Vergleich der Flußläufe liegen die MS-Werte der Mittleren Thüringischen Saale mit etwa $300 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ im gleichen Bereich wie - von lokalen Anomalien abgesehene - Hintergrundwerte von Elbe und Rhein. Die Werte

der Mittleren und Unteren Saar liegen mit Werten um $1000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ deutlich höher, was für den Einfluß der Schwerindustrie spricht.

Bei Werten der **MS pelitischer Sedimente gegen die Fließstrecke** fallen viele Werte in den Bereich um $500 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$, lediglich die der mittleren Saar liegen auch hier mit etwa $1000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ wieder deutlich höher. Bei der Elbe fallen wieder die relativ abrupten Schwankungen auf. Generell wären weitere Proben der Sedimente dieser Flüsse wünschenswert.

Tab. 5.5-3: Anzahl N von Proben in Deutschland, bei denen die masse-spezif. MS an Kornfraktionen bestimmt wurde.

Region	Gewässer	N	Referenz
Westfriesische Inseln	Langeoog	22	* FluviMag
Unteres Weser	Weser	11	*
Unteres Weser	Geeste	2	*
Untere Elbe	Aue	1	*
Untere Elbe	Elbe	7	*
Untere Elbe	Este	1	*
Untere Elbe	Landwetter	1	*
Untere Elbe	Lühe	1	*
Mittelrhein	Rhein	4	*
Mittelsaale	Thüringer Saale	25	(BEYER 2008), (MÖLLER 2009) & *
Mittelsaale	Leutra	1	(BEYER 2008), (MÖLLER 2009)
Mittelsaale	Roda	1	(BEYER 2008), (MÖLLER 2009)
Ronneburger Horst	Weißer Elster	1	(STENDEBACH 2009)
Ronneburger Horst	Lammsbach	1	(STENDEBACH 2009)
Ronneburger Horst	Gessenbach	7	(STENDEBACH 2009)
Ronneburger Horst	Badergraben	7	(STENDEBACH 2009)
Gesamt		93	

Die **MS von Kornfraktionen** wurde nur an ausgesuchten Proben bestimmt, siehe [Tab. 5.5-3](#). In [Abb. 5.5-3](#) oben zeigt sich die höchste MS einmal in der Siltfraction, 2-63 μm , und einmal im Bereich Grobsand, um 0.5-1 mm. Kritisch bezogen auf die Genauigkeit der MS-Bestimmung ist eine Messung der MS bei Fraktionsgewicht $<1 \text{ g}$, diese Daten wurden daher für diese Abbildung nicht berücksichtigt. Dadurch gehen aber auch je nach Fraktion unterschiedlich viele Daten in die Berechnung der Mediane der MS einzelner Fraktionen ein, was zu Verzerrungen führen kann. Daher wurde in [Abb. 5.5-3](#) unten die MS der jeweiligen Fraktion durch die MS der sandigen bzw. pelitischen Ausgangsprobe, also die MS der Gesamtfraction, dividiert, was eine Normierung bedingt. Als Resultat liegt wieder in der Siltfraction die höchste MS vor, jedoch gefolgt von der Feinkiesfraction im Bereich 2-3 mm.

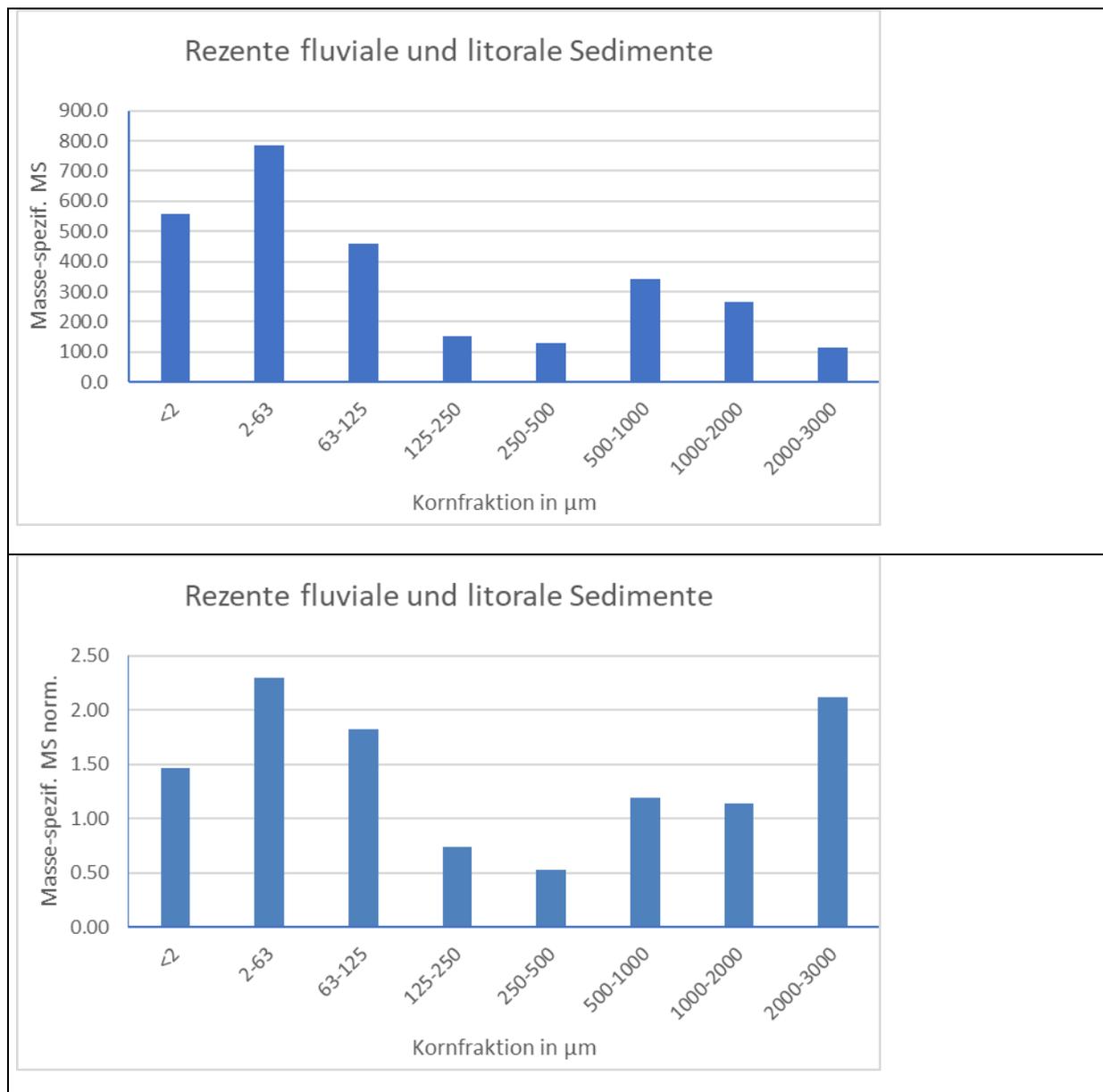


Abb. 5.5-3: Mediane der masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] von Kornfraktionen, oben berechnet mit den tatsächlich gemessenen MS Werten einzelner Fraktionen, unten MS einer Fraktion normiert auf die MS der vorwiegend sandigen oder pelitischen Ausgangsprobe. Für 62 hier nicht dargestellte Fraktionen $< 63 \mu\text{m}$ würde der Median der MS 798 [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] betragen, also sehr ähnlich dem hier aufgeführten Median der MS der Siltfraction liegen.

Das Ergebnis ist insofern interessant, da viele umweltmagnetische Studien magnetische Partikelgrößen im Bereich superparamagnetic, single-domain, pseudo-single-domain, also $<$ etwa $2 \mu\text{m}$, und eher selten im Bereich multidomain, also $>$ etwa $2 \mu\text{m}$, annehmen, siehe z.B. (SCHEIDT, et al. 2017). **Im fluvialen und litoralen Bereich tragen Siltpartikel, vorwiegend in Suspension transportiert, und Grobsand- bis Feinkiespartikel, vorwiegend rollend transportiert, ganz überwiegend zur MS der Sedimente bei.**

Das breite Minimum der MS in [Abb. 5.5-3](#) zwischen 125 und 500 μm zeigt auch, dass die in diesem Projekt vorgenommene Einteilung in pelitische Sedimente $<$ und sandige Sedimente $> 63 \mu\text{m}$ durchaus sinnvoll ist.

Für die **Frequenzabhängigkeit der MS**, χ_{fd} , wäre anzunehmen, dass mit zunehmender Transportlänge mehr und mehr Magnetominerale durch Kollisionen mit anderen Partikeln ihre Korngröße verringern. Bisher liegen hierzu nur von der Fränkischen Saale ausreichend Daten vor. In diesem Fall deutet sich bei einigen Schwankungen eine leichte Abnahme der χ_{fd} mit zunehmender Fließstrecke an, ohne Abbildung. Das bedeutet in diesem Fall, dass Einflüsse der feinkörnigen Liefergesteine des Keupers im Oberlauf einen größeren Einfluß auf diesen Parameter haben als die Kornverkleinerung der Magnetominerale mit zunehmender Fließstrecke. Es gibt einen Ausreißer mit 10.7 %, eine Mittelsandprobe der Aude im Languedoc mit karbonatischen Sedimenten im Einzugsgebiet. Für die übrigen Proben beträgt χ_{fd} maximal 6 %. Dies bedeutet, **dass insgesamt nur ein geringer Anteil von sehr feinen, superparamagnetischen Partikeln in den hier untersuchten Proben vorliegt**, vergl. (DEARING, et al. 1996). Dies ist nicht überraschend, da in laminar oder turbulent strömenden Gewässern ein Absinken solcher Partikel aus der Suspension bis zum Gewässergrund in der Rinne zwar möglich ist, ein Verbleib am Gewässergrund aber nur im Strömungsschatten von Hindernissen kurzzeitig möglich erscheint. Allenfalls bei stehendem Wasser in der überfluteten Aue ist eine längerfristige Fixierung solcher feinkörniger Partikel denkbar. Trägt man die Höhe der Proben gegen die Frequenzabhängigkeit der MS auf, ohne Abbildung, so zeigt sich kein genereller Trend. Es ist jedoch die Aussage zu treffen, dass Proben mit $\chi_{fd} > 3$ %, die nach (DEARING, et al. 1996) überwiegend aus Stable Single-domain Partikeln, zwischen etwa 1 μ und 0.03 μm , und superparamagnetischen Partikeln, $< 0.03 \mu\text{m}$ bestehen, nur in Höhen < 500 m NN auftreten. Ebenfalls kein Trend erkennbar ist für die MS gegen Höhe aufgetragen für sandige und pelitische Proben, ohne Abbildung. Auffällig ist höchstens, dass oberhalb 500 m ü. NN nur ganz vereinzelt pelitische Proben im untersuchten Datensatz vorliegen.

Zwischen MS und Frequenzabhängigkeit der MS besteht weder für sandige noch für pelitische Proben ein Zusammenhang, ohne Abbildung. Nur die Aussage, dass sehr stark magnetisierbare Proben mit einer $MS > 5000 [10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ eine χ_{fd} nahe 0 % haben, lässt sich treffen.

[Zurück zur Übersicht](#)

5.5.3 Magnetische Suszeptibilität der Sedimente und ihrer Liefergesteine

Stellt man in [Abb. 5.5-4](#) die Magnetisierbarkeit nur von sandigen fluviatilen und litoralen Sedimenten dar, die ohne heute erkennbaren menschlichen Einfluß – von Landnutzungsformen wie Landwirtschaft und Forstwirtschaft abgesehen - abgelagert worden sind, so lassen sich Bezüge zu den Liefergesteinen ziehen, sofern ein Liefergebiet vorherrschend aus Gesteinen einer Lithologie besteht. Logischerweise handelt es sich bei diesen Proben um Fließgewässer im Oberlauf bzw. von geringer Ordnung. Geringmächtige Bedeckung mit quartären Hang- und Auelehmen ist hierbei vernachlässigt, da hier ja meist Gesteine der unmittelbaren Umgebung verwittert und umgelagert wurden. Für die Festlegung der Lithologie im Liefergebiet wurden im Bereich Deutschland geologische Karten vor allem der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Maßstab 1:200000 verwendet, ergänzt um geologische Spezialkarten der Landesämter, für andere Gebiete geologische Karten der jeweiligen Bundesanstalten in verschiedenen Maßstäben. Nicht dargestellt in [Abb. 5.5-4](#) wurden Proben des Litorals mit einer MS von 100 bis 800 $[10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$ vor dem Rügener Kreidekliff, da hier für Schreibkreide atypisch hohe MS-Werte auftreten. Letztere gehen vermutlich auf Seifenbildung im Brandungsbereich der Ostsee mit Aufarbeitung pleistozänen Moränenmaterials zurück.

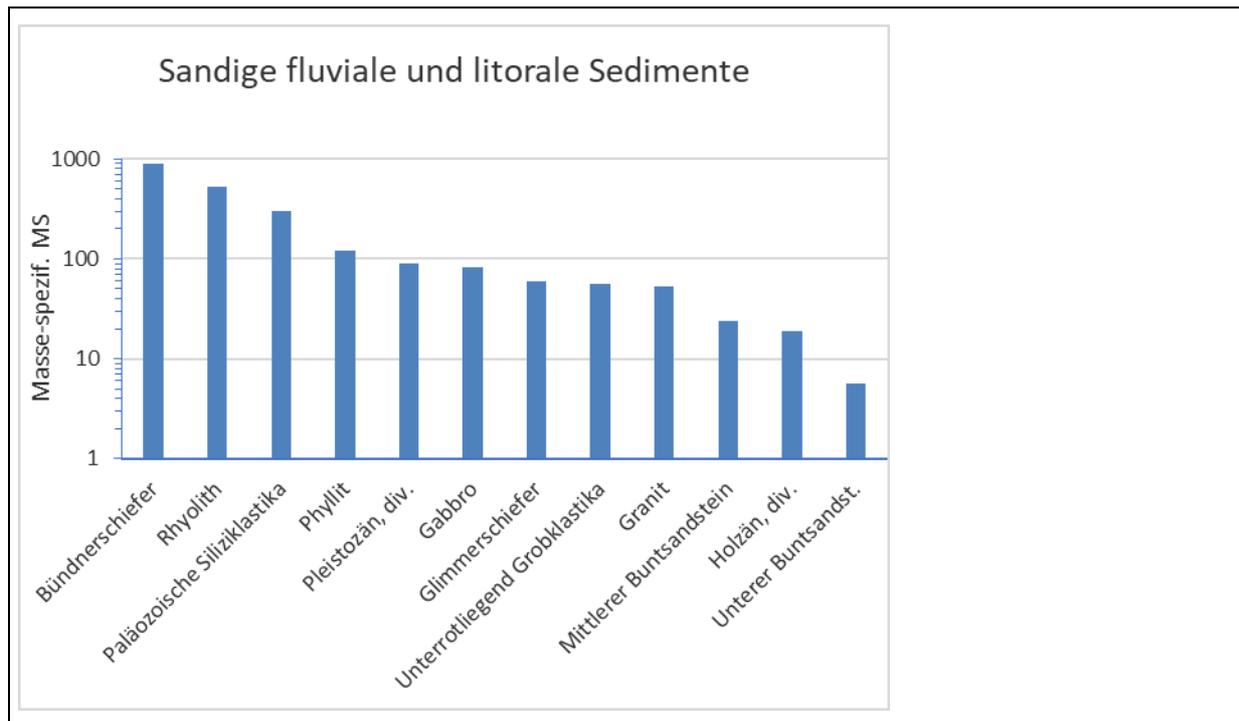


Abb. 5.5-4: Masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] vorrangig sandiger fluviatiler und einiger litoraler Sedimente in Abhängigkeit vom dominierenden Gestein im Liefergebiet. Es sind nur Proben dargestellt, bei denen der menschliche Einfluß weitgehend fehlt oder zumindest gering ist. Damit stellt die Abbildung geogene Hintergrundwerte für Gewässersedimente in Abhängigkeit von der Lithologie dar. Anzahl der Werte für Einzugsgebiete mit vorrangiger Lithologie: Tonschiefer bis Phyllite der mesozoischen Bündnerschiefer des penninischen Ozeans im Unterengadiner Fenster 7, Rhyolithe des Rotliegenden im Saar-Nahe-Becken 5, Paläozoische Tonschiefer, Siltschiefer, Sandsteine des variskischen Gebirges 35, Phyllite des Ordoviziums im Westerzgebirge 3, Pleistozäne Siliziklastika unterschiedlicher Zusammensetzung z.T. unter holozäner Bedeckung 20, Gabbros der Bretagne 3, Glimmerschiefer des variskischen Paläozoikums & alpinen Mesozoikums 7, Grobklastika des Unterrotliegend 5, Granite des Paläozoikums 23, Sandsteine des Mittleren Buntsandsteins im Saar-Nahe-Becken und der Thüringer Mulde 4, Holozäne siliziklastische und organische Sedimente 94, Tonsteine & Sandsteine des Unteren Buntsandsteins in Pfälzer Wald und Thüringer Mulde 4.

Vergleicht man in [Abb. 5.5-4](#) aufgeführte Mediane für die MS von **fluviatilen Sedimenten** in Einzugsgebieten mit einer vorherrschenden Lithologie mit Medianen der MS der **zugrundeliegenden Liefergesteine**, siehe Tabelle 3-4 im Kapitel „FM-3 Magnetische Suszeptibilität“, so fällt auf, dass die Mediane für die bisher beprobten **Liefergesteine Phyllite, Glimmerschiefer, Granite, Sandsteine** durchaus in einem **ähnlichen Bereich** liegen wie die daraus resultierenden **fluviatilen Sedimente**. Um einen Faktor 2 bis 12 **höhere Werte bei den fluviatilen Sedimenten** treten auf in Liefergebieten aus **Rhyolithen, paläozoischen Siliziklastika** und **Bündner Schiefern**. Als geogene Gründe für solche erhöhten Gehalte an Magnetomineralen in fluviatilen Sedimenten kommen vor allem Seifenbildung in Sanden, pedogene Bildung von Eisenoxiden bzw. -hydroxiden, sowie durch pedogene Lösung von Karbonat bedingte Anreicherung paramagnetischer Tonminerale in Frage. Auch der Eintrag von magnetischen Spherulen aus der Verbrennung fossiler Energieträger wäre denkbar, aber kaum abhängig von Liefergesteinen sondern als generelle Erhöhung in fluviatilen Sedimenten, was zumindest nicht ganz so offensichtlich ist.

Da Halden des **ehemaligen Erzbergbaus** in Deutschland von größerem Einfluß auf Gewässerablagerungen sein dürften, sind in [Abb. 5.5-5](#) ausgewählte Erzbergbaugebiete dargestellt zusammen mit der MS sandiger Proben. Für einige Proben im Harz mit sehr hohen MS-Werten liegt ein Zusammenhang mit ehemaligen Aktivitäten des Erzabbaus nahe.

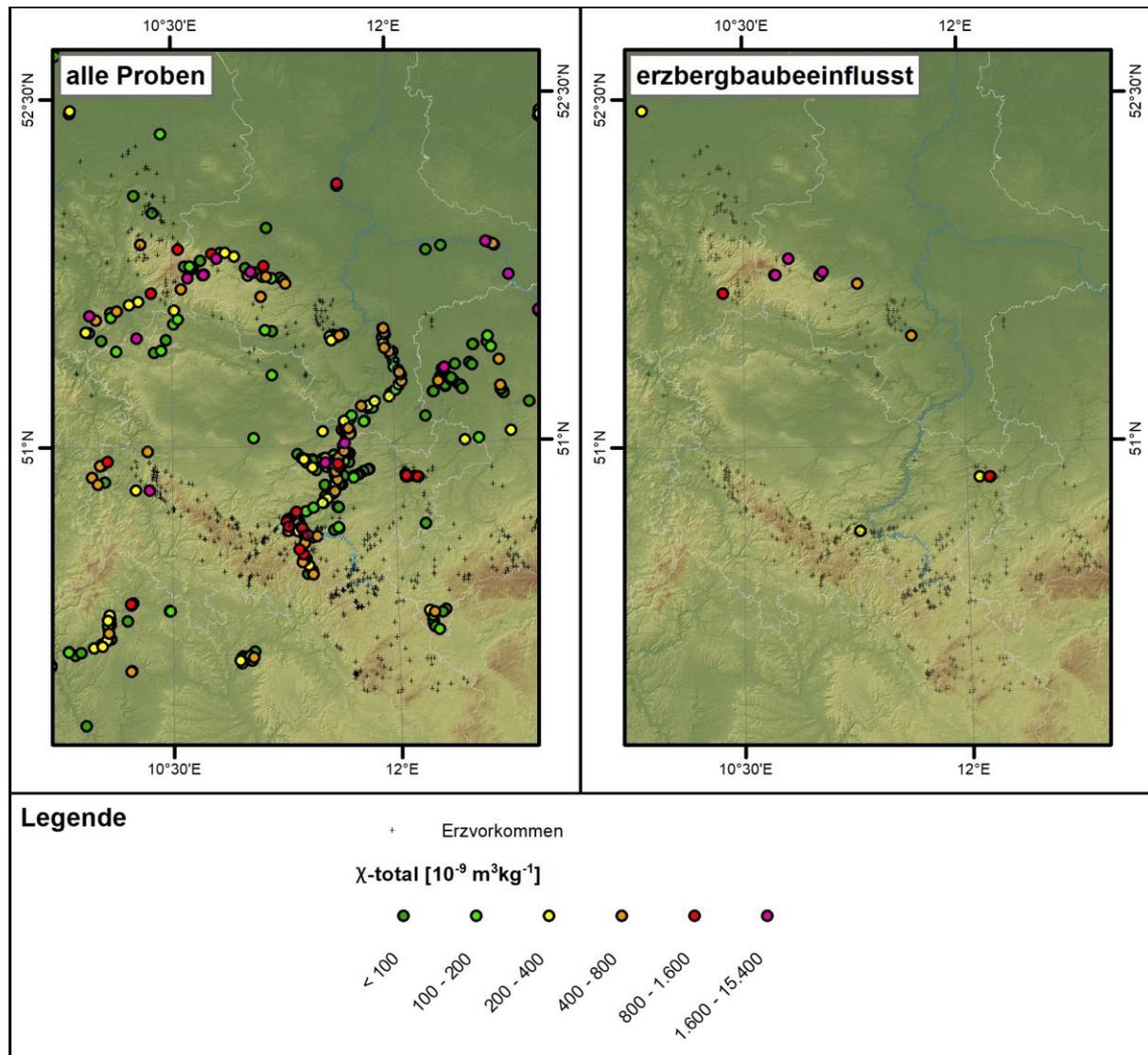


Abb. 5.5-5: MS sandiger fluviatiler Proben, links alle Proben, rechts nur erkennbar durch Erzbergbau beeinflusste Proben, und Standorte ehemaliger Erzbergwerke, u.a. nach (REH & SCHRÖDER 1974), (STEDINGK, et al. 2002), (PÄLCHEN 2009). Dargestellt ist der Ausschnitt mit den Mittelgebirgen Harz, Thüringer Wald, Thüringer Schiefergebirge und westliches Erzgebirge. Zu © Geländemodell siehe [Abb. 5.5-1](#), sowie Bundesländergrenzen "GE250, 2017": Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, dl-de/by-2-0, www.bkg.bund.de, Flüsse "DLM250, 2020": GeoBasis-DE / BKG, www.bkg.bund.de.

[Zurück zur Übersicht](#)

5.5.4 Magnetische Suszeptibilität und Schwermetallgehalte

Zum Schluss soll noch der verschiedentlich beobachtete, siehe u.a. (EVANS & HELLER 2003), **Zusammenhang zwischen Schwermetallgehalten und MS** betrachtet werden. Für das hier beispielhaft herausgegriffene Schwermetall Pb in Bachsedimenten, Daten aus (FAUTH, et al. 1985), zeigt [Abb. 5.5-6](#) einen Plot der Elementgehalte gegen die MS. Bei der Darstellung für

sandige Proben wurde eine Probe, FM_Kasbach2017-4 nahe Remagen, mit 320 ppm Pb und MS 879 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] als Ausreißer betrachtet, sie liegt in einem ehemaligen Kupfer-Bergbaugebiet südlich des Siebengebirges bei Bonn. Bei der Darstellung für pelitische Proben wurde eine Probe, FM_Züllighofener_Bach2014-1 im Drachenfelser Ländchen gegenüber vom Siebengebirge, mit 830 ppm Pb und MS 235 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], ebenfalls als Ausreißer betrachtet und nicht dargestellt, da hier die ehemalige Grube Laura bei Züllighofen, die einen Pb-Zink-Erzgang abgebaut hat, unmittelbar benachbart ist. In beiden Fällen ist anzunehmen, dass Horizontaldistanzen unter 200 m schon große Variationen durch Einflüsse von Halden und Sickerwässern hervorrufen. Festzuhalten ist, dass im ersten der beiden genannten Fälle die MS der sandigen Probe verglichen mit anderen Proben stark erhöht ist. Aus [Abb. 5.5-6](#) ergäbe sich lediglich für die pelitischen Proben ein wahrscheinlicher Zusammenhang zwischen MS und Pb-Gehalten, aber hier liegen zu wenige Vergleichsdaten vor.

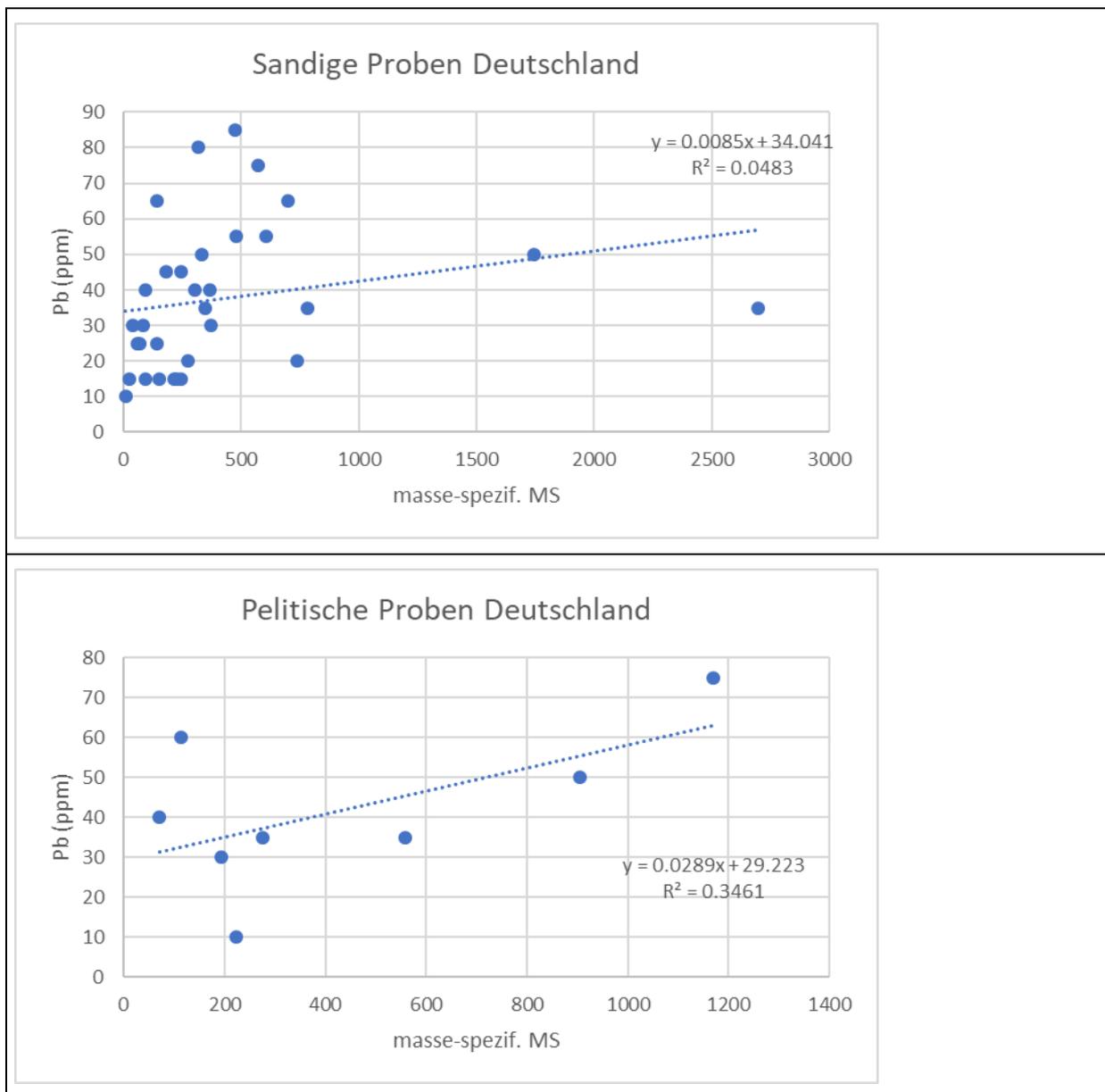


Abb. 5.5-6: Pb-Gehalt von Bachsedimenten der Fraktion $<200 \mu\text{m}$ in den alten Bundesländern nach (FAUTH, et al. 1985) und masse-spezifische magnetische Suszeptibilität [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] von 32 sandigen, oben, sowie 8 tonigen, unten, Bachsedimenten, in diesem Projekt beprobt, gegeneinander aufgetragen. Zwischen den Entnahmelokationen von (FAUTH, et al. 1985) und denen von FluviMag liegt jeweils eine Horizontaldistanz $<200 \text{ m}$.

Historisch bedingt ist der Datensatz der Arsen- und Schwermetallgehalte in Bachsedimenten von (FAUTH, et al. 1985) auf die alten Bundesländer beschränkt. Für die neuen Bundesländer gibt es Darstellungen als analoge Abbildungen von (BIRKE, et al. 1995) für die Mittelgebirgsregionen der ehemaligen DDR. Nach Wissen der Autorin und Autoren existiert kein flächendeckender und nach einheitlicher Methode erhobener Datensatz der Arsen- und Schwermetallgehalte in Bachsedimenten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, auf den frei zugegriffen werden kann. Für Sachsen liegen landesweite als Raster interpolierte Kartendarstellungen der Schwermetall- und Arsengehalte in Bachsedimenten der Fraktion $<200 \mu\text{m}$ ebenso wie Mediane der Teileinzugsgebiete vor (GREIF, et al. 2004). Für die Thüringische Saale finden sich Arsen- und Schwermetallgehalte der fluviatilen Sedimente in der Fraktion $<20 \mu\text{m}$ vor Stauwehren bei (HANISCH, et al. 2005), (MÖLLER & EINAX 2013) bzw. in Auesedimenten bei (MÜLLER, et al. 2003). Hier könnte ein Zusammenhang zwischen MS und Schwermetallgehalten näher beleuchtet werden.

Im Rahmen dreier B.Sc. Arbeiten am Institut für Geowissenschaften wurden der Arsen- und **Schwermetallgehalt und die magnetische Suszeptibilität der Tonfraktion = Fraktion $<2 \mu\text{m}$** in Sedimenten vom Ufer und z.T. vom Rinnenboden der **Thüringischen Saale um Jena** von (BEYER 2008), (MÖLLER 2009) und von Rinnensedimenten im **Gessental östlich Gera** (STENDEBACH 2009) untersucht. Die Tonfraktionen der Proben wurden nach Totalaufschluß mit Induktiv-gekoppeltem Plasma mit Optischer Emissionsspektrometrie bzw. Massenspektrometrie untersucht, zur Methodik siehe z.B. (GRAWUNDER, et al. 2014). Jena wurde einerseits aus logistischen Gründen, andererseits aufgrund des relativ großen Einzugsgebietes der Thüringer Saale mit zahlreichen stromauf gelegenen ehemaligen Erzbergwerken im Thüringischen Schiefergebirge ausgewählt. Das Gessental ist dagegen ein relativ kleines Einzugsgebiet, indem durch Halden und Sickerwasseraustritte des ehemaligen Uranbergbaus ein deutlicher anthropogener Einfluß ausgeprägt ist. Zunächst soll hier analog zu oben der Pb-Gehalt betrachtet werden. Für beide Bereiche ergibt sich eine relativ deutliche **positive Korrelation**, siehe [Abb. 5.5-7](#) und [Tab. 5.5-4](#), **von MS und Pb-Gehalten**, sofern man bei der Saale eine Probe, FM_Saale2008-6, als Ausreißer weglässt. Betrachtet man beide Datensätze zusammen, so ergibt sich keine überzeugende Korrelation. Das liegt daran, dass die Pb-Gehalte in Sedimenten der Saale etwa doppelt so hoch liegen wie im Gessental.

Wie sieht es aus, wenn die MS der Gesamtfraktion sowohl sandiger als auch pelitischer Proben betrachtet wird gegen den Pb-Gehalt der Tonfraktion? Für die Saale um Jena ergibt sich keinerlei Aussagemöglichkeit, für das Gessental sinkt die Prägnanz der Korrelation, was deutlich macht, dass die Schwermetallgehalte erwartungsgemäß an bestimmte Kornfraktionen gebunden sind. Nimmt man in beiden Gebieten die MS der durch Naßsiegung abgetrennten Fraktion $<63 \mu\text{m}$ und korreliert sie mit den Pb-Gehalten, so liegt der quadrierte Korrelationskoeffizient, r^2 , für beide Gebiete nahe demjenigen für die Tonfraktion. Pb-Erze, vermutlich Pb-Sulfide paläozoischer Tonschiefer, werden in den beiden hier betrachteten Gebieten offensichtlich zusammen mit Magnetit in der feinkörnigen Schwermineralfraktion transportiert.

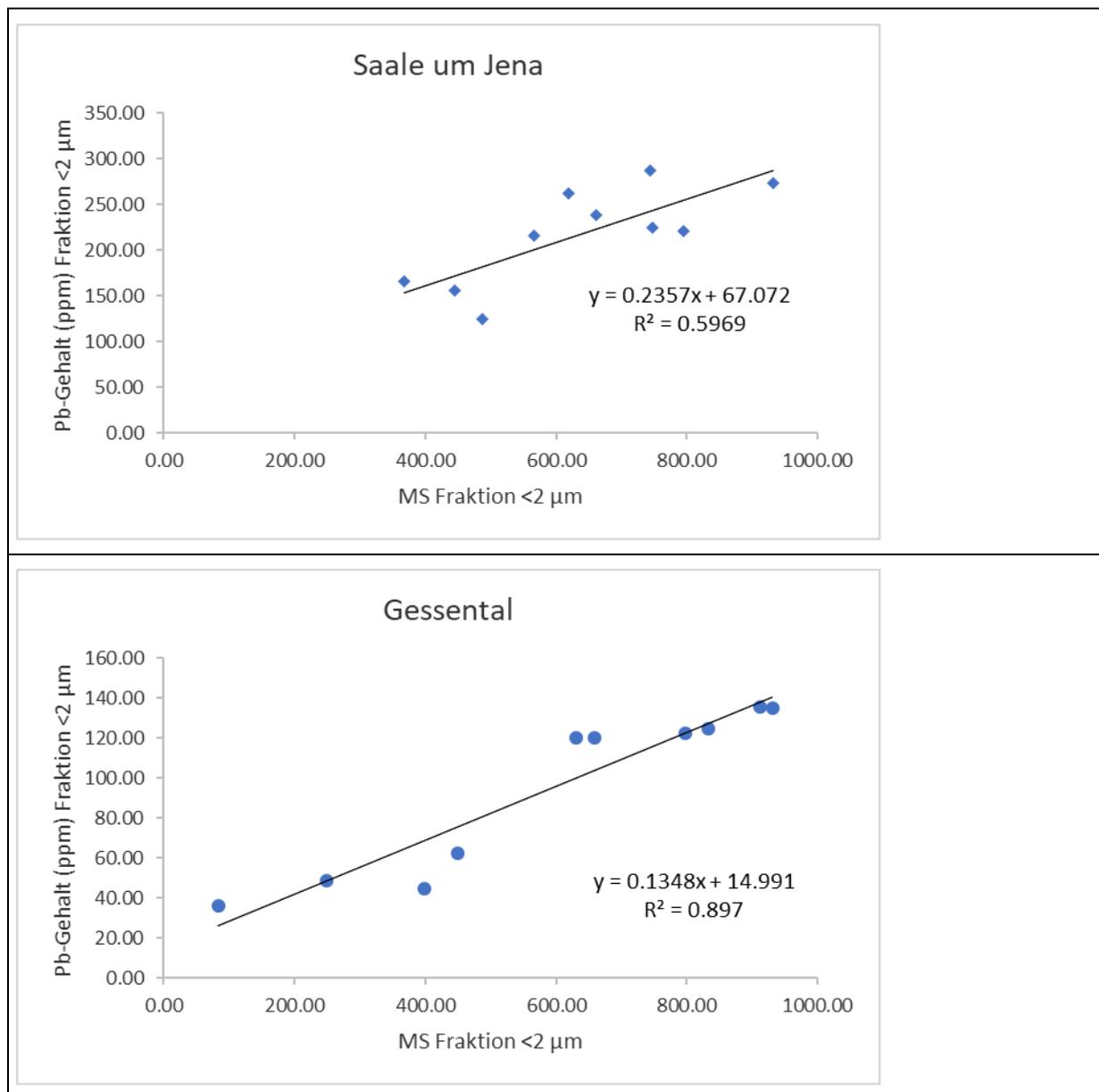


Abb. 5.5-7: Pb-Gehalte gegen masse-spezif. magnetische Suszeptibilität [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] der Tonfraktion in Sedimenten der Saale und im Gessental. Daten aus (MÖLLER 2009) und (STENDEBACH 2009).

Tab. 5.5-4: Quadrierte lineare Korrelationskoeffizienten, r^2 , der Arsen- und Schwermetallgehalte der Fraktion <2 μm [$\mu\text{g/g}$ bzw. ppm] gegen masse-spezif. MS [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] der Fraktion <63 μm, aus jeweils 10 Proben fluviatiler Sedimente bestimmt. Fett hervorgehoben sind Werte >0.5.

Gebiet	MS/As	MS/Cd	MS/Co	MS/Cr	MS/Cu	MS/Ni	MS/Pb	MS/U	MS/V	MS/Zn
Saale, Jena	0.01	0.31	0.02	0.67	0.22	0.05	0.61	0.2	0.16	0.71
Gessental	0.06	0.00	0.09	0.07	0.26	0.14	0.89	0.27	0.02	0.37

Neben den bereits erwähnten Pb-Gehalten tritt bei As und weiteren Schwermetallen der Tonfraktion im Gessental keine und im Saaletal um Jena nur für Cr- und Zn-Gehalte eine deutliche positive Korrelation mit der MS der Fraktion <63 μm auf. **Der Parameter MS der Fraktion <63 μm läßt sich als Anzeiger für einige geogene bzw. anthropogene**

Schwermetall-Kontaminationen verwenden, jedoch nur nach entsprechender Korrelation innerhalb eines Einzugsgebietes bzw. eines Flußabschnittes.

[Zurück zur Übersicht](#)

5.5.5. Ausblick

Natürlich ist ein Datensatz immer zu klein, es fehlen wichtige Proben usw.. So liegen beispielsweise noch keine oder nur wenige Proben vor aus: Oberlauf der Loire, Mittel- und Oberlauf des Weser-Fulda-Werra-Systems, Seine, Rhône, Rhein Unter- und -oberlauf, Ems, Oder, Donau, Küste der Normandie. Da die Korngrößenabhängigkeit der MS in Kornfraktionen einer Probe teilweise erheblich ist, so z.B. an der mittleren Saale, wären hierzu weitere Daten wünschenswert. Darstellungen der MS der Sandfraktion einerseits und der Pelitfraktion andererseits stellen in jedem Fall Vereinfachungen der tatsächlichen Einflüsse von Sortierung und zugrundeliegender Strömungsdynamik dar. Weiterhin wären Bestimmungen der Curie-Temperatur dazu geeignet, die Träger der Magnetisierbarkeit zu ermitteln, hier sind bisher nur wenige Messungen, vor allem an Proben von der Insel Usedom, erfolgt. Geplant ist, in diesen Richtungen in den nächsten Jahren Fortschritte zu erzielen und in kommenden Versionen der FluviMag Berichte zu berücksichtigen.

Um den Aspekt Nachhaltigkeit zumindest anzusprechen möchten die Autorin und Autoren darauf hinweisen, dass die weitaus meisten Proben eher zufällig, als „Beifang“ sozusagen, entnommen wurden auf Reisen in diese Regionen. Gezielte Beprobungskampagnen sind bisher nur in den Bereichen Siebengebirge, Saarland und Fränkische Saale erfolgt, zumindest teilweise mit Rad oder ÖPNV.

[Zurück zur Übersicht](#)

5.5.6. Zitierte Literatur

- ANONYMUS (1980b): Carte géologique de la France et de la marge continentale à l'échelle de 1/1 500 000, Notice explicative. – Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM); Orléans.
- ANONYMUS (2003): Le volcanisme en Auvergne: Cantal, Haute-Loire, Puy-de-Dôme. – 1-144 S.; Clermont-Ferrand (Chamina).
- BERES, M., BURKHALTER, R., CAPRIO, M., GOUFFON, Y., KISSLING, E., SELAMI, S., VALLIN, S. & VANDELLI, A. (2013): Geologie Schweiz - das Wissen aus dem Untergrund. – 1-136 S.; Wabern (Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Landesgeologie).
- BEYER, D. (2008): Analyse von Korngrößenvariationen in Saalesedimenten im Raum Jena. – 76 S.; Forschungspraktikum F.-Schiller-Univ.; Jena.
- BIRKE, M., RAUCH, U. & RENTZSCH, J. (1995): Environmental results of a regional geochemical survey in Eastern Germany. – Geologisches Jahrbuch D, **94**: 1-35;
- BROUSSE, R. & LEFEVRE, C. (1990): Le volcanisme en France et en Europe limitrophe. – 1-263 S.; Paris, Milan, Barcelone, Mexico (Masson).
- BRULÉ-PEYRONIE, M. & LEGROS, F. (1996): Volcanisme en Auvergne - La Chaîne des Puys. – 1-33 S.; Clermont-Ferrand (éditions du miroir).
- 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>
- EBERLE, J., EITEL, B., BLÜMEL, W.D. & WITTMANN, P. (2010): Deutschlands Süden - vom Erdmittelalter zur Gegenwart. – 1-192 S.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).
- EVANS, M.E. & HELLER, F. (2003): Environmental magnetism - principles and applications of enviromagnetics. – 1-299 S.; Amsterdam, Boston etc. (Academic Press).
- FAUTH, H., HINDEL, R., SIEWERS, U. & ZINNER, J. (1985): Geochemischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland - Verteilung von Schwermetallen in Wässern und Bachsedimenten. – 1-79 S.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- FRECHEN, J. (1976): Siebengebirge am Rhein, Laacher Vulkangebiet, Maargebiet der Westeifel. – 1-209 S.; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- GRAWUNDER, A., MERTEN, D. & BÜCHEL, G. (2014): Origin of middle rare earth element enrichment in acid mine drainage-impacted areas. – *Environ Sci Pollut Res Int*, **21(11)**: 6812-6823; Berlin. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2107-x>
- GREIF, A., PÄLCHEN, W., RANK, G. & WEIDENSDÖRFER, H. (2004): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen Teil 2: Spurenelementgehalte in Bachsedimenten. – 1-66 S.; (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie).
- HANISCH, C., ZERLING, L., JUNGE, F.W. & CZEGKA, W. (2005): Verlagerung, Verdünnung und Austrag von schwermetallbelasteten Flusssedimenten im Einzugsgebiet der Saale. – *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-naturwiss. Klasse*, **64**: 1-135;
- HENNINGSEN, D. (1981): Einführung in die Geologie der Bundesrepublik Deutschland. – 1-123 S.; Stuttgart (Enke).
- LABHART, T. (1992): Geologie der Schweiz. – 1-211 S.; Thun (Ott Verlag).
- MENNING, M. & HENDRICH, A. (2016): STD 2016 - Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016. – Deutsche Stratigraphische Kommission; GeoForschungsZentrum Potsdam; Potsdam.
- 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>
- MÜLLER, A., ZERLING, L. & HANISCH, C. (2003): Geogene Schwermetallgehalte in Auensedimenten und -böden des Einzugsgebietes der Saale. – *Abhandlungen der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Mathematisch-naturwiss. Klasse*, **59**: 1-122;
- PÄLCHEN, W. (2009): Geologie von Sachsen II - Georessourcen, Geopotenziale, Georisiken. – 1-307 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- 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.).
- ROTH, H.J. (1993): Siegerland, Westerwald, Lahn und Taunus - Geologie, Mineralogie und Paläontologie - mit Exkursionen. – 1-176 S.; Bindlach (Gondrom).
- SCHEIDT, S., EGLI, R., FREDERICH, T., HAMBACH, U. & ROLF, C. (2017): A mineral magnetic characterization of the Plio-Pleistocene fluvial infill of the Heidelberg Basin (Germany). – *Geophys. J. Int.*, **210**: 743-764; Oxford. doi: 10.1093/gji/ggx154
- SCHMINCKE, H.-U. (2009): Vulkane der Eifel - Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung. – 1-160 S.; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).

- SCHÖNLAUB, H.P. & HOFMANN, P. (2007): Geo-Atlas Österreich - die Vielfalt des geologischen Untergrundes. – 1-111 S.; Wien, Köln, Weimar (Böhlau).
- 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.
- WALTER, R. & DORN, P. (2007): Geologie von Mitteleuropa. – 1-511 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- WATERLOT, G., BEUGNIES, A., BONTE, A., CHARLET, J.-M., CORSIN, P., BINTZ, J., HARY, A. & MULLER, A. (1973): Ardenne, Luxembourg. – 1-206 S.; Paris (Masson).