

**Magnetische Charakterisierung von
Prozessstoffen der Klärschlammkompostierung
des Reinhaltungsverbandes Leoben**

Diplomarbeit

vorgelegt von
Elisabeth Herr

Betreuung: Dr. Robert Scholger,
Lehrstuhl für Geophysik, Montanuniversität Leoben

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst und keine
anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Elisabeth Herr
Dezember 2006

Danksagung

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Robert Scholger für die Betreuung der Arbeit, die Bereitstellung der Arbeitsmittel, seine ständige Hilfsbereitschaft und die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Herrn Dr. Hassan Neinavaie danke ich für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft bei der Analyse technischer Mineralphasen im Auflicht, sowie für Bereitstellung diverser Berichte und Vergleichsproben.

Herrn Siegfried Schider ermöglichte mir die Aufnahme von REM-Bildern. Für die zahlreichen Bilder und seine freundliche Hilfsbereitschaft möchte ich mich bei ihm bedanken.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Raith, er ermöglichte mir die mineralogischen Untersuchungen an der Mikrosonde und die Benutzung des Auflichtmikroskopes.

Bei Herrn Helmut Mühlhans möchte ich mich für die Durchführung der Mikrosonde-Messungen und für die Anfertigung von polierten Anschliffen bedanken.

Herrn Prof. Mali danke ich für die Durchsicht der Anschliff-Proben.

Gulcin Körpe möchte ich für die Korrektur der englischen Zusammenfassung danken.

Von der Arbeitsgruppe für Paläomagnetik gilt mein Dank besonders Sigrid Hemetsberger für ihre tatkräftige Unterstützung und Hilfsbereitschaft.

Bei Davor Mucic und Thomas Windisch bedanke ich mich für die freundliche Kooperation und Bereitstellung des Probenmaterials.

Besonderen Dank gilt Gert Gaisberger für seine ständige Hilfsbereitschaft, unentbehrliche Unterstützung und Durchsicht der Rohfassung dieser Arbeit. Er hat durch konstruktive Kritik sehr zum Gelingen beigetragen.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern Maria und Josef Herr, die mich während meiner gesamten Studienlaufbahn tatkräftig und großzügig unterstützt haben.

Abstract

Since 1997 the Reinhaltungsverband Leoben has been running a sewage sludge composting plant. With the coming into force of the 2001 ministerial order for compost, new limit values must be complied with. This holds true for particularly nickel, cadmium and mercury, which in sewage sludge compost are sometimes present in excess.

The aim of this study was to examine the magnetic properties of organic waste, sewage sludge, compost of the sewage plant Leoben and to determine on the basis of chemical analyses the magnetic parameters which are especially suited to indicate heavy metals in Leoben and its surroundings. Magnetic characterizations of the mineral phases were carried out on selected samples. Moreover, additional mineralogical examinations were performed by way of reflected-light microscopy, scanning electron microscopy and microprobing to analyse the mineral composition.

Essentially it became possible to divide the samples into groups according to their grain-size spectrum and with regard to the incidence of weathering or conversions into secondary minerals such as lepidocrocite.

The findings of the investigations proved that the magnetic fraction of the individual samples virtually consists solely of anthropogenic particles. Furthermore the frequency count of individual particles by means of a reflected-light microscope showed that magnetite and hematite were the most prevalent among the magnetic mineral phases. Calcium ferrite, wüstite, and lepidocrocite constitute a considerable part of the magnetic fraction. Metallic iron and nickel chrome alloys were rated as minor components. All samples include similar or almost identical particles such as globular-shaped particles, sinter and slag. A comparison of the magnetic parameters with the heavy metal content further showed a significant positive correlation with arsenic, cadmium, chrome, cobalt, lead and the like.

Anthropogenic phases of similar composition, shape and chemistry were detected also in other industrial areas such as Linz, Ybbstal, Mürztal near Krieglach, and Mitterdorf (PIRKL & NEINAVAIE, 2002). The achieved results confirm that magnetic analysis provides (in combination with mineralogical analyses) significant results in the steel and iron manufacturing industry, for example in Leoben, with respect to both type as well as amount of anthropogenic particles.

Zusammenfassung

Der Reinhaltungsverband Leoben betreibt seit 1997 eine Klärschlamm Kompostierungsanlage. Mit dem Inkrafttreten der Kompostverordnung (BGBL. II Nr. 292/2001) gelten neue Grenzwerte, die im Klärschlammkompost fallweise überschritten werden, insbesondere bei Nickel, Cadmium und Quecksilber.

Ziel dieser Arbeit war es, die magnetischen Parameter Sättigungsremanenz und magnetische Suszeptibilität von Strukturmaterial-, Klärschlamm- und Kompostproben aus der Kläranlage Leoben zu bestimmen und anhand Daten der chemischen Analysen zu klären, für welche umweltrelevanten Schwermetalle sich magnetische Parameter im Raum Leoben als Indikatoren besonders eignen. Zusätzlich erfolgte an Einzelproben eine magnetische Charakterisierung der Mineralphasen über die Bestimmung von Curiepunkt, IRM-Erwerbskurven, Koerzitivkraft, Remanenzkoerzitivkraft und S-Faktor. Darüber hinaus wurden mineralogische Untersuchungen in Form von Auflichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und Mikrosondemessungen zur Klärung des Mineralbestandes durchgeführt.

Tatsächlich konnten bezüglich der Probengruppen Strukturmaterial-, Klärschlamm- und Kompost über Verwitterungs- bzw. Umwandlungserscheinungen zu sekundär gebildeten Mineralen, sowie über das Korngrößenspektrum wesentliche Unterschiede nachgewiesen werden, die eine Trennung der Probengruppen erlaubte.

Die Analysen belegen auch, dass die magnetische Fraktion der einzelnen Probengruppen praktisch ausschließlich aus technogenen Partikeln besteht. Aus der Auszählung der Häufigkeit einzelner Partikel geht hervor, dass unter den magnetischen Mineralphasen Magnetit und Hämatit als dominierende Bestandteile beobachtbar sind. Daneben stellen Calciumferrite, Wüstit und Lepidokrokit einen beträchtlichen Anteil der magnetischen Fraktion dar, metallisches Eisen und Cr/Ni-Legierungen konnten als Nebenbestandteil eingestuft werden. In allen Proben sind ähnliche oder annähernd gleiche Partikel wie z.B. globulare Phasen, Zunder-, Schlacken- und Sinterpartikel vorhanden.

Des Weiteren wurden die magnetischen Parameter Sättigungsmagnetisierung und magnetische Suszeptibilität den chemischen Messergebnissen gegenübergestellt, wobei die magnetischen Parameter signifikant positiv mit den Schwermetallen Arsen, Chrom, Kobalt, Blei etc. korrelieren.

Auch in anderen untersuchten Industriegebieten wie Linz, mittleres Ybbstal und Mürztal bei Krieglach und Mitterdorf (PIRKL & NEINAVAIE, 2002) sind technogene Phasen ähnlicher Zusammensetzung, Form und Chemismus nachgewiesen worden.

Daher kann bei geringem geogenen Eintrag magnetischer Minerale aus dem geologischen Hintergrund, wie es für das Einzugsgebiet der Kläranlage Leoben gegeben ist, davon ausgegangen werden, dass die magnetischen Untersuchungsmethoden (in Kombination mit mineralogischer Detailanalyse) im Einzugsgebiet von Stahl- und Hüttenindustrie, für Bereiche verstärkter Immission industrieller Stäube und Flugaschen, signifikante Ergebnisse erbringen, sowohl hinsichtlich Art der eingetragenen technogenen Partikel, als auch ihrer Menge.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG.....	10
1.1	AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	11
1.2	EINZUGSGEBIET DER KLÄRANLAGE	12
1.2.1	<i>Umweltrelevante Angaben zum Standort</i>	12
1.2.2	<i>Die immissionsklimatische Situation</i>	13
1.2.3	<i>Geologische Situation</i>	15
2	THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	18
2.1	MAGNETISCHE EIGENSCHAFTEN	19
2.1.1	<i>Definitionen</i>	19
2.2	MAGNETISCHE ORDNUNGSZUSTÄNDE.....	20
2.3	MAGNETISCHE HYSTERESESCHLEIFE	25
2.4	MAGNETISCHE MESSMETHODEN IM UMWELTMONITORING.....	26
3	METHODEN	27
3.1	UNTERSUCHUNG MAGNETISCHER EIGENSCHAFTEN.....	28
3.1.1	<i>Geländearbeit</i>	28
3.1.2	<i>Rottenhalle</i>	28
3.1.3	<i>Rotten nach der Siebung</i>	29
3.2	LABORMESSUNGEN	29
3.2.1	<i>Untersuchungsmethodik</i>	29
3.2.2	<i>Proben und Probenaufbereitung</i>	29
3.3	MAGNETISCHE PARAMETER.....	31
3.3.1	<i>Magnetische Suszeptibilität</i>	31
3.3.2	<i>Remanente Sättigungsmagnetisierung</i>	31
3.3.3	<i>SIRM/κ</i>	32
3.3.4	<i>Isothermale remanente Magnetisierung</i>	32
3.3.5	<i>Remanenzkoerzitivkraft (B_0)_{CR}</i>	34
3.3.6	<i>S-Faktor</i>	34
3.3.7	<i>Curie-Temperatur</i>	35

3.4	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN MAGNETISCHEN PARAMETERN UND CHEMISCHEN ANALYSEN	36
3.4.1	<i>Beurteilungsgrundlage</i>	37
3.5	IDENTIFIZIERUNG, EIGENSCHAFTEN UND MINERALOGIE VON BESTANDTEILEN DER MAGNETISCHEN FRAKTION.....	38
3.5.1	<i>Auflichtmikroskopie</i>	38
3.5.2	<i>Korngrößenverteilung</i>	40
3.5.3	<i>Rasterelektronenmikroskopie</i>	40
3.5.4	<i>Focused Ion Beam, FIB</i>	40
4	ERGEBNISSE DER MAGNETISCHEN UNTERSUCHUNGEN	42
4.1	GELÄNDEARBEIT:.....	43
4.1.1	<i>Rottenhalle</i>	43
4.1.2	<i>Rotten nach der Siebung</i>	44
4.2	LABORMESSUNGEN	46
4.2.1	<i>Magnetische Suszeptibilität κ</i>	46
4.2.2	<i>Remanente Sättigungsmagnetisierung SIRM</i>	48
4.2.3	<i>SIRM/κ</i>	52
4.3	DETAILSTUDIEN ANHAND VON EINZELPROBEN:	52
4.3.1	<i>Isothermale remanente Magnetisierung</i>	52
4.3.2	<i>Remanenzkoerzitivkraft $(B_0)_{CR}$ und S-Faktor</i>	54
4.3.3	<i>Curietemperatur</i>	55
4.4	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN MAGNETISCHEN PARAMETERN UND SCHWERMETALLGEHALTEN	61
4.4.1	<i>Schwermetallgehalte und Grenzwerte</i>	65
5	IDENTIFIZIERUNG, EIGENSCHAFTEN UND MINERALOGIE DER MAGNETISCHEN FRAKTION	66
5.1	ERGEBNISSE DER RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE	67
5.2	ERGEBNISSE DER OPTISCHEN UNTERSUCHUNGEN - AUFLICHTMIKROSKOPIE	69
5.2.1	<i>Ergebnisse der Korngrößenuntersuchung</i>	70
5.3	IDENTIFIKATION DER MAGNETISCHEN PHASEN.....	71
5.4	ERGEBNISSE FOCUSED ION BEAM	80

6	INTERPRETATION UND DISKUSSION	87
6.1	MINERALOGIE DER MAGNETISCHEN FRAKTION	88
6.2	GEGENÜBERSTELLUNG DER KORNGRÖßENABSCHÄTZUNG – MAGNETIK UND AUFLICHTMIKROSKOPIE:	89
6.3	CURIE-TEMPERATUR	91
6.4	EINFLUSS DER PROBEN BZW. DER PROBENAHEME AUF DIE INTERPRETIERBARKEIT DER MESSERGEBNISSE	93
6.5	MAGNETISCHER RICHTWERTE FÜR DIE PROBEN DER KLÄRANLAGE LEOBEN	94
	LITERATURVERZEICHNIS	103

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Der Reinhaltungsverband Leoben betreibt seit 1997 eine Klärschlamm-Kompostierungsanlage. Mit dem Inkrafttreten der Kompostverordnung (BGBl. II Nr. 292/2001) gelten neue Grenzwerte, die im Klärschlammkompost fallweise überschritten werden, insbesondere bei Nickel, Cadmium und Quecksilber. Um die Qualität des erzeugten Klärschlammkompostes zu sichern und damit auch künftig eine Verwertbarkeit zu ermöglichen, ist es wichtig die Herkunft der Schwermetallbelastungen und ihre Eintragswege zu erforschen, um vermeidbare Belastungen möglichst zu verhindern. Neben den für kommunales Abwasser spezifischen Eintragsquellen, wie Haushalte, Kleingewerbe, Dachwässer und Straßenabwässer kommen für die Kläranlage Leoben auch zahlreiche Indirekteinleiter aus der Schwerindustrie und geologische Hintergrundbelastung aus ultrabasischen Gesteinsformationen der Region als mögliche Belastungsquelle in Frage.

Ziel des Forschungsprojektes „IVUS – Identifikation vermeidbarer und unvermeidbarer Schadstoffquellen am Beispiel der Kläranlage Leoben und ihres Einzugsgebiets“ ist es daher, eine qualitative Zuordnung der unterschiedlichen Eintragsquellen zur Schwermetallbelastung zu finden (PROKEKTSANTRAG IVUS, 2004).

Bisherige magnetische Untersuchungen am Institut für Geophysik der Montanuniversität Leoben an Boden- und Ahornblätterproben belegen signifikante Zusammenhänge zwischen der magnetischen Suszeptibilität und der Konzentration bestimmter Schwermetalle (HANESCH, et al., 2003; BOYKO, et al., 2004).

Ausgehend von Erfahrungen in den bisherigen Studien war es das Ziel dieser Arbeit die magnetischen Parameter von Strukturmaterial-, Klärschlamm- und Kompostproben aus der Kläranlage Leoben zu bestimmen und anhand der Daten der chemischen Analysen zu klären für welche umweltrelevanten Schwermetalle sich magnetische Parameter im Raum Leoben als Indikatoren besonders eignen. Die magnetischen Charakterisierung der Mineralphasen erfolgte an Stichproben (Curiepunkt, IRM-Erwerbsskurven, Koerzitivkraft, Remanenzkoerzitivkraft, S-Faktor) wobei zusätzlich mineralogische Untersuchungen zur Klärung des Mineralbestandes durchgeführt werden sollten.

Zur Bestimmung der Variabilität der magnetischen Eigenschaften an den Kompostrotten Vorort sollten projektbegleitend Insitu Messungen der magnetischen Suszeptibilität durchgeführt werden. Die Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes IVUS am Department für Angewandte Geowissenschaften und Geophysik der Montanuniversität Leoben (unter der Leitung von Dr. Robert Scholger) durchgeführt.

1.2 Einzugsgebiet der Kläranlage

Leoben liegt an der Einmündung des Vordernbergertales in das Murtal. Im Leobner Stadtteil Donawitz befinden sich auf einer schmal ausgebildeten Talterasse des Vordernbergbaches die Werksanlagen der Hütte Voest-Alpine Donawitz (Abb.1).



Abb. 1: Geographische Übersichtskarte (Land Steiermark, BEV).

1.2.1 Umweltrelevante Angaben zum Standort

In der traditionsreichen Hütte Voest-Alpine Donawitz stehen folgende Produktionsanlagen in Betrieb: Hochofenbetrieb (Sinteranlage, Hochofen), Stahlwerk (Schmelzbetrieb, Gießereibetrieb), Walzwerke (Grobwalzwerk, Feinwalzwerk).

Die Luftgüte im Raum Leoben/Donawitz wird vor allem durch die Emissionen der Sinteranlage, dem Kraftwerk, dem Stahlwerk sowie mehreren Hubbalkenöfen beeinträchtigt. Die wesentlichen Luftschadstoffe sind Staub, SO₂, NO_x und Kohlenwasserstoffe. Weiters sind auch Belastungen durch Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Fluoride, Chloride sowie Schwermetalle zu erwarten (UMWELTBUNDESAMT, 1992).

Entsprechend der Ergebnisse einer Studie von WEISS et al. (1996) über Elementgehalte und weitere spezifischen Eigenschaften von Fichtennadeln im Raum Leoben/Donawitz zählt das

Projektgebiet nach wie vor zu den am stärksten belasteten Regionen Österreichs. Aufgrund der Nähe höher belasteter Standorte zur Stahlhütte und statistisch absicherbarer Zusammenhänge mit den Gehalten von stahlwerkstypischen Leitelementen wie beispielsweise Eisen, sowie den Erfahrungen aus anderen Untersuchungsprogrammen steht fest, dass die Hütte Donawitz – bei Quecksilber im speziellen die Sinteranlage - die Ursache für die erhöhten Gehalte zahlreicher Elemente in den Nadeln darstellt (WEISS et al., 1996).

1.2.2 Die immissionsklimatische Situation

Der Witterungsablauf und die geländeklimatischen Gegebenheiten spielen eine wesentliche Rolle für die Ausbreitung von Luftschadstoffen. Das Nordwest-Südost orientierte Vordernbergtal ist durch häufiges Auftreten von tagesperiodischen Windsystemen charakterisiert. In der Nacht und in den Morgenstunden bilden sich Talauswinde aus Nordwest. Im weiteren Tagesverlauf entstehen Taleinwinde aus südöstlichen Richtungen. Generell ist das Gebiet durch austauscharme Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Besonders in den Herbst- und Wintermonaten kommt es im Raum Donawitz bedingt durch die inneralpine Tallage und die abschirmende Wirkung des Alpenhauptkammes gegenüber West- und Nordwestströmungen zu oft beständigen Inversionswetterlagen. Weiters werden in diesem Raum im Jahresdurchschnitt etwa 150 bis 160 Tage mit Nebel oder Hochnebel beobachtet. Die Hochnebelobergrenzen liegen häufig um 1000 m und stellen somit eine Barriere für den weiteren vertikalen Aufstieg von Rauchgasen dar. Diese Grenze spiegelt sich demnach auch in den Belastungszonen für Schadstoffe in den Wäldern wider. Leoben liegt in der Klimazone „Murtal von Preg bis Bruck“, wobei diese Zone einen der trockensten Abschnitte des Murtales (Kraubath 753 mm, im Jänner 31 mm, im Juli 121 mm) betrifft (WEISS et al., 1996; SEMMELROCK, 2004).

Für Ballungsräume der Steiermark wie auch für den Raum Leoben wurde eine sogenannte Klimaeignungskarte (Abb. 2) auf wissenschaftlicher Basis erstellt (Lazar, ARGE LÖSS, 1994). Diese stellt in Form einer synthetischen Karte (Überlagerung verschiedener Karteninhalte zu einer Gesamtaussage) die Klimatypen des besagten Raumes dar. Diese Klimatypen sind u.a. durch Temperatur-, Wind- und Nebelverhältnisse definiert. Zifferncodes bezeichnen Klimatope, Gebiete mit vergleichbaren Größen der Klimaparameter.

Der Raum Leoben wird im Wesentlichen durch folgende Klimatope der Talbereiche beschrieben: Mit **27.2** werden „begünstigte inneralpine Haupt- und Seitentallagen“ gekennzeichnet. Das Klima dieser Zone lässt sich als mäßig inversions- und frostgefährdet

einstufen (Inversionsgefährdung ca. 70% der Nachtstunden). Die Durchlüftung bleibt an das Talwindssystem gebunden, wobei 1 - 2 m/s als Jahresmittel der Windgeschwindigkeit kaum überschritten werden. Diese Zone ist thermisch gegenüber der Zone **28.2** etwas begünstigt; die Wärmeinseleffekte der Städte und größeren Siedlungskerne sind nur sehr schwach ausgebildet und vornehmlich auf die 1. Nachthälfte beschränkt. Die Nebelhäufigkeit erreicht 40 - 50 d/a.

Die „inneralpinen Haupt- und Seitentallagen“ (**28.2**) umfassen Tallagen mit relativ hoher Frost- und Inversionsgefährdung (130 -138 Frostage/Jahr, 70 - 85% Inversionshäufigkeit) und Nebelgefährdung. Hinsichtlich der Durchlüftung zeigt sich eine Verringerung der Windgeschwindigkeiten (Jahresmittel der Windgeschwindigkeit 1 - 2 m/s, im Winterhalbjahr zumeist noch darunter) und eine Zunahme der Kalmenhäufigkeit (Windgeschwindigkeit unter 0,5 m/s).

Aus immisionsklimatologischer Sicht lässt sich daher der Standort der Hütte Donawitz als ungünstig bewerten (WEISS et al., 1996; SEMMELROCK, 2004).

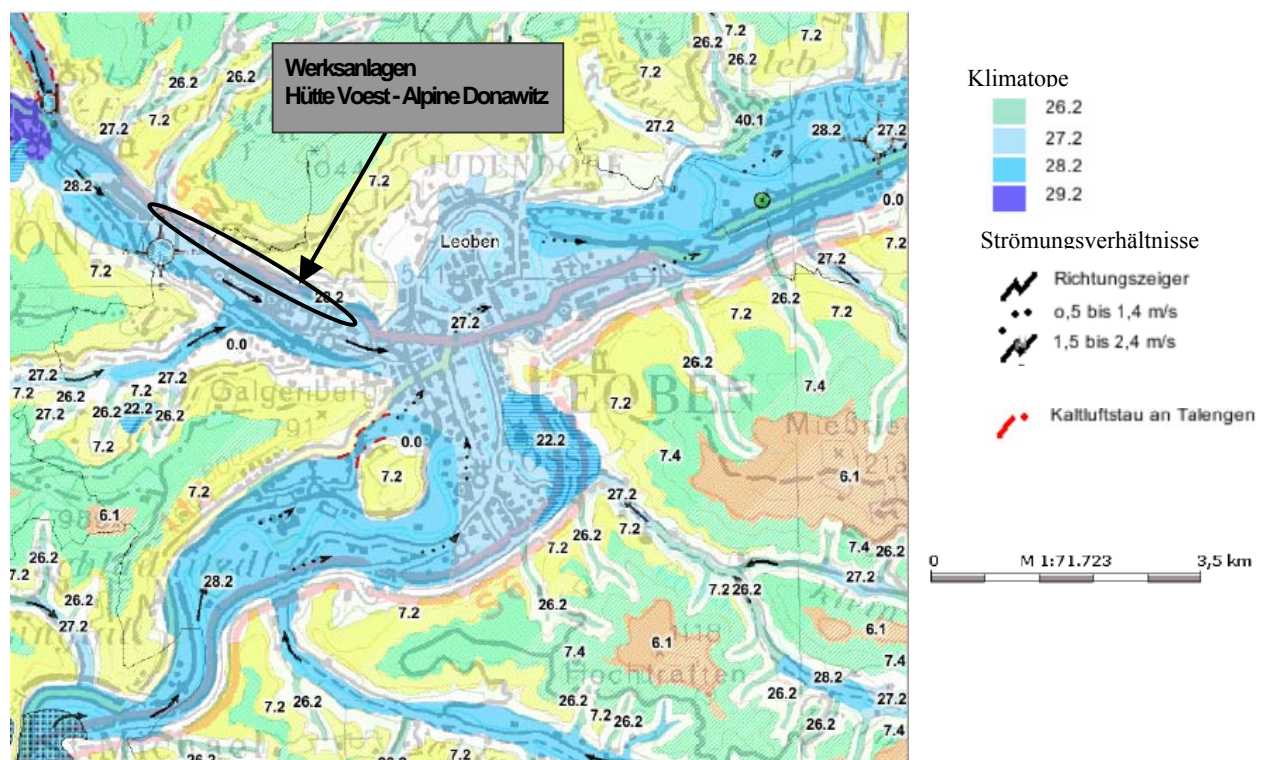


Abb. 2: Ausschnitt aus der Klimaeignungskarte Raum Leoben (Land Steiermark, BEV)

1.2.3 Geologische Situation

Die nördlichen Anteile der Karte (Abb.3) werden großteils von der oberostalpinen Grauwackenzone eingenommen. Südlich schließt das Mittelostalpin an. Daneben treten inneralpine Tertiärbecken entlang der norischen Senke (tlw. kohleführend, z.B. Leoben – Seegraben), pleistozäne Terrassensedimente, alluviale Talfüllungen und Hangschuttmassen auf.

Oberostalpinen Deckenstockwerk:

Die klastischen und teilweise fossilführenden, niedrig bis niedrigstgradig metamorphen Vorkommen des oberostalpinen Paläozoikums liegen in folgenden Einheiten:

- *Grauwackenzone:*

Die Grauwackenzone erstreckt sich längs des Südrandes der Nördlichen Kalkalpen und weist eine starke alpidische Schuppentektonik auf. Die Schichtfolgen setzen innerhalb des Ordoviziums ein und reichen bis ins Oberkarbon. Generell sind die Gesteine geschiefert und bis in den Bereich der oberen Grünschieferfazies metamorph. Die Lagerstätten und Gesteine der Veitscher Decke (Magnesit, Talk, Graphit) unterscheiden sich stark von jenen der Norischen Decke (Siderit, Cu-Erze). Auftretende Schichten: Erzführender (Siderit/Ankerit) Kalk (59), Eisenerzer Schichten (48), Graphitkarbon (46), Triebensteinkalk (47) Altpaläozoischer Phyllit (59)

- *Höhermetamorphe Schollen:*

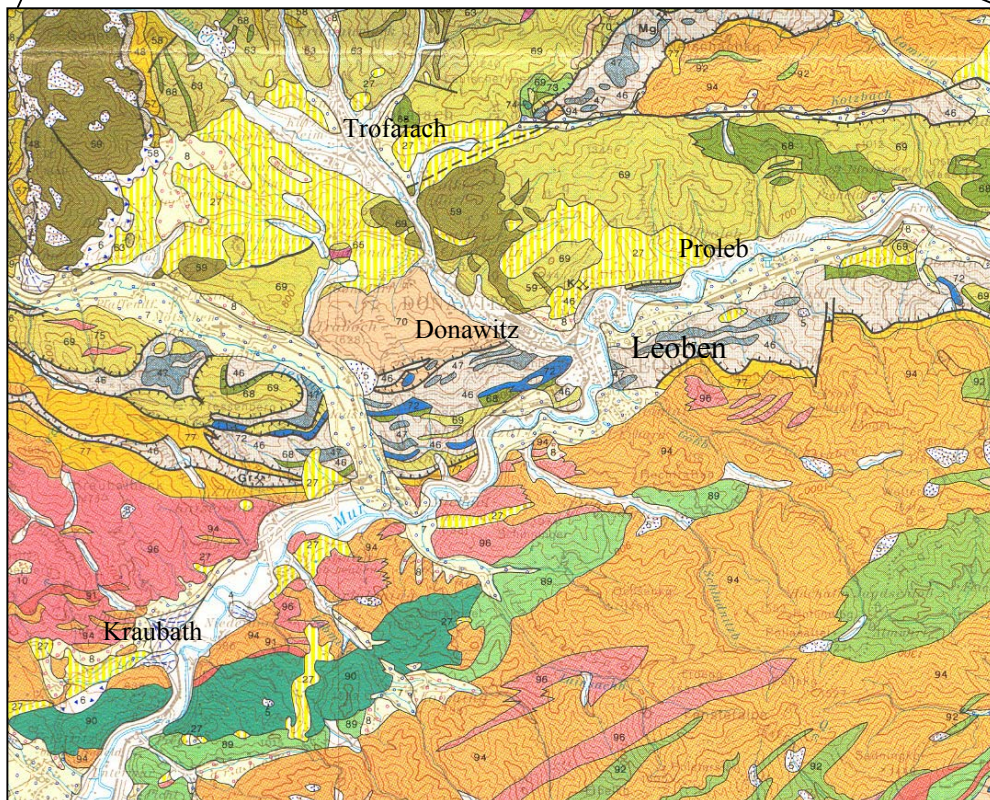
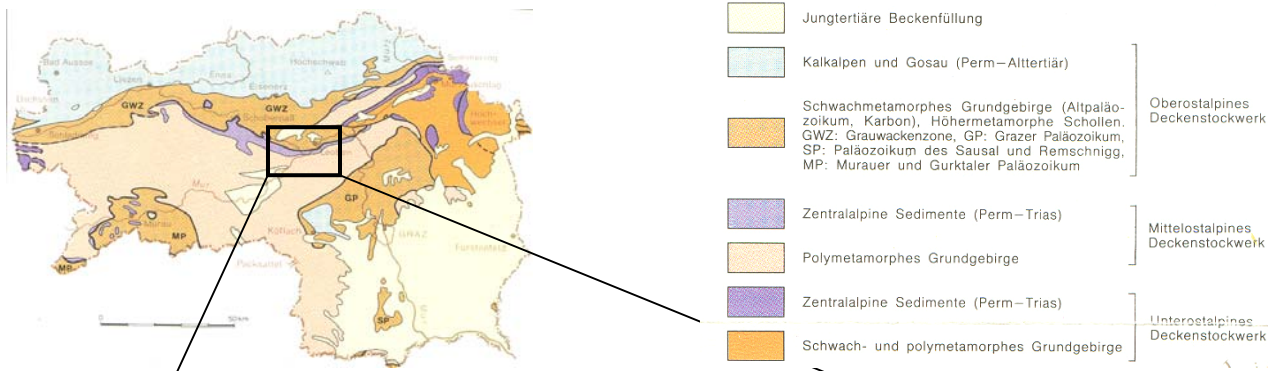
Innerhalb des Oberostalpins treten Gesteinszüge mit stärkerer voralpidischer Metamorphose an der Basis der Norischen Decke auf: Glimmerschiefer (70), Marmor (72), Amphibolit (73), Serpentin (74) und Aplitgneis (75)

Mittelostalpinen Deckenstockwerk:

Das Mittelostalpine Deckenstockwerk besteht vorwiegend aus hochmetamorphem Altkristallin wie Glimmerschiefer, Ortho- und Paragneis, Migmatiten und Amphiboliten. Es handelt sich dabei überwiegend um ehemalige paläozoische Sedimente und Vulkanite, die bei der variszischen und alpidischen Gebirgsbildung umgewandelt worden sind. An wenigen Stellen sind auf dem Altkristallin noch Reste der autochthonen mesozoischen Sedimentbedeckung zu finden. An Erz und Minerallagerstätten gibt es unter anderem Chromit und Magnesit im Serpentin-Komplex von Kraubath.

- *Zentralalpine Sedimente (Perm – Trias)*: Tattermannschiefer, Quarzit, Alpiner Verrucano (77)
- *Polymetamorphes Grundgebirge*: Orthogneis, Migmatit, Granitgneis (96), Paragneis i.a. Plagioklasgneis (94), Glimmerschiefer (87)

(WEBER et al., 1997; FLÜGEL & NEUBAUER, 1984)



27 Inneralpine, Tertiärbecken

OBEROSTALPINES DECKENSTOCKWERK
 SCHWACHMETAMORPHES GRUNDGEBIRGE
 (ALTPALÄOZOIKUM UND KARBON)

- 46 „Graphitkarbon“ (GWZ); Karbon
- 47 Triebensteinkalk (GWZ); Karbon
- 48 Eisernerzer Schichten (GWZ), Dultschichten (GP); Oberkarbon

59 Altpaläozoischer Bänderkalk i. a., Reitingkalk, Erzführender Kalk partim (GWZ); Schöckelkalk (GP); Murauer Kalk (MP); vorw. Devon

68 Spilit, Diabas, Grünschiefer

69 Altpaläozoischer Phyllit i. a.; feinschichtige Grauwackenschiefer i. a. (GWZ); Passailer Phyllit, Heilbrunner Phyllit (GP); Altpaläozoikum i. a.

HÖHERMETAMORPHE SCHOLLEN (KAINTALECK-SCHOLLEN, „ANGERKRISTALLIN“, „ACKERLKRISTALLIN“)

- 70 Glimmerschiefer, phyllitischer Glimmerschiefer
- 72 Marmor
- 73 Amphibolit
- 75 Aplitgneis

MITTELÖSTALPINES DECKENSTOCKWERK
 ZENTRALALPINE SEDIMENTE (PERM–TRIAS)

77 Semmeringquarzit, Plattquarzit
 Alpiner Verrucano, Rannachformation,
 Tattermannschiefer; Perm–Skvth

POLYMETAMORPHES GRUNDGEBIRGE

- 87 Glimmerschiefer i. a., phyllitischer Glimmerschiefer
- 89 (Bänder-)Amphibolit des Speikkomplexes
- 90 Serpentin, Ultramafit
- 92 Amphibolit i. a.
- 94 Paragneis i. a., Plagioklasgneis
- 96 Orthogneis, Migmatit, Granitgneis

Abb. 3: Geologische Großeinheiten der Steiermark und Geologische Karte Raum Leoben (entnommen aus FLÜGEL et al.1984)

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Magnetische Eigenschaften

2.1.1 Definitionen

Magnetisches Moment M :

Alle Stoffe haben bei Temperaturen oberhalb des absoluten Nullpunktes magnetische Eigenschaften. In einer Materie besitzt jedes Elektron ein spezifisches magnetisches Dipolmoment bzw. magnetisches Moment M . Diese werden zum einen durch die axiale Drehbewegung der Elektronen (magnetisches Spinmoment) und zum anderen durch deren Bahnbewegung um den Atomkern (magnetisches Bahnmoment) hervorgerufen. Eigen- und Bahndrehimpulse der Elektronen addieren sich zum Gesamtdrehimpuls eines Atoms, aus dem dessen resultierendes magnetisches Moment hervorgeht (ANGENHEISTER & SOFFEL, 1972). Die magnetischen Momente haben die Tendenz sich weitgehend zu kompensieren, was durch entsprechende Anordnungen möglich ist (SOFFEL, 1991).

Magnetisierung J :

Bei unvollständiger Kompensation der Momente ergibt sich ein resultierendes magnetisches Moment, welches, pro Volumeneinheit dV , die Magnetisierung J definiert (SOFFEL, 1991):

$$J = \frac{M}{dV} \quad [\text{A/m}] \quad (\text{Gleichung 1})$$

Wird die Magnetisierung J durch das Anlegen eines äußeren Magnetfeldes erzeugt, spricht man von einer induzierten Magnetisierung. Die remanente Magnetisierung hingegen ist unabhängig vom äußeren Magnetfeld.

Suszeptibilität κ :

Die Größe der induzierten Magnetisierung J_i ist proportional zum äußeren Magnetfeld H_a und wird durch die magnetische Volumenssuszeptibilität κ (dimensionslose Proportionalitätskonstante) angegeben (SOFFEL, 1991):

$$J_i = \kappa \cdot H_a \quad (\text{Gleichung 2})$$

2.2 Magnetische Ordnungszustände

Diamagnetismus

Alle Substanzen verhalten sich diamagnetisch. Als alleinige magnetische Eigenschaft tritt Diamagnetismus jedoch nur bei Elementen und Verbindungen mit vollständig besetzten Elektronenschalen auf (TARLING & HROUDA, 1993).

Die Summe aller magnetischen Bahn- und Spinmomente eines diamagnetischen Stoffes ist immer gleich Null. Wirkt ein äußeres Feld, so wird von den Bahnmomenten, entsprechend der Lenzschen Regel eine dem äußeren Feld entgegen gerichtete Magnetisierung induziert. Die magnetische Suszeptibilität ist daher negativ (vgl. Abb. 4). Diamagnetische Eigenschaften sind temperaturunabhängig und bestehen nur so lange, wie ein äußeres Magnetfeld angelegt ist (SOFFEL, 1991).

Paramagnetismus

Im Gegensatz zu den Diamagnetika sind die magnetischen Spin- und Bahnmomente paramagnetischer Stoffe nicht vollständig kompensiert. Deren Atome bzw. Moleküle besitzen ein permanentes magnetisches Moment, ohne dass unter ihnen Wechselwirkungen auftreten. Im feldfreien Raum heben sich ihre Magnetfelder gegenseitig auf, so dass sich ein paramagnetischer Körper nach außen unmagnetisch verhält.

Wirkt auf einen paramagnetischen Stoff ein magnetisches Feld H ein, werden die bereits vorhandenen magnetischen Momente in Feldrichtung ausgerichtet und verstärken das angelegte Feld. Die magnetische Suszeptibilität ist demnach positiv. Der Feldverstärkung wirken diamagnetische Effekte und Wärmebewegung entgegen. Die diamagnetische Feldschwächung ist vernachlässigbar klein, da sie etwa um den Faktor 10 bis 100 geringer ist als die paramagnetische Suszeptibilität. Die Temperatur eines paramagnetischen Stoffes jedoch schwächt dessen Suszeptibilität nach (ANGENHEISTER & SOFFEL 1972):

$$k_{para} = \frac{C}{T} \quad \text{(Gleichung 3)}$$

C = Curie-Konstante (stoffspezifisch), T = Temperatur, k_{para} = paramagnetische Suszeptibilität

Die Stärke ihrer Magnetisierung ist linear von der Stärke des angelegten Magnetfeldes abhängig. Die induzierte Magnetisierung hat nach dem Abschalten des äußeren Feldes keinen weiteren Bestand. Wichtige gesteinsbildende Minerale der paramagnetischen Stoffgruppe sind Biotit, Hornblende, Pyroxen, Amphibol, Granat, und Pyrit.

Ferromagnetismus

Ferromagnetische Phänomene beschränken sich auf die Gruppe der Übergangselemente (z.B. Eisen, Nickel, Kobalt) und deren Verbindungen. Reiner Ferromagnetismus tritt nicht in gesteinsbildenden Mineralen, sondern nur in Metallen auf. Zu den Ordnungszuständen des Ferromagnetismus gehören die Phänomene des Antiferro- und Ferrimagnetismus.

Im Gegensatz zu Diamagnetika und Paramagnetika müssen bei den Ferromagnetika die Wechselwirkungen der Atome und Moleküle untereinander berücksichtigt werden. Spin- und Bahnmomente jedes Atoms bzw. Moleküls ferromagnetischer Stoffe sind bis auf ein magnetisches Spinmoment kompensiert. Die Elektronenspins benachbarter ferromagnetischer Kationen sind durch eine Austauschkraft direkt aneinander gekoppelt, so dass in den magnetischen Teilbereichen (*Weißsche Bezirke, Domänen*) eines Ferromagnetikums alle magnetischen Momente parallel zueinander ausgerichtet sind und jedem Weißschen Bezirk ein einheitliches magnetisches Moment zugeordnet werden kann. Diese gebietsweise Gleichrichtung der magnetischen Momente erfolgt ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes und wird daher als *spontane Magnetisierung* bezeichnet. Die Beträge der magnetischen Momente sind in jedem Weißschen Bezirk gleich groß, weisen jedoch in unterschiedliche Richtungen.

Wirkt auf ferromagnetische Stoffe ein äußeres Magnetfeld H ein, werden jene Weißschen Bezirke mit günstig zur äußeren Feldrichtung orientierten magnetischen Momenten durch Verschieben der sie begrenzenden *Blochwände* auf Kosten anderer Bezirke vergrößert.

Unterhalb der materialspezifischen Curie-Temperatur T_c ist der Ferromagnetismus temperaturunabhängig. Bei Überschreiten von T_c erfolgt eine Zerstörung der Weißschen Bezirke durch Wärmebewegung und der ferromagnetische Stoff verhält sich paramagnetisch, so dass auch dessen magnetische Suszeptibilität temperaturabhängig wird nach (SOFFEL, 1991):

$$k_{ferro} = \frac{C}{T - T_c} \quad \text{(Gleichung 4)}$$

C = Curie-Konstante (stoffspezifisch), T = Temperatur, T_c = Curie-Temperatur, k_{ferro} = ferromagnetische Suszeptibilität

Antiferromagnetismus

In oxidischen und sulphidischen Verbindungen der Übergangsmetalle existieren im Gegensatz zum Ferromagnetismus keine direkten Austauschkräfte zwischen den magnetischen Momenten benachbarter Atome bzw. Moleküle. Stattdessen wirken zwischen angrenzenden Kationen über das dazwischen liegende Anion (z.B. Sauerstoff, Schwefel) sogenannte *Superaustauschwechselwirkungen*, so dass die Elektronenspins der Kationen ebenfalls den Anionen zuzuordnen sind. Dadurch sind die Spinrichtungen benachbarter Kationen entgegengerichtet und es entstehen zwei invers zueinander magnetisierte Untergitter. Da die beiden Gitter gleich stark magnetisiert und exakt antiparallel ausgerichtet sind, tritt nach außen keine magnetische Wirkung auf (Abb. 4).

Allerdings tritt bei vielen antiferromagnetischen Mineralen (z.B. Hämatit) ein *parasitärer Ferromagnetismus* auf, weil deren magnetische Untergitter nicht genau antiparallel ausgerichtet sind. Diese von DZYALOSHINSKY (1958) als „*spin-canting*“ bezeichnete leichte, aber permanente Abweichung von der exakten Antiparallelstellung führt auch in Abwesenheit eines äußeren Feldes zu einer Magnetisierung. Die magnetische Wirkung nach außen ist sehr schwach, aber äußerst stabil, da die Gitter fest zueinander arretiert sind (TARLING & HROUDA 1993).

Spin- und Bahndrehmomente antiferromagnetischer Stoffe sind bei tiefen Temperaturen vollständig kompensiert. Steigende Temperaturen heben die Ausrichtung der Untergitter durch Wärmebewegung auf, bis sie schließlich bei einer stoffspezifischen Temperatur T_N (*Néeltemperatur*) vollständig zusammenbricht. Bei Temperaturen über dem Néelpunkt zeigen auch antiferromagnetische Stoffe paramagnetisches Verhalten. Die magnetische Suszeptibilität wird temperaturabhängig nach (SOFFEL, 1991):

$$k_{\text{antiferro}} = \frac{C}{T + T_N} \quad \text{(Gleichung 5)}$$

C = Curie-Konstante (stoffspezifisch), T = Temperatur, T_N = Néeltemperatur,

$k_{\text{antiferro}}$ = antiferromagnetische Suszeptibilität

Unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes verhält sich ein antiferromagnetischer Körper genau wie ein ferromagnetischer Stoff. Die induzierte Magnetisierung ist der des äußeren Feldes gleichgerichtet; die antiferromagnetische Suszeptibilität ist positiv. Nach dem Abschalten des äußeren Feldes hat die Magnetisierung keinen weiteren Bestand.

Wichtige gesteinsbildende Minerale der antiferromagnetischen Stoffgruppe - mit teilweise schwach ferromagnetischem Verhalten - sind Hämatit, Ilmenit, Goethit, Pyrrhotin, und Wüstit.

Ferrimagnetismus

Die Struktur ferrimagnetischer Substanzen ist der antiferromagnetischer Substanzen sehr ähnlich, allerdings sind die entgegengesetzt ausgerichteten Untergitter nicht gleich stark magnetisiert. Die Ursache liegt in den unterschiedlich großen magnetischen Momenten der beteiligten paramagnetischen Kationen (z.B. Magnetit Fe_3O_4 mit Fe^{2+} und Fe^{3+}). Dadurch entsteht bei ferrimagnetischen Stoffen ein spontanes äußeres Magnetfeld (SOFFEL, 1991).

Spin- und Bahnmomente der Elektronen ferrimagnetischer Stoffe sind nur teilweise kompensiert, so dass bei ihnen ähnliche Eigenschaften wie in der ferromagnetischen Stoffgruppe auftreten. Ihre maximal mögliche Magnetisierung ist jedoch wesentlich geringer als die ferromagnetischer Substanzen. Oberhalb einer materialspezifischen Curie-Temperatur verhalten auch sie sich paramagnetisch (Curie-Weißsches Gesetz). Gesteinsbildende ferrimagnetische Minerale sind Magnetit, Titanomagnetit, Chromit und Magnetkies.

Abbildung 4 fasst die Ordnungszustände der unterschiedlichen magnetischen Stoffgruppen schematisch zusammen.

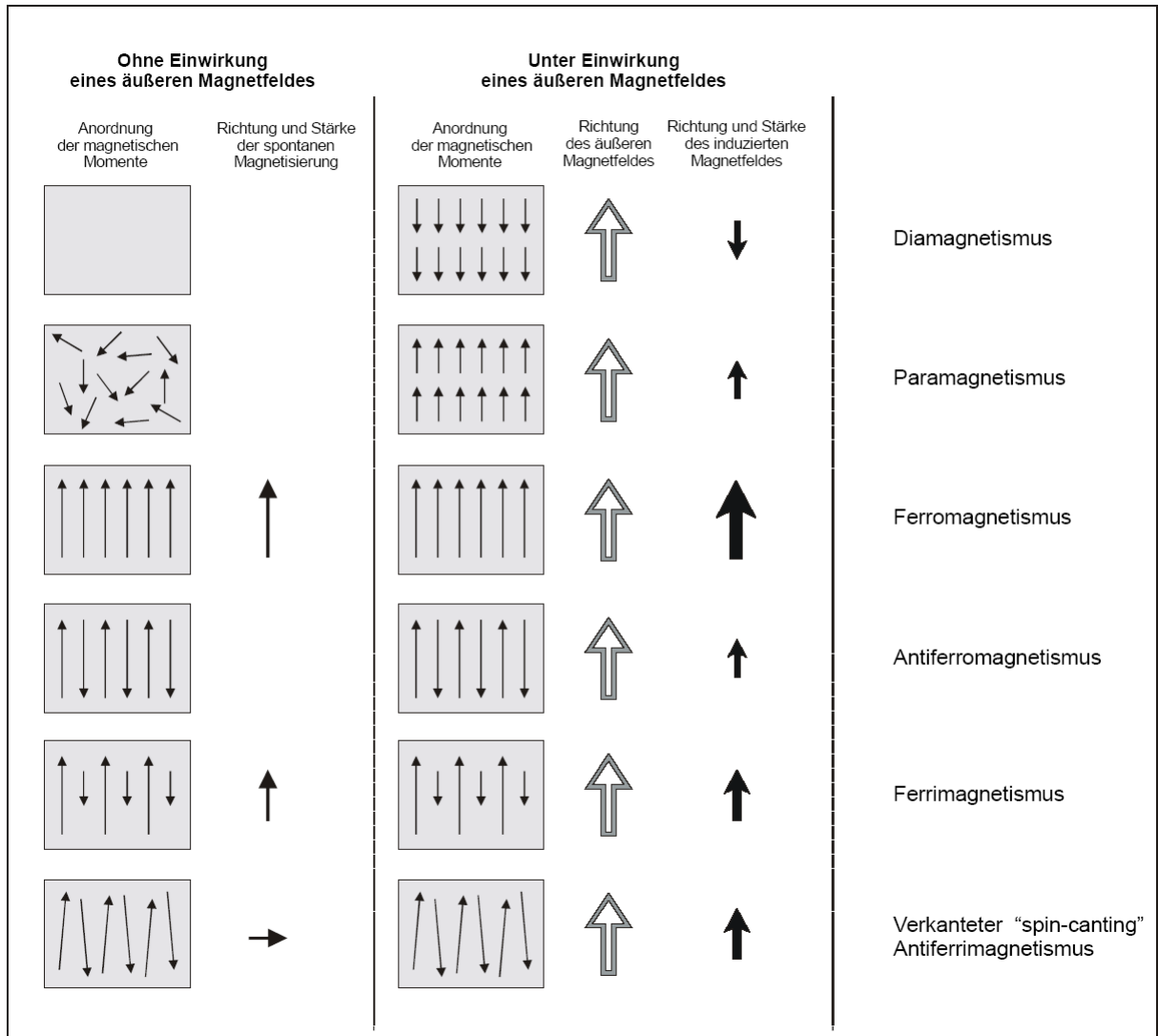


Abb. 4: Schematische Übersicht magnetischer Ordnungszustände (unterhalb von Curie- bzw. Néeltemperatur), (entnommen aus GÜNTHER, 2003)

2.3 Magnetische Hystereseschleife

Wird eine unmagnetisierte ferr(o)magnetische Probe einem Magnetfeld mit langsam ansteigender Feldstärke H ausgesetzt, vergrößert sich die Magnetisierung der Probe zunächst proportional zur Feldstärke (Abb.5). Die Steigung dieses Kurvenabschnittes ist als *Anfangssuszeptibilität* definiert. Mit zunehmender Feldstärke flacht die Kurve immer weiter ab, bis mit der Feldstärke die *Sättigungsmagnetisierung* J_s der Probe erreicht ist, oberhalb derer eine Erhöhung der Feldstärke keinen Anstieg der Magnetisierung zur Folge hat.

Der Wert der Sättigungsmagnetisierung bei Normaltemperatur ist für jedes ferr(o)magnetische Mineral eine Materialkonstante und eignet sich als Diagnostikum. Im Zustand der magnetischen Sättigung besteht die Probe nur noch aus einem einzigen Weißschen Bezirk, dessen magnetisches Moment genau in Feldrichtung zeigt. Dieser Kurvenabschnitt (beginnend bei $H_a = 0$) wird als *Neukurve* bezeichnet.

Verringert man nach Erreichen der Sättigungsmagnetisierung die äußere Feldstärke, verläuft die Kurve (im Gegensatz zu diamagnetischen und paramagnetischen Stoffen) nicht reversibel zur Neukurve. Stattdessen liegt der rückläufige Ast oberhalb der Neukurve und hat einen geringeren Steigungsbetrag. Trotz einer vollständigen Reduktion des äußeren Feldes bleibt eine Restmagnetisierung zurück. Dieser irreversible Magnetisierungsanteil wird als Remanenz J_r bzw. im Falle einer vorhergehenden Sättigung als Sättigungsremanenz J_{rs} bezeichnet.

Für eine Abmagnetisierung zum Wert $J = 0$ muss ein zum ursprünglichen Feld gegengerichtetes äußeres Feld angelegt werden, welches als Koerzitivfeldstärke oder Koerzitivkraft H_c bezeichnet wird. Eine weitere Erhöhung des Gegenfeldes führt erneut zu einer, entsprechend inversen Sättigung ($J = -J_s$). Bei Reduktion des Gegenfeldes ergibt sich schließlich wieder eine Remanenz J_r mit entgegengesetzter Ausrichtung.

Als Remanenzkoerzitivkraft H_{cr} wird die Stärke jenes Gegenfeldes bezeichnet, welche bei einer vollständigen Reduktion des äußeren Feldes zum Erreichen des Wertes 0 für die remanente Magnetisierung J_r benötigt wird.

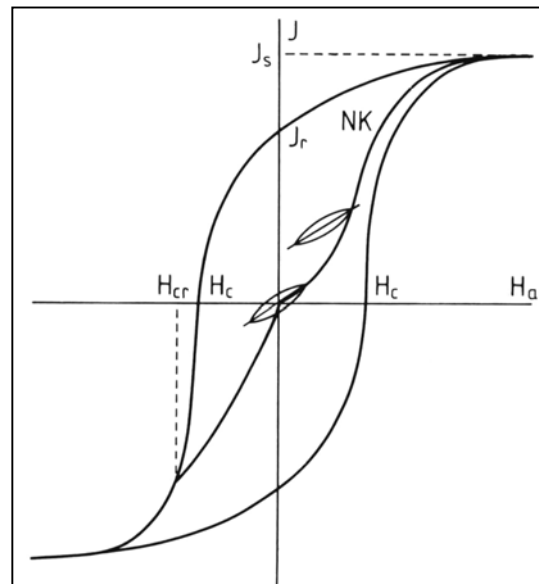


Abb. 5: Idealisierte Hystereseschleife; J Magnetisierung; H_a äußeres Magnetfeld; J_s Sättigungsmagnetisierung; J_r remanente Magnetisierung; H_c Koerzitivkraft; H_{cr} Remanenzkoerzitivkraft; NK Neukurve; (aus SOFFEL, 1991)

Ein Anwachsen des äußeren Feldes in ursprünglicher Richtung führt bei ausreichend hoher Feldstärke wieder zum Zustand der magnetischen Sättigung. Wird der Vorgang abwechselnd in beide Richtungen fortgesetzt so beschreibt die Magnetisierungskurve eine vollständige Hystereseschleife (SOFFEL, 1991).

In dieser Arbeit wird der Begriff Ferr(o)magnetika verwendet um ferromagnetisches Verhalten im weiteren Sinne also einschließlich antiferro- und ferrimagnetischer Phänomene zu beschreiben.

2.4 Magnetische Messmethoden im Umweltmonitoring

Magnetische Messmethoden haben für die Erfassung und Charakterisierung von Umweltbelastungen in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Die wissenschaftliche Disziplin „Umweltmagnetik“ stützt sich dabei auf Erkenntnisse der Geomagnetik, wobei die in der Paläomagnetik verwendeten Messinstrumente und Verfahren ein ideales „Werkzeug“ für die umweltbezogene Forschung darstellen (MAHER et al., 1999).

Partikuläre Schwermetallemissionen, beispielsweise durch Flugaschen von Kohlekraftwerken (KAPICKA, et al., 2001), Emissionen der metallverarbeitenden Industrie (LECOANET, et al., 2001) aber auch Autoabgase (HOFFMANN, et al., 1999) sind oftmals hochmagnetisch. Dieser Zusammenhang erklärt sich in der Eigenschaft von industriell entstandenen magnetischen Mineralen, Schwermetalle zu absorbieren, adsorbieren bzw. in bestimmten Fällen in ihre Struktur einzubauen (MAHER et al., 1999). Dabei konnte eine deutliche Korrelation der magnetischen Suszeptibilität mit den Schwermetallgehalten (z.B.: Cr, Pb, Zn und Cu) von Böden nachgewiesen werden (BITYUKOVA et al., 1999). Geomagnetische Messmethoden können chemische Analysen und mineralogische Untersuchungen keinesfalls ersetzen, stellen jedoch als Indikator für Schwermetallemissionen eine rasche und ökonomische Beurteilungsgrundlage dar.

Eine umfassende Darstellung der Methoden und Aufgabenfelder haben THOMPSON & OLDFIELD (1986) publiziert. Neuere Übersichtsartikel zu verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten geomagnetischer Messmethoden als Indikator für Schwermetallemissionen sind in EVANS & HELLER (2003) zusammengefasst.

3 Methoden

3.1 Untersuchung magnetischer Eigenschaften

3.1.1 Geländearbeit

Zur Klärung der in weiterer Folge wiederholt verwendeten Begriffe Miete, Rotte und Kompost wird an dieser Stelle eine kurze Erläuterung vorangestellt.

Unter dem Begriff **Rotte** werden biologische Um- und Abbauprozesse organischer Substanz im vorwiegend aeroben Bereich zusammengefasst. Die Verrottung in Kompostieranlagen erfolgt in Mieten bei Temperaturen von etwa 65° Celsius.

Als **Kompost** wird das Verrottungsprodukt von organischen Substanzen bezeichnet, das nach einem von vorwiegend aeroben Mikroorganismen gesteuerten, mehrmonatigen Umwandlungsprozess entsteht.

Unter **Fertigkompost** wird fertiges Rottegut verstanden, welches aus Klärschlamm von kommunalen biologischen Kläranlagen und Strukturmaterial (Grünschnitt) zusammengesetzt ist und aus Kompostieranlagen stammt.

Die Messung der magnetischen Suszeptibilität an den Mieten in der Rottenhalle und den gesiebten Rotten wurde mit dem Bartington-MS2D Sensor durchgeführt. Der MS2D Sensor eignet sich für die Kartierung der magnetischen Volumensuszeptibilität an der Oberfläche. Die Spule (185mm Durchmesser) legt ein Wechselstrom-Magnetfeld an, das im Untergrund einen Strom induziert, welcher seinerseits ein sekundäres Magnetfeld induziert. Dieses Magnetfeld induziert wiederum ein Strom in der Spule, der dann gemessen wird. Die magnetische Suszeptibilität ist eine dimensionslose Grösse, die das Verhältnis zwischen der vom Untergrund induzierter Spannung und der an der Spule angelegter Spannung darstellt. Mit dem Bartington MS2D-Sensor kann bis in eine Tiefe von ca. 6 cm gemessen werden. Das Messgerät arbeitet mit einer Frequenz von 0,958 kHz. Während des Messvorgangs wird der Sensor unter leichtem Druck an der Oberfläche aufgesetzt. (Bartington operation manual).

3.1.2 Rottenhalle

Ziel dieser Messung war es, die Verteilung der magnetischen Suszeptibilität zu kartieren um abschätzen zu können, inwieweit sich die Mieten in der Rottenhalle mit Hilfe von Suszeptibilitätsmessungen voneinander unterscheiden lassen und ob ein homogener Aufbau gegeben ist. Die Mieten in der Rottenhalle wurden jeweils über ihre Länge beidseitig gemessen. Für das erste Profil wurde zunächst ein Abstand von einem Meter zwischen den Messpunkten gewählt. Aufgrund der geringen Variation der magnetischen Suszeptibilitäten wurde entlang der restlichen Profile das Messintervall auf 6 m (Säulenabstand) erhöht. Da im

Rottenmaterial vor der Siebung sowohl Eisenteile (Drahtstücke, Nägel,...) mit hoher magnetischer Suszeptibilität als auch größere Holzstücke mit geringen Suszeptibilitätswerten vorhanden sind, hat sich diese Methode an den Mieten in der Rottenhalle als wenig geeignet herausgestellt und wurde deshalb nicht weiter eingesetzt.

3.1.3 Rotten nach der Siebung

Nach dem Aufsetzen der Rotten als Mieten in der Rottenhalle wird das Rottegut mit einer Maschenweite von 20mm gesiebt und anschließend umgelagert. In diesem Arbeitsschritt werden Eisenteile wie Nägel oder Drahtstücke und größeres Strukturmaterial aus dem Rottenmaterial weitgehend entfernt. Nach dem Wegfallen dieser Störeinflüsse, erwies sich der Bartington-MS2D Sensor zur Ermittlung der magnetischen Suszeptibilität als geeignet. Die Messung der magnetischen Suszeptibilität an den gesiebten Rotten wurde an jeweils einem Tag in den Monaten April (19.04.2005), Mai (30.05.2005), September (13.09.2005) und Oktober (17.10.2005) vorgenommen. Die Messung im April und im Oktober erfolgte gemeinsam mit der Probenahme für die chemische Analyse.

3.2 Labormessungen

3.2.1 Untersuchungsmethodik

Alle magnetischen Messungen wurden im Paläomagnetiklabor der Montanuniversität Leoben durchgeführt. An sämtlichen Proben (vgl. Tab. 1) wurde die magnetische Suszeptibilität, die remanente Sättigungsmagnetisierung (SIRM) und der daraus abgeleitete Parameter $SIRM/\kappa$ bestimmt. Zusätzlich wurden in Detailuntersuchungen an jeweils 2 repräsentativen Proben pro Probengruppe die temperaturabhängige magnetische Suszeptibilität (Curie-Temperatur) sowie die IRM-Erwerbsskurve bestimmt und daraus die Remanenzkoerzitivkraft, die IRM-Komponenten und der S-Faktor ermittelt.

3.2.2 Proben und Probenaufbereitung

Das Probenmaterial wurden vom Institut für Chemie der Karl-Franzens Universität Graz und vom Department für Allgemeine, Analytische und Physikalische Chemie der Montanuniversität Leoben zur Verfügung gestellt. Für die chemischen Analysen wurde das Probenmaterial folgendermaßen vorbereitet: Strukturmaterial wurde zuerst geschreddert und anschließend wie die übrigen Probenmaterialien (Fertigkompost, Aufgesetzte Miete, Siebüberlauf,...) luftgetrocknet und gemahlen. Für die magnetischen Untersuchungen wurde

ein Teil des aufbereiteten Probenmaterials in Plastikdosen (Greiner-Dosen) mit einem Volumen von 10 cm³ umgefüllt und mit Watte verdichtet. Die Probengruppen und -Anzahl der ersten und zweiten Probenserie sind in Tabelle 1 angeführt.

Tab.1: Probengruppen und Probenzahl

1. Probenserie		2. Probenserie	
April 2005	Anzahl	Oktober 2005	Anzahl
Klärschlamm	31	Klärschlamm	10
Aufgesetzte Miete	32	Strukturmaterial Leoben Stadt	20
Siebüberlauf	20	Strukturmaterial Göss	20
Fertigkompost	30	Strukturmaterial Proleb	20
Strukturmaterial Leoben Stadt	20	Strukturmaterial Fremd Bruck	15
Strukturmaterial Göss	20	Strukturmaterial Fremd Linz	5
Strukturmaterial Proleb	15	Strukturmaterial Fremd Mautern	5
Strukturmaterial Fremd Bruck	5		
Strukturmaterial Fremd Linz	10		
Strukturmaterial Fremd Mautern	5		

Proben für die Detailstudien

Detaillierte Untersuchungen erfolgten an jeweils 2 repräsentativen Proben pro Probengruppe. Dabei wurden zuerst IRM Erwerbsskurven an unsepariertem Probenmaterial ermittelt. Zur Bestimmung der Curie-Temperatur und für mineralogische Untersuchungen wurde separiertes Probenmaterial verwendet.

Magnetseparation:

Für die Separation der magnetischen Anteile aus den für die chemische Analyse aufgemahlene Proben wurde etwa 2-5g Probenmaterial in destilliertem Wasser dispergiert und mittels Handmagnet gewonnen. Um die mineralische Komponente vom organischen Material abzutrennen war es notwendig, das separierte Material mit 6%-igem H₂O₂ zu behandeln. Die so gewonnene magnetische Fraktion wurde für Curie-Temperaturbestimmungen sowie für optische, elektronenoptische und Mikrosonden-Untersuchungen weiterverwendet.

3.3 Magnetische Parameter

3.3.1 Magnetische Suszeptibilität

An allen Proben wurde die magnetische Suszeptibilität bestimmt. Die Messung der magnetischen Suszeptibilität erfolgte bei Raumtemperatur mit der Geofyzika KLY 2 Kappabridge (Agico Corporation, Brno, Tschechien). Die Messfrequenz des Geräts beträgt 920 Hz.

Bringt man Materie in ein Magnetfeld H beobachtet man eine magnetische Polarisierung (induzierte Magnetisierung M) der Materie. Sie entsteht durch atomare magnetische Momente, die entweder durch das Magnetfeld erzeugt werden, oder durch bereits vorhandene, die im Feld ausgerichtet werden.

$$\kappa = M/H$$

κ = Volumenssuszeptibilität, Materialkonstante, H = angelegte magnetische Feldstärke [A/m]
 M = induzierte magnetische Feldstärke [A/m]

Die dimensionslose magnetische Suszeptibilität ist ein Maß für die Magnetisierbarkeit eines Stoffes. Vereinfacht betrachtet, ist die magnetische Suszeptibilität proportional zur Konzentration ferr(o)magnetischer Minerale innerhalb der Probe (THOMPSON & OLDFIELD, 1986).

Die Angabe der spezifischen bzw. Massensuszeptibilität χ hat gegenüber der Volumenssuszeptibilität κ den Vorteil, dass Fehler bei der Volumenbestimmung von Material mit geringerer Dichte vermieden werden.

3.3.2 Remanente Sättigungsmagnetisierung

Nach der Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität wurde die remanente Sättigungsmagnetisierung (SIRM) ermittelt. Als remanente Sättigungsmagnetisierung wird unter den gegebenen Laborbedingungen die maximal erreichbare isothermale remanente Magnetisierung SIRM bezeichnet. Wenn das zuvor angelegte Magnetfeld wieder abgestellt wird, verbleibt eine remanente Magnetisierung, die sich nur durch ein Gegenfeld bestimmter Stärke, der sogenannten Koerzitivkraft H_c , beseitigen lässt.

Der Wert der Sättigungsmagnetisierung bei Normaltemperatur ist für jedes ferr(o)magnetische Mineral eine Materialkonstante und eignet sich als Diagnostikum. Im Zustand der magnetischen Sättigung besteht die Probe nur noch aus einem einzigen

Weißschen Bezirk, dessen magnetisches Moment genau in Feldrichtung zeigt (SOFFEL, 1991).

Die Sättigung der Proben bei 2,5 Tesla erfolgte mit einem Pulse Magnetizer der Firma "2G Enterprises", anschließend wurde mithilfe eines Cryogenmagnetometers die Remanenz in einer magnetfeldfreien Umgebung ermittelt.

3.3.3 SIRM/ κ

Das Verhältnis der beiden Parameter SIRM und κ ist diagnostisch für den Mineraltyp. MAHER & THOMPSON (1999) geben typische Verhältnisse wichtiger natürlicher Minerale an (vgl. Tabelle 2).

Tab. 2: SIRM/ κ Verhältnisse einiger natürlicher Minerale

Mineral	SIRM/ κ [kA/m]
Magnetit (weich)	1,6
Magnetit (hart)	55
Titanomagnetit (weich)	10
Titanomagnetit (hart)	60
Hämatit	400
Goethit	70
Eisen	40

3.3.4 Isothermale remanente Magnetisierung

IRM-Erwerbsskurven zeigen für die einzelnen ferr(o)magnetischen Minerale aufgrund ihrer unterschiedlich hohen Koerzitivkräfte charakteristische Verläufe. Um einzelne Mineralphasen möglichst eindeutig zu differenzieren werden ihre individuellen Referenzcharakteristika bei unterschiedlichen Feldkonfigurationen genutzt. Die Proben wurden bei Raumtemperatur schrittweise einem magnetischen Gleichfeld bis 2,5 Tesla ausgesetzt um so eine isothermale remanente Magnetisierung aufzuprägen.

Abbildung 6 zeigt drei verschiedene Typen solcher Erwerbsskurven normiert auf die maximal mögliche IRM in schematischer Darstellung. Proben mit Magnetit oder Titanomagnetit (Typ 1) erreichen ihre Sättigung bereits bei Feldstärken von 100 bis 200 mT. Die IRM von Hämatit

(Typ 2) ist im Gegensatz dazu erst zwischen 300 und 600 mT gesättigt, während die Sättigung der remanenten Magnetisierung von Goethit (Typ3) nur bei Starkfeldern von mehreren Tesla erfolgt (SOFFEL, 1991). Durch die mineralspezifische-Form der Erwerbsskurve ist eine weitere Charakterisierung der magnetischen Trägerminerale möglich.

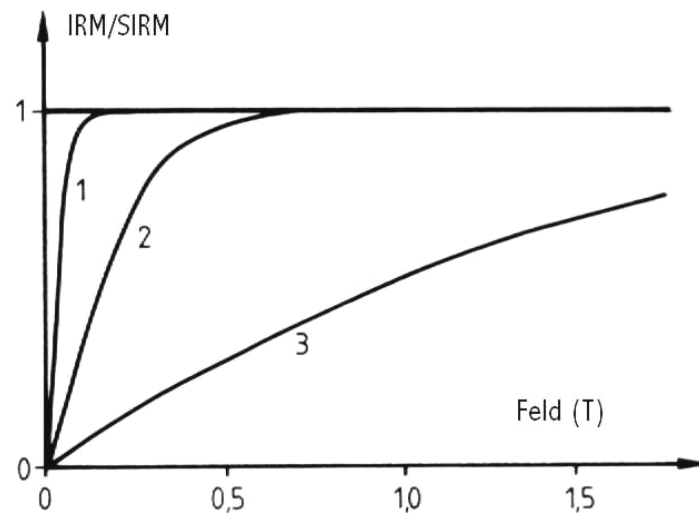


Abb. 6: Schematische Darstellung von IRM-Erwerbsskurven für verschiedene Ferrite (normiert); Typ 1: Magnetit, Maghemit, Titanomagnetit oder Magnetkies; Typ 2: Hämatit; Typ 3: Goethit (aus SOFFEL, 1991).

Die Auswertung der IRM-Erwerbsskurven erfolgte mit dem Programm IRM-CLG 1.0 (KRUIVER et al, 2001). Damit ist es möglich, die Konzentrationen der verschiedenen Mineralphasen innerhalb einer Probe abzuschätzen. Anhand verschiedener Parameter wird eine theoretische IRM Erwerbsskurve an die reale angenähert. Das Programm ermöglicht eine Modellierung über die Parameter SIRM, mittlere Koerzitivität, $B_{1/2}$ (Feldstärke bei der die Hälfte der Sättigung erreicht ist) und halbe Breite der Verteilung (DP)

Die IRM Komponentenanalyse mit dem Programm IRM-CLG 1.0 (KRUIVER et al, 2001) ist eine Methode mit der die unterschiedlichen ferr(o)magnetische Mineralphase in einer Probe bestimmt werden können. Auf Grund unterschiedlich hoher Koerzitivkraft der einzelnen magnetischen Phasen kann man Rückschlüsse auf den Mineraltyp ziehen.

3.3.5 Remanenzkoerzitivkraft $(B_0)_{CR}$

$(B_0)_{CR}$ bezeichnet dasjenige Feld, welches bei Raumtemperatur die Sättigungsremanenz zu Null reduziert. Es differenziert zwischen ferri- und antiferrimagnetischen Mineraltypen (FASSBINDER, 1994). Zur Erzeugung der IRM Backfield-Kurven werden die Proben schrittweise in der entgegengesetzter Richtung wieder einem IRM-erzeugenden Feld ausgesetzt. Die verbleibende Remanenz wird dann nach jedem Schritt gemessen. Der Wert des Nulldurchgangs ist als die Remanenzkoerzitivkraft definiert (vgl. Abbildung7).

3.3.6 S-Faktor

Der S-Faktor ist das Verhältnis der Magnetisierung, die in einem Gegenfeld von z.B. -100 mT erworben wurde, zur SIRM, d.h.:

$$S = \frac{IRM_{-100mT}}{SIRM_{2500mT}}$$

Der S-Faktor differenziert zwischen ferri- und antiferrimagnetischen Anteilen. Bei Magnetit ist dieses Verhältnis S etwa $0,8 < S < 1$, bei Hämatit oder Goethit liegt S bei $0 < S < 0,2$ (FASSBINDER, 1994).

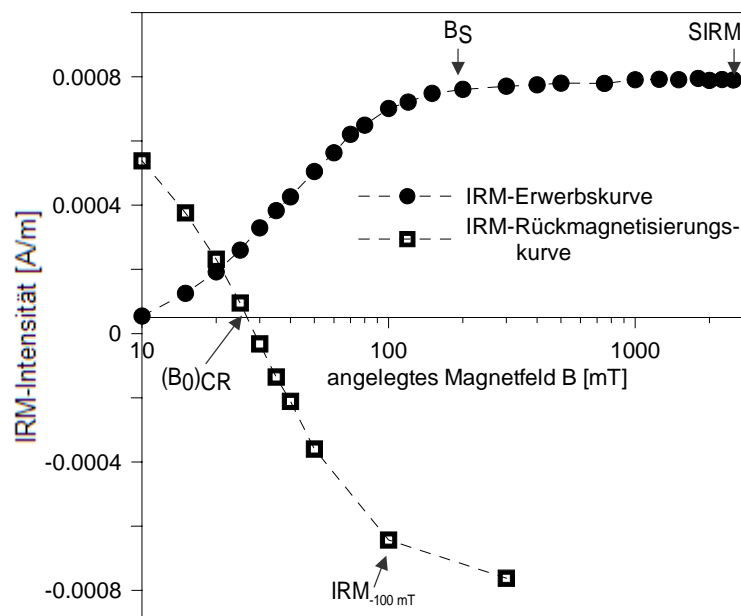


Abb. 7: IRM-Erwerbs – und –Rückmagnetisierungskurve der Probe RF-2 (Strukturmaterial „Region, Fremd“, Bruck - 2) mit einer Remanenzkoerzitivkraft (Nulldurchgang) von 27 mT. Die Sättigung (B_S) wird bei einem Feld von ca. 200 mT fast vollständig erreicht. SIRM ist die maximal erreichbare IRM

3.3.7 Curie-Temperatur

Die Untersuchung des temperaturabhängigen Suszeptibilitätsverhaltens ist eine weitere Methode zur Identifizierung ferr(o)magnetischer Mineralphasen im Probenmaterial. Mit einer zusätzlichen Temperaturkontrolleinheit CS3 ist die Kappabridge dazu geeignet, Probenmaterial bis auf 700°C aufzuheizen und anschließend auf 40°C abzukühlen. Während des Heiz- und Abkühlvorganges wird die magnetische Suszeptibilität automatisch bestimmt. Wenn man eine ferr(o)magnetische Probe bis zur Curie-Temperatur erwärmt fällt die magnetische Suszeptibilität κ der Probe von hohen, den ferr(o)magnetischen Eigenschaften entsprechenden Werten zu niedrigen Werten ab, da sich die Probe nun paramagnetisch verhält. Die Curie-Temperatur ist eine charakteristische Materialkonstante der Ferr(o)magnetika und kann ebenfalls für die Identifikation der einzelnen magnetischen Phasen verwendet werden, da jeder Magnetisierungsträger in der Probe eine typische Curie-Temperatur aufweist (SOFFEL, 1991). Aus dem Verlauf der Aufheiz- und Kühlkurve kann die Curietemperatur bestimmt werden.

Tabelle 3 fasst die Schwankungsbreite von Curie-Temperatur, Remanenzkoerzitivkraft, magnetische Suszeptibilität, Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivkraft wichtiger ferr(o)magnetischer Mineralphasen zusammen.

Tab. 3: magnetische Kenngrößen natürlicher Minerale zur Identifikation der Hauptmagnetisierungsträger

Mineral	magnetisches Verhalten ¹	Curie-Temperatur ¹	Remanenz-Koerzitivkraft ³
		T_C [°C]	$(B_0)_{CR}$ [mT]
Magnetit	ferrimagnetisch	575-585	15-55
Hämatit	antiferromagnetisch	675	700
Goethit	antiferromagnetisch	120	-
Lepidokrokot	antiferromagnetisch	-196	-
Wüstit	antiferromagnetisch	-83	-
Eisen	ferromagnetisch	770	-

Mineral	spez. Suszeptibilität ¹	Sättigungsmagnetisierung ²	Koerzitivkraft ³
	χ [10 ⁻⁸ m ³ /kg]	SIRM [kA/m]	$(B_0)_C$ [mT]
Magnetit	20.000-110.000	480	10
Hämatit	10-760	1	400

Goethit	26-280	0,05-5	5000
Lepidokrokit	40-70	<10	-
Wüstit	7200cgs/gm ⁽⁴⁾		-
Eisen	50.000	1715	0,1-2 ⁽⁴⁾

aus ¹ HUNT et al. (1995), ² MCELHINNY & MCFADDEN, (2000), ³ THOMPSON & OLDFIELD, (1986)

⁴ CARMICHAEL (1989) in cgs-System

Zusammenfassend können die magnetischen Parameter und Kennwerte zur Charakterisierung von ferr(o)magnetischer Minerale bezüglich Zusammensetzung, Konzentration und Korngröße angewendet werden (EVANS & HELLER, 2003).

Die statistische Bearbeitung und graphische Darstellung der magnetischen Ergebnisse erfolgte mit dem Programm Statistica in Form von Box-Plots. Mit Hilfe des Box-Plots lassen sich in robuster Form wichtige statistische Parameter wie Streuungsmaß (Oberes und Unteres Quantil), Median (bzw. Mittelwert) und Ausreißer übersichtlich darstellen lassen.

Robust deshalb, da sich die Kenngrößen des Boxplots auf die tatsächliche Verteilung der Datenwerte bezieht, und nicht wie die üblichen Standardabweichungen (Streuungsmaß) und der arithmetische Mittelwert auf eine Standardnormalverteilung (MATSCHULLAT et al. 1997).

3.4 Zusammenhänge zwischen magnetischen Parametern und chemischen Analysen

Die Ergebnisse der chemischen Analyse wurden vom Institut für Chemie der Karl-Franzens Universität Graz und vom Department für Allgemeine, Analytische und Physikalische Chemie der Montanuniversität Leoben zur Verfügung gestellt. Zur Bestimmung der Schwermetallgehalte wurden die Proben mit einem HNO₃-Aufschluss in der Mikrowelle vorbereitet. Analysiert wurden die Klärschlammproben mit ICP-MS am Department für Allgemeine, Analytische und Physikalische Chemie der Montanuniversität Leoben. Die Proben „Strukturmaterial“, „Aufgesetzte Miete“, „Siebüberlauf“ und „Fertigkompost“ wurden mit Hilfe der AAS-Methode am Institut für Chemie der Karl-Franzens Universität Graz untersucht. Die Korrelation zwischen dem magnetischen Parameter SIRM und den chemischen Analysen wurden in Scatterplots veranschaulicht.

3.4.1 Beurteilungsgrundlage

Kompostverordnung 2001

Zur Beurteilung des Schwermetalleintrags in Kompost, Klärschlamm und Strukturmaterialien gibt die am 1. September 2001 in Kraft getretene Kompostverordnung (BGBL.II-Nr.-292/2001) für eine Reihe von Schwermetallen Grenzwerte vor (Tabelle 4).

Die Kompostverordnung legt Qualitätsstufen sowie Anforderungen an die Ausgangsmaterialien fest. Qualitätsunterschiede ergeben sich aus der Schwermetallbelastung wobei für Kompost drei Qualitätsklassen (A+, A und B) und 4 Anwendungsbereiche (Landwirtschaft, Landschaftsbau/-pflege, Erdenherstellung und Biofilterbau) festgelegt sind. Die Kompost-Klasse B stellt die Mindestqualität dar. Klasse A ist die Voraussetzung für eine Eignung des Kompostes für die Landwirtschaftliche Verwendung. Kompost-Klasse A+ stellt eine Sonderklasse dar, die unter der zusätzlichen Voraussetzung der Verwendung bestimmter beschränkter Ausgangsmaterialien auch für den ökologischen Landbau geeignet ist. Je nach beabsichtigter Anwendung sind bei der Herstellung bestimmte Grenzwerte einzuhalten und eine entsprechende Kennzeichnung ist vorzunehmen. Für Strukturmaterial dürfen bei Elementen die entsprechend der Qualitätsklasse A begrenzt sind maximal 50% des Grenzwertes erreicht werden.

Tab. 4: Grenzwerte für Schwermetalle in Kompost und Klärschlamm

Element	Kompost [mg/kg TM]			Klärschlamm [mg/kg TM]
	Qualitätsklasse A+	Qualitätsklasse A	Qualitätsklasse B	
Cd	0,7	1	3	3
Cr	70	70	250	300
Hg	0,4	0,7	3	5
Ni	25	60	100	100
Pb	45	120	200	200
Cu	70	150	500	500
Zn	200	500	1800	2000

3.5 Identifizierung, Eigenschaften und Mineralogie von Bestandteilen der magnetischen Fraktion

Das Ziel der mineralogischen Untersuchungen war es, auf Grund von Mineralogie, Morphologie und Korngröße die Zusammensetzung der Träger der magnetischen Eigenschaften zu bestimmen, die verschiedenen Probengruppen zu charakterisieren und voneinander abzugrenzen. Als Bestimmungsgrundlage dienten neben den optischen Untersuchungen an polierten Anschliffen unter dem Auflichtmikroskop die Analyseergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie und Mikrosonde.

Für die mineralogischen Bestimmungen wurde separiertes Probenmaterial verwendet. Die Herstellung der polierten Anschliffe und die Mikrosondenanalysen wurden von Helmut Mühlhans am Lehrstuhl für Mineralogie und Petrologie der Montanuniversität Leoben vorgenommen. Die Rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Siegfried Schider am Lehrstuhl für Metallurgie der Montanuniversität Leoben durchgeführt.

3.5.1 Auflichtmikroskopie

Zur optischen Bestimmung und Unterscheidung der verschiedenen ferr(o)magnetischen Phasen wurden polierte Anschliffe angefertigt. Für diese Methode wurde separiertes Probenmaterial aus Klärschlamm, Fertigkompost und Strukturmaterial ausgewählt.

Zur lichtoptischen Bestimmung der Mineralphasen auf den Anschliffpräparaten wurden die in Tabelle 5 angeführten Mineraleigenschaften untersucht.

Neben der visuell vergleichenden Abschätzung der Farbe und des Reflexionsvermögens wurden Anisotropie, Bireflexion, Innenreflexe und Gefüge der verschiedenen Phasen beurteilt.

Tab. 5: Mineralcharakteristik und Mineraleigenschaften aus BAUMANN&LEEDER (1991) und TROJER (1963)

Mineral	Mineralcharakteristik			Merkmale im Auflicht ¹					
	Formel	Fe %	Kristallsystem	Farbe	Bireflektanz	Reflexion	Innenreflexe	Anisotropie	Gefüge
Magnetit	Fe ₃ O ₄	72,36	kubisch	grau	isotrop	21	keine	isotrop	Ausbildung idiomorpher Kristalle
Hämatit	Fe ₂ O ₃	69,94	trigonal	weiß – bläulich grau	gering - deutlich	26 - 30	dunkelrot	wechselnd grau	Ausbildung idiomorpher Kristalle, Entmischungen
Wüstit	FeO	77,73	kubisch	grau	isotrop	20	keine	isotrop	Entmischungen
Goethit	α-FeOOH	62,85	orthorhombisch	hellgrau – dunkelgrau	gering	15 - 20	bräunlich – rötlich - ocker	durch Innenreflexe nicht sichtbar	kollomorph
Lepidokrokot	χ-FeOOH	62,85	orthorhombisch	grauweiß	gering - deutlich	15 - 20	rötlich	wechselnd grau	lamellare Entmischungen
Metallisches Eisen	Feα	100	kubisch	weiß	isotrop	~ 65	keine	isotrop	Entmischungen
Calciumferrit							rötlich-braun		
Spinelle	A ₂ BO ₄ A: Fe, Cr.. B:Mg,Fe,..		kubisch	grau	isotrop	8	farblos – bräunlich	isotrop	Ausbildung idiomorpher Kristalle

¹ in Luft mit Trockenobjektiv

3.5.2 Korngrößenverteilung

Neben der Zuordnung der Phasen wurden Korngrößenbestimmungen durchgeführt. An dieser Stelle sei vermerkt, dass die Korngrößenanalyse anhand von REM-Aufnahmen oder Auflichtbildern keinerlei statistische Aussage in Bezug auf die Gesamtprobe erlaubt. Auch die Gesamtheit der magnetischen Fraktion ist nicht repräsentativ. Durch die verwendete Separationsmethode wird bevorzugt die Fraktion kleiner Teilchen angereichert. Dennoch wurde versucht durch die Korngrößenverteilung des behandelten Probenmaterials eine Unterscheidung der Probengruppen vorzunehmen.

3.5.3 Rasterelektronenmikroskopie

Als zusätzliche und ergänzende Methode zur Identifikation der magnetischen Phasen wurden separierte Proben unter dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Dazu wurde Probenmaterial mit Kohleklebeband auf Aluminiumträgertischen montiert. Mittels energie-dispersiver Röntgenmikroanalyse wurde unter dem REM auch die Zusammensetzung einzelner Partikel bestimmt (semiquantitative Bestimmung der Haupt- und Nebenelemente).

Als Probenmaterial wurde die magnetische Fraktion folgender Proben verwendet:

- Strukturmaterial R1 (Göss) und R2 (Leoben Stadt)
- Klärschlamm
- Aufgesetzte Miete
- Siebüberlauf
- Fertigkompost

Weiters wurden an den polierten Anschliffen ausgewählte Partikel analysiert, um die Ergebnisse mit den Werten der Mikrosondemessungen und den optischen Eigenschaften unter dem Mikroskop vergleichen zu können.

3.5.4 Focused Ion Beam, FIB

Der Anteil an globularen Partikeln beträgt in den untersuchten Probengruppen „Klärschlamm“, „Strauchschnitt“, „Fertigkompost“, „Aufgesetzte Miete“ und „Siebüberlauf“ etwa 20 bis 25%. Auf Grund ihrer Häufigkeit wurden einzelne globulare Partikel mit FIB angeschnitten, um Informationen über deren inneren Aufbau zu erhalten. Die globulare Form der Partikel deutet meist auf einen Verbrennungsprozess als ursprüngliche Quelle hin (MATZKA & MAHER, 1999).

Funktionsprinzip Focused Ion Beam

Prinzipiell gleicht der FIB einem Rasterelektronen-Mikroskop, wobei anstatt dem Elektronenstrahl ein Ionenstrahl zur Anwendung kommt. Dabei wird der Effekt genutzt, dass die Masse eines Elektrons 2.000 - 500.000-mal kleiner ist als die eines Ions.

Der wesentliche Unterschied zum Aufbau des REM besteht in der Verwendung einer Flüssigmetallquelle anstelle der Elektronenkanone. Der Vorteil der höheren Masse der beschleunigten Ionen gegenüber Elektronen besteht darin, dass beim Auftreffen auf ein Substrat erheblich mehr Energie übergeben wird. Ionen reißen Material heraus, wohingegen Elektronen wie „Bälle“ reflektiert werden.

Der Elektronenstrahl dient der Beobachtung und Analyse einer Oberfläche auf der Nanometerskala, der Ionenstrahl ermöglicht eine aktive Manipulation der Probe in der gleichen Größenordnung. Zur Erzeugung des Ionenstrahls wird die Wolframspitze mit dem gewünschtem Flüssigmetall bedeckt. Durch Stromzufuhr wird die Wolframspitze über die Wicklungen stark erhitzt und die emittierten Ionen werden mittels hoher Spannung beschleunigt (Abb.8). Trifft ein beschleunigtes Ion auf den Festkörper, so gibt es beim Eindringen stückweise bei Kollisionen seine kinetische Energie ab. Neben Sekundärelektronen (SE) entstehen Sekundärionen (Si) (vgl. Abb.9) - es werden ganze Atome aus dem Substrat herausgeschlagen, zusätzlich bleibt ein großer Teil der einschlagenden Ionen im Material stecken.

Der Ionenstrahl generiert folglich energieabhängig unterschiedliche Mikrodefekte auf der Substratoberfläche. Ein kontinuierlicher Beschuss der Oberfläche führt zur schrittweisen Abtragung von Material, womit punktuelle Bohrungen oder ein flächiges Fräsen von Strukturen ermöglicht wird (ARMBRUSTER, 2005).

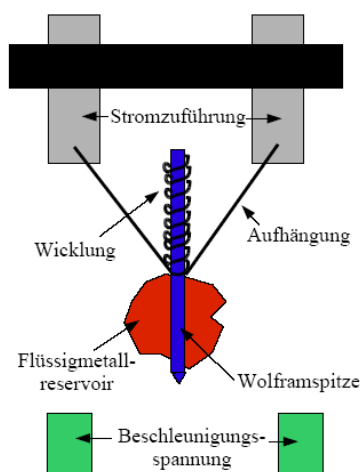
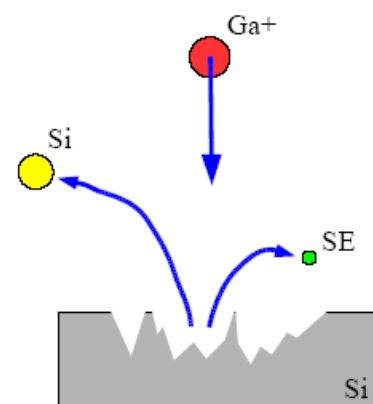


Abb. 8: Flüssigmetallquelle

Abb. 9: Ein beschleunigtes Ion trifft auf einen Festkörper, neben einem Sekundärelektron (SE) entsteht ein Sekundärion (Si), (aus ARMBRUSTER, 2005)



4 Ergebnisse der magnetischen Untersuchungen

4.1 Geländearbeit:

4.1.1 Rottenhalle

Das Ergebnis der Suszeptibilitätsmessungen an den Rotten in der Rottenhalle am 19. April 2005 ist in Abbildung 10 zusammengefasst. Innerhalb einer Rotte traten keine wesentlichen Inhomogenitäten auf. Von einer Rotte zur Nächsten sind jedoch Unterschiede hinsichtlich der magnetischen Suszeptibilität feststellbar.

Am Vortag der Messung wurden die Rotten neu umgesetzt. Miete 1 und Miete 2 waren zu dem Zeitpunkt der Messung nicht aufgesetzt.

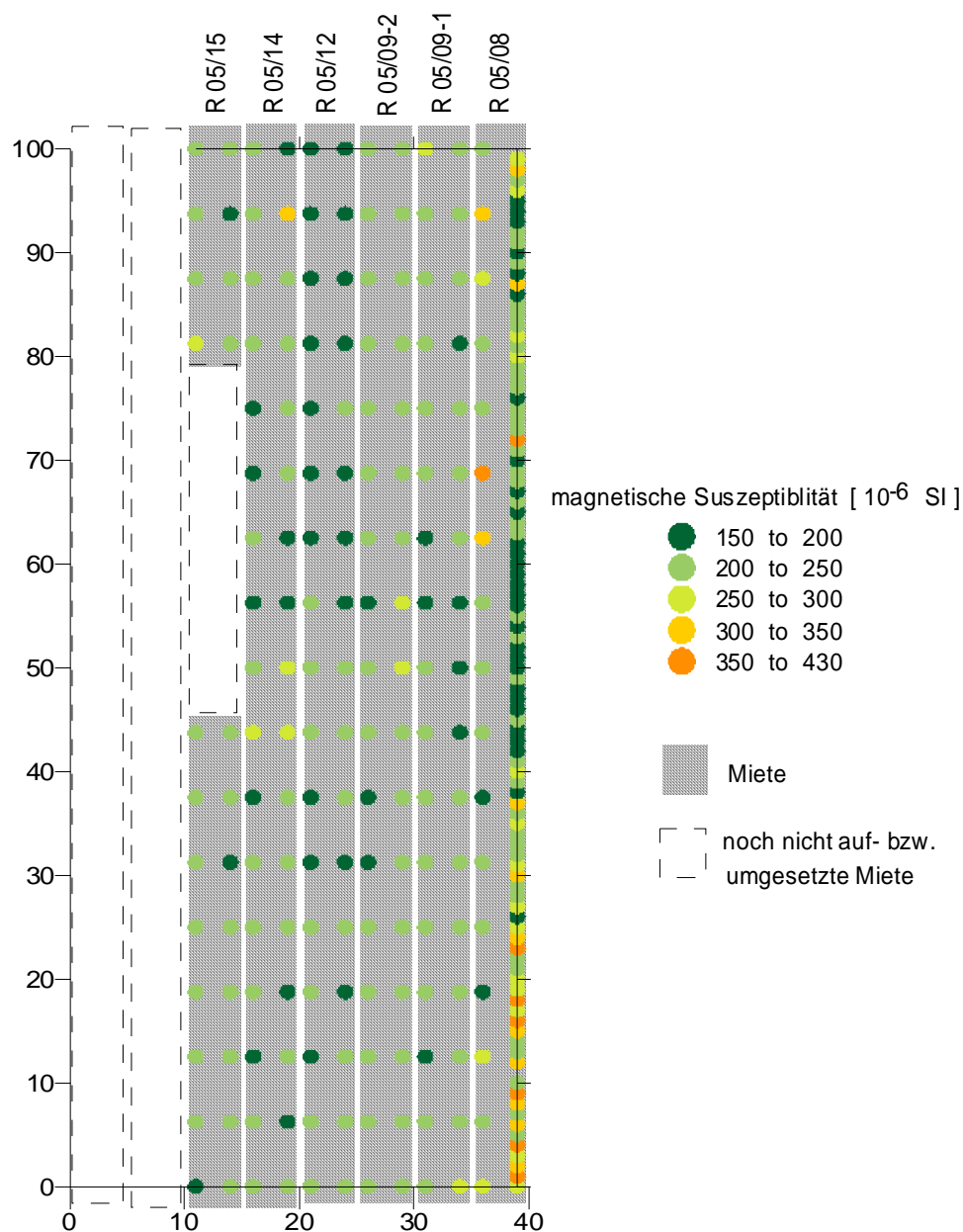


Abb. 10: Kartendarstellung der Volumenssuszeptibilität [10^{-6} Si] der Mieten in der Rottenhalle (19.4.2005)

Abbildung 11 fasst die Ergebnisse der Messungen der magnetischen Suszeptibilität für jede Miete in der Rottenhalle zusammen. Die Ausreißer, die auf Metallteile zurückzuführen waren, wurden in der Datenauswertung nicht berücksichtigt. Aus der Verteilung der Volumensuszeptibilität der gemessenen Mieten ergibt sich ein Wertebereich des Medians zwischen $190 \cdot 10^{-6}$ SI und $220 \cdot 10^{-6}$ SI.

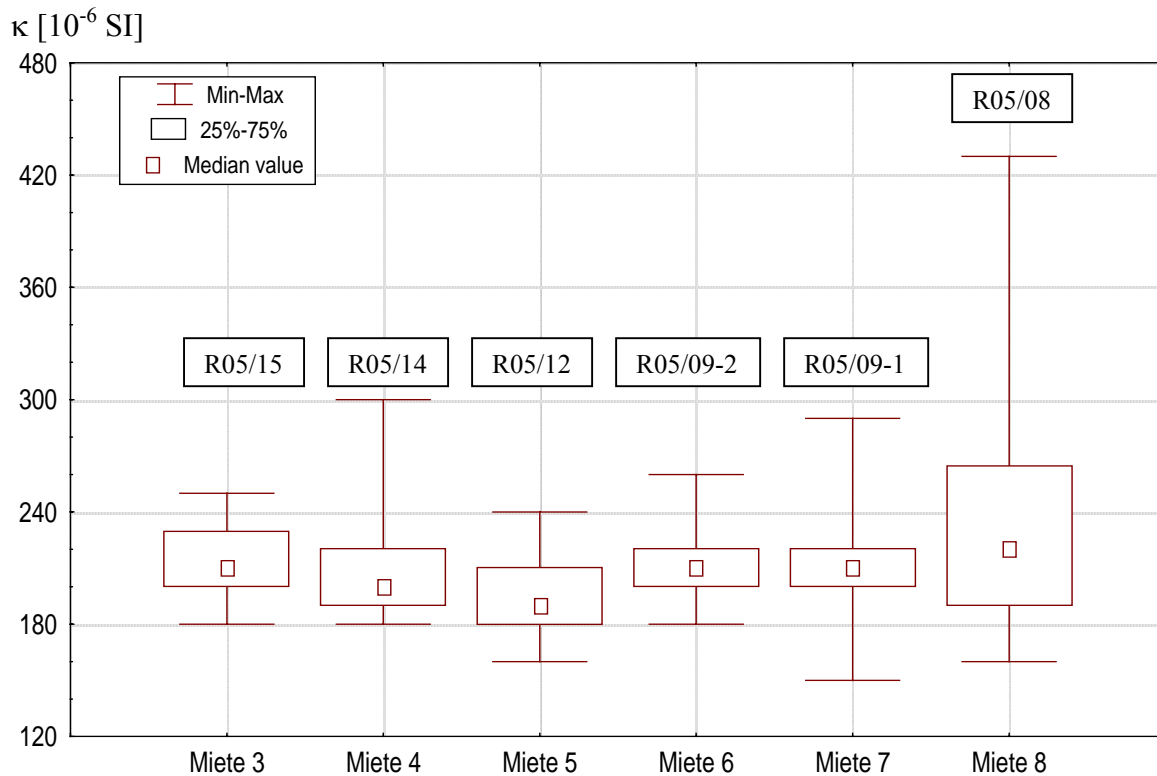


Abb. 11: Boxplotdarstellung der **Volumensuszeptibilität** κ [10^{-6} SI] der **Mieten** in der Rottenhalle

4.1.2 Rotten nach der Siebung

Die Ergebnisse der magnetischen Suszeptibilitätsmessungen an den gesiebten Rotten sind als Boxplots in Abbildung 12 dargestellt. Im **April** 2005 ergab sich für die gesiebten Rotten, die zwischen der 25. und der 51. Kalenderwoche 2004 aufgesetzt worden sind, ein Trend zu stetig abnehmenden Suszeptibilitätswerten von etwa $950 \cdot 10^{-6}$ SI zu $500 \cdot 10^{-6}$ SI. Die zu Jahresbeginn 2005 aufgesetzten Rotten (R05/01 und R05/03) zeigten wieder eine leichte Zunahme der magnetischen Suszeptibilität.

Im **Mai** 2005 konnten innerhalb der Rotten nur geringe Schwankungen festgestellt werden. Der Median der gemessenen Suszeptibilität schwankt zwischen $480 \cdot 10^{-6}$ SI und $635 \cdot 10^{-6}$ SI.

Im **September** 2005 wurden mit Ausnahme der in der 15. Kalenderwoche aufgesetzten Rotte vergleichsweise hohe Suszeptibilitätswerte von $870 \cdot 10^{-6}$ SI bis $940 \cdot 10^{-6}$ SI festgestellt. Auffallend ist der Trend der im **Oktober** 2005 für die Rotten R05/12 bis R05/24 registriert wurde. Die Rotten mit höheren Kalenderwochenzahlen zeigen zunehmend höhere Messwerte. Der Median für die älteste Rotte R05/12 beträgt nur $510 \cdot 10^{-6}$ SI, für die jüngste Rotte R05/24 bereits $850 \cdot 10^{-6}$ SI (Abb. 12)

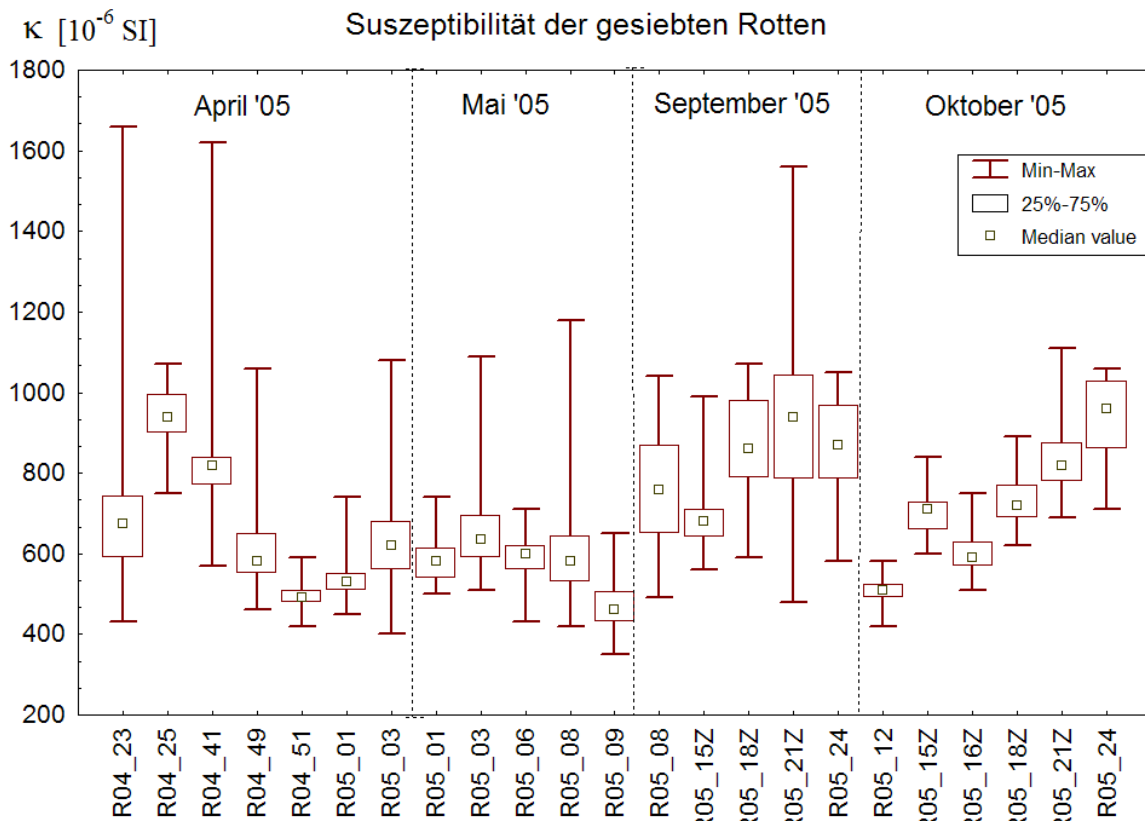


Abb. 12: Boxplotdarstellung der **Volumensuszeptibilität** κ [10^{-6} SI] für die gesiebten Rotten

4.2 Labormessungen

4.2.1 Magnetische Suszeptibilität κ

1. Probenserie, April 2005

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen bezogen auf die Masse der Proben für die erste Probenserie in Boxplotdarstellung zusammengefasst dargestellt.

Die Proben können bezüglich ihrer magnetischen Suszeptibilität in zwei Gruppen eingeteilt werden: Die erste Gruppe beinhaltet die Proben des Strukturmaterials und zeigt niedrige Suszeptibilitätswerte unter $20 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Die zweite Gruppe bilden die Proben aus „Aufgesetzter Miete“, „Fertigkompost“, „Sieüberlauf“ und „Klärschlamm“ mit magnetischen Suszeptibilitäten über $100 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. Die ermittelten Suszeptibilitätswerte für Klärschlamm schwanken zwischen $150 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (Probe KS0906) und dem Maximalwert von etwa $680 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ für die Probe KS2006. Die Suszeptibilitätsmessungen an den Proben „Fertigkompost“ ergaben eine homogene Werteverteilung. Die Probengruppe „Strukturmaterial Fremd“ setzt sich aus höheren Suszeptibilitätswerte für die Proben Linz und niedrigeren Werten für die Probengruppen Bruck und Mautern zusammen.

2. Probenserie, Oktober 2005

Die Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessung in Boxplotsdargestellung werden in Abbildung 14 gezeigt. In der linken Bildhälfte sind die Messergebnisse für die Proben „Strukturmaterial“ und „Klärschlamm“ zusammen dargestellt, die rechten Bildhälfte zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der ermittelten Suszeptibilitätswerte der Strukturmaterial-Proben. Die Resultate stimmen gut mit jenen der ersten Probenserie überein. Die Schwankungsbreite der Messwerte liegt zwischen 2 und $60 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ für die verschiedenen Proben des Strukturmaterials und zwischen 102 und $360 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ für Klärschlamm.

Die Suszeptibilitätsmessung an Strukturmaterial Göss ergab etwas höhere Werte als in der ersten Messserie. Für den Median der massenbezogenen Suszeptibilität wurde in der ersten Beprobung $7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ermittelt, wohingegen im Zuge der zweiten Probenahme ein Durchschnittswert von $21 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ berechnet wurde.

Weiters fällt auf, dass die magnetische Suszeptibilität der Klärschlamm-Proben verglichen mit der ersten Beprobung über einen geringeren Wertebereich (100 bis $350 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) variiert,

obwohl durch die geänderte Probenahme die Proben über mehrere Wochen verteilt entnommen worden sind.

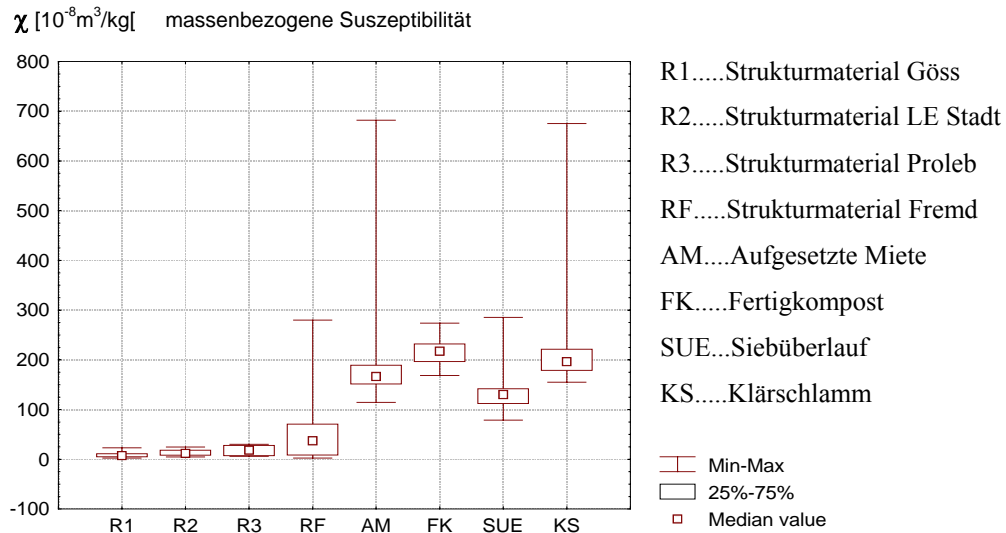


Abb. 13: Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen in Boxplotdarstellung, 1. Probenserie

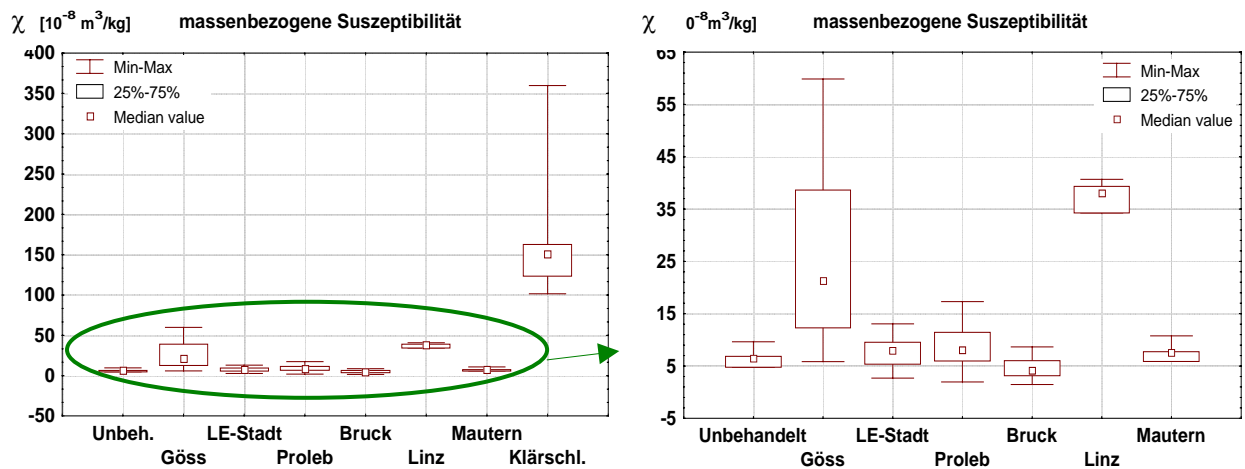


Abb. 14: Ergebnisse der Suszeptibilitätsmessungen in Boxplotdarstellung, 2. Probenserie

4.2.2 Remanente Sättigungsmagnetisierung SIRM

1. Probenserie, April 2005

Abbildung 15 fasst die Ergebnisse der Messungen der magnetischen Suszeptibilität und remanenten Sättigungsmagnetisierung für alle gemessenen Proben zusammen. Dabei ist die Sättigungsremanenz SIRM in Abhängigkeit von der volumenbezogenen magnetischen Suszeptibilität κ der Proben aufgetragen. Die Schätzwerte für die magnetische Korngröße und Magnetitkonzentration beziehen sich auf reinen Magnetit.

Die Werte der SIRM variieren von 123 mA/m im Strukturmaterial bis 37.135 mA/m im Klärschlamm. Übersichtlicher ist das Ergebnis in Abbildung 17 mit dem jeweiligen Median pro Probengruppe dargestellt. Die Proben reihen sich entlang von Linienscharen auf, wobei die parallelen Linien jeweils einen Korngrößenbereich darstellen.

Aus Abbildungen 15 und 17 geht hervor, dass nur geringe Korngrößenschwankungen auftreten, der Unterschied beruht auf unterschiedlich hohe Konzentrationen der magnetischen Phase.

Aus den Daten der Volumensuszeptibilität und der Sättigungsmagnetisierung wurde mit Hilfe von Abbildung 15 THOMPSON & OLDFIELD (1986) der Magnetitgehalt im Klärschlamm, im Fertigkompost und in den aufgesetzter Mieten mit ca. 0,05 – 0,1 Gewichtsprozent abgeschätzt. Der Magnetitgehalt für die Proben Strukturmaterial „Leoben Göss“, „Leoben Stadt“, „Proleb“ und „Bruck an der Mur“ liegt demnach unter 0,005 Gewichtsprozent. Die dominante magnetische Phase der ferr(o)magnetischen Partikel liegt nach dieser Darstellung für alle Proben in einem Korngrößenbereich von 2 bis 30 μm .

2. Probenserie, Oktober 2005

Nach dem Diagramm von THOMPSON & OLDFIELD (1986) in Abbildung 16 und 18 liegen die ferr(o)magnetischen Partikel ähnlich wie auch in der ersten Probenserie fast ausschließlich in einem engen Korngrößenbereich zwischen etwa 3 und 20 μm . Somit treten nur geringe Korngrößenschwankungen auf, die Proben unterscheiden sich lediglich in der Konzentration der magnetischen Phase.

Die Klärschlammproben weisen wieder hohe Konzentrationen an magnetischen Trägern auf. Die Korngröße der magnetischen Partikel in den Klärschlammproben zeigen verglichen mit der ersten Beprobungsserie eine größere Schwankungsbreite, was sich dadurch erklären lässt, dass die Proben der zweiten Probenserie über einen längeren Zeitraum von mehreren Wochen hinweg genommen worden sind.

Für Klärschlamm ergeben sich SIRM-Werte von 3.876 mA/m bis 22.102 mA/m. Die Werte für die verschiedenen Strukturmaterialien aus Leoben Stadt, Proleb, Mautern, und Bruck liegen alle in einem Bereich zwischen 81 bis 751 mA/m. Der Wertebereich für Strukturmaterial Göss liegt etwas höher zwischen 200 mA/m und 1.867 mA/m. Auffallend ist, dass die Proben Strukturmaterial Göss diesmal mit einem Median von 720 mA/m höhere Werte aufweisen, verglichen mit 310mA/m (Median) der ersten Beprobung.

Ähnlich wie bereits für die erste Probenserie konnte auch hier wieder aus den Daten der Volumenssuszeptibilität und der Sättigungsmagnetisierung mit Hilfe von Abbildung 16 aus THOMPSON & OLDFIELD (1986) der Magnetitgehalt im Klärschlamm zu ca. 0,03 bis 0,1 Gewichtsprozent abgeschätzt werden und stimmt damit mit den Ergebnissen der ersten Probenahme gut überein. Der Magnetitgehalt im Strukturmaterial „Göss“ ergibt sich demzufolge mit ca. 0,001 bis 0,008 Gewichtsprozent und liegt damit etwas über dem ermittelten Gehalt für die erste Probenahme im April 2005. Mit weniger als 0,003 Gewichtsprozent Magnetit ist die Konzentration in den Strukturmaterialien „Leoben Stadt“, „Proleb“ und „Bruck“ als sehr gering einzustufen. Die Veränderungen gegenüber der ersten Probenserie sind somit gering.

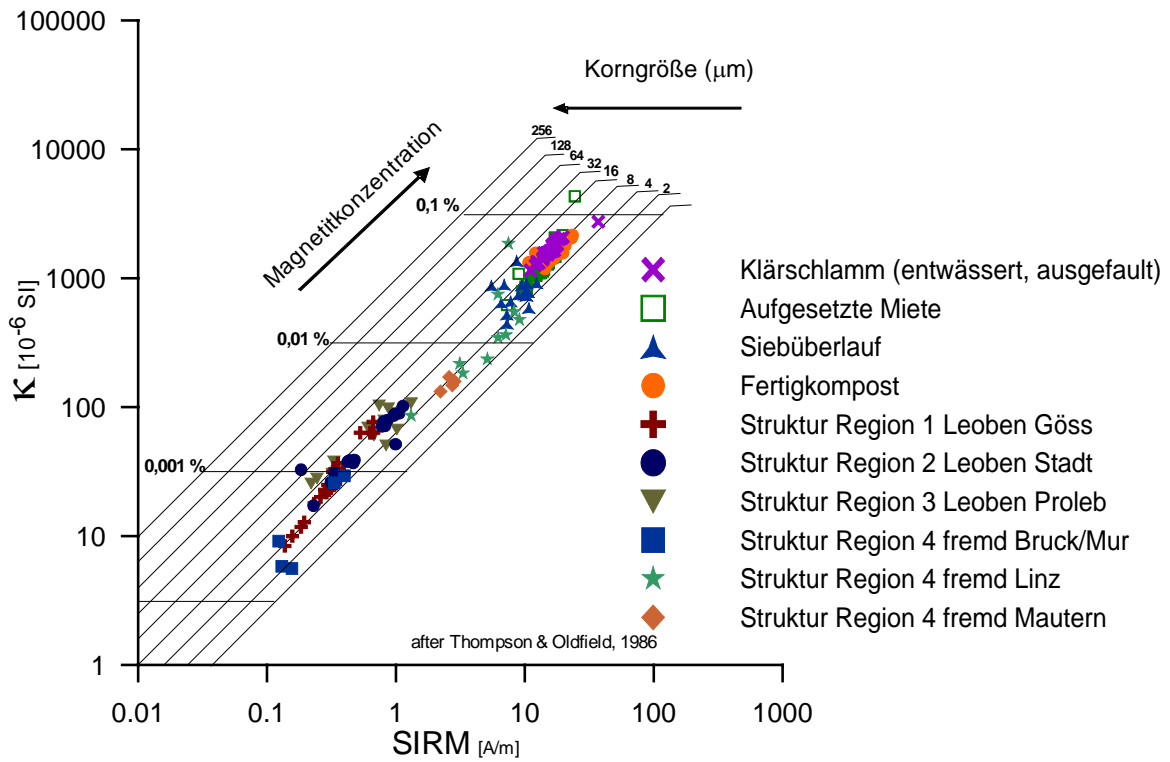


Abb. 15: Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986), 1. Beprobung

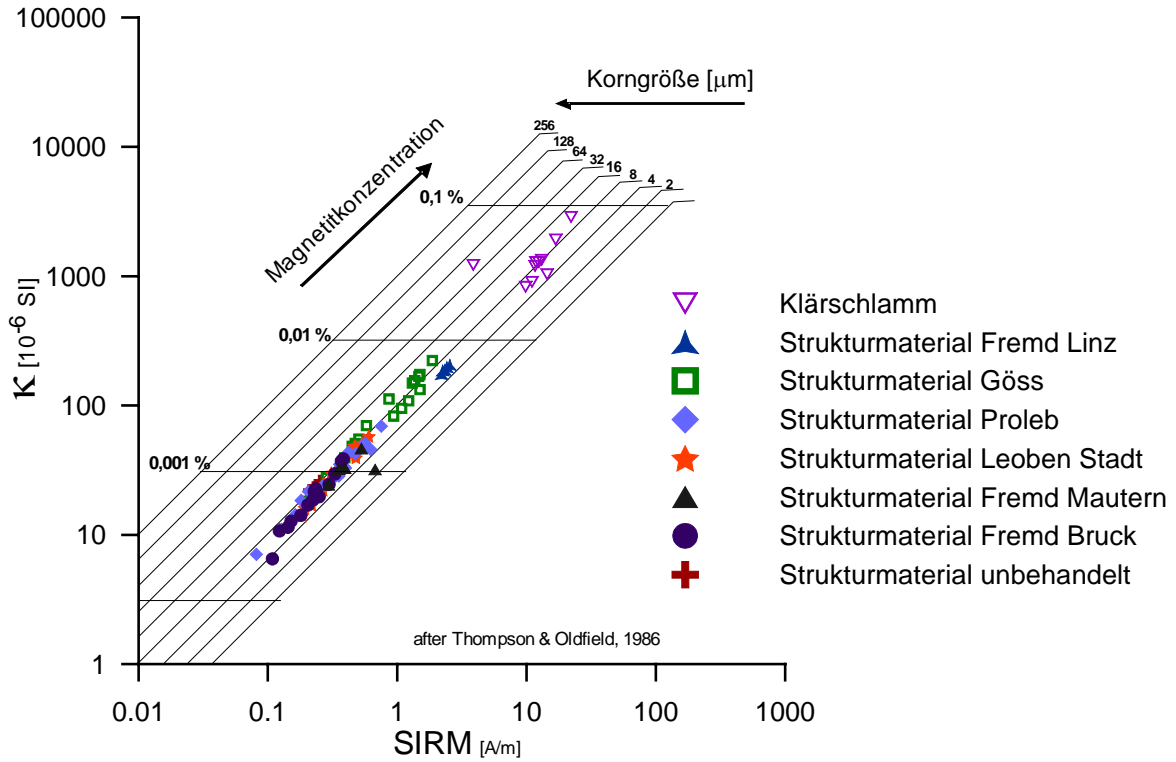


Abb. 16: Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) 2. Probenserie

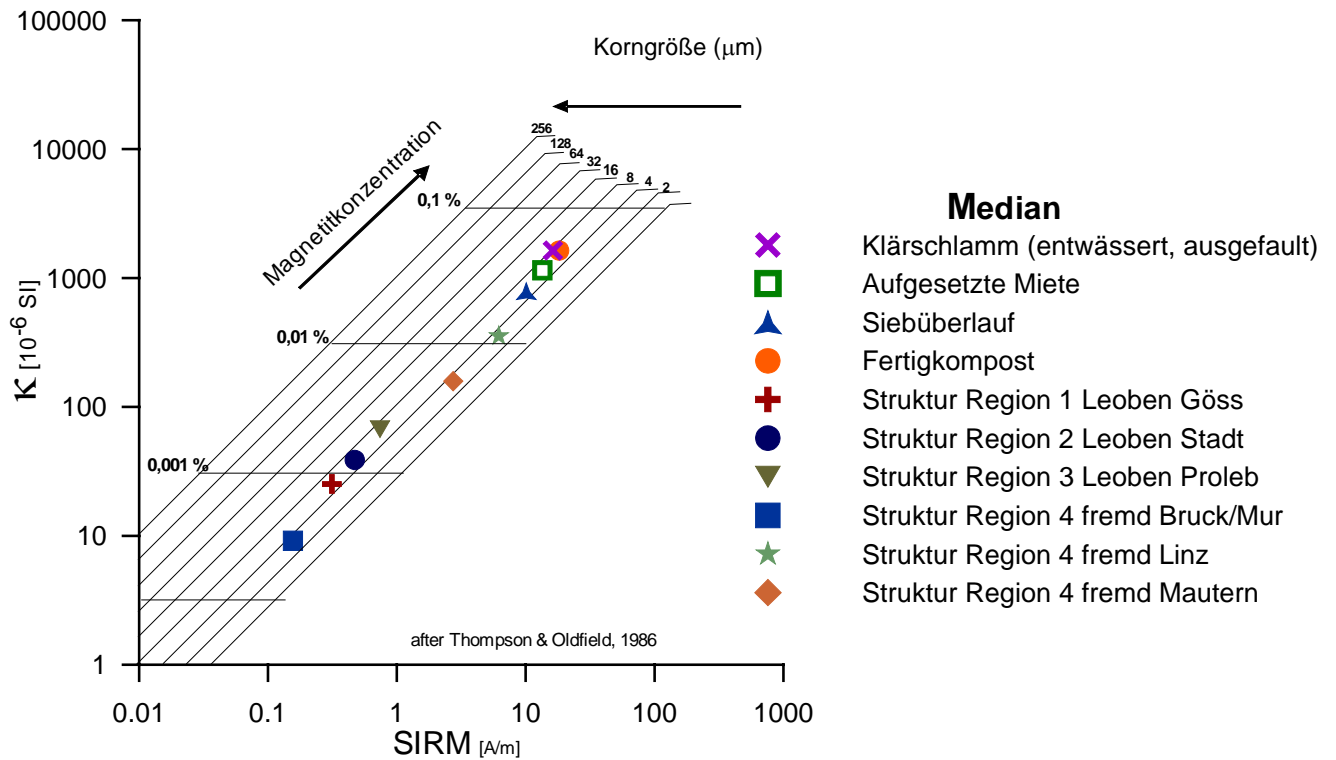


Abb. 17: Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986), 1. Beprobung; Median

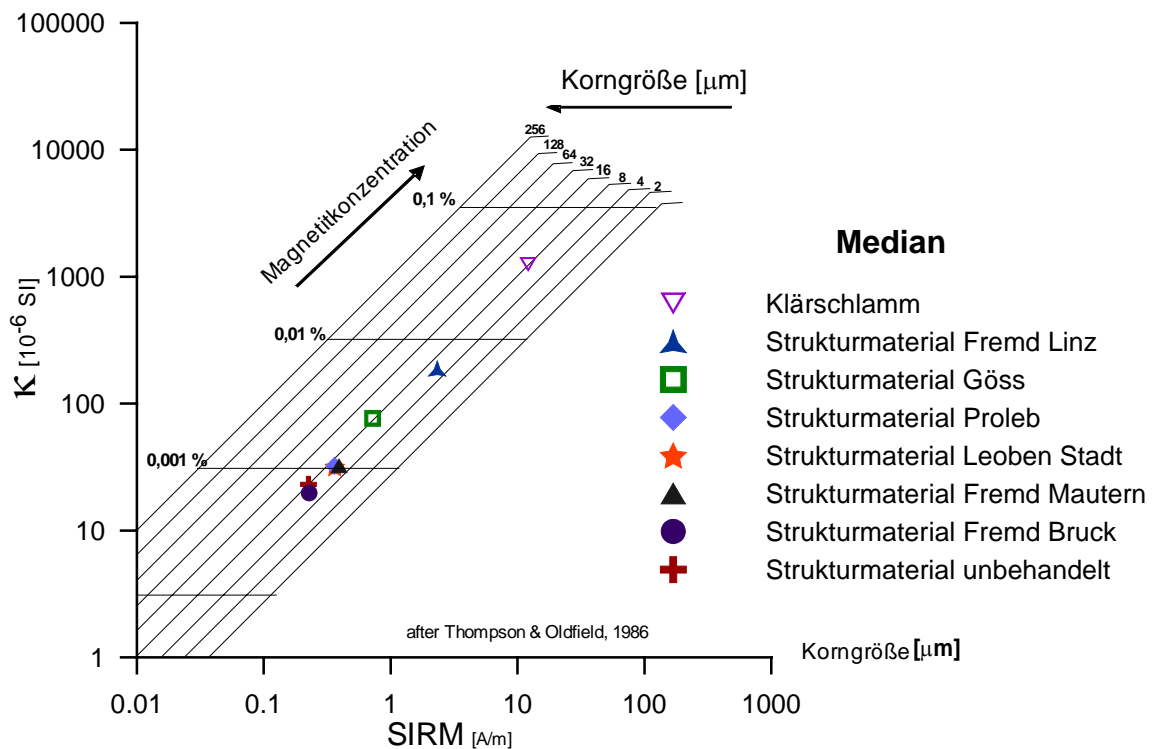


Abb. 18: Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986), 2. Probenserie, Median

4.2.3 SIRM/ κ

1. und 2. Probenserie

In Tabelle 6 ist das Verhältnis der Sättigungsremanenz SIRM zur Suszeptibilität κ dargestellt, welches ebenfalls zur Erkennung der magnetischen Phasen herangezogen werden kann.

Der Kennwert SIRM/ κ für die **erste Probenserie** variiert in einem kleinen Bereich zwischen 4 und 27,8 kA/m, der Median beträgt 11 kA/m. Die ermittelten Werte für das Verhältnis SIRM/ κ der **2. Probenserie** liegen mit 6 kA/m bis 49 kA/m und einem Median von 16 kA/m geringfügig höher. Verglichen mit einer Tabelle nach Maher et al. (1999) bewegen sich die ermittelten Verhältnisse im Wertebereich von weichem Magnetit (1,6 kA/m) und hartem Magnetit (55 kA/m) möglicherweise macht sich hier aber auch ein geringer Anteil an Hämatit (400 kA/m) oder Goethit (70kA/m) bemerkbar.

4.3 Detailstudien anhand von Einzelproben:

4.3.1 Isothermale remanente Magnetisierung

1. Probenserie, April 2005

Exemplarisch ist in Abbildung 19 die IRM-Erwerbskurve der Probe „Strukturmaterial Leoben-Göss 1.12“ aufgetragen.

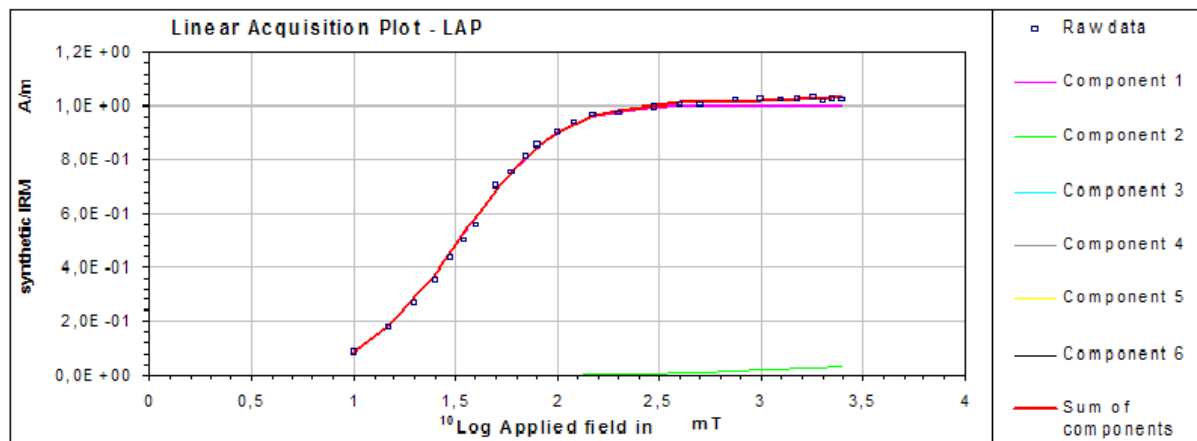


Abb. 19: Bsp für eine IRM-Erwerbskurve (Probe „Strukturmaterial Leoben-Göss 1.12“ 1. Probenserie)

Die Kurven aller untersuchten Proben zeigten einen gleichartigen Verlauf. Die isothermale remanente Magnetisierung wird somit von den gleichen magnetischen Phasen bestimmt, die zwischen 200 und 300 mT 95% der Sättigung erreichen.

Mittels der IRM-Komponentenanalyse (Programm IRM-CLG 1.0, KRUIVER et al., 2001) wurden zwei verschiedene Komponenten festgestellt. In Tabelle 6 sowie in Abbildung 20 sind die prozentuellen Verteilungen der Komponenten angegeben. Die Hauptkomponente ist mit einem $B_{1/2}$ Wert von etwa 30 mT als niedrigkoerzitiv einzustufen. Diese niedrigkoerzitive magnetische Phase wurde in den Proben zu meist über 90% festgestellt. Wie bereits aus anderen Untersuchungen (HANESCH, et al., 2003) in diesem Gebiet bekannt ist, handelt es sich dabei vermutlich um technogenen Magnetit (vgl. Kap. 5).

Die zweite Komponente ist durch $B_{1/2}$ Werte zwischen 1000 und 2000 mT charakterisiert und zu weniger als 10% vertreten. Es kommt in erster Linie Hämatit in Betracht, eventuell auch Goethit.

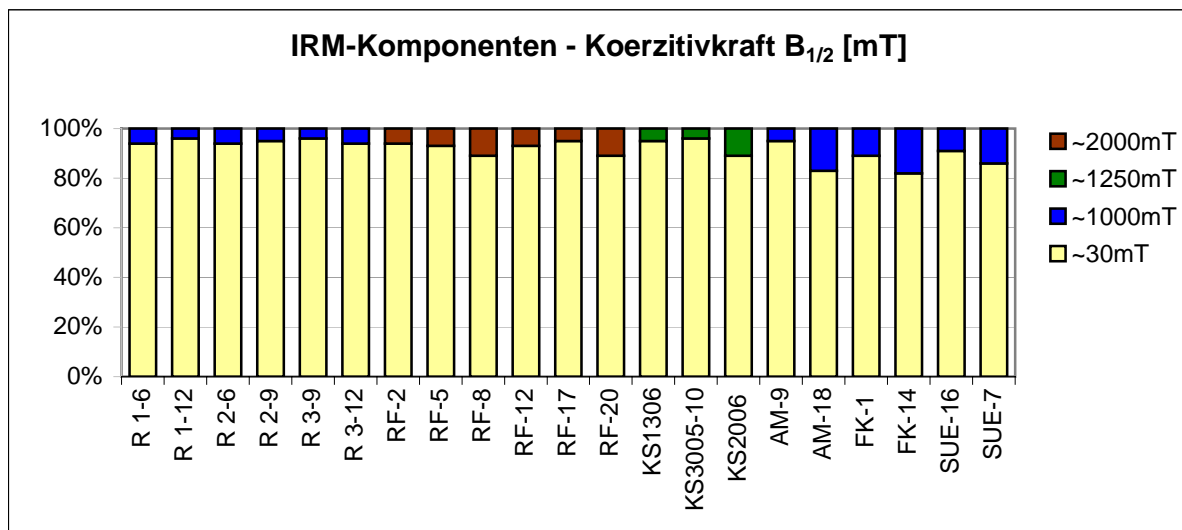


Abb. 20: Verteilung der IRM Komponenten ermittelt mit IRM-CLG nach KRUIVER et al., (2001), 1. Probenserie (R1-Strukturmaterial Göss, R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesetzte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

2. Probenserie, Oktober 2005

Die Messung der isothermalen remanenten Magnetisierung bestätigt das Ergebnis der ersten Probenahme. Wie schon in der ersten Probenserie zeigten sich auch in den Kurven der einzelnen Proben nur geringe Unterschiede, wobei 95% der magnetischen Sättigung zwischen 200 und 300 mT erreicht wurde. Durch die IRM-Analyse mit dem Programm IRM-CLG 1.0 von KRUIVER et al. (2001) konnten erneut 2 verschiedene Komponenten unterschieden werden. Die Verteilung der ermittelten Komponenten ist in der Tabelle 7 zusammengefasst. Die niedrigkoerzitive Komponente die bereits in der ersten Probenserie festgestellt wurde, konnte hier erneut beobachtet werden. Der Anteil der ersten Komponente mit einem $B_{1/2}$ –

Wert von etwa 30 mT (Wertebereich von Magnetit) schwankte in den Proben zwischen 87% und 97%.

4.3.2 Remanenzkoerzitivkraft (B_0)_{CR} und S-Faktor

1. Probenserie, April 2005

Die Remanenzkoerzitivkraft der untersuchten Proben liegt zwischen 20 mT und 30 mT (vgl. Tab. 6). Nach der Darstellung von PETERS & THOMPSON (1998) in Abbildung 21 werden die Remanenzkoerzitivkraft und der Parameter SIRM/ κ gegenübergestellt. Demzufolge befinden sich die gemessenen Proben im Bereich **Magnetit**/Titanomagnetit. Mit Werten für den **S-Faktor** (Verhältnis von Gegenfeld $IRM_{-100mT}/SIRM$) von $0,77 < S < 0,99$, macht sich auch hier die Dominanz von Magnetit bemerkbar.

2. Probenserie, Oktober 2005

Die ermittelte **Remanenzkoerzitivkraft** für die Proben der zweiten Mess-Serie variiert in einem engen Bereich zwischen 24 mT und 28 mT (vgl. Tab.7). Nach dem Diagramm nach PETERS & THOMPSON (1998) liegt die dominante magnetische Phase auch hier wieder im Bereich **Magnetit**/Titanomagnetit. Ähnlich wie für die erste Probenserie variieren die Werte für den **S-Faktor** (Verhältnis von Gegenfeld $IRM_{-100mT}/SIRM$) zwischen $0,79 < S < 0,86$, was auf Magnetit als vorherrschende Mineralphase hinweist.

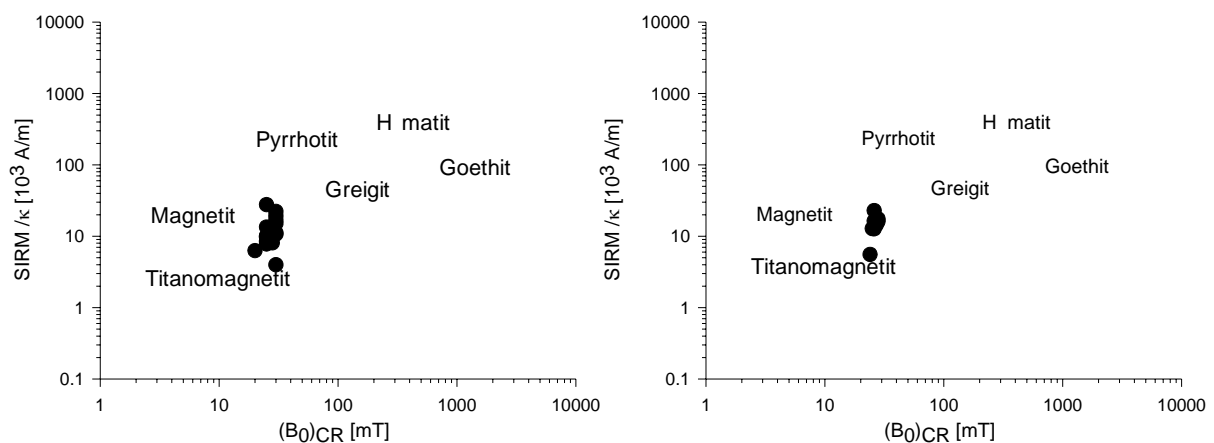


Abb. 21: Magnetische Unterscheidung von Mineralen nach PETERS & THOMPSON (1998),

1. Probenserie (links) und 2. Probenserie (rechts)

4.3.3 Curietemperatur

Exemplarisch sind Aufheizkurven einiger Proben der ersten Probenserie in Abbildung 22 dargestellt. Die Proben zeigen generell einen ähnlichen Kurvenverlauf - während der Aufheizphase steigt die magnetische Suszeptibilität bis etwa 350°C kontinuierlich an. Bei ca. 500°C tritt ein deutlicher Suszeptibilitätsabfall ein.

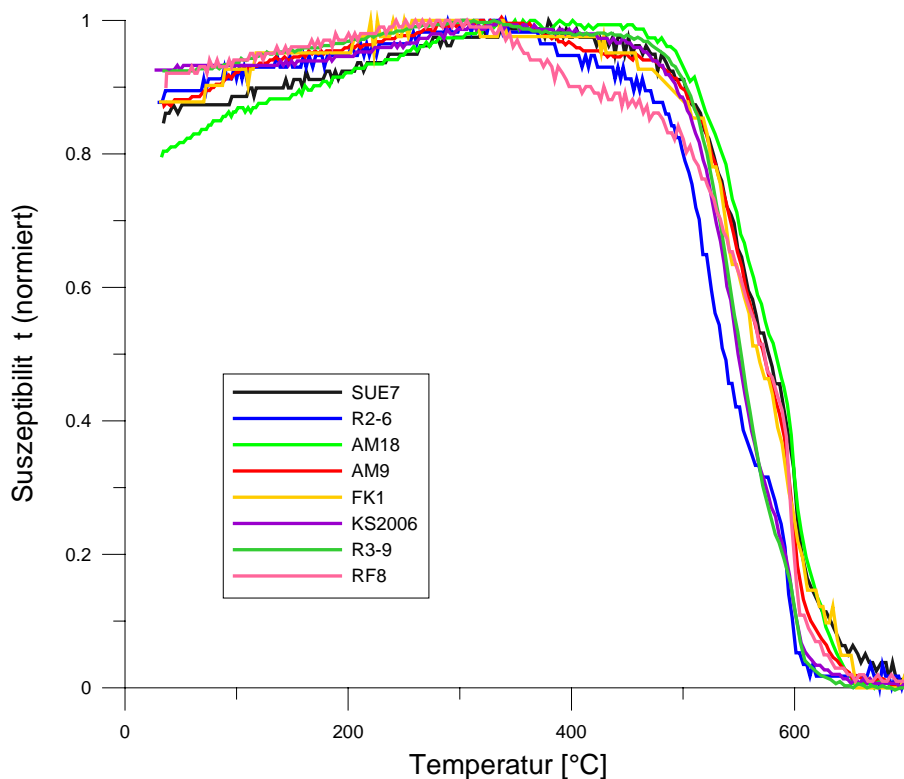


Abb. 22: Temperaturabhängige magnetische Suszeptibilität, Aufheizkurven (R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesezte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

Die durch Magnetseparation gewonnenen Strukturmaterial-Proben wurden auf Grund geringen Mengen teilweise als zusammengefasste Probegruppen gemessen.

Bei näherer Betrachtung der Messergebnisse konnten die Proben zwei Gruppen zugeordnet werden, die durch ähnliche Kurvenverläufe und somit tendenziell gleiches temperaturabhängiges Suszeptibilitätsverhalten charakterisiert sind.

Gruppe I:

Die in dieser Gruppe zusammengefassten Proben KS1306, KS2006, KS3005, FK1, FK14, AM9, SUE7, RF8 und RF20 zeigen während der Temperaturbehandlung folgende Gemeinsamkeiten (Abb. 23 – Abb.26): Während der Aufheizphase steigt die Suszeptibilität

langsam bis etwa 300°C an, oberhalb von ca. 350°C fällt die magnetische Suszeptibilität leicht ab, bei etwa 550°C kommt es zu einem steilen Suszeptibilitätsabfall. Im Temperaturintervall von ca. 620°C bis 700°C verlaufen die Kurven aller Proben während der Aufheiz- und Abkühlphase mit geringen Suszeptibilitätswerten parallel zur Temperaturachse. Die Reversibilität der Kühlkurven endet zwischen 620°C und 570°C. Unterhalb dieser Temperatur verlaufen die Abkühlungskurven in allen Fällen auf einem wesentlich niedrigeren Niveau als die Aufheizkurven. Bis zum Temperaturniveau der Raumtemperatur sinkt ihre Suszeptibilität leicht ab. Die Curietemperatur wurde graphisch bestimmt

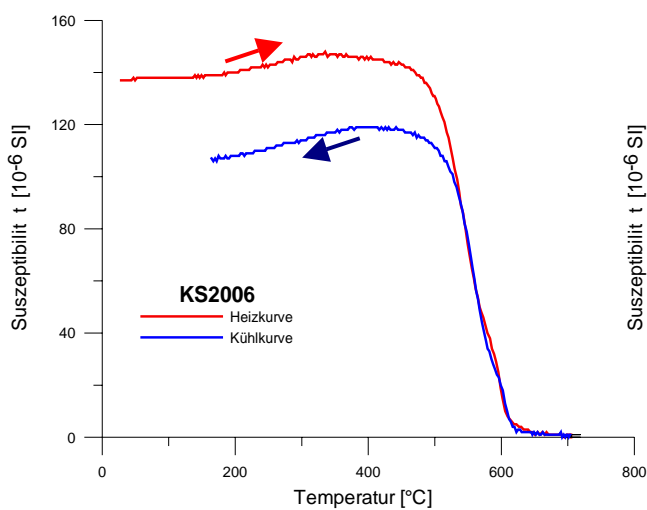


Abb. 23: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Probe KS2006 (Aufheizkurve rot)

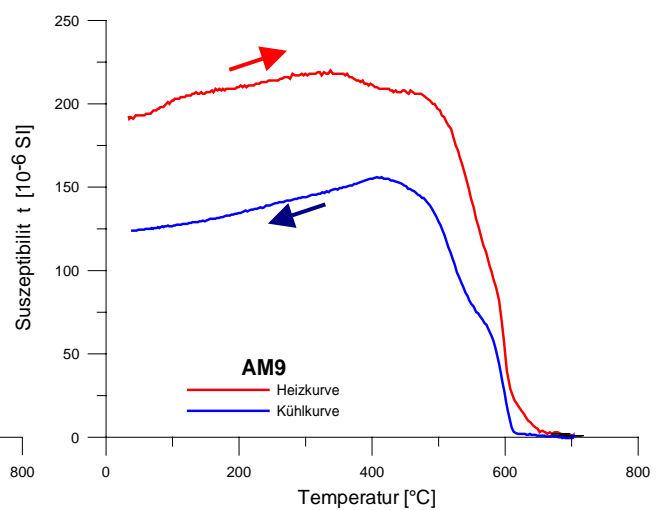


Abb. 24: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Probe AM9 (Aufheizkurve rot)

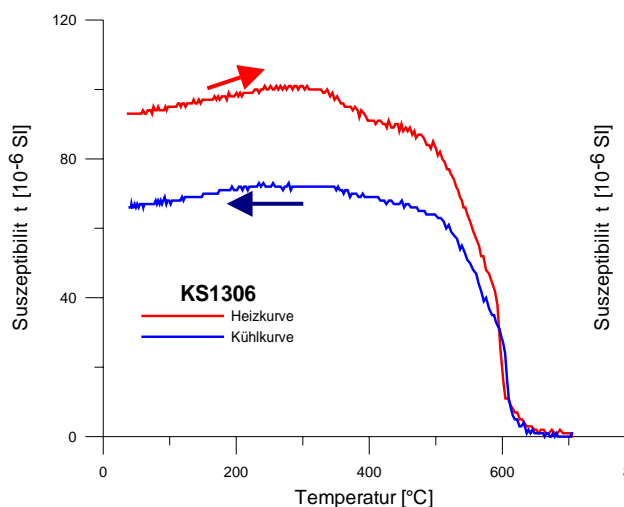


Abb. 25: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Probe KS1306 (Aufheizkurve rot)

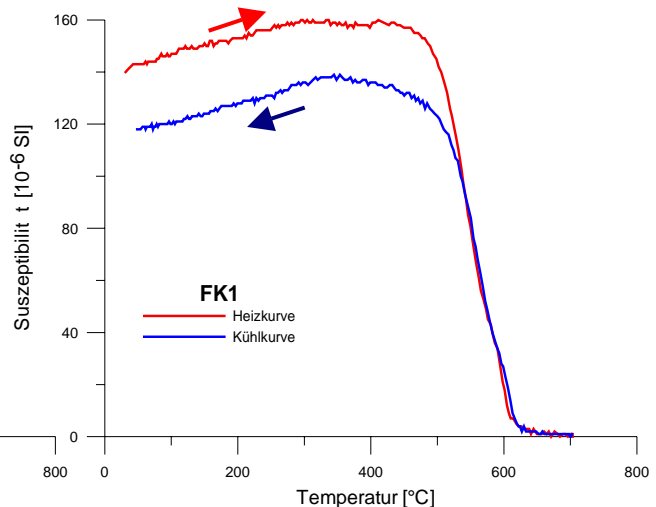


Abb. 26: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Probe FK 1 (Aufheizkurve rot)

Gruppe II:

Es zeigen sich sehr ähnliche Kurvenverläufe wie für die in der Gruppe I zusammengefassten Proben, charakteristisch für das temperaturabhängige Suszeptibilitätsverhalten der Proben R1.6/R1.12, R2.6/R2.9, R3.9/R3.12 und AM18 ist jedoch, dass ihre Abkühlungskurven deutlich über den Aufheizkurven liegen (vgl. Abb. 27 – 29). Während der Aufheizphase verhalten sie sich ähnlich wie die Proben der Gruppe I. Die magnetische Suszeptibilität steigt zunächst kontinuierlich an, bei etwa 320°C wird ein leichter Peak verzeichnet, ab 500°C fällt die magnetische Suszeptibilität steil ab. Die rückläufige Kurve ist bis etwa 620°C deckungsgleich. Bis 500°C kommt es zu einem steilen Anstieg der magnetischen Suszeptibilität. Im weiteren Abkühlungsprozess verringert sich die magnetische Suszeptibilität kontinuierlich und erreicht ein etwas höheres Niveau als jenes der Anfangssuszeptibilität bei Raumtemperatur.

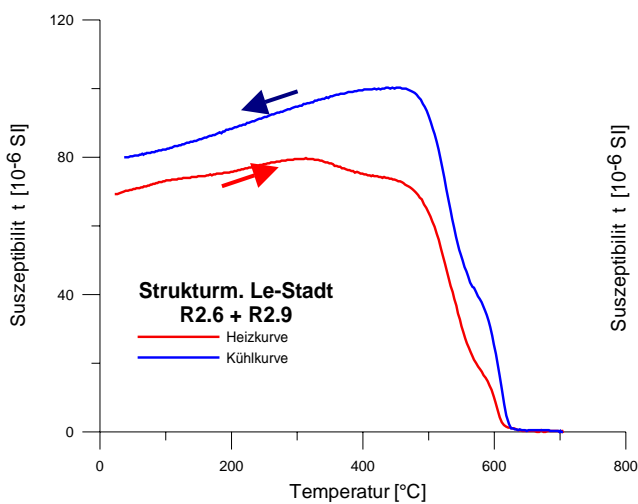


Abb. 27: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Proben R2.6 und R2.9 (Aufheizkurve rot)

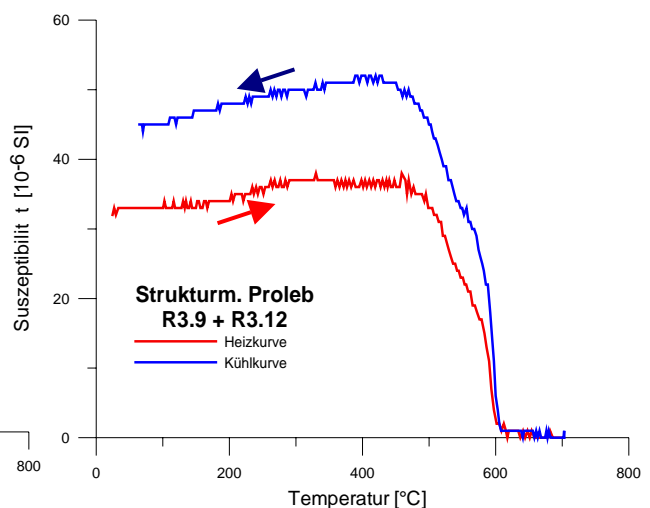


Abb. 28: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Proben R3.9 und R3.12 (Aufheizkurve rot)

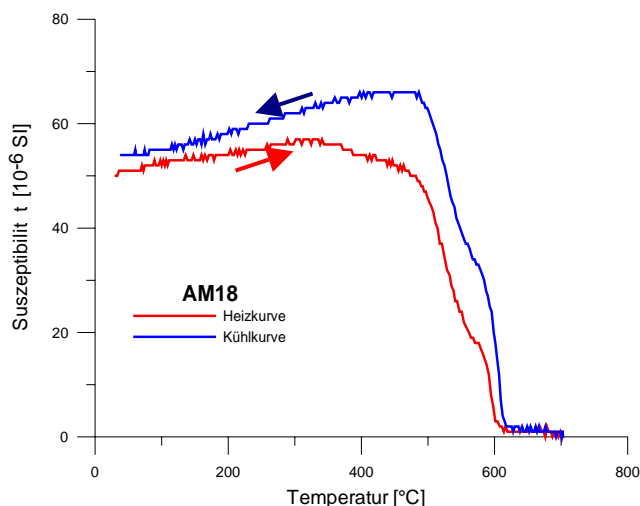


Abb. 29: Temperaturabhängiger Suszeptibilitätsverlauf der Probe AM 18 (Aufheizkurve rot)

In den Tabellen 6 und 7 sind die ermittelten magnetischen Kennwerte für die magnetische Suszeptibilität, die remanente Sättigungsmagnetisierung SIRM, das Verhältnis SIRM/Volumsuszeptibilität, Koerzitivkraft der IRM-Komponenten, die Remanenzkoerzitivkraft B_{0CR} , die Curie-Temperatur und der S-Faktor der ersten Probenserie und zweiten Probenserie zusammengefasst.

Probe	κ [10 ⁻⁶ SI]	χ [10 ⁻⁸ m ³ /kg]	SIRM [A/m]	SIRM _{2,5T} / κ [kA/m]	$B_{1/2}$ (Komponente1) [mT]	$B_{1/2}$ (Komponente2) [mT]	(B_0) _{CR} [mT]	T_C^1 [°C]	T_C^2 [°C]	Sättigung ^(95%) [mT]	S-Faktor [/]
R-G1-6	32	9	0,32	10,3	30 (95%)	1000 (5%)	28	580	610	300	0,82
R-G 1-12	33	9	0,34	10,2	28 (83%)	1000 (17%)	28			300	0,84
R-LE 2-6	52	13	1	19,3	29 (89%)	1000 (11%)	30	575	615	300	0,81
R-LE 2-9	77	17	0,8	10,4	26 (82%)	1000 (18%)	28			200	0,80
R-P 3-9	60	17	0,67	11,2	31 (91%)	1000 (9%)	30	580	605	200	0,82
R-P 3-12	90	28	0,96	10,7	29 (86%)	1000 (14%)	30			300	0,81
RF-B-2	6	4	0,13	22,3	32 (94%)	1000 (6%)	30	---	---	200	0,81
RF-B-5	6	4	0,16	27,8	33 (96%)	1000 (4%)	25	---	---	120	0,99
RF-L-8	751	122	6,19	8,2	34 (94%)	1000 (6%)	26	570	630	400	0,82
RF-L-12	1861	280	7,47	4	33 (95%)	1000 (5%)	30	580	630	300	0,76
RF-M-17	132	33	2,22	16,8	31 (96%)	1000 (4%)	30	---	---	200	0,86
RF-M-20	171	30	2,59	15,1	32 (94%)	1000 (6%)	30			200	0,84
KS1306	1308	168	12,88	9,9	34 (94%)	2000 (6%)	25	590	610	300	0,86
KS3005-10	1156	155	11,06	9,6	33 (93%)	2000 (7%)	25	575	625	200	0,85
KS2006	2743	675	37,13	13,5	30 (89%)	2500 (11%)	25	570	620	500	0,84
AM-9	1419	181	14,36	10,1	36 (93%)	2000 (7%)	25	590	610	200	0,82
AM-18	1084	160	8,97	8,3	36 (95%)	2000 (5%)	25	575	610	300	0,85
FK-1	1320	169	10,73	8,1	33 (89%)	2000 (11%)	28	575	620	150	0,80
FK-14	1454	200	12,56	8,6	27 (95%)	1260 (5%)	25	590	620	400	0,77
SUE-16	890	135	6,92	7,8	26 (96%)	1260 (4%)	25	570	620	300	0,83
SUE-7	876	164	5,5	6,3	25 (84%)	1260 (16%)	20	580	610	400	0,72

Tab. 6: magnetische Kennwerte der 1. Probenserie (Strukturmaterial: R1-Göss, R2-LE Stadt; R3-Proleb; RF-Fremd; KS- Klärschlamm, FK-Fertigkompost, AM-Aufgesetzte Miete, SUE- Sieüberlauf)

Probe	κ [10 ⁻⁶ SI]	χ [10 ⁻⁸ m ³ /kg]	SIRM [A/m]	SIRM _{2,5T/κ} [A/m]	$B_{1/2}$ (Komponente1) [mT]	$B_{1/2}$ (Komponente2) [mT]	(B_0) _{CR} [mT]	T_C^1 [°C]	T_C^2 [°C]	Sättigung ^(95%) [mT]	S-Faktor [/]
R 1-G-4	149	45	1,31	13	30 _(95%)	2000 _(5%)	25	580	605	200	0,84
R 1-G-20	132	32	1,50	18	30 _(96%)	1000 _(4%)	28	---	---	200	0,86
R 2-LE-4	29	8	0,33	16	33 _(92%)	2000 _(8%)	26	---	---	300	0,79
R 2-LE-18	51	13	0,54	16	32 _(92%)	2000 _(8%)	28	580	605	300	0,81
R 3-P-7	44	12	0,42	13	29 _(92%)	2000 _(8%)	25	580	610	400	0,79
R 3-P-17	33	8	0,38	18	35 _(94%)	2000 _(6%)	29	585	605	300	0,81
RF-B-11	20	4	0,24	18	33 _(92%)	1000 _(8%)	29	---	---	400	0,80
RF-L-18	186	38	2,25	13	32 _(87%)	1000 _(13%)	26	580	615	200	0,85
RF-M-23	32	7	0,35	14	33 _(96%)	2000 _(4%)	27	---	---	200	0,82
KS 041105	902	101	11,01	23	29 _(97%)	1000 _(3%)	26	575	605	150	0,85
KS 251105	1222	154	3,88	6	33 _(93%)	2000 _(7%)	24	575	605	200	0,86

Tab. 7: magnetische Kennwerte der 2. Probenserie

4.4 Zusammenhänge zwischen magnetischen Parametern und Schwermetallgehalten

Die Ergebnisse der magnetischen Untersuchungen stimmen mit jenen der chemischen Analysen gut überein. Für folgende Proben wurden vergleichsweise hohe Konzentrationen an magnetischen Phasen und Schwermetallgehalten ermittelt:

- Aufgesetzte Miete,
- Fertigkompost,
- Klärschlamm,
- Strukturmaterial fremd Linz, (andere Strukturmaterialien vgl. Kap. 6.4)
- Siebüberlauf,

Folgende Probengruppen können als vergleichsweise unbelastet eingestuft werden können

- Strukturmaterial R1 Göss,
- Strukturmaterial R2 Leoben,
- Strukturmaterial R3 Proleb und
- Strukturmaterial fremd Bruck

In Abbildung 30 sind beispielhaft die magnetische Suszeptibilität und die Analyseergebnisse für Arsen und Blei bilogarithmisch gegenübergestellt.

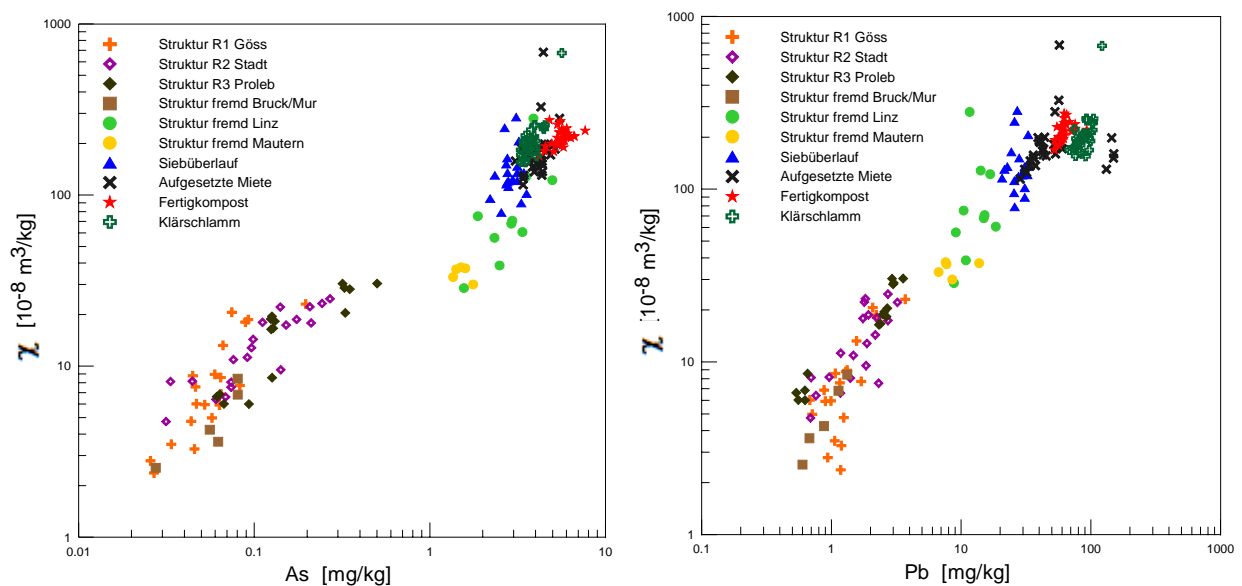


Abb. 30: Vergleich zwischen der magnetischen Suszeptibilität [$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$] mit As (links), und Pb (rechts) [mg/kg], 1. Probenserie

Trotz unterschiedlicher Probenarten und Analysemethoden konnte zwischen den analysierten Schwermetallen und den magnetischen Parametern **SIRM** und χ der Proben des ersten Datensatzes ein ausgeprägter Zusammenhang gefunden werden. Für die Probengruppe „Strukturmaterial Fremd“ aus Bruck, Linz und Mautern wurde getrennt ein Regressionskoeffizient berechnet.

Für die anderen Probengruppen konnte ohne weitere Unterscheidung eine signifikante positive Korrelation nachgewiesen werden. Besonders deutlich sind die Zusammenhänge zwischen den magnetischen Parametern und den Schwermetallen Arsen, Kobalt, Blei und Zink. Die ermittelten Regressionskoeffizienten zu den magnetischen Parametern SIRM und χ sind in der Tabelle 8 jeweils aufgeteilt auf die zwei Probengruppen angeführt.

SIRM vs. Schwermetallgehalt

Die Korrelationsergebnisse zwischen SIRM und Schwermetallgehalten sind in Abbildung 31 und 32 dargestellt. Für den Probensatz „Fertigkompost, Klärschlamm, Siebüberlauf, Aufgesetzte Miete, Strukturmaterial Göss, Leoben und Proleb“ (Gruppe 1) wurden jeweils Regressionskoeffizienten von $R^2 = 0,91$ bis $R^2 = 0,97$ ermittelt.

Die Regressionskoeffizienten der Probengruppe „Strukturmaterial Fremd“ (Gruppe 2) schwanken für die analysierten Elemente zwischen $R^2 = 0,95$ und $R^2 = 0,69$. Bei den Elementen Kupfer und Quecksilber konnten hier nur geringe Zusammenhänge mit dem magnetischen Parameter SIRM festgestellt werden.

χ vs. Schwermetallgehalt:

Für die Probengruppe 1 („Fertigkompost, Klärschlamm, Siebüberlauf, Aufgesetzte Miete, Strukturmaterial Göss, Leoben und Proleb“) wurden jeweils Regressionskoeffizienten von $R^2 = 0,84$ bis $R^2 = 0,98$ ermittelt (vgl. Tab.8).

Die Regressionskoeffizienten der Probengruppe 2 „Strukturmaterial Fremd“ variieren für die analysierten Elemente Arsen, Cobalt, Blei, Zink zwischen $R^2 = 0,95$ und $R^2 = 0,65$. Die Elemente Cadmium, Kupfer, Chrom, Quecksilber, Nickel zeigten für die Probengruppe „Strukturmaterial Fremd“ nur geringe Zusammenhänge mit der magnetischen Suszeptibilität.

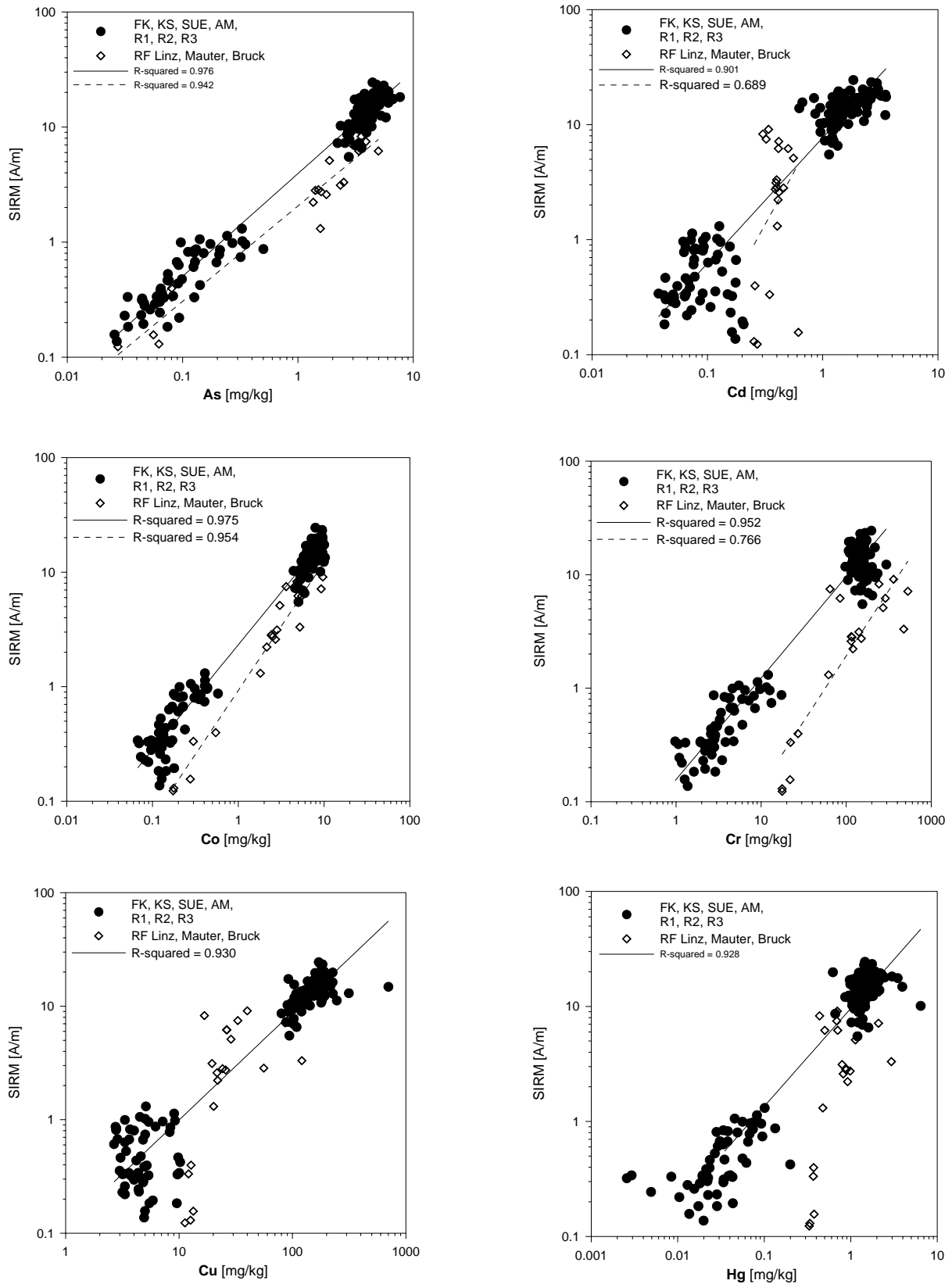


Abb. 31: Korrelation zwischen der remanenten Sättigungsmagnetisierung SIRM [A/m] und den Schwermetallen As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg [mg/kg], 1. Probenserie (R1-Strukturmaterial Göss, R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesetzte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

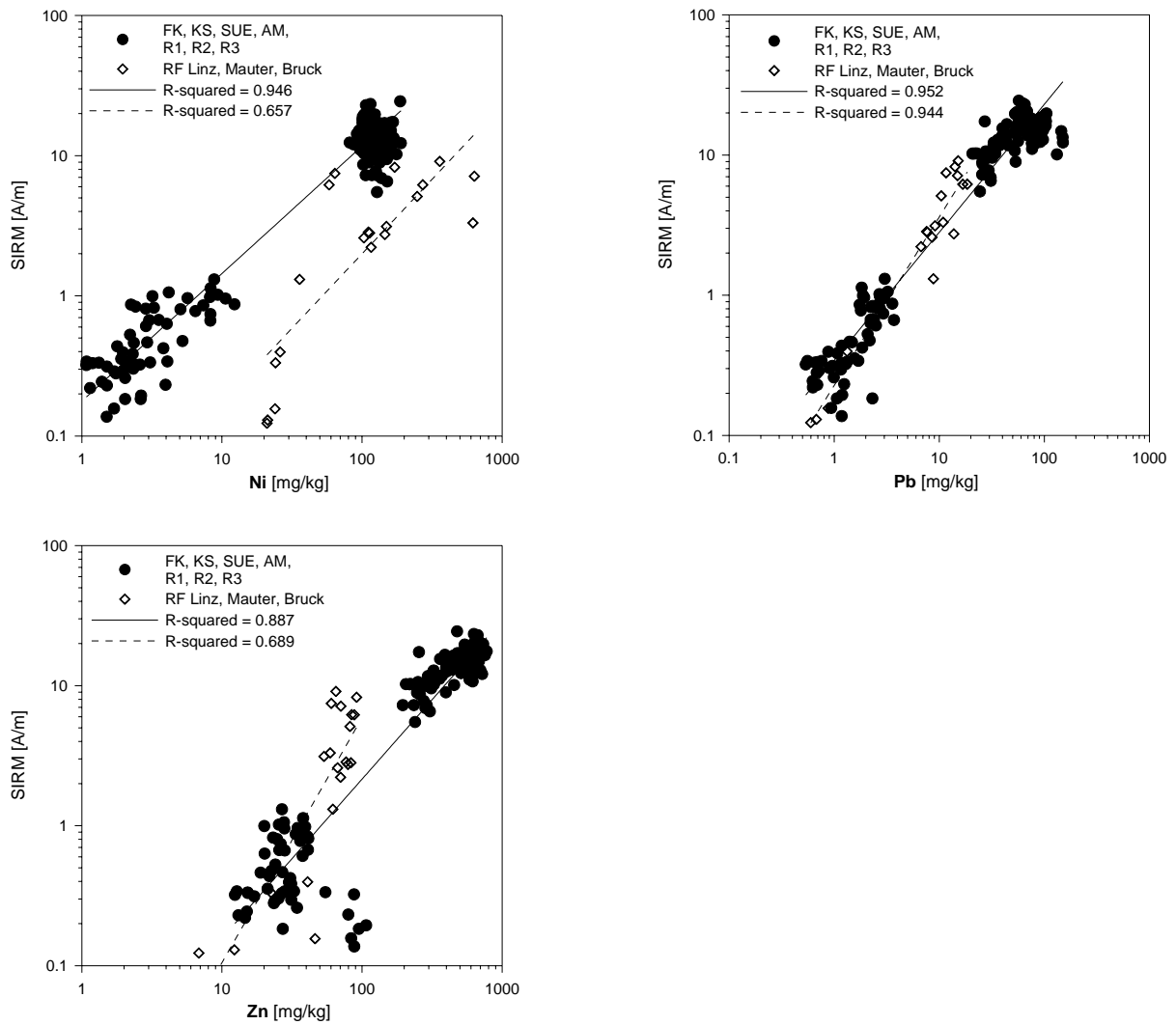


Abb. 32: Korrelation zwischen der remanenten Sättigungsmagnetisierung SIRM [A/m] und den Schwermetallen Ni, Pb, Zn [mg/kg], 1. Probenserie (R1-Strukturmaterial Göss, R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesetzte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

Tab. 8: Regressionskoeffizienten (R^2) für die Korrelation zwischen Elementgehalten und SIRM bzw. χ

SIRM [A/m]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Gruppe 1	0,976	0,901	0,975	0,952	0,930	0,928	0,946	0,952	0,887
Gruppe 2	0,942	0,689	0,954	0,766	-	-	0,657	0,944	0,689
χ [$10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$]	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Gruppe 1	0,963	0,870	0,975	0,940	0,888	0,908	0,929	0,935	0,841
Gruppe 2	0,904	-	0,954	-	-	-	-	0,863	0,645

Gruppe 1: Fertigkompost, Klärschlamm, Siebüberlauf, Aufgesetzte Miete, Strukturmaterial Göss, Leoben Proleb

Gruppe 2: Strukturmaterial Fremd aus Bruck, Linz und Mautern

4.4.1 Schwermetallgehalte und Grenzwerte

Um die vorhandenen Elementkonzentrationen beurteilen zu können wurden die gemessenen Schwermetallkonzentrationen mit den Grenzwerten der Kompostverordnung 2001 für Kompost und Klärschlamm (siehe Tabelle 4) verglichen.

Die Grenzwerte der Kompostverordnung von 2001 für **Kompost** der Qualitätsklasse B werden bei Nickel (100 mg/kg) mit einem Median von 110 mg/kg und vereinzelt bei Cadmium (3 mg/kg) sowie bei Quecksilber (3 mg/kg) überschritten. Bezüglich der Kompostklasse B liegen die Schwermetallkonzentrationen der Elemente Kupfer, Zink und Blei deutlich unter den Grenzwerten. Die Voraussetzung für die Verwendung des Kompostes als Qualitätsklasse A werden nicht erfüllt. Die Schwermetallgehalte der untersuchten **Strukturmaterial**-Proben sind als gering einzustufen. Unterschiede in den Konzentrationen zwischen den Strukturmaterialproben Proleb, Leoben-Stadt und Göss sind nur marginal. Die Anforderungen für **Klärschlamm** als Ausgangsmaterial für Kompost werden bei den Schwermetallen Cadmium, Kupfer, Quecksilber, Zink und Blei eingehalten, bei Nickel wird der Grenzwert (100 mg/kg) mit einem Median von 110 mg/kg überschritten. Die erhöhten Schwermetallgehalte der Probengruppe „**Aufgesetzte Miete**“ (Kupfer, Quecksilber) sind auf wenige Einzelproben beschränkt. Wie auch im Fertigungskompost und Klärschlamm wurden für Nickel erhöhte Konzentrationen gemessen

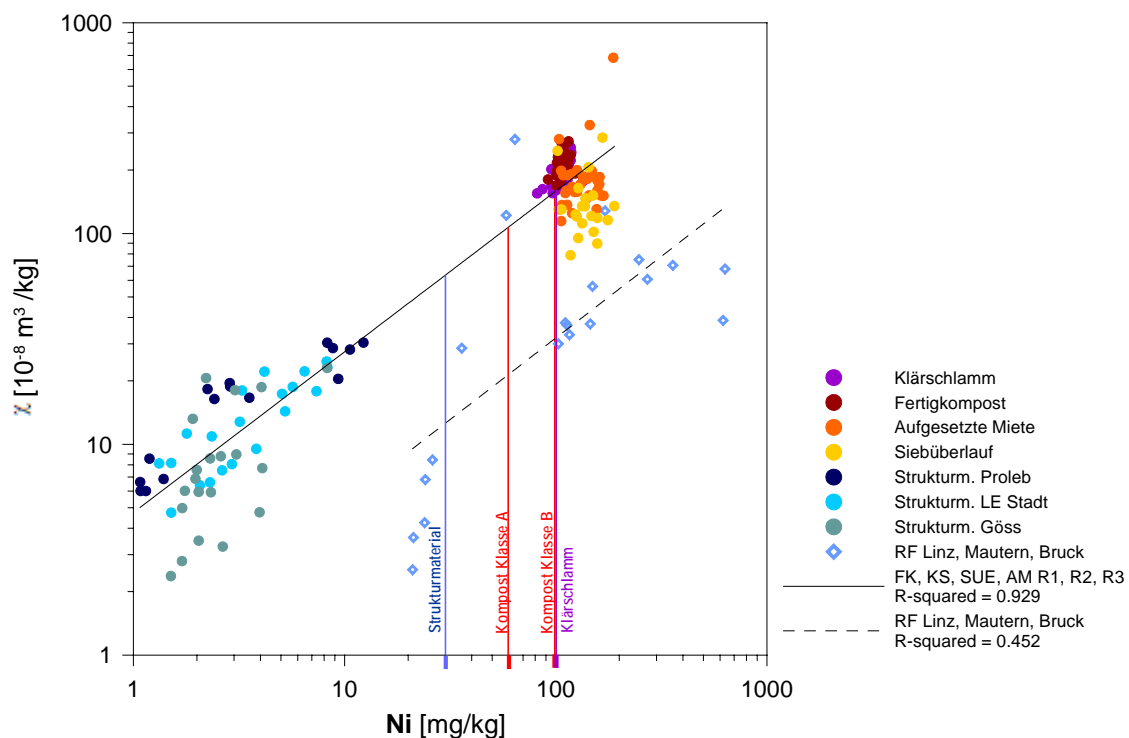


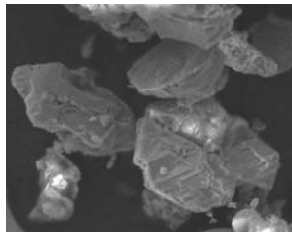
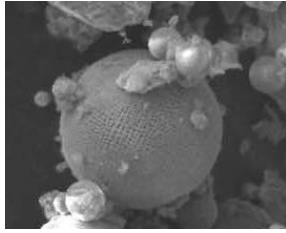
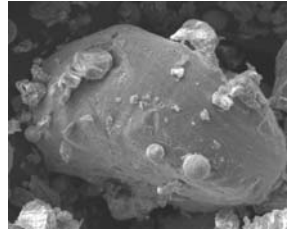
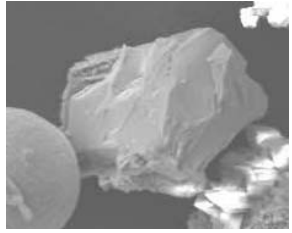
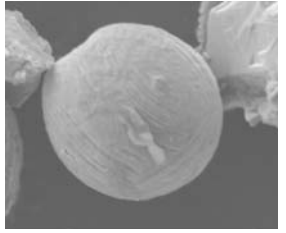
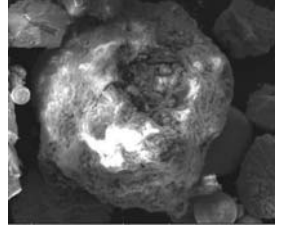
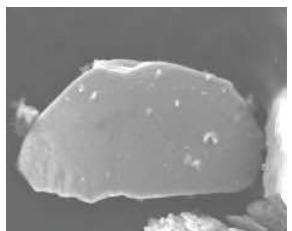
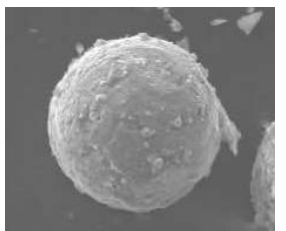
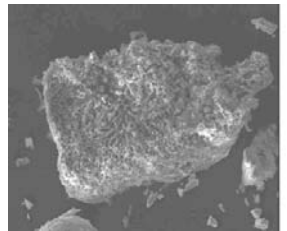
Abb. 33: Grenzwerte für das Element Nickel laut Kompostverordnung 2001 für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm, Proben der ersten Mess-Serie

5 Identifizierung, Eigenschaften und Mineralogie der magnetischen Fraktion

5.1 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie

Auf Grund ihrer Form bzw. Morphologie und ihren Elementgehalten konnten **bei allen** Probengruppen ähnliche charakteristische technogene Partikel der Eisen- und Stahlindustrie nachgewiesen werden. Es war hingegen nicht möglich mittels Rasterelektronenmikroskopie die einzelnen Probengruppen voneinander zu unterscheiden. Häufig vorkommende Partikel sind Zundermaterial, globulare Eisenoxidphasen, Schlacken- und Sinterprodukte. Die nachfolgenden REM-Aufnahmen und die zugehörigen Elementgehalte in Tabelle 9 veranschaulichen charakteristische Partikel für die Proben „Strukturmaterial“, „Klärschlamm“ und „Fertigkompost“.

Tab. 9: REM-Aufnahmen und Elementgehalte

	Zundermaterial	globulare Eisenoxid-Phasen	Schlacke- und Sinterpartikel																																					
Strukturmaterial																																								
	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Cr</th><th>Al</th><th>Si</th><th>Mg</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>26,6</td><td>1,7</td><td>1,0</td><td>4,2</td><td>4,7</td><td>62,7</td></tr> </table>	O	Cr	Al	Si	Mg	Fe	26,6	1,7	1,0	4,2	4,7	62,7	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Mg</th><th>P</th><th>Ca</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>31,8</td><td>3,0</td><td>0,6</td><td>3,5</td><td>61,1</td></tr> </table>	O	Mg	P	Ca	Fe	31,8	3,0	0,6	3,5	61,1	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Mg</th><th>Al</th><th>Si</th><th>P</th><th>Ca</th><th>Mn</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>11,0</td><td>0,7</td><td>1,6</td><td>2,9</td><td>0,9</td><td>8,0</td><td>7,3</td><td>67,6</td></tr> </table>	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe	11,0	0,7	1,6	2,9	0,9	8,0	7,3
O	Cr	Al	Si	Mg	Fe																																			
26,6	1,7	1,0	4,2	4,7	62,7																																			
O	Mg	P	Ca	Fe																																				
31,8	3,0	0,6	3,5	61,1																																				
O	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe																																	
11,0	0,7	1,6	2,9	0,9	8,0	7,3	67,6																																	
Klärschlamm																																								
	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Mg</th><th>Al</th><th>Ca</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>32,9</td><td>1,9</td><td>0,7</td><td>1,1</td><td>63,5</td></tr> </table>	O	Mg	Al	Ca	Fe	32,9	1,9	0,7	1,1	63,5	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Fe</th><th>Co</th></tr> <tr><td>33,4</td><td>65,7</td><td>0,9</td></tr> </table>	O	Fe	Co	33,4	65,7	0,9	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Mg</th><th>Al</th><th>Si</th><th>P</th><th>Ca</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>41,9</td><td>1,2</td><td>2,6</td><td>4,2</td><td>6,0</td><td>4,5</td><td>39,6</td></tr> </table>	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Fe	41,9	1,2	2,6	4,2	6,0	4,5	39,6							
O	Mg	Al	Ca	Fe																																				
32,9	1,9	0,7	1,1	63,5																																				
O	Fe	Co																																						
33,4	65,7	0,9																																						
O	Mg	Al	Si	P	Ca	Fe																																		
41,9	1,2	2,6	4,2	6,0	4,5	39,6																																		
Fertigkompost																																								
	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Fe</th><th>Cr</th></tr> <tr><td>22,32</td><td>77,3</td><td>0,4</td></tr> </table>	O	Fe	Cr	22,32	77,3	0,4	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Pb</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>21,9</td><td>2,03</td><td>76,03</td></tr> </table>	O	Pb	Fe	21,9	2,03	76,03	<table border="1"> <tr><th>O</th><th>Mg</th><th>Al</th><th>Si</th><th>P</th><th>Ca</th><th>Ti</th><th>Cr</th><th>Mn</th><th>Fe</th></tr> <tr><td>33,3</td><td>2,1</td><td>1,6</td><td>11,2</td><td>8,2</td><td>0,4</td><td>0,5</td><td>8,8</td><td>32,2</td><td></td></tr> </table>	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	33,3	2,1	1,6	11,2	8,2	0,4	0,5	8,8	32,2						
O	Fe	Cr																																						
22,32	77,3	0,4																																						
O	Pb	Fe																																						
21,9	2,03	76,03																																						
O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe																															
33,3	2,1	1,6	11,2	8,2	0,4	0,5	8,8	32,2																																

In allen untersuchten Partikeln wurden Eisen und Sauerstoff als Hauptelemente gefunden. Die plättchenförmig ausgebildeten Zunderpartikel und die globularen Eisenoxidphasen bestehen vor allem aus Eisen (etwa 60 – 78 Gewichtsprozent) und Sauerstoff. Häufig treten als Spurenelemente (Anteil von weniger als 2 Gewichtsprozent) Elemente wie Chrom, Blei, Kobalt, Mangan, Aluminium, Magnesium, Kalzium und Silizium auf. Zunder entsteht vor allem bei Hochtemperaturprozessen in der formgebenden Verarbeitung von Stahl, wie z.B. Schmieden oder Walzen (SCHOLGER, 1996).

Die globularen Körper aus Magnetit mit Eisenkern, Magnetitkugeln oder auch Hohlkörper entstehen als Verbrennungsfunken, wobei Temperaturen erzeugt werden müssen, die die Schmelzpunkte von FeO , Fe_3O_4 und Fe also 1440°C für Wüstit und 1520°C für Eisen mindestens erreichen. Die glühend, geschmolzen oder gar verdampfend in die Atmosphäre geschleuderten Schmelztröpfchen verfestigen sich während der Beschleunigung, im freien Fall sowie im gelegentlichen Auftreten von Drehimpulsen (SEELIGER et al., 1974).

Die Oberfläche der globularen Partikeln ist in vielen Fällen glatt ausgebildet, es konnten aber auch dendritische Oberflächenstrukturen beobachtet werden.

Kennzeichnend für die untersuchten Schlacke- und Sinterpartikel ist eine größere Vielfalt an Elementen.

Die Gangarten der Eisenerze, die Zuschläge und die Futter der Öfen sind als Stofflieferanten für Eisenhüttenfunken ebenso typisch, wie Karbonat- und Silikatinhalte, Eisensulfide u.s.w. für Kohlen in Kesselanlagen (SEELIGER et al. 1974).

Die Partikel enthalten als Nebenelemente neben Eisen und Sauerstoff oftmals Magnesium, Aluminium, Silizium, Phosphor (vor allem in den Schlacken) und Kalzium in unterschiedlichen Gewichtsprozenten. Der Eisengehalt ist meist deutlich niedriger, als bei Zundermaterial und globularen Eisenoxidphasen festgestellt wurde. Sie treten in Form von unregelmäßig geformten Massen auf, zeigen teilweise muschelig gebrochene Oberflächen oder sind durch eine porenreiche Struktur charakterisiert. Unter Sintern versteht man das Zusammenfiltern von pulverförmigen bis körnigen Rohmaterialien unter Hitzeeinwirkung durch oberflächliches Aufschmelzen des Gutes (z.B. Erz + Koks + Kalkzuschläge) (NEINAVAIE et al., 2000).

In Tabelle 10 sind die charakteristischen Merkmale der Partikel zusammengestellt.

Tab. 10: Chemische und morphologische Charakteristika der Partikel

	Zunderpartikel	Globulare Eisenoxidphasen	¹Schlacke- und ²Sinterprodukte
Hauptelemente	Fe, O	Fe, O	Fe, O
Nebenelemente (fallweise)	Mg, Ca, Mn	Ca, Mg	P, Ca, Si , Mg, Al; Mn
Spurenelemente (fallweise)	Cr, Mn, Co, Pb, Al, Si, Mg, Ca	Cr, Mn, Co, Pb, Al, Si, Mg, Ca	Ti, Cr, Mg, P
Durchmesser [µm]	1-200	0,1 - 200	10- > 500
Habitus	Plättchen mit glatter Oberfläche	Kugeln, häufig mit glatter tlw. mit dendritischer Oberfläche	⁽¹⁾ Unregelmäßige, tlw. porenreiche Klumpen ⁽²⁾ stängelige Partikel

Es handelte sich hierbei nicht um eine systematische Untersuchung, vielmehr sind einige charakteristische Fälle zur Demonstration ausgewählt worden. Trotz dieser Einschränkung veranschaulichen die Beispiele, aus welchen Partikeln sich die Proben typischerweise zusammensetzen.

5.2 Ergebnisse - Auflichtmikroskopie

Bei allen Proben wurden mit Hilfe optischer Untersuchung unter dem Auflichtmikroskop technogene Mineralphasen gefunden, die typisch für Hochtemperaturprozesse in der Eisen- und Stahlindustrie sind (vgl. NEINAVAIE, PIRKL & TRIMBACHER, 2000). Häufig vorkommende Mineralphasen sind Magnetit, Hämatit, Wüstit, Calciumferrite, metallisches Eisen und Cr/Ni-Legierungen (vgl. Kap.6, Tabelle 12).

Die Probengruppen „Strukturmaterial“, „Klärschlamm“ und „Fertigkompost“ konnten durch die Korngrößenverteilung und Umwandlungs- bzw. Verwitterungserscheinungen voneinander abgegrenzt werden. Diese Umwandlungserscheinungen wurden vor allem bei Partikeln in den Klärschlammproben unter gekreuzten Polarisationsfiltern als deutlich rote (meist randliche) Innenreflexe erkennbar, was Mineralumwandlungen zu Hämatit, oder Eisenhydroxide wie Lepidokrokit oder Limonit anzeigt.

Auf Grund der schwachen Lichtverhältnisse unter gekreuzten Polarisationsfiltern war eine photographische Dokumentation nicht möglich. Aber auch unter einfach polarisiertem Licht konnten an Magnetitpartikel vermehrt die Bildung von Hämatitlamellen beobachtet werden (vgl. Abb. 34).

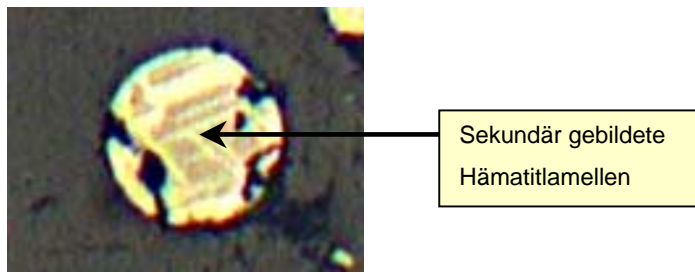


Abb. 34: Globulares Magnetitkorn mit sekundär gebildeten Hämatitlamellen aus der Probe Fertigkompost

Die magnetischen Partikel im Strukturmaterial waren im Vergleich zu den Klärschlamm-Proben kaum sichtbar von Umwandlungs- und Verwitterungserscheinungen betroffen.

Die Auszählung der globularen Phasen ergab, dass in der magnetischen Fraktion der untersuchten Proben „Strukturmaterial“ und „Klärschlamm“ jeweils ca. 25% globulare Partikel vorliegen. Im Fertigkompost wurde ein Anteil globularer Phasen von 20% beobachtet.

5.2.1 Ergebnisse der Korngrößenuntersuchung

Die magnetische Fraktion im **Strukturmaterial** wurde als sehr feinkörnig eingestuft. Von den vermessenen Partikeln liegen 75% in einem Korngrößenbereich unter 10 μm (vgl. Abb. 35 C). Aus der Korngrößenverteilung geht hervor, dass Partikel ab einem Durchmesser von 50 μm kaum mehr auftreten. Das größte im Strukturmaterial beobachtete Partikel hatte einen Durchmesser von 160 μm .

Die **Klärschlamm**-Proben zeichnen sich hingegen durch ein breites Korngrößenspektrum aus. Es treten Partikel mit einem Durchmesser von bis zu 500 μm auf (vgl. Abb. 35 B). Der Anteil an feinkörnigen Partikeln kleiner als 10 μm beträgt nur etwa 40%.

In Abbildung 35 (A) ist die Korngrößenverteilung für die magnetische Fraktion der Probe **Fertigkompost** zusammengefasst. Der Schwerpunkt der Korngrößen (72%) liegt im feinkörnigen Bereich unter 10 μm , ähnlich wie im Strukturmaterial, es wurden aber auch größere Partikel über 100 μm beobachtet, wie sie im Strukturmaterial kaum vorkommen.

Die Probe Fertigkompost lässt sich bezüglich der Korngrößenverteilung in der Mitte zwischen dem Strukturmaterial und dem Klärschlamm einstufen. Die Beobachtungen belegen, dass die Partikel der Probe Fertigkompost sowohl aus dem Strukturmaterial als auch aus dem Klärschlamm stammen.

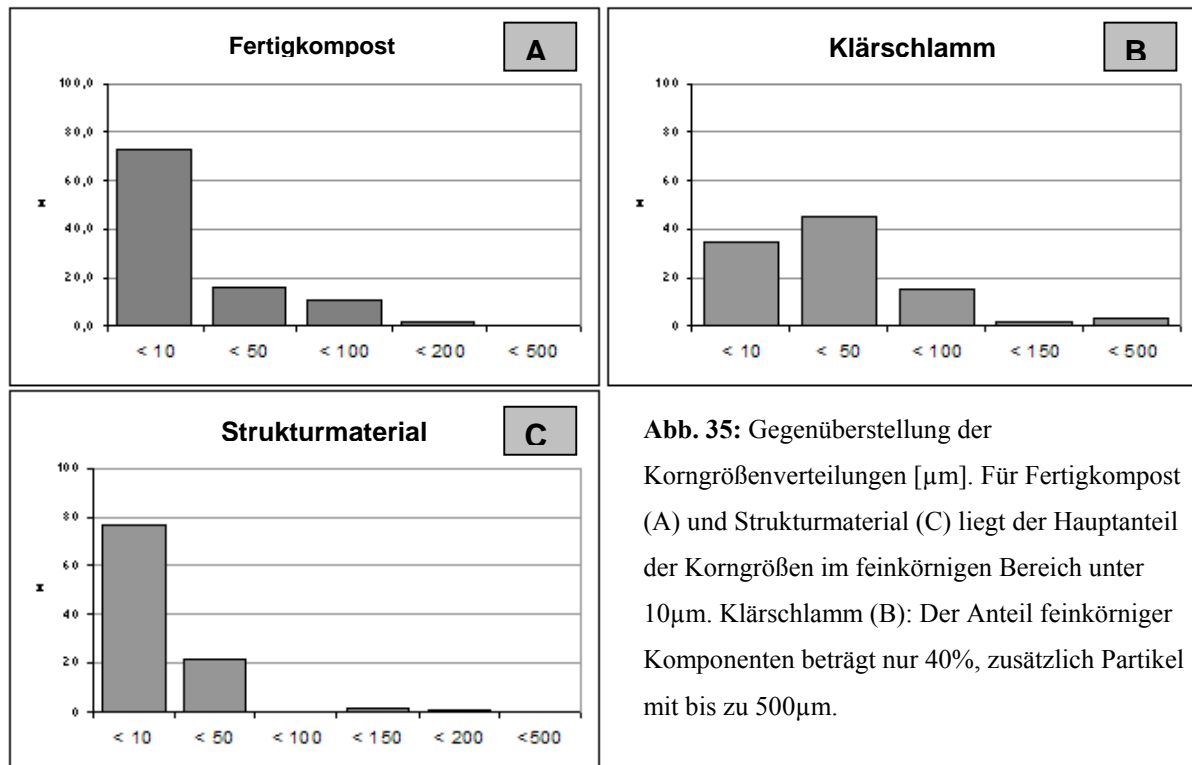


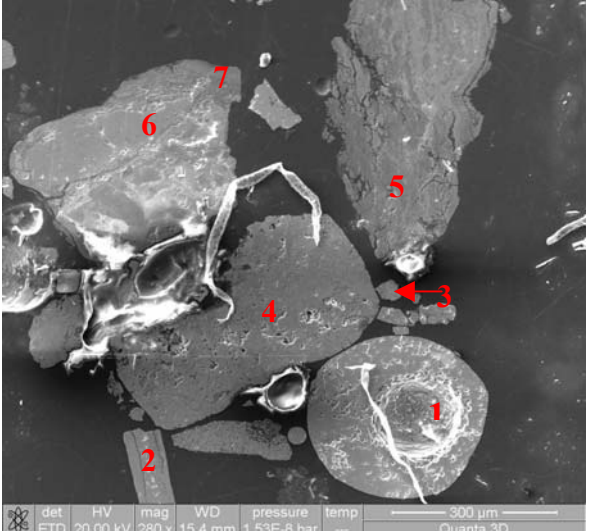
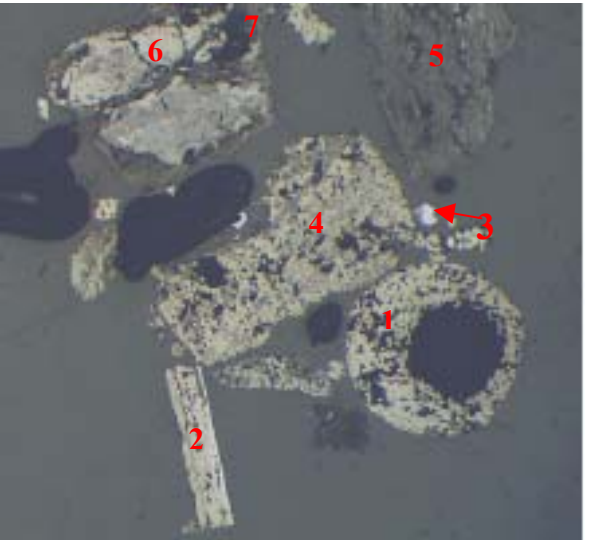
Abb. 35: Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen [μm]. Für Fertigkompost (A) und Strukturmaterial (C) liegt der Hauptanteil der Korngrößen im feinkörnigen Bereich unter 10μm. Klärschlamm (B): Der Anteil feinkörniger Komponenten beträgt nur 40%, zusätzlich Partikel mit bis zu 500μm.

5.3 Identifikation der magnetischen Phasen

In den nachstehenden Abbildungen 36 – 40 sind für Klärschlamm, Fertigkompost und Strukturmaterial einige Messergebnisse der Rasterelektromikroskopie, der Mikrosonde, ihre optischen Eigenschaften unter dem Auflichtmikroskop und die darausfolgende Identifikation der Phasen zusammengefasst.

Die über Rasterelektronenmikroskopie ermittelten Elementgehalte werden aufsummiert, jeweils auf 100 Prozent normiert und weichen teilweise von jenen der Mikrosonde ab. Den Ergebnissen der Mikrosonde wurde mehr Bedeutung beigemessen.

Die Rasterelektronenanalysen an den Anschliffpräparaten des Strukturmaterials wurden im Niedrigvakuum gemessen, was zur Folge hat, dass die ermittelten prozentuellen Anteile der detektierten Elemente verfälscht werden. Somit konnten nur quantitative Abschätzungen zu den bestimmten Elementen gemacht werden.

Klärschlamm KS 3005	Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie	Ergebnisse Mikrosonde	Identifikation der Phasen																																																																																																																																																										
	<table border="1"> <tr> <td>1:</td> <td>Fe</td> <td>O</td> <td>Mn</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>77,1</td> <td>22,2</td> <td>0,4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>Fe</td> <td>O</td> <td>Mn</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>76,2</td> <td>22,3</td> <td>1,6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>Fe</td> <td>O</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>97,5</td> <td>2,5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4:</td> <td>Fe</td> <td>O</td> <td>Mn</td> <td>Al</td> <td>Si</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>75,2</td> <td>22,6</td> <td>1,1</td> <td>0,3</td> <td>0,2</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5:</td> <td>Fe</td> <td>O</td> <td>P</td> <td>Ca</td> <td>Cl</td> <td>Mn</td> </tr> <tr> <td></td> <td>48</td> <td>30,8</td> <td>11,3</td> <td>5,6</td> <td>3,5</td> <td>0,9</td> </tr> </table>	1:	Fe	O	Mn					77,1	22,2	0,4				2:	Fe	O	Mn					76,2	22,3	1,6				3:	Fe	O						97,5	2,5					4:	Fe	O	Mn	Al	Si			75,2	22,6	1,1	0,3	0,2		5:	Fe	O	P	Ca	Cl	Mn		48	30,8	11,3	5,6	3,5	0,9	<table border="1"> <tr> <td>1:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>78,8</td> <td>0,0</td> <td>0,03</td> <td>0,45</td> <td>0,06</td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>99</td> <td>0,02</td> <td>0,03</td> <td>0,3</td> <td>0,06</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>3b:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>78,3</td> <td>0,0</td> <td>0,05</td> <td>1,0</td> <td>0,02</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>5:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>73,7</td> <td>0,0</td> <td>0,03</td> <td>0,3</td> <td>0,0</td> <td>0,38</td> </tr> <tr> <td>6:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>74,0</td> <td>0,02</td> <td>0,02</td> <td>0,1</td> <td>0,0</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td>7:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>48,1</td> <td>0,0</td> <td>0,01</td> <td>0,09</td> <td>0,0</td> <td>0,2</td> </tr> </table>	1:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		78,8	0,0	0,03	0,45	0,06	0,05	3:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		99	0,02	0,03	0,3	0,06	0,02	3b:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		78,3	0,0	0,05	1,0	0,02	0,0	5:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		73,7	0,0	0,03	0,3	0,0	0,38	6:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		74,0	0,02	0,02	0,1	0,0	0,02	7:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		48,1	0,0	0,01	0,09	0,0	0,2	<p>1: globularer Magnetit mit randlichen Hämatitlamellen Häufigkeit: ++</p> <p>2: tafelförmiger Magnetit mit Hämatitsaum Häufigkeit: ++</p> <p>3: metallisches Eisen verwachsen mit Magnetit Häufigkeit: +</p> <p>4: Magnetit mit Hämatit und teilweise dunkelgraue Phase: vermutlich Ca-Ferrit Häufigkeit: ++</p> <p>5: Mischoxid bestehend aus Magnetit, Hämatit, Eisenhydroxid und Einschlüsse von metallischem Eisen Häufigkeit: +</p> <p>6 + 7: Mischoxid aus Magnetit, Hämatit und Eisenhydroxid Häufigkeit: ++</p>
1:	Fe	O	Mn																																																																																																																																																										
	77,1	22,2	0,4																																																																																																																																																										
2:	Fe	O	Mn																																																																																																																																																										
	76,2	22,3	1,6																																																																																																																																																										
3:	Fe	O																																																																																																																																																											
	97,5	2,5																																																																																																																																																											
4:	Fe	O	Mn	Al	Si																																																																																																																																																								
	75,2	22,6	1,1	0,3	0,2																																																																																																																																																								
5:	Fe	O	P	Ca	Cl	Mn																																																																																																																																																							
	48	30,8	11,3	5,6	3,5	0,9																																																																																																																																																							
1:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	78,8	0,0	0,03	0,45	0,06	0,05																																																																																																																																																							
3:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	99	0,02	0,03	0,3	0,06	0,02																																																																																																																																																							
3b:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	78,3	0,0	0,05	1,0	0,02	0,0																																																																																																																																																							
5:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	73,7	0,0	0,03	0,3	0,0	0,38																																																																																																																																																							
6:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	74,0	0,02	0,02	0,1	0,0	0,02																																																																																																																																																							
7:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																																																																																																							
	48,1	0,0	0,01	0,09	0,0	0,2																																																																																																																																																							
	<p>Auflichtmikroskopie:</p> <p>1: 320 µm großes, hohlkugeliges Partikel, R~20, graue Farbe, isotrop, randliche feine Lamellen einer helleren Phase, R~30</p> <p>2: tafelige Kornform, R ~ 20, Farbe: graubraun, isotrop, Magnetit; linker Rand heller, R ~ 30, Farbe: grauweiß, rote Innenreflexe</p> <p>3: R > 60 weiß, geringe Polierhärte, verwachsen mit grauer Mineralphase: R ~ 30</p> <p>4: Gemenge aus verschiedenen Mineralphasen: graue Phasen mit R ~ 20, einigen Bereiche mit einer Mineralphase von R ~ 15, daneben Bereiche einer höher reflektierenden Phase mit dunkelroten Innenreflexen</p> <p>5: Gemenge aus verschiedenen Mineralphasen, dunkelrote und hellrote Innenreflexe, Auf Grund R und Farbe vermutlich Magnetit, Hämatit und Eisenhydroxidphasen mit hochreflektierenden Einschlüssen</p> <p>6 + 7: Mischoxid mit starken Verwitterungserscheinungen, hell- und dunkelrote Innenreflexe,</p> <p>Marke: 100µm</p>	<p>Abb. 36</p>																																																																																																																																																											

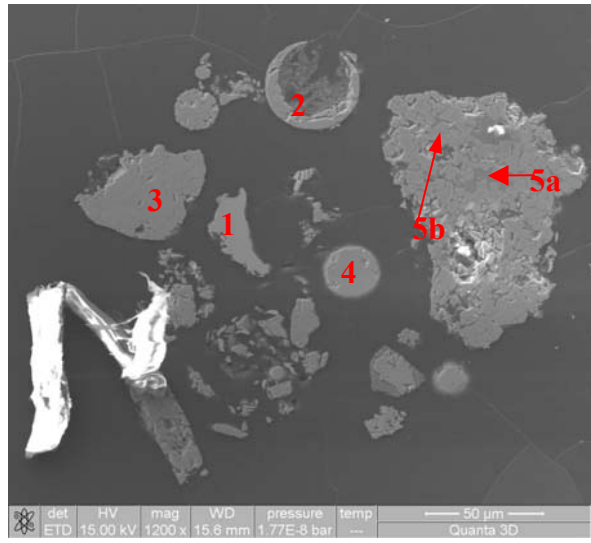
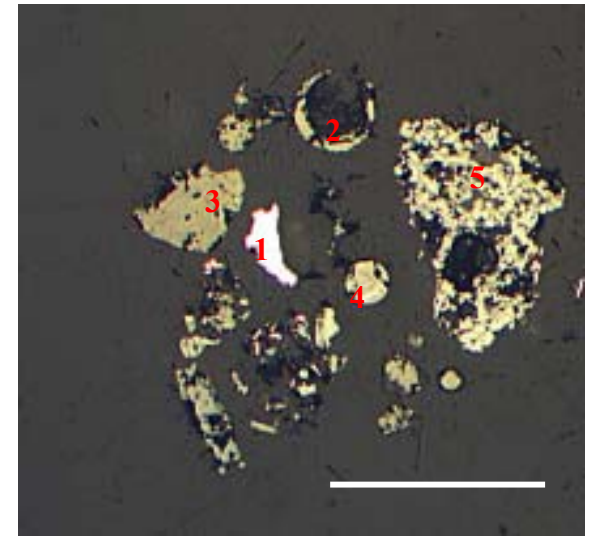
Fertigkompost FK1	Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie	Ergebnisse Mikrosonde	Identifikation der Phasen																																																																						
	<p>1: <table border="1" data-bbox="792 276 1290 343"> <tr><td>Fe</td><td>O</td><td>Cr</td><td>Ni</td><td>Si</td><td>Mn</td></tr> <tr><td>55,0</td><td>24,3</td><td>13</td><td>6,1</td><td>0,4</td><td>1,3</td></tr> </table></p> <p>2: <table border="1" data-bbox="792 351 1003 418"> <tr><td>Fe</td><td>O</td></tr> <tr><td>77,4</td><td>22,5</td></tr> </table></p> <p>3: <table border="1" data-bbox="792 426 1122 493"> <tr><td>Fe</td><td>O</td><td>Cr</td><td>Mn</td></tr> <tr><td>76,36</td><td>22,34</td><td>0,5</td><td>0,8</td></tr> </table></p> <p>5a: <table border="1" data-bbox="792 501 1279 568"> <tr><td>Fe</td><td>O</td><td>Ca</td><td>Si</td><td>Al</td><td>Mg</td><td>Si</td></tr> <tr><td>14,75</td><td>37,87</td><td>21,4</td><td>19</td><td>2,2</td><td>0,4</td><td>4,1</td></tr> </table></p> <p>5b: <table border="1" data-bbox="792 576 1122 643"> <tr><td>Fe</td><td>O</td><td>Ca</td><td>Mn</td></tr> <tr><td>76,39</td><td>22,3</td><td>0,32</td><td>1,0</td></tr> </table></p>	Fe	O	Cr	Ni	Si	Mn	55,0	24,3	13	6,1	0,4	1,3	Fe	O	77,4	22,5	Fe	O	Cr	Mn	76,36	22,34	0,5	0,8	Fe	O	Ca	Si	Al	Mg	Si	14,75	37,87	21,4	19	2,2	0,4	4,1	Fe	O	Ca	Mn	76,39	22,3	0,32	1,0	<p>3: <table border="1" data-bbox="1335 276 1744 343"> <tr><td>Fe</td><td>Ti</td><td>Cr</td><td>Mn</td><td>Ni</td><td>Mg</td></tr> <tr><td>73,8</td><td>0,0</td><td>0,35</td><td>0,42</td><td>0,02</td><td>0,0</td></tr> </table></p> <p>4: <table border="1" data-bbox="1335 351 1744 418"> <tr><td>Fe</td><td>Ti</td><td>Cr</td><td>Mn</td><td>Ni</td><td>Mg</td></tr> <tr><td>72,2</td><td>0,0</td><td>0,13</td><td>0,33</td><td>0,0</td><td>0,0</td></tr> </table></p>	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg	73,8	0,0	0,35	0,42	0,02	0,0	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg	72,2	0,0	0,13	0,33	0,0	0,0	<p>1: Cr-Ni-Legierung Häufigkeit: +</p> <p>2: globulare aufgebrochene und hohle Phase bestehend aus Magnetit Häufigkeit: ++</p> <p>3: tafeliger Magnetit Häufigkeit: ++</p>
Fe	O	Cr	Ni	Si	Mn																																																																				
55,0	24,3	13	6,1	0,4	1,3																																																																				
Fe	O																																																																								
77,4	22,5																																																																								
Fe	O	Cr	Mn																																																																						
76,36	22,34	0,5	0,8																																																																						
Fe	O	Ca	Si	Al	Mg	Si																																																																			
14,75	37,87	21,4	19	2,2	0,4	4,1																																																																			
Fe	O	Ca	Mn																																																																						
76,39	22,3	0,32	1,0																																																																						
Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																				
73,8	0,0	0,35	0,42	0,02	0,0																																																																				
Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																				
72,2	0,0	0,13	0,33	0,0	0,0																																																																				
	<p>Auflichtmikroskopie:</p> <p>1: R > 50, Farbe gelblich-weiß, keine Schleifspuren</p> <p>2: globulare Phase, angebrochen und hohlkugelig, Farbe. grau, R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe</p> <p>3: tafeliges Partikel, grauer Farbeindruck, R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe</p> <p>4: globulares Partikel, grauer Farbeindruck: R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe hellere Phase: grauweiß, R ~ 30, lamellenförmig gewachsen, rote Innenreflexe</p> <p>5: Partikel bestehend aus mehreren Phasen: 5a: (dunkel)grauer Farbeindruck, R ~ 15, leichte rote Innenreflexe; 5b. graubraun, R ~ 20, idiomorph ausgebildete Kristallstruktur; c: hellgraue Mineralphase mit R ~ 30; d: schwarze Matrix</p> <p>Marke: 100µm</p>		<p>4: Globulares Magnetitkorn mit Hämatitlamellen. Häufigkeit: +++</p> <p>5: Magnetit (hellbraun), Ca-Ferrit (grau) und Hämatit und Glasphase(schwarz) Häufigkeit: ++</p>																																																																						

Abb. 37

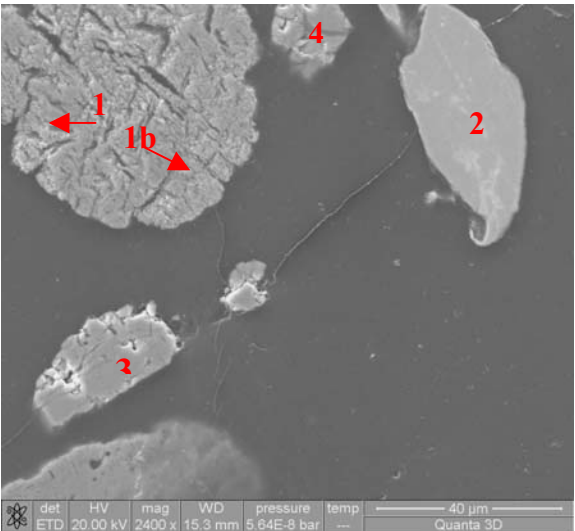
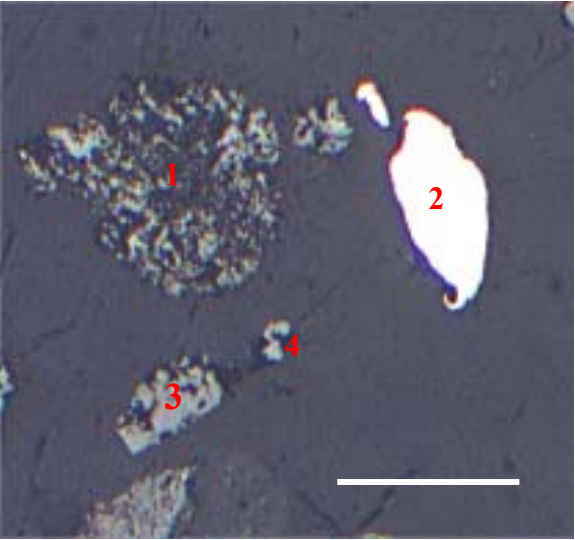
Klärschlamm KS 2006	Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie	Ergebnisse Mikrosonde	Identifikation der Phasen																																																																				
	<p>1a: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>O</th><th>Mn</th><th>Mg</th><th>Ca</th></tr> <tr><td>70,62</td><td>22,99</td><td>3,61</td><td>2,3</td><td>0,5</td></tr> </table></p> <p>1b: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>O</th><th>Mn</th><th>Mg</th><th>Ca</th></tr> <tr><td>69,63</td><td>23,18</td><td>3,8</td><td>3</td><td>0,4</td></tr> </table></p> <p>2: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>Cr</th><th>Ni</th><th>Mn</th><th>Si</th></tr> <tr><td>71,5</td><td>14,39</td><td>9,19</td><td>2,6</td><td>0,4</td></tr> </table></p> <p>3: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>O</th><th>Mn</th><th>Ca</th><th>Mg</th></tr> <tr><td>68,77</td><td>23,41</td><td>3,62</td><td>0,4</td><td>3,8</td></tr> </table></p> <p>4: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>O</th><th>Mn</th><th>Cr</th><th>Ca</th><th>Si</th><th>Al</th><th>Mg</th></tr> <tr><td>55,4</td><td>27,3</td><td>4,14</td><td>0,3</td><td>2,7</td><td>4,4</td><td>1</td><td>5</td></tr> </table></p>	Fe	O	Mn	Mg	Ca	70,62	22,99	3,61	2,3	0,5	Fe	O	Mn	Mg	Ca	69,63	23,18	3,8	3	0,4	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	71,5	14,39	9,19	2,6	0,4	Fe	O	Mn	Ca	Mg	68,77	23,41	3,62	0,4	3,8	Fe	O	Mn	Cr	Ca	Si	Al	Mg	55,4	27,3	4,14	0,3	2,7	4,4	1	5	<p>2: <table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Fe</th><th>Ti</th><th>Cr</th><th>Mn</th><th>Ni</th><th>Mg</th></tr> <tr><td>71,1</td><td>0,02</td><td>17,75</td><td>2,01</td><td>9,63</td><td>0,02</td></tr> </table></p>	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg	71,1	0,02	17,75	2,01	9,63	0,02	<p>1: Pseudomorphose von Hämatit nach Karbonat, vermutlich mit Umwandlungen zu Limonit Häufigkeit: +</p> <p>2: Cr-Ni-Stahllegierung Häufigkeit: +</p>
Fe	O	Mn	Mg	Ca																																																																			
70,62	22,99	3,61	2,3	0,5																																																																			
Fe	O	Mn	Mg	Ca																																																																			
69,63	23,18	3,8	3	0,4																																																																			
Fe	Cr	Ni	Mn	Si																																																																			
71,5	14,39	9,19	2,6	0,4																																																																			
Fe	O	Mn	Ca	Mg																																																																			
68,77	23,41	3,62	0,4	3,8																																																																			
Fe	O	Mn	Cr	Ca	Si	Al	Mg																																																																
55,4	27,3	4,14	0,3	2,7	4,4	1	5																																																																
Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																		
71,1	0,02	17,75	2,01	9,63	0,02																																																																		
	<p>Auflichtmikroskopie:</p> <p>1: R~20/30, grau-bläulicher Farbeindruck, rote und hellrote Innenreflexe, feinkörniges Gemenge</p> <p>2: R > 50, viele Schleifspuren – geringe Polierhärte, isotrop, keine Innenreflexe, weiß mit leichtem Gelbstich</p> <p>3: tafelige Kornform, R ~ 20, Farbe: graubraune, isotrop; linker Rand heller, R ~ 30, Farbe: grauweiß, rote Innenreflexe</p> <p>4: Partikel bestehend aus zwei unterscheidbaren Phasen: R ~ 20 und grauem Farbeindruck, daneben eine etwas hellere Phase mit auffallend roten Innenreflexen</p> <p>Marke: 50µm</p>	<p>3: Hämatit und Magnetit Häufigkeit: ++</p> <p>4: Mischoxid Häufigkeit: +</p>																																																																					

Abb. 38

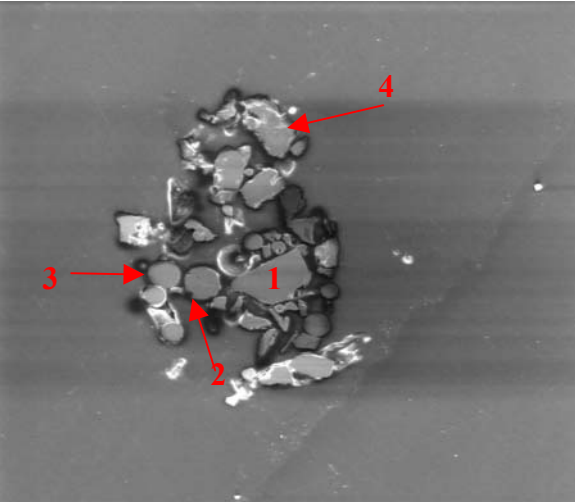
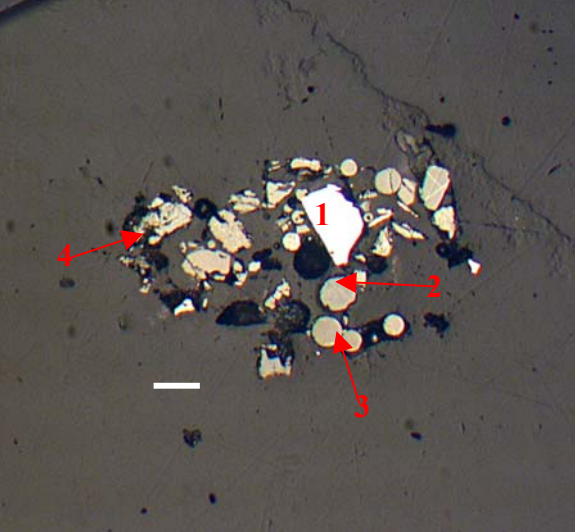
Strukturmaterial R1	Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie	Ergebnisse Mikrosonde	Identifikation der Phasen																																																																																
 <p>det HV mag WD pressure temp 100 µm LFD 12.50 kV 1000 x 18.7 mm 6.00E-4 bar --- Quanta 3D</p>	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>Fe</td> <td>Co</td> <td>Ni</td> <td>Ti</td> <td>Al</td> </tr> <tr> <td></td> <td>+++</td> <td>++</td> <td>++</td> <td>+</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Fe</td> <td>Ca</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>+++</td> <td>++</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	1	Fe	Co	Ni	Ti	Al		+++	++	++	+	+	2	Fe	Ca					+++	++				<table border="1"> <tr> <td>1:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>40</td> <td>4,47</td> <td>0</td> <td>0,15</td> <td>13,86</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>55,4</td> <td>0,01</td> <td>0,02</td> <td>0,2</td> <td>0,0</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>75,1</td> <td>0</td> <td>0,03</td> <td>0,04</td> <td>0</td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>4:</td> <td>Fe</td> <td>Ti</td> <td>Cr</td> <td>Mn</td> <td>Ni</td> <td>Mg</td> </tr> <tr> <td></td> <td>70,4</td> <td>0,02</td> <td>0,01</td> <td>0,8</td> <td>0</td> <td>01,4</td> </tr> </table>	1:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		40	4,47	0	0,15	13,86	0,2	2:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		55,4	0,01	0,02	0,2	0,0	0,03	3:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		75,1	0	0,03	0,04	0	0,05	4:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg		70,4	0,02	0,01	0,8	0	01,4	<p>1: Ni-Legierung Häufigkeit: +</p> <p>2: weniger als 10µm große, globulare vermutlich vollkugelige Phase bestehend aus Ca-Ferrit Häufigkeit: +</p>
1	Fe	Co	Ni	Ti	Al																																																																														
	+++	++	++	+	+																																																																														
2	Fe	Ca																																																																																	
	+++	++																																																																																	
1:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																													
	40	4,47	0	0,15	13,86	0,2																																																																													
2:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																													
	55,4	0,01	0,02	0,2	0,0	0,03																																																																													
3:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																													
	75,1	0	0,03	0,04	0	0,05																																																																													
4:	Fe	Ti	Cr	Mn	Ni	Mg																																																																													
	70,4	0,02	0,01	0,8	0	01,4																																																																													
 <p>Marke: 10µm</p>	<p>Auflichtmikroskopie:</p> <p>1: R > 60, Farbe weiß, keine Schleifspuren, keine Innenreflexe</p> <p>2: globulare Phase, Grau, R ~ 15, keine Innenreflexe erkennbar</p> <p>3: globulares Partikel, grauebraune Phase: R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe erkennbar, randlicher Hämatitsaum</p> <p>4: tafeliges Partikel, grauer Farbeindruck, R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe</p>		<p>3: weniger als 10µm große, globulare Phase aus Magnetit mit Hämatitsaum Häufigkeit: +++</p> <p>4: tafelförmiges Partikel, vermutlich Magnetit Häufigkeit: +++</p>																																																																																

Abb. 39

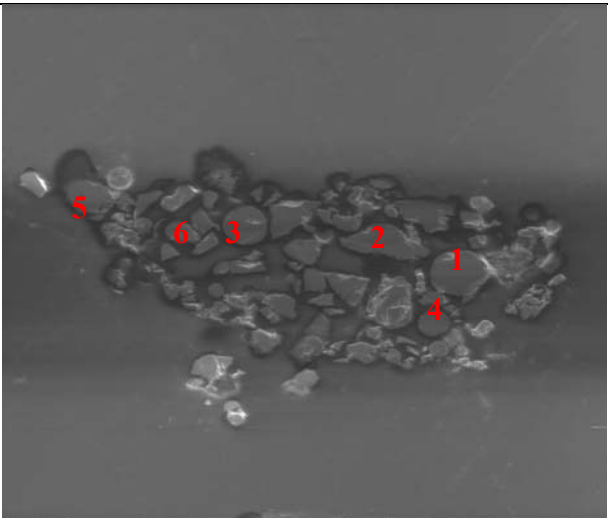
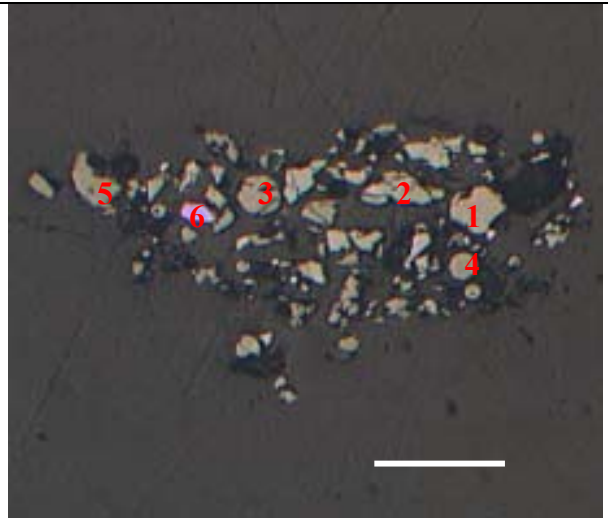
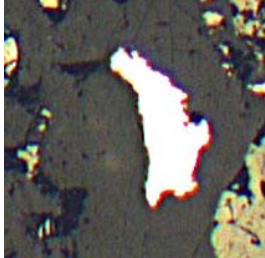
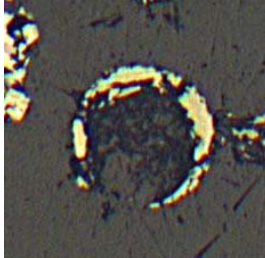

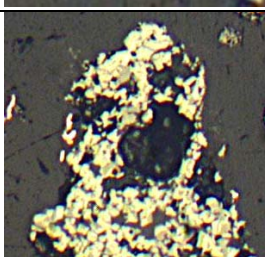
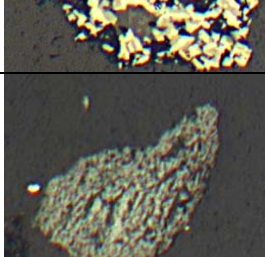
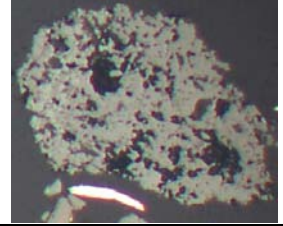
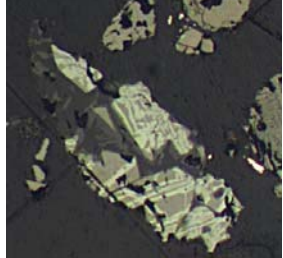
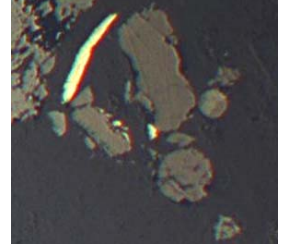
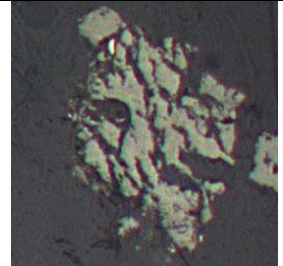
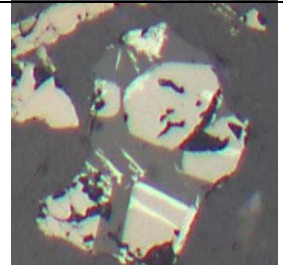
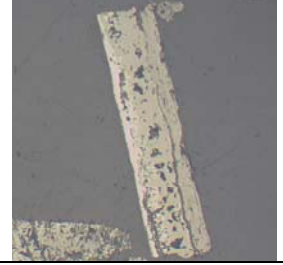
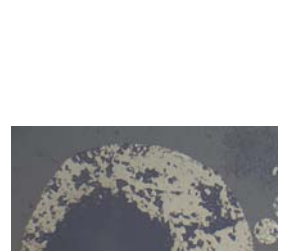
Strukturmaterial R1	Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie	Ergebnisse Mikrosonde	Identifikation der Phase
 <p>det HV mag WD pressure temp LFD 12.50 kV 1300 x 16.8 mm 8.00E-4 bar --</p> <p>50 µm Quanta 3D</p>	<p>1: Fe ++++</p> <p>2: Fe Mn Mg Ca ++++ + + +</p> <p>3: Fe ++++</p> <p>4: Fe ++++</p> <p>5: Fe Mg +++ +</p>	<p>1: Fe Ti Cr Mn Ni Mg 75,3 0,02 0,25 0,92 0,55 0,08</p> <p>3: Fe Ti Cr Mn Ni Mg 75,1 0,0 0,05 0,9 0,02 0,0</p> <p>6: Fe Ti Cr Mn Ni Mg 68,5 0,02 0,7 0,6 1,68 0,37</p>	<p>1: globularer Magnetit Häufigkeit: +++</p> <p>2: tafelförmiges Partikel bestehend aus Magnetit Häufigkeit: +++</p> <p>3, 4: globulare Phase aus Magnetit Häufigkeit: +++</p>
 <p>50 µm</p>	<p>Auflichtmikroskopie:</p> <p>1: globulare Phase, bräunliches Grau, R ~ 20, keine Innenreflexe erkennbar</p> <p>2: tafelförmiges Partikel, bräunliches Grau, R ~ 20 keine Innenreflexe,</p> <p>3, 4: globulare Partikel, graubraune Phase: R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe erkennbar</p> <p>5: tafeliges Partikel, grauer Farbeindruck, R ~ 20, isotrop, keine Innenreflexe</p> <p>6: tafelförmiges Partikel, R > 60, keine Innenreflexe</p> <p>Marke: 50µm</p>	<p>5: tafelförmiges Partikel bestehend aus Magnetit/Wüstit Häufigkeit: +++</p> <p>6: Ni, Cr Stahllegierung Häufigkeit: +</p>	

Abb. 40

Auf Grund ihrer Morphologie, chemischen Zusammensetzung und optischen Eigenschaften wurde eine Identifikation der technogenen Partikel vorgenommen. Bemerkenswerterweise konnte unter den Partikeln der untersuchten Proben keine einzige Phase **geogenen** Ursprungs nachgewiesen werden. In der nachstehenden Tabelle 11 sind exemplarisch einige Partikel aus dem Fertigkompost, Klärschlamm und Strukturmaterial zusammengestellt.

Tab.11: Anschliffbilder einzelner technogener Phasen und ihre Identifikation

Fertigkompost	Identifikation
	Cr-Ni-Stahllegierung
	Globulares Partikel aus Magnetit mit Luftblase, (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 12)
	Globulares Partikel bestehend aus Magnetit mit Hämatitlamellen; (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 1.11.3)
	Eisenhüttenschlacke bestehend aus Magnetit, Calciumferrit und Hämatit; (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, Abb. 1.11.16)
	Röstgut, Pseudomorphosen von RO-Mischphasen (=technogene Mischoxide von zweiwertigen Metallen) nach Karbonat; (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, Abb. 1.1.3; Abb. 1.1.2)

	<p>Schlacke aus Ca-Ferrit-Mischkristallen mit Silikaten (schwarze Einschlüsse) und RO-Phase Abb. A12 (vgl. NEINAVAIE & PIRKL, 1996)</p> <p>leistenförmiges metallisches Eisen (weiß) (vgl. PIRKL & NEINAVAIE 2002, Abb. 1.3.5)</p>
	<p>Schlackenstück bestehend aus Ca-Ferrit-Mischphasen, RO-Phasen und silikatischer Matrix (schwarz); (vgl. NEINAVAIE, PIRKL & TRIMBACHER, 2000, Abb. 40)</p>
	<p>Tafelförmiges Zundermaterial aus Magnetit (vgl. Pirkl und Neinavaie, 2002, Abb. 1.9.11); leistenförmiges metallisches Eisen (weiß) (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 1.3.5); Globulare Magnetit/Wüstitpartikel (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 1.11.9)</p>
	<p>Röstgut, Pseudomorphosen von RO-Mischphasen (=technogene Mischoxide von zweiwertigen Metallen) nach Karbonat (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002; Abb. 1.1.3: Abb. 1.1.2)</p>
	<p>Partikel aus der Sinteranlage bestehend aus Ca-Ferrit (grau), Magnetit (braunlich grau) und Hämatit (hellgrau) (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 13)</p> <p>Oben links leistenförmiges Zundermaterial aus Magnetit und Wüstit (vgl. PIRKL & NEINAVAIE,, Abb. 1.9.11)</p>
<p>Klärschlamm</p>	<p>Identifikation</p>
	<p>tafelförmiges Zundermaterial bestehend aus Magnetit und Hämatit</p>
	<p>Globulares Partikel aus Magnetit mit Luftblase (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 12)</p>

	<p>Röstgut, Pseudomorphose nach Karbonat, bestehend aus Hämatit (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb 1.2.3)</p>
<p>Strukturmaterial</p>	<p>Identifikation</p>
	<p>Cr-Ni-Stahllegierung</p>
	<p>Globulare Partikel aus dem Hochofen, Gichtstaub, bestehend aus Magnetit und Calciumferrit (oben) (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 13)</p>
	<p>Tafelförmige Zunderpartikel bestehend aus Magnetit/Wüstit und Hämatit (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002,, Abb. 1.4.3)</p>
	<p>Globulare Partikel aus dem Hochofen (Gichtstaub) Leistenförmiges Zundermaterial</p>
 <p style="text-align: right; font-size: small;">50 µm</p>	<p>Stahlwerksschlacke bestehend aus Ca-Ferrit, Silikatischer Matrix (Schwarz) und RO-Phase (=technogene Mischoxide von zweiwertigen Metallen); (vgl. NEINAVAIE, PIRKL & TRIMBACHER, 2000, Abb. 17)</p>
 <p style="text-align: right; font-size: small;">50 µm</p>	<p>Stahlwerksschlacke bestehend aus Ca-Ferrit, Silikatischer Matrix (Schwarz) und RO-Phase (vgl. NEINAVAIE, PIRKL & TRIMBACHER, 2000, Abb. 17) globulare Partikel aus dem Hochofen, Gichtstaub (vgl. PIRKL & NEINAVAIE, 2002, Abb. 13)</p>

5.4 Ergebnisse Focused Ion Beam

Die Untersuchung der Innenstruktur an Stichproben von globularen Partikeln zeigte voll- oder hohlkugeligen Aufbau, oder Strukturen mit exzentrischer Luftblase. Die chemische Zusammensetzung wurde mit REM bestimmt. Häufig wiesen die Elementenspektren einen zur Mitte zunehmenden Eisengehalt auf, teilweise wurde ein Eisenkern detektiert. Die Oberfläche der Partikel war meist glatt ausgebildet, teilweise zeigte sie unregelmäßige oder dendritische Beschaffenheit. Im Vergleich zwischen den einzelnen Probengruppen konnte hinsichtlich der globularen Phasen keine Unterscheidung getroffen werden. Für die Entstehung von globularen Partikeln sind verschiedene Bildungsumstände möglich. SEELIGER (1974) erkannte verschiedene Bildungsbedingungen und Typen von Verbrennungsfunken magnetischer Flugkörperchen. Anhand dieser Beobachtungen wurde eine Zuordnung der mittels FIB angeschnittenen globularen Partikel vorgenommen werden. Eine eindeutige Einteilung war jedoch nicht für alle bearbeiteten Partikel möglich.

a.) Reibungsfunken:

Ein Beispiel für Flugkörper des Eisens als Reibungsfunken stellt der Abrieb an Schleifsteinen dar. Die Funken bestehen hier mit Übergewicht aus glühendem Kaltabrieb (Schleifspäne). An mechanisch besonders stark beanspruchten Stellen von Schleifspänen können sich als Reaktionsprodukt Magnetittröpfchen bilden. Die Reibungswärme reicht aber nur im Extremfall zum Schmelzen von Eisen aus. Durch den Rückstoßeffect beim maschinellen Fortschleudern wird eine exzentrische Lagerung des Eisenkerns in der Magnetithülle erreicht. Teilweise werden ovale Deformationen durch Ausbildung einer durch den Kern verlaufenden Streckungsachse beobachtet (SEELIGER, et al. 1974).

Dem Typus „Reibungsfunken“ konnten unter den analysierten Stichproben keine kennzeichnenden Partikel zugeordnet werden.

b.) Funken beim autogenen Schweißen

Beim Verblasen des flüssigen Eisens oder bei Explosion durch Verdampfung sind auch hier die Flugimpulse sehr groß. Die Erstarrung erfolgt oft schon sehr früh in der Beschleunigungsphase, und deshalb unterscheiden sich diese Gebilde von den Reibungsfunken am Schleifstein kaum. Neben Magnetit mit exzentrischer Lage des Eisens findet man häufig ballonartige Hohlformen vor. (Ganz analoge Gebilde wurden in Gießereistaub beobachtet.) Da Luftsauerstoff in die Reaktion eingeht, ist es kein Wunder,

dass nach Entzug des Sauerstoffanteiles Restgase von den Reaktionsprodukten eingeschlossen werden und sich nach den Gasgesetzen ausdehnen. Bei Verwendung von Flussmittel, hauptsächlich von Calciumsilikat, kann dieses in Mengen von 5 – 20% mit in den Flugkörper gelangen. Bei mehrphasigen Flugkörpern tritt mit zunehmender Größe und zunehmendem Beschleunigungsflug ein Phasentrennung unterschiedlich dichter Teile im Körper ein. Dem Typus der Schweißfunken entsprechen viele Funken der Eisen und Stahl erzeugenden und verarbeitenden Industrie (SEELIGER, et al. 1974).

Ein hohlkugeliges Magnetit aus dem Strauchschnitt mit **ballonartiger Hohlform**, typisch für eine Bildung während dem Schweißen durch eine Reaktion mit Luftsauerstoff, ist in Abbildung 41 erkennbar. Das Partikel misst etwa 20 µm und zeigt eine glatte Oberflächenbeschaffenheit. Ein weiteres Beispiel für den Typus „Schweißfunken“ ist in Abbildung 42 dargestellt. Der globulare Magnetitkörper mit glatter Oberflächenstruktur, einer Größe von 10 µm und **exzentrisch gelagerter Luftblase** stammt aus dem Strukturmaterial.

Dem selben Bildungsmechanismus wurde das in Abbildung 43 dargestellte globulare Partikel aus dem Klärschlamm zugeordnet. Es zeigt porösen Innenbau mit **exzentrisch gelagerter Luftblase**. Das Elementenspektrum wurde an 4 Positionen (MP 1 bis 4) gemessen wobei der Eisengehalt von Außen nach Innen zunimmt und demnach durch einen zonierten Aufbau bestimmt ist. Für die hier gezeigte Eisenoxid-Phase wurde in Spektrum 1 Eisen mit etwa 67 Gewichtsprozent registriert, und in Spektrum 4 bereits ein Eisengehalt von 92 Gewichtsprozent festgestellt. Der Restgehalt bestand jeweils aus Sauerstoff.

Die in Abbildung 44 gezeigte etwa 30µm große globulare Phase mit einem aus der Probe „Aufgesetzte Miete“ konnte nicht zugeordnet werden. Der porös ausgebildeten Eisenkern lässt eine ähnliche Herkunft vermuten. Eine im gewählten Ausschnitt nicht sichtbare gewordene exzentrische Luftblase wäre möglich. Gleichsam wie bei dem in Abb. 43 aufgenommenen Partikel nimmt der Eisengehalt von Außen nach Innen zu. Für Spektrum 1 wurde 68% Eisen gemessen, Spektrum 2 ergab 76% und Spektrum 3 98% Eisen.

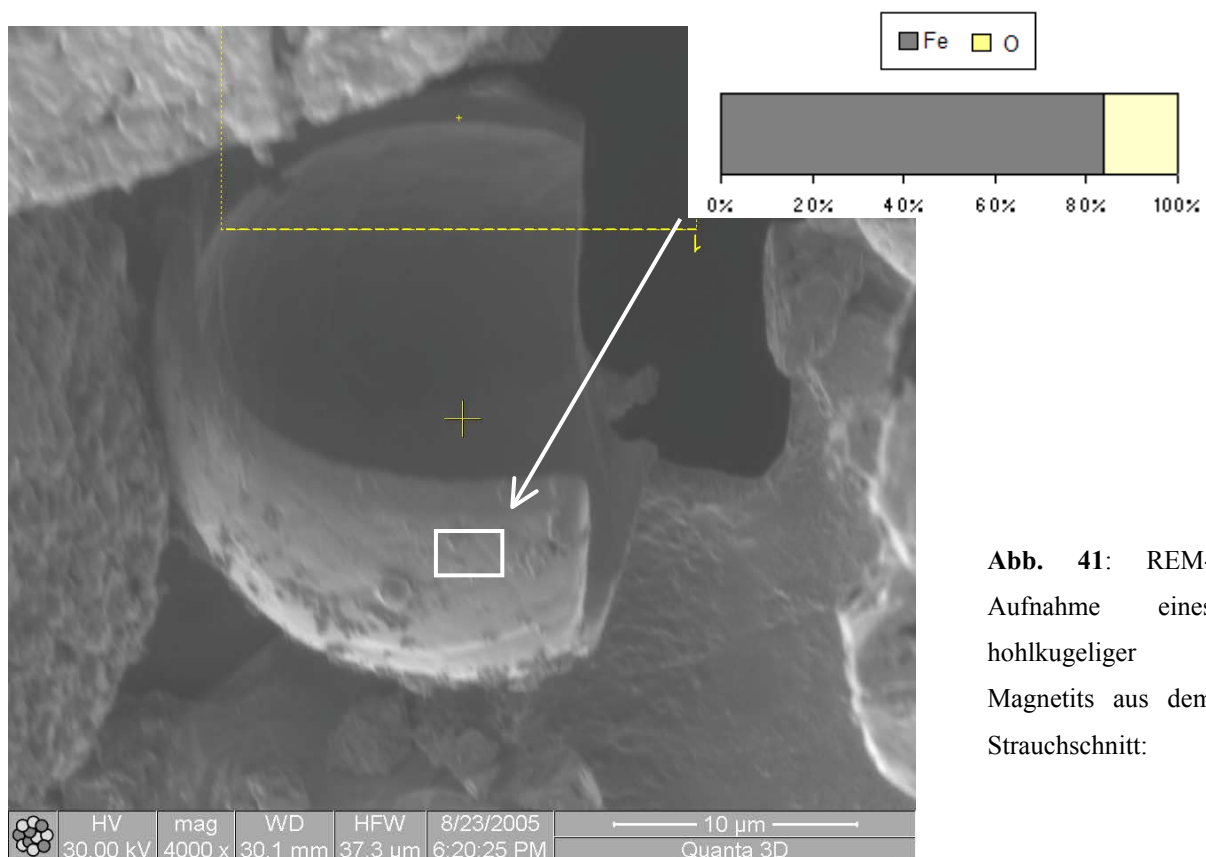


Abb. 41: REM-Aufnahme eines hohlkugeliges Magnetits aus dem Strauchschnitt:

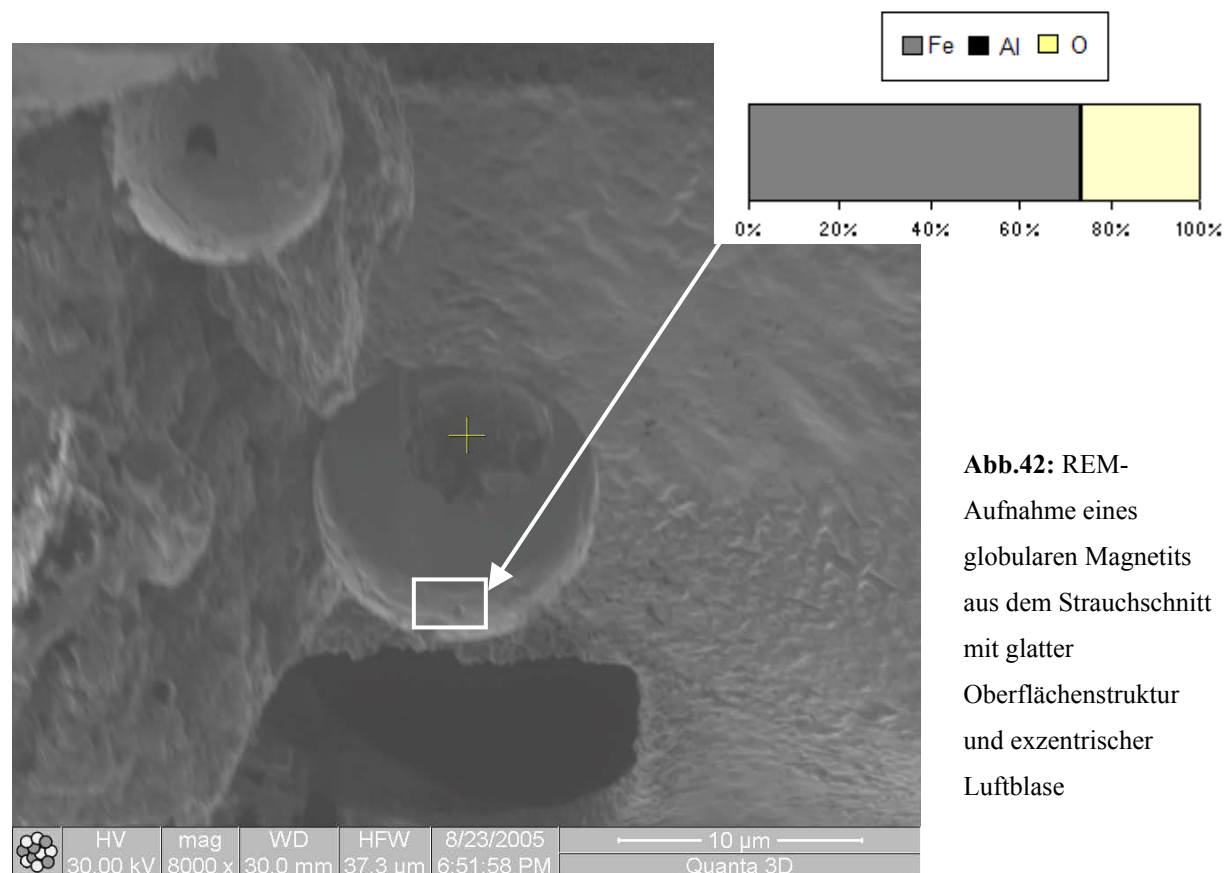


Abb.42: REM-Aufnahme eines globularen Magnetits aus dem Strauchschnitt mit glatter Oberflächenstruktur und exzentrischer Luftblase

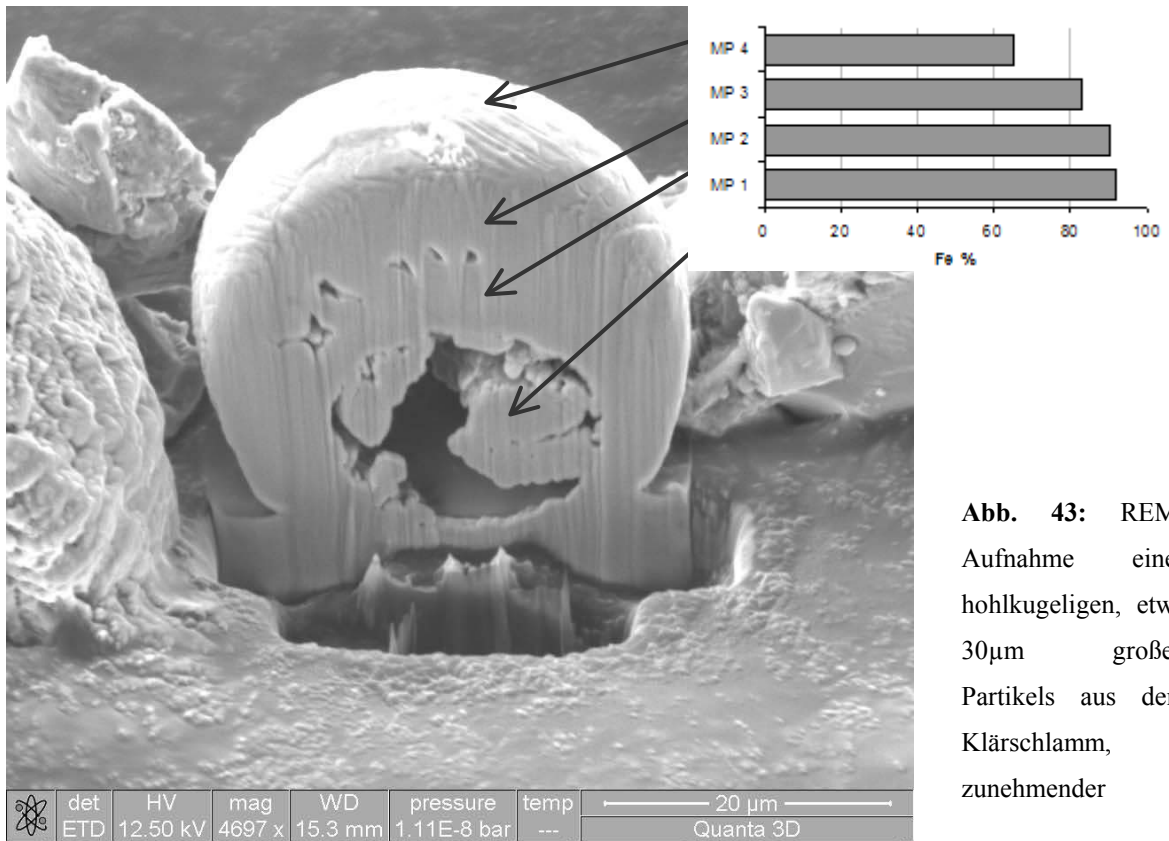


Abb. 43: REM-Aufnahme eines hohlkugeligen, etwa 30µm großen Partikels aus dem Klärschlamm, zunehmender

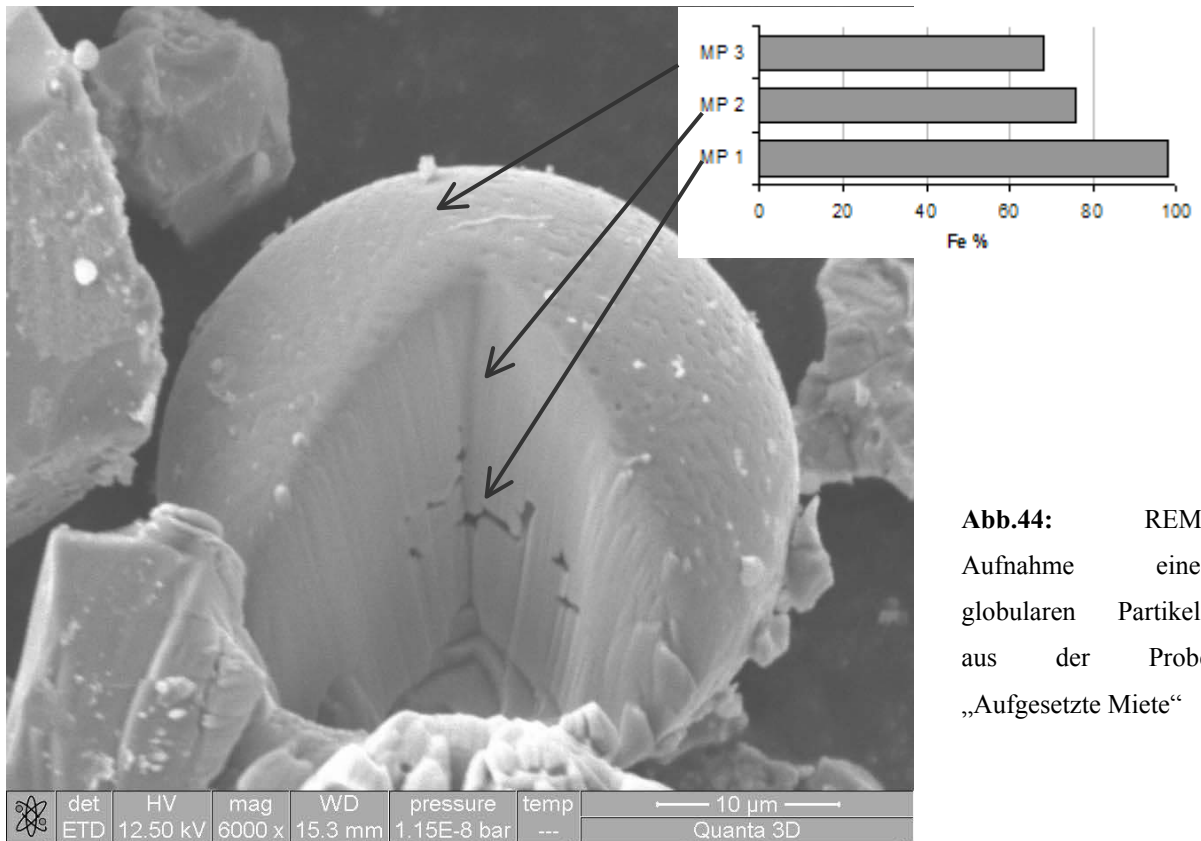


Abb.44: REM-Aufnahme eines globularen Partikels aus der Probe „Aufgesetzte Miete“

c.) Flugfunken von Kessel- und Verbrennungsanlagen

Flugfunken aus Kessel oder Verbrennungsanlagen unterscheiden sich von anderen dadurch, dass sie hauptsächlich im Warmluftauftrieb von Schornsteinen, also nicht in der Beschleunigungsphase, sondern in der Schwerelosigkeit dieses Auftriebs entstanden sind. Eine relativ lange Temperung noch vor der Erstarrung bzw. Kristallisation führt unter den Redoxbedingungen des Heißluftstromes dazu, dass Körper mit exzentrischem Eisenkern fast oder gänzlich fehlen. Das Stoffangebot ist sehr unterschiedlich und die Strukturen sind abhängig von der physikalisch-chemisch vorgegebenen Phasenzahl im jeweiligen System. Dendritische Strukturen sind hier charakteristisch.

Nach der Entstehung der Körperchen tritt zunächst Klassierung derselben ein, in dem im Warmluftstrom von Hochöfen und Schornsteinen eine genügend leichte und also meist kleine Korngröße in die unteren Wolkenschichten getragen werden. Mit diesen werden sie so lange und so weit transportiert, bis sie, nach Auflösung der Wolken durch Verdunstung oder nach Abregnen oder Abschneien auf die Erde zurückfallen. Weitere Dispergierung tritt mit dem Wind ein. Auf der Erde erfolgt ihre Zerstörung im allgemeinen sehr schnell – sie verrosten zu FeOOH (SEELIGER, et al. 1974).

Folgende Partikel wurden dem Typus „Kessel- und Verbrennungsanlage“ zugeordnet:

Abbildung 45 zeigt einen Schnitt durch ein vollkugeliges Partikel aus der Probe „Aufgesetzte Miete“ mit **feindendritischer Oberflächenstruktur**. Wieder nimmt der Eisengehalt in Richtung Kern zu. Neben Eisen als Hauptbestandteil wurden die Elemente Kalzium und Sauerstoff detektiert.

In Abbildung 46 ist ein Schnitt durch einen **vollkugeligen** und bleihältigen Magnetit aus dem Fertigungskompost mit unregelmäßiger Oberfläche und anhaftenden Mikropartikeln. Der Korndurchmesser beträgt etwa 50µm.

Abbildung 47 zeigt die Aufnahme eines Magnetits aus dem Siebüberlauf mit **dendritischer Oberflächenstruktur**. Das Korn ist nur randlich angeschnitten, vermutlich ist es aber genauso vollkugelig wie jenes Partikel, das in Abbildung 43 dargestellt ist. Neben Eisen weist das Elementenspektrum Mangan, Chrom, Kalzium, Silizium, Aluminium und Magnesium auf.

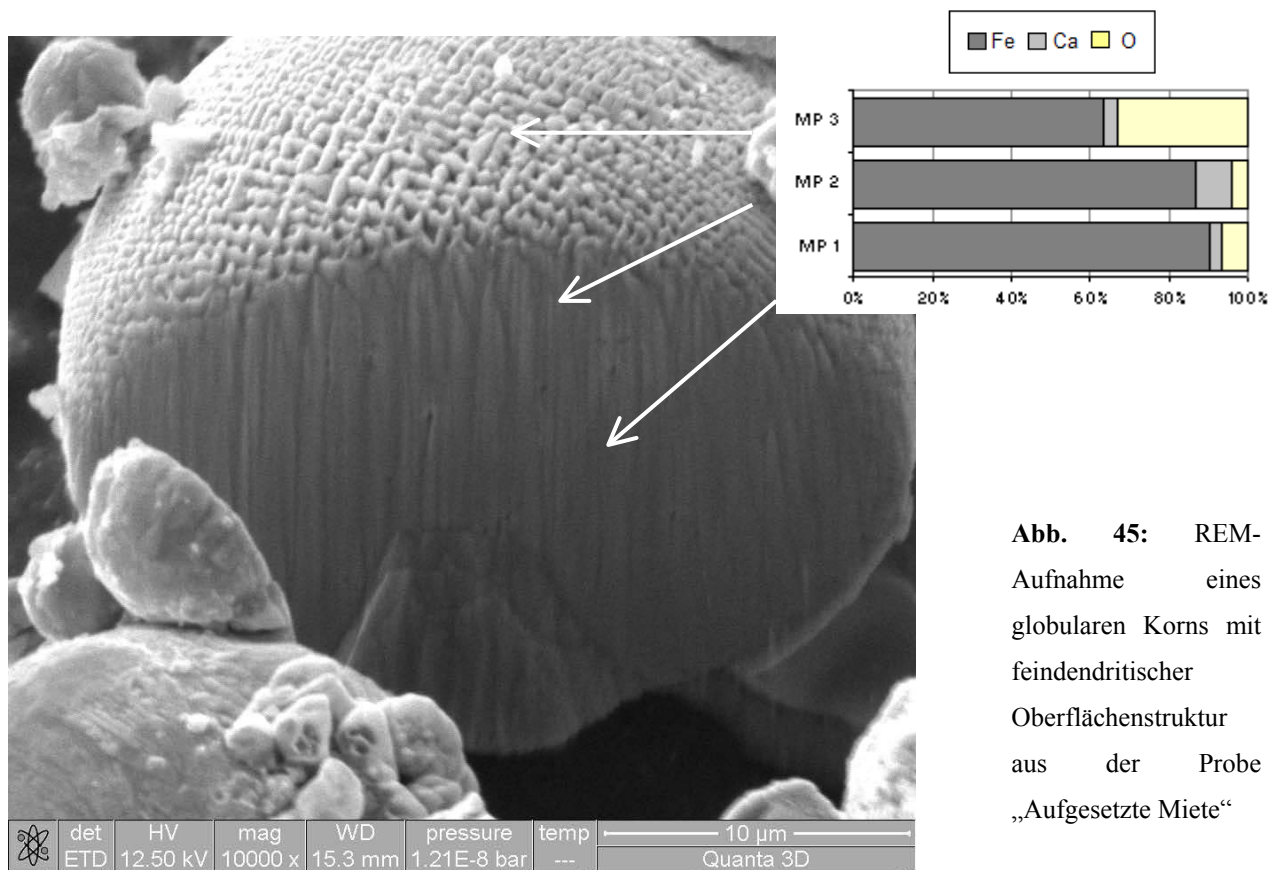


Abb. 45: REM-Aufnahme eines globularen Korns mit feindendritischer Oberflächenstruktur aus der Probe „Aufgesetzte Miete“

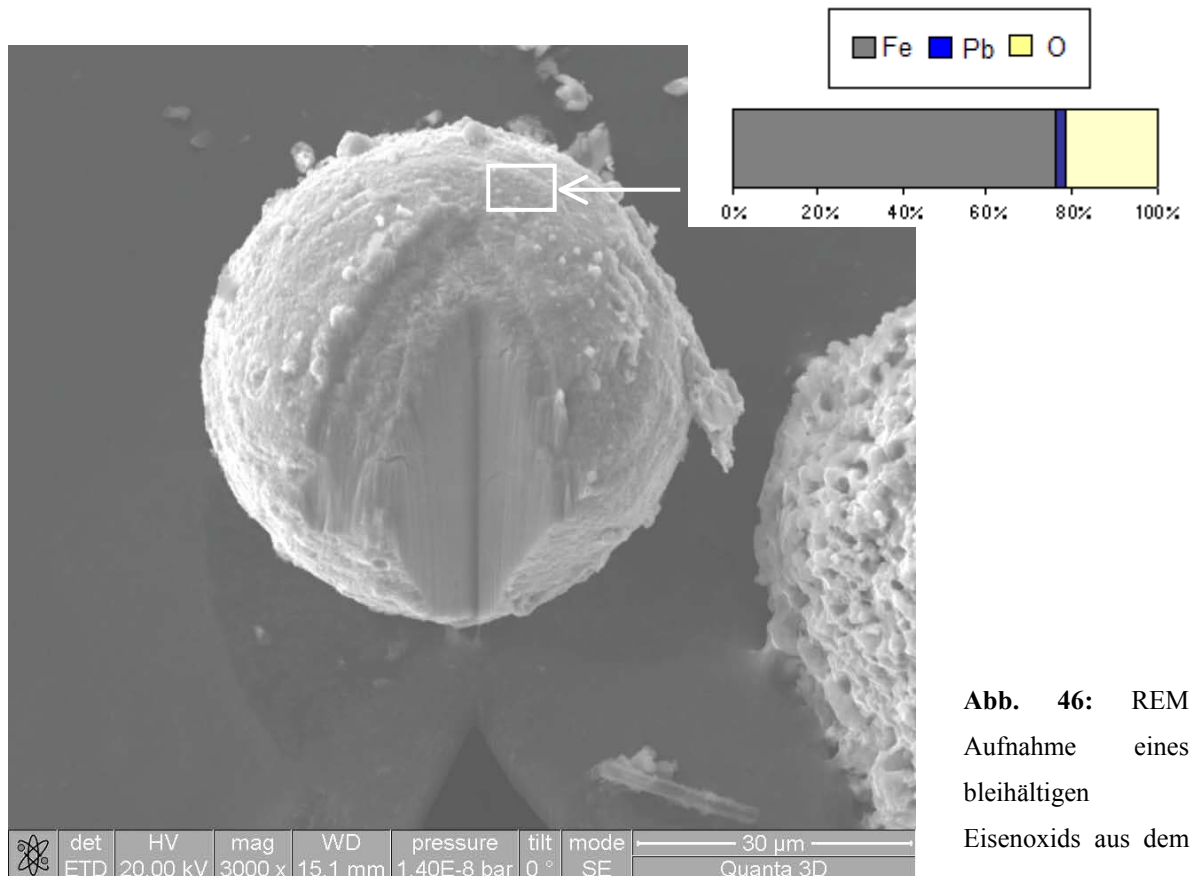


Abb. 46: REM Aufnahme eines bleihaltigen Eisenoxids aus dem

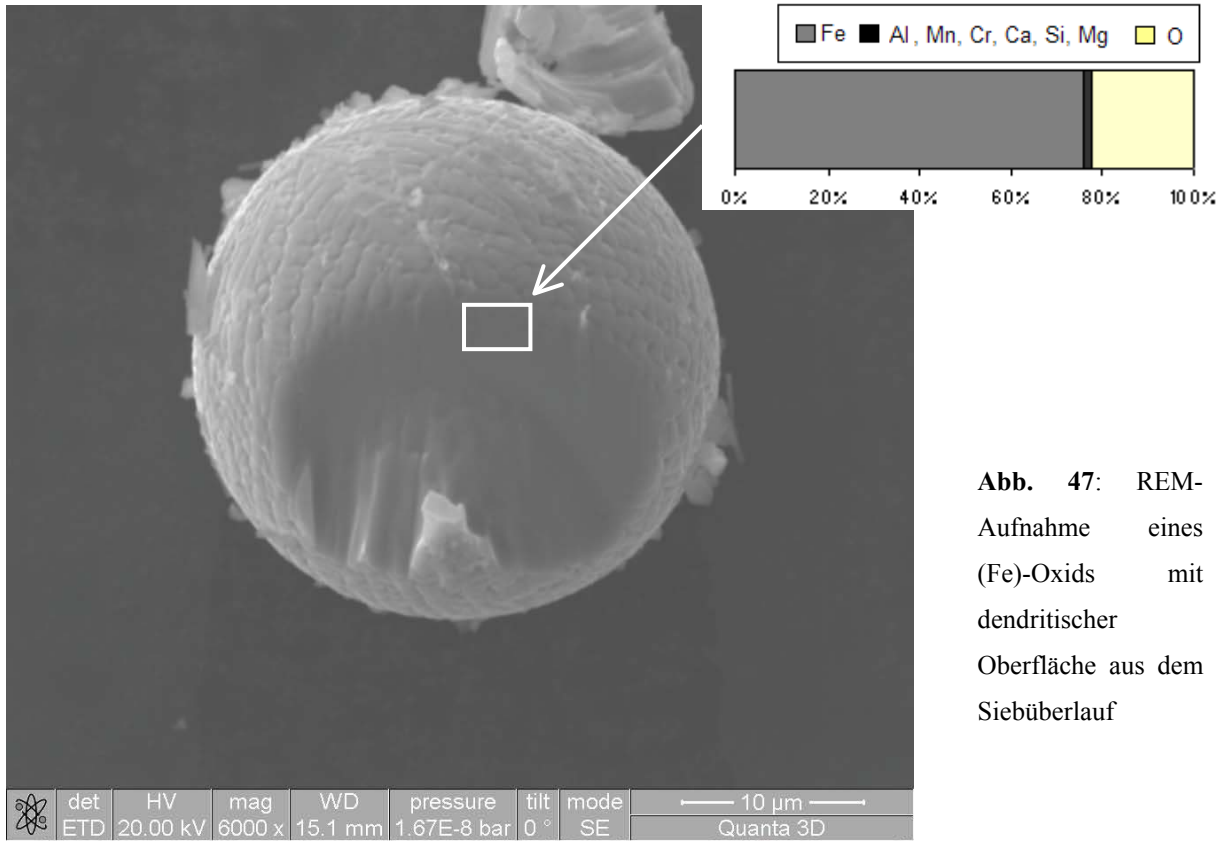


Abb. 47: REM-Aufnahme eines (Fe)-Oxids mit dendritischer Oberfläche aus dem Siebüberlauf

6 Interpretation und Diskussion

6.1 Mineralogie der magnetischen Fraktion

In der nachfolgenden Tabelle 12 sind die beobachteten technogenen Phasen und deren Häufigkeit (auf Basis der optischen Auswertung der Schliffpräparate) aufgelistet. Die Angaben der möglichen Quellen sowie die wichtigsten Spurenelementgehalte in den jeweiligen Phasen sind aus der Literatur entnommen.

Weiters ist die Stabilität der jeweiligen Phasen im Verwitterungskreislauf angegeben. Im Umkehrschluss sind daraus analoge Hinweise auf eine mögliche Element-Mobilisierbarkeit interpretierbar (vgl. NEINAVAIE & PIRKL, 1996).

Tab. 12: Phasenbestand und Häufigkeit

Phasen	Häufigkeit ¹	Stabilität ²	Anmerkung und mögl. Quellen ³	Schwermetalle ⁴
Magnetit	++++	sehr stabil	Globular (z.T. hohlkugelig), tafelig leistenförmig, dendritisch (Eisen- & Stahlindustrie)	Ni, Pb, Zn, V
Hämatit	+++	sehr stabil	z.T. als Umwandlungsprodukt von Magnetit und Wüstit	Mn
Calciumferrit	+++	sehr stabil	Verbrennungsanlagen (nicht Hausbrand)	Cr, Ni, V, Mn, P, Cu, Pb, Zn, Nb
Wüstit	+++	mäßig stabil	Globular und tafelig, meist eng mit Magnetit verwachsen	Mn, P, Ni, V, Zn, Pb
Eisenhydroxid	++	sehr stabil	Umwandlungsprodukt	Mn, Zn, Cr, Ca, As, Pb
Metallisches Eisen	++	mäßig stabil	Splitter, tafelig, Späne in Wüstit (Eisen- & Stahlindustrie, Bremsabrieb)	Cr, Ni, Ca, As, Co, Mn, S, P, W, Mo
Eisenkarbonat geröstet	++	instabil	Röstgut	
Glasphase	++	mäßig stabil	Häufig mit Einschlüssen von Magnetit und Spinellen	Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Cd, Cl, S, B, V, Zr, Ba, Mn, P
Metallisches Zink	+			Zn
Spinell	+	sehr stabil		Cr, Ni, Zn, Cu, Pb, Mn, V
Cr, Ni Stahllegierung	+	sehr stabil	Eisen- & Stahlindustrie	Cr, Ni, Fe, Mn, Mo

¹ eigene Schliffbeobachtungen, ² NEINAVAIE & PIRKL (1996), ³ TRIMBACHER & NEINAVAIE (2002), ⁴ NEINAVAIE, PIRKL & TRIMBACHER (2000)

Häufigkeit: +...vereinzelt, ++...wenig, +++...mittel, ++++ häufig

Aus der Bestimmung der magnetischen Mineralphasen an Anschliffpräparaten über optische Eigenschaften sowie Messergebnissen der Mikrosonde und Rasterelektronenmikroskopie geht hervor, dass Magnetit als dominante Phase in Form von globularen Partikeln, Zundermaterial und Sinterprodukten vorliegt. Daneben tritt häufig Hämatit, Eisenhydroxid, Calciumferrit, metallisches Eisen, Wüstit und geröstetes Eisenkarbonat auf. Vereinzelt wurden Partikel bestehend aus Cr-Ni Stahl, Legierungen, metallisches Zink und glasige Schlacken mit Einschlüssen von Spinellen und Magnetit beobachtet.

Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen ermöglichten einen schnellen Überblick über Morphologie und Zusammensetzung der Partikel. Diese Untersuchungen sollten jedoch nicht isoliert betrachtet werden, sondern sollten mit den Ergebnissen anderer Untersuchungsmethoden korreliert werden.

Die mineralogischen Detailuntersuchungen bestätigen die Ergebnisse der Magnetik. Die ermittelten magnetischen Kennwerte für SIRM/ κ , Curie-Temperatur, Remanenzkoerzitivkraft und S-Faktor weisen alle darauf hin, dass Magnetit die dominante ferromagnetische Phase darstellt.

Ähnlich wie bei einer Untersuchung von FASSBINDER (1994) zeigte sich bei den IRM-Erwerbskurven, dass auch bei 150 mT noch nicht die volle Sättigung erreicht wurde. Dies ist nach FASSBINDER (1994) auf einen geringen Anteil von Hämatit neben weichmagnetischen Magnetit zurückzuführen.

6.2 Gegenüberstellung der Korngrößenabschätzung – Magnetik und Auflichtmikroskopie:

Der Vergleich zwischen den magnetischen Korngrößenabschätzung und der Auflichtmikroskopie ergab eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Korngrößenbestimmungen der Magnetik erfolgten an unsepariertem Probenmaterial über das Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986). Die aus dem Diagramm abgeleiteten Korngrößen sind in Tabelle 1 angegeben. Den Untersuchungen der Magnetik zufolge liegt der dominante Anteil der magnetisch wirksamen Phasen der Proben Strukturmaterial (R1.12, R2.6) und Fertigkompost (FK 1) und Klärschlamm (3005-10, 2006) in einem Korngrößenbereich von $\leq 10\mu\text{m}$ (vgl. Abb. 49, Tab.14).

Weiters wurde der Medianwert der Korngröße an separierten Probenmaterial in Übersichtsaufnahmen des Auflichtmikroskops ermittelt und in Tabelle 14 angegeben. Beide Methoden führten zu dem Ergebnis, dass die bestimmende Korngröße der Strukturmaterial-

und Fertigkompostproben 8µm bis 10µm beträgt. Für die Probe „KS2006“ wurde der Median der Korngröße einerseits mit 15µm an Anschliffaufnahmen und andererseits mit 5 µm aus dem Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) bestimmt.

Die Korngrößenbestimmung an der separierten Probe „KS 3005-10“ ergab einen Median von 26 µm. Unter dem Mikroskop waren in der Probe „KS 3005-10“ außergewöhnlich große Partikel festzustellen (vgl. Kap. 5. Abb. 36), wogegen aus der magnetischen Analyse ein Durchschnittswert von etwa 10µm abgeleitet wurde. Ein erheblicher Anteil der grobkörnigeren Teilchen dieser Probe besteht aus Bruchstücken von Sinterprodukten, welche sich bei starker Vergrößerung als Gemenge von feinstkörnigen Magnetitkristallen offenbaren, die in eine silikatisch-ferritischen Matrix eingebettet sind (vgl. Abb. 48). Laut den Vorbedingungen für die Interpretation des Diagramms nach THOMPSON & OLDFIELD (1986), wonach die daraus gewinnbare Korngrößeninformation nur für reinen Magnetit ungefiltert abgeleitet werden darf, scheinen genau jene versinterten Magnetite für eine Verfälschung der magnetischen Korngrößen-Abschätzung verantwortlich sein. Zusätzlich sind die magnetischen Mineralphasen aller KS-Proben im Vergleich zu den anderen Proben stark von Umwandlungserscheinungen zu Hämatit, Lepidikrokit, Limonit u.ä. betroffen. Somit sind die magnetischen Partikel der Klärschlamm-Proben KS 2006 und KS 3005-10 grobkörniger als man an Hand des Diagramms nach THOMPSON & OLDFIELD (1986) annehmen könnte.

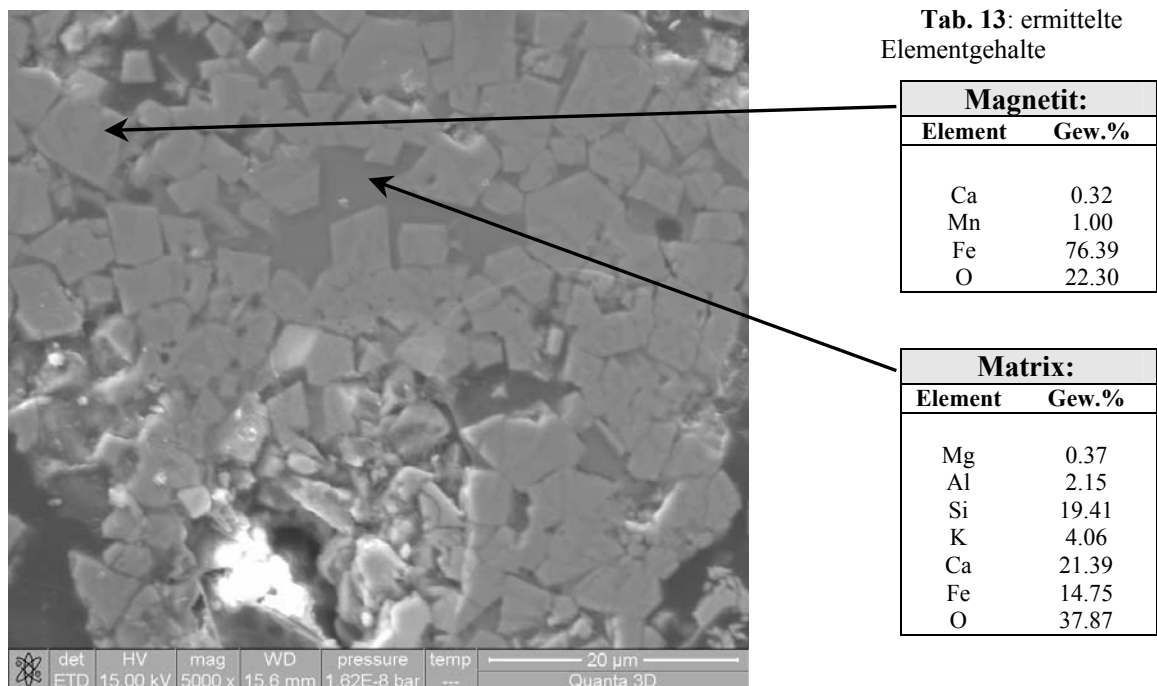


Abb. 48: REM-Aufnahme eines Sinterpartikels aus dem Klärschlamm

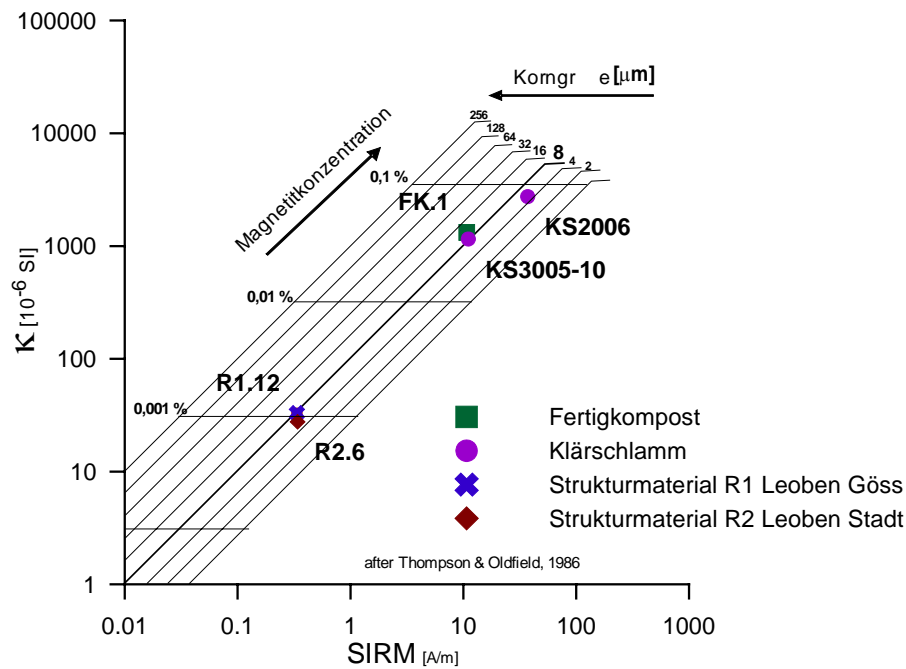


Abb. 49: Korngrößenabschätzung über das Diagramm nach THOMPSON & OLDFIELD (1986)

Tab. 14: Ermittelte Korngrößen im Vergleich: Magnetik (unseparierte Proben) und polierter Anschliff (separiertes Probenmaterial)

Probe	Korngröße [µm]	
	Magnetik	polierter Anschliff
Strukturmaterial R1.12	8	8
Strukturmaterial R2.6	6	8
Fertigkompost FK1	10	9
Klärschlamm 2006	5	15
Klärschlamm 3005-10	10	26

6.3 Curie-Temperatur

Ausgehend von den vorangehenden magnetischen und mineralogischen Untersuchungen konnte davon ausgegangen werden, dass mehrere Mineralarten an der Magnetisierung der Proben beteiligt sind, wobei bei allen Proben zwei Curie-Punkte bestimmt werden konnten. Die ermittelte Curie-Temperatur¹ bei 570 – 590 °C entspricht dem Wertebereich von Magnetit. Für jene Mineralphase, die bei 605-630 °C ihren Curie-Punkt erreicht, kommt Maghemit in Betracht.

Das Mineral Maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) besitzt die gleiche chemische Formel wie Hämatit, unterscheidet sich aber durch eine kubische Spinellstruktur, ähnlich der des Magnetits. Zwischen dem ferrimagnetischen Maghemit und Magnetit gibt es eine lückenlose Mischreihe. Die Curietemperatur von Maghemit ist schwer zu bestimmen, da Maghemit oberhalb von 400°C in den ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) Zustand übergeht. T_c dürfte aber zwischen 580 und 675°C liegen (SOFFEL 1991).

Der bei etwa 300°C angedeutete leichte Peak konnte nicht exakt bestimmt werden. Auf Grund der mineralogischen Untersuchungen und energie-dispersiver Röntgenmikroanalyse an separiertem Probenmaterial kann jedoch das Auftreten von Pyrrhotit (Fe_{1-x}S , T_c $300\text{-}325^\circ\text{C}$, CARMICHAEL, 1989) ausgeschlossen werden.

GÜNTHER (2003) beschreibt in ihrer Arbeit „Magnetische Anisotropie gebänderter Eisenerze und deren Beziehung zu kristallographischen Vorzugsorientierungen“ unter anderem die Charakteristik der gemessenen Aufheiz- und Abkühlkurven im Zuge von Curie-Punktbestimmungen an verschiedenen Erzproben. Demnach sei der Suszeptibilitätsanstieg ab ca. 100°C durch Maghemit verursacht, der sich durch Dehydratation aus Lepidokrokit ($\gamma\text{-FeOOH}$) bildet (DE BOER 1999). Es wird weiters angeführt, dass Maghemit bei Temperaturen über 300°C großteils irreversibel in Hämatit übergeht (ÖZDEMIR 1990).

Da die Kurvenverläufe der getätigten Curiepunkt-Bestimmungen an den Klärschlamm-, Kompost-, und Strukturmaterialproben jenen von GÜNTHER (2003) sehr ähnlich bis annähernd identisch sind kann von ähnlichem mineralogischem Inventar ausgegangen werden. Der irreversible Verlauf aller Kurven im Temperaturbereich von ca. 300°C bestätigt eine Phasenumwandlung bzw. Mineralneubildung während der Aufheizphase. Der Übergang einer Mineralphase in den paramagnetischen Zustand hätte eine Reversibilität der Kurve zur Folge. Bei ca. 575°C verliert Magnetit seine ferrimagnetischen Eigenschaften. Diese Tatsache wird bei allen Proben durch den steilen Suszeptibilitätsabfall bestätigt. Hämatit geht bei etwa 680°C in den paramagnetischen Zustand über. Aufgrund der geringen Suszeptibilität von Hämatit ist dieser im Kurvenverlauf nur bei wenigen Proben bemerkbar. Im Temperaturbereich von 680°C bis 700°C treten leichte Schwankungen auf, die auf einen Hämatitgehalt hinweisen könnten. Eine partielle Oxidation des Magnetits zu Hämatit schwächt deutlich die Suszeptibilität der rückläufigen Kurve. Weiters sprach die deutliche Rotfärbung vieler Proben, die nach dem Heizvorgang beobachtet wurde, für eine Hämatitneubildung während des Heizens.

Die Suszeptibilitätszunahme in den Abkühlungskurven der in Gruppe II zugeordneten Proben unterhalb 570°C ist nach GÜNTHER (2003) auf einen Zugewinn an stark suszeptiblen Mineralen (Sulfide, Oxide) zurückzuführen.

Neben Magnetit ist demnach in den untersuchten Proben ein geringer Volumenanteil an Lepidokrokit anzunehmen. Wieviel Hämatit primär in den Proben vorhanden war und zu welchem Anteil er sich sekundär durch den Aufheizvorgang gebildet hat, lässt sich nur schwer abschätzen. Prinzipiell wird das thermomagnetische Verhalten des Hämatits vom stark suszeptiblen Magnetit teilweise überprägt.

6.4 Einfluss der Proben bzw. der Probenahme auf die Interpretierbarkeit der Messergebnisse

Eine Interpretation der Strukturmaterial-Ergebnisse war auf Grund der geringen Konzentration an ferr(o)magnetischen Phasen nur mit Vorbehalt möglich. Auffallend ist die geringe Konzentration vor allem im Strukturmaterial aus Leoben-Stadt, Göss, Proleb und Bruck an der Mur (vgl. Kap 4, Abb. 15 und 16).

Das zur Verfügung gestellte Probematerial konnte gerade noch signifikant ausgewertet werden. Die Messwerte fügen sich dennoch ins einheitliche Bild. Demgegenüber konnten in einer Studie über Ahornblätter von Bäumen aus derselben Region vergleichsweise große Mengen an magnetischer Fraktion separiert und auch messtechnisch nachgewiesen werden (HANESCH, et al., 2003).

Eine Erklärung für die geringen Gehalte an magnetischen Mineralphasen in den untersuchten Strukturmaterial-Proben könnte die Inhomogenität des Strauchschnitts sein, da dessen Zusammensetzung stark variieren kann. Eine repräsentative Probenahme ist unter diesen Umständen erschwert. Wenn beispielsweise im Zuge der Probenahme vorwiegend größere Holzstücke gewählt werden, wird durch das Aufmahlen die Konzentration an Staubpartikeln herabgesetzt. Die geringen Werte sind also vermutlich ein Effekt der Verdünnung durch die Probenahme und Aufbereitung für die chemischen Analysen. Die in den Stäuben enthaltenen ferr(o)magnetischen Partikel sind vorwiegend auf der Pflanzenoberfläche zu finden.

Die für die bearbeiteten Klärschlamm-, Fertigkompost- und Siebüberlauf-Proben ermittelten magnetischen Messergebnisse konnten ohne Einschränkung ausgewertet bzw. interpretiert werden, da sie verglichen mit den Strukturmaterialien einen wesentlich höheren Anteil an magnetischer Fraktion aufweisen. Generell sollten die Strukturmaterial-Ergebnisse mit Vorsicht interpretiert werden.

6.5 Magnetische Richtwerte für die Proben der Kläranlage Leoben

Für die Beurteilung der magnetischen Suszeptibilität und Sättigungsremanenz der untersuchten Proben bezüglich der Schwermetallkonzentrationen wurden anhand der Grenzwerte der Kompostverordnung von 2001 magnetische Richtwerte für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm abgeleitet. Dazu sind in den Abbildungen 50 - 52 die verschiedenen Grenzwertkriterien gemäß der Kompostverordnung 2001 (vgl. Tab. 4) über Regressionsgeraden durch die Messpunkte den magnetischen Parametern SIRM und χ zugeordnet. Die Tabellen 15 und 16 enthalten die so ermittelten magnetischen Richtwerte für die magnetische Suszeptibilität und Sättigungsremanenz bezüglich der Schwermetalle Cd, Cr, Hg, Ni, Cu, Zn und Pb für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm. Die Ergebnisse stimmen im wesentlichen mit jenen der chemischen Analysen überein. Die Nickelkonzentrationen der Klärschlamm- Mieten- und Fertigkompostproben überschreiten gleichermaßen die Grenzwerte der Kompostverordnung wie auch die magnetischen Richtwerte.

Auffällig ist, dass sich die den chemischen Grenzwerten zugeordneten **magnetischen Richtwerte** betreffend ihrer Größenordnung großteils im selben Wertebereich abbilden, obwohl sich die entsprechenden chemischen Grenzwerte, je nach Menge, Art und Vorkommen des zu beurteilenden Elements hinsichtlich ihrer Größenordnung stark unterscheiden.

So sind, auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften (Mobilität), die chemischen Grenzwerte für Cu und Zn höher angesetzt als etwa für Ni, Cd und Hg, für das vergleichsweise noch stabilere Blei noch eine Größenordnung höher. Dementsprechend fällt auch die Sensibilität der abgeleiteten „Magnetischen Richtwerte“ in einen höheren Wertebereich der magnetischen Parameter, wobei sich Cu und Zn für die Richtwerte Kompostklasse A und Strukturmaterial auch im selben Wertebereich befinden

Die Gruppierung der Elemente Cd, Cr, Hg ist bei den abgeleiteten magnetischen Richtwerten besonders signifikant, bzw. sind die Grenzwert-Entsprechungen nahezu identisch. Für Nickel gilt dies auch bei Strukturmaterial und für die Kompostklasse A.

Tab. 15: Richtwerte für die Kläranlage Leoben für die magnetische Suszeptibilität bezüglich der Schwermetalle Cd, Cr, Hg, Ni, Cu, Zn, Pb (1.Serie)

Richtwerte für die magnetische Suszeptibilität- χ [$10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$]				
Elemente	Strukturmaterial	Kompostklasse A	Kompostklasse B	Klärschlamm
Cd	60	100	300	300
Cr	60	100	270	300
Hg	60	100	300	400
Ni	60	100	160	160
Cu	100	180	420	420
Zn	100	170	600	600
Pb	200	300	500	500

Tab. 16: Richtwerte für die Kläranlage Leoben für die remanente Sättigungsmagnetisierung bezüglich der Schwermetalle Cd, Cr, Hg, Ni, Cu, Zn, Pb (1.Serie)

Richtwerte für die remanente Sättigungsmagnetisierung- SIRM [A/m]				
Elemente	Strukturmaterial	Kompostklasse A	Kompostklasse B	Klärschlamm
Cd	3,5	7,2	25	25
Cr	3,8	7	30	32
Hg	4	7	25	25
Ni	4	7	11	11
Cu	6,5	13	25	25
Zn	6,3	13	58	71
Pb	13	31	42	43

Dementsprechend wurden in den Abbildungen 53 und 54 die Ergebnisse der magnetischen Suszeptibilitätsmessungen der ersten Probenreihe (vgl. Abb. 13) mit den magnetischen Richtwerte für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm ergänzt.

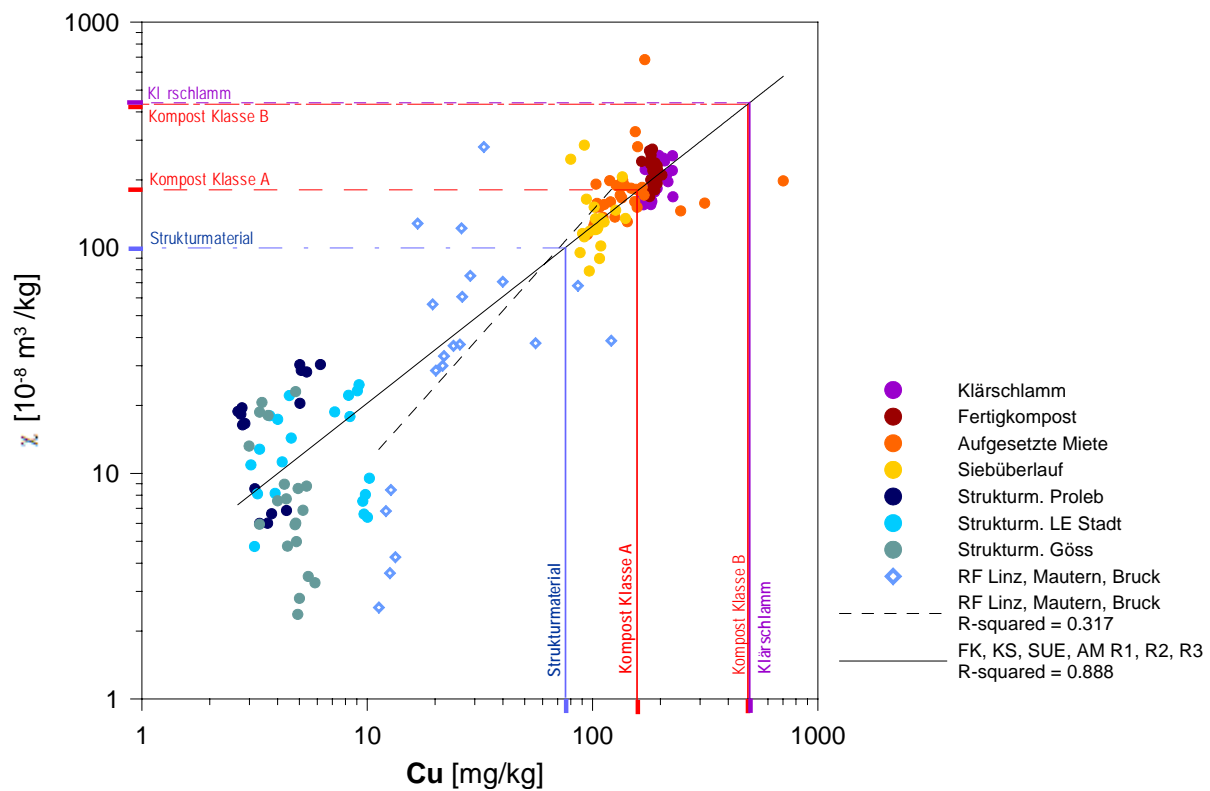
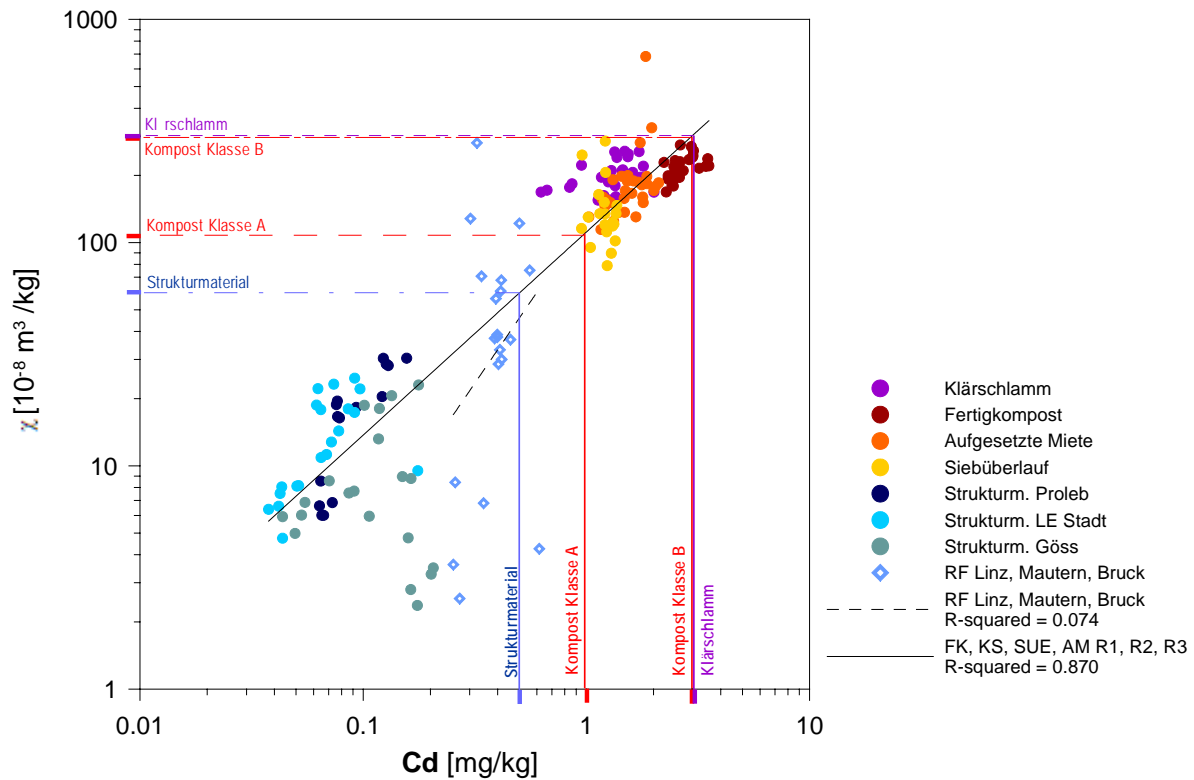


Abb. 50: Grenzwerte und magnetische Richtwerte (magnetische Suszeptibilität) für die Elemente Cd und Cu

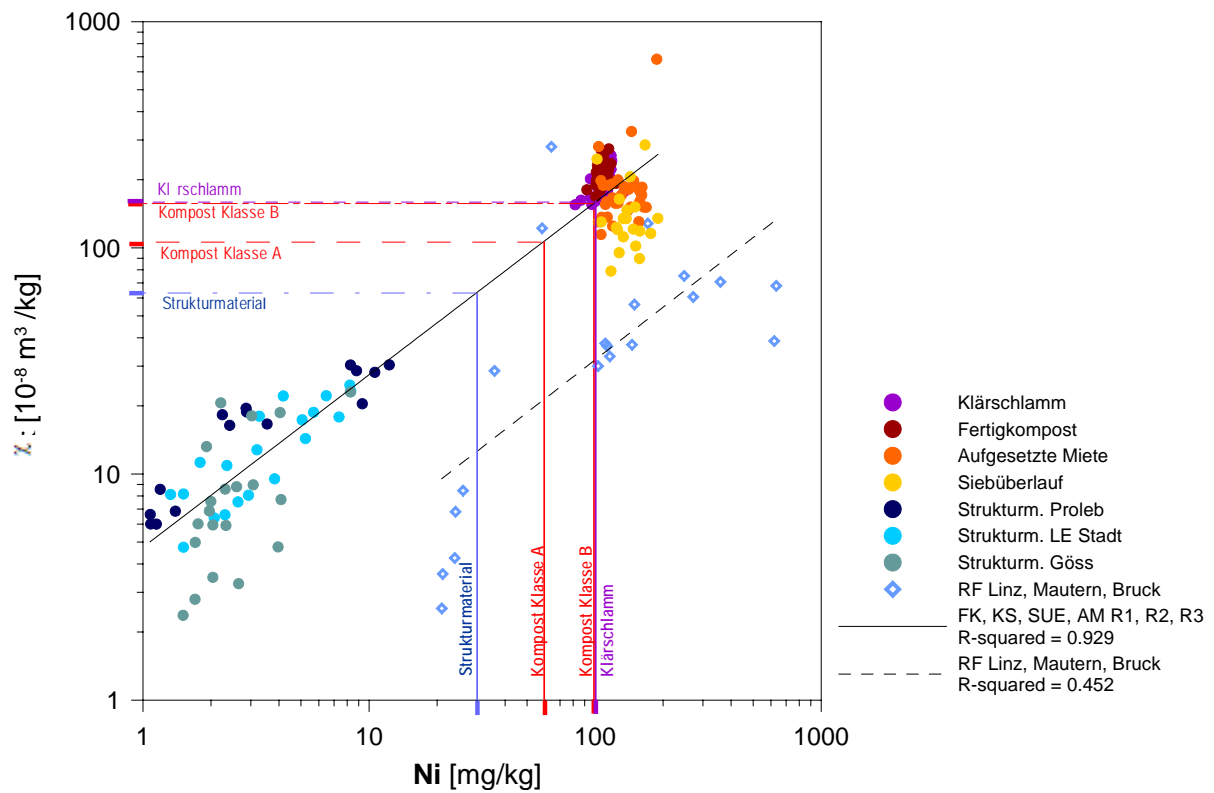
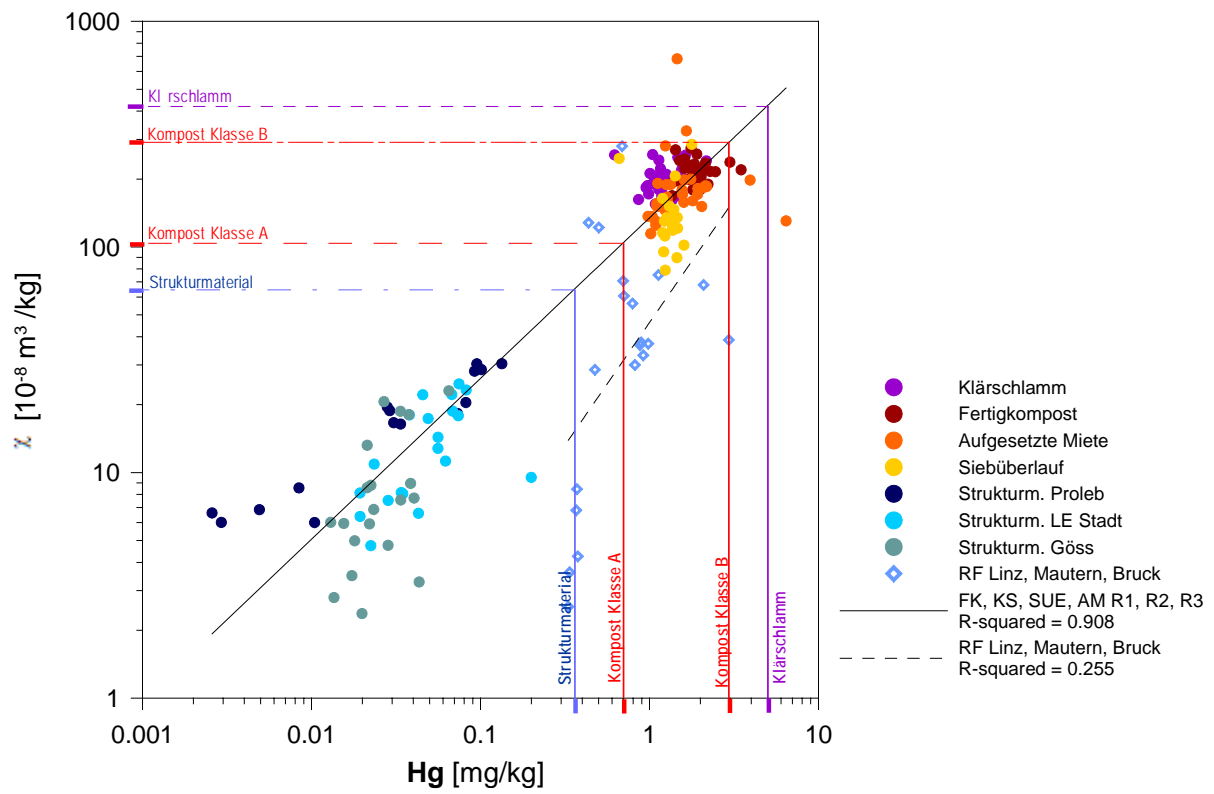


Abb. 51: Grenzwerte und magnetische Richtwerte (magnetische Suszeptibilität) für die Elemente Hg und Ni

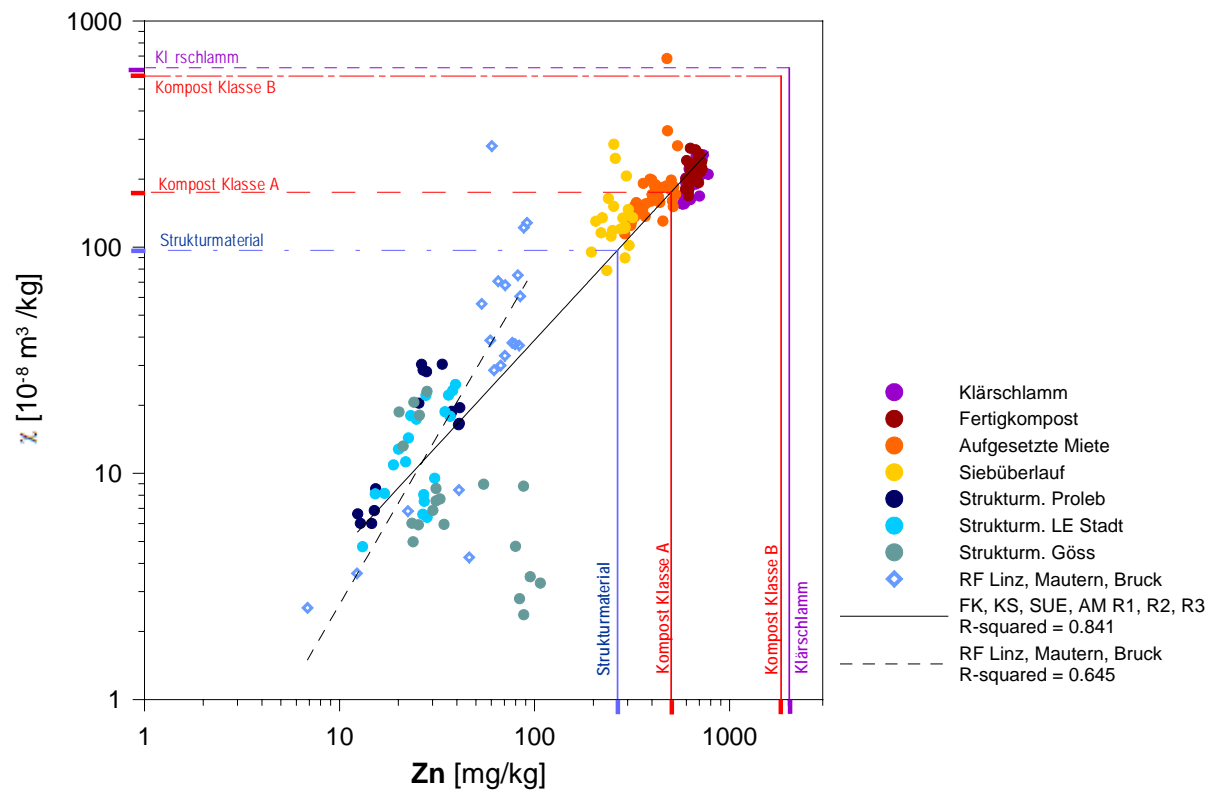
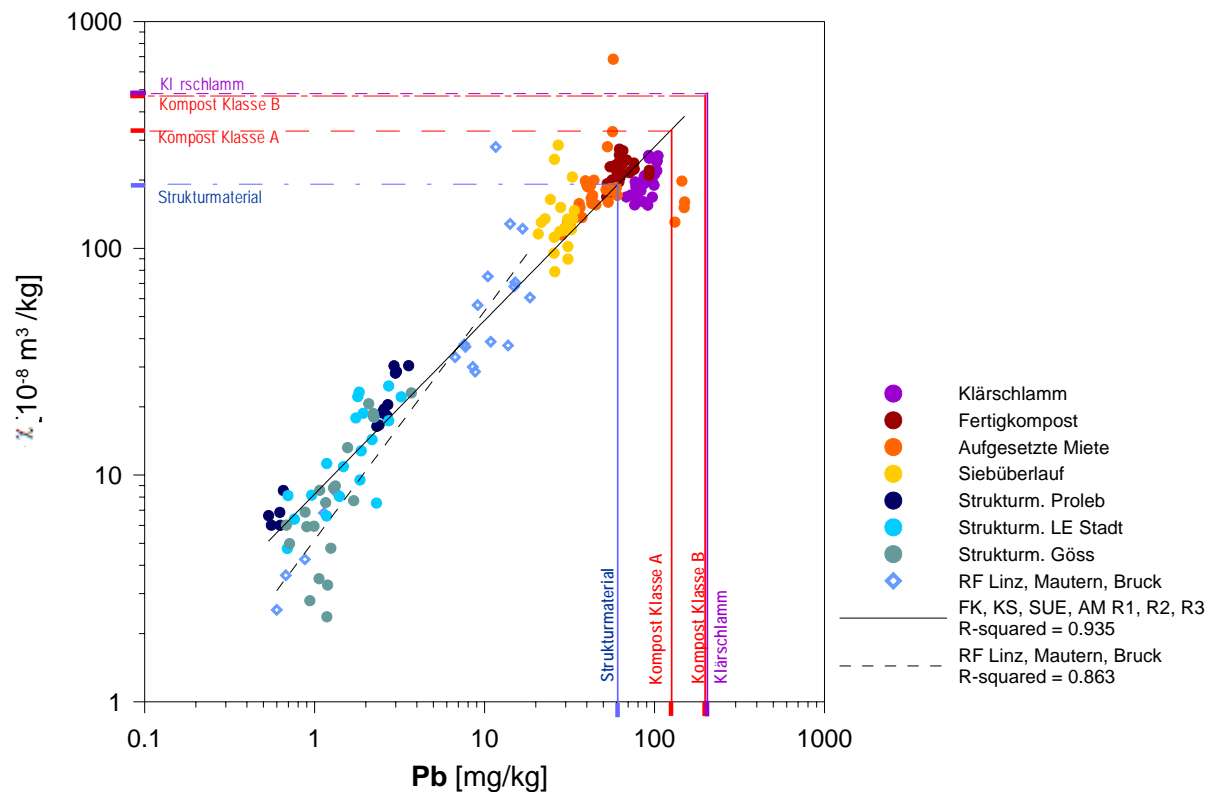


Abb. 52: Grenzwerte und magnetische Richtwerte (magnetische Suszeptibilität) für die Elemente Pb und Zn

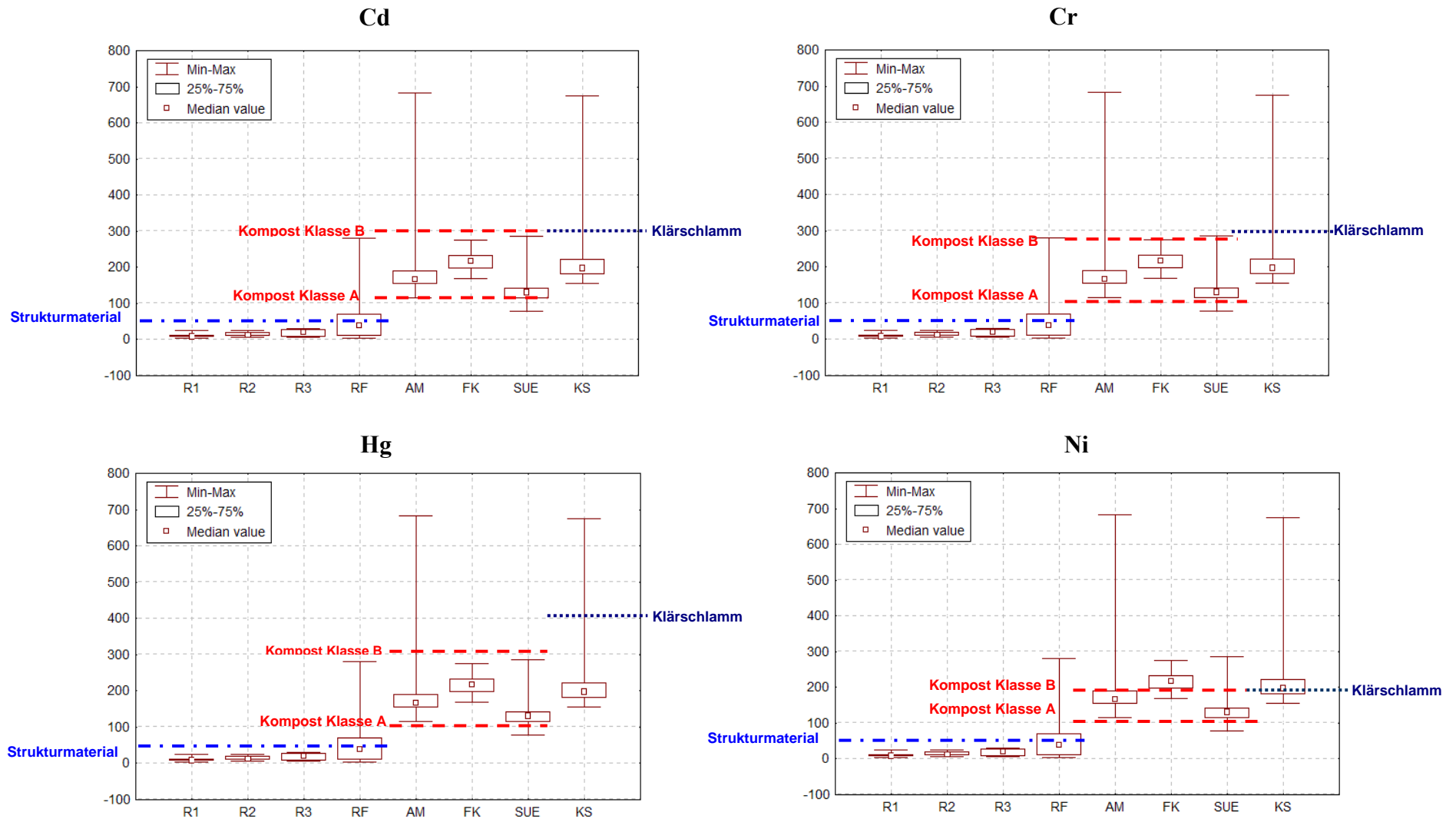


Abb. 53: magnetische Suszeptibilitäts-Richtwerte für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm bezüglich der Elemente Cd, Cr, Hg und Ni, angewendet auf die Ergebnisse der 1..Probenserie (R1-Strukturmaterial Göss, R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesetzte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

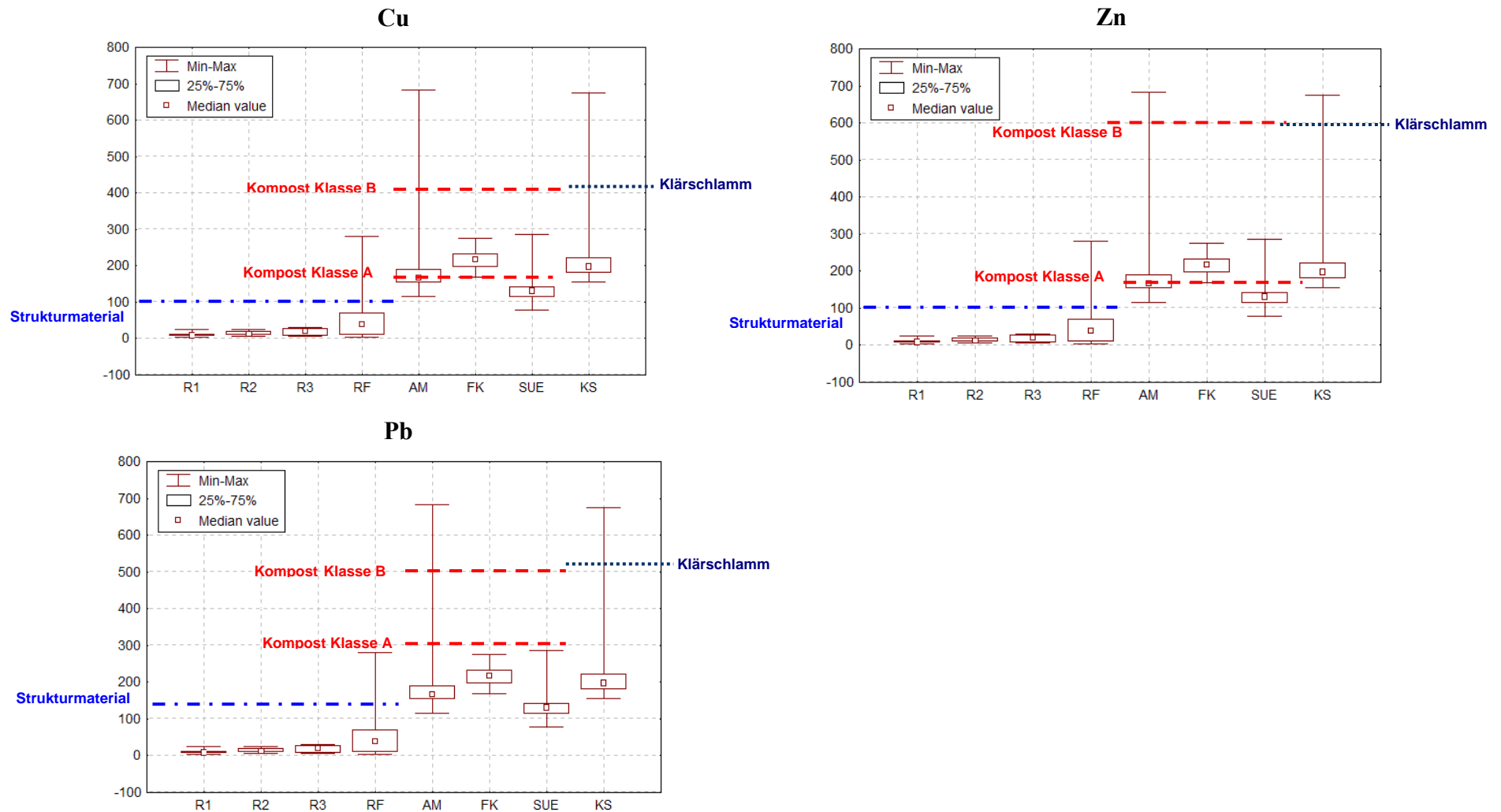


Abb. 54: magnetische Suszeptibilitäts-Richtwerte für Strukturmaterial, Kompost und Klärschlamm bezüglich der Elemente Cd, Cr, Hg und Ni, angewendet auf die Ergebnisse der 1..Probenserie (R1-Strukturmaterial Göss, R2-Strukturmaterial LE Stadt; R3-Strukturmaterial Proleb; RF-Strukturmaterial Fremd, AM-Aufgesetzte Miete, FK-Fertigkompost, SUE-Siebüberlauf, KS-Klärschlamm)

Es wurde der Versuch unternommen, an Hand der magnetischen Richtwerte, die aus der Regression mit den chemischen Untersuchungsergebnissen der ersten Probenserie abgeleitet wurden, die Grenzwertüberschreitungen in den weiteren Probenserien 2, 3 und 4 in gleicher Vorgehensweise vorherzusagen.

In den Tabellen 17 - 18 sind exemplarisch für die Probengruppe Klärschlamm die Überschreitungen der magnetischen Suszeptibilitäts - Richtwerte bei Nickel und die entsprechende Nickelkonzentration gegenübergestellt. Für die im Herbst 2005 getätigte zweite Probenserie sowie auch für die dritte Probenserie im Winter 2005/2006 wurden bezüglich der Proben KS 270905, KS051005 und KS090206 Überschreitungen der magnetischen Suszeptilitäts-Richtwerte festgestellt. Der Vergleich mit den Ergebnissen der chemischen Analyse zeigte jedoch, dass die Proben mit Nickelkonzentrationen von 76,3, 78,8 und 52,1 mg/kg weit unter dem in der Kompostverordnung 2001 festgelegten Grenzwert liegen.

Für die Proben KS180406 und KS250406 der 4. Probenserie (Sommer 2006) wurde mit einem Messwert von 258,3 und 254,9 [10^{-8} m³/kg] erneut der magnetische Richtwert der ersten Probenserie überschritten. Tatsächlich wurden auch in der chemischen Analytik Nickelkonzentrationen gemessen, die über dem Grenzwert liegen.

Tab. 17 Vergleich der Grenzwertüberschreitungen für **Klärschlamm**, 2.Probenserie

Ni	Richtwert [10^{-8} m ³ /kg]	Messwert [10^{-8} m ³ /kg]	Grenzwert [mg/kg]	Konz. [mg/kg]
KS270905	160	226,6	100	76,3
KS051005	160	294,4	100	78,8

Tab. 18 Vergleich der Grenzwertüberschreitungen für **Klärschlamm**, 3.Probenserie

Ni	Richtwert [10^{-8} m ³ /kg]	Messwert [10^{-8} m ³ /kg]	Grenzwert [mg/kg]	Konz. [mg/kg]
KS090206	160	1397,1	100	52,1

Tab. 19 Vergleich der Grenzwertüberschreitungen für **Klärschlamm**, 4.Probenserie

Ni	Richtwert [10^{-8} m ³ /kg]	Messwert [10^{-8} m ³ /kg]	Grenzwert [mg/kg]	Konz. [mg/kg]
KS180406	160	258,3	100	130,8
KS250406	160	254,9	100	105,4

Auf Grund bereits geringer Verschiebung in der Steigung der jeweiligen Regressionsgeraden im bilogarithmischem Crossplot der zweiten Probenserie sind die Änderungen der entsprechenden magnetischen Richtwerte zu groß, als dass diese Methode in dieser Weise bereits zu einer raschen Einstufung der Schwermetallbelastung des Probenmaterials geeignet wäre. In wieweit eine Bestimmung der Grenzwertüberschreitungen mit Hilfe der dargelegten Methodik möglich ist, gehört noch näher untersucht. Es müsste daher noch geklärt werden ob die jeweilige Steigung der Regressionsgeraden saisonabhängigen Schwankungen unterliegt, da die magnetischen Richtwerte der Beprobungsreihe 1 (Sommer 2005) mit tatsächlich Grenzwertüberschreitungen in der Beprobungsreihe 4 (Sommer 2006) Übereinstimmung zeigten.

Für eine Klassifizierung der magnetischen Ergebnisse müssten eventuell für jede Saison erneut magnetische Richtwerte für die einzelnen Probengruppen verifiziert werden.

Mitentscheidend für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wäre dabei auch, dass Probenahme, Analytik und Messabfolge aller Proben einheitlich durchgeführt werden. Im Idealfall sollte somit der ganze Arbeitsvorgang beginnend mit der Probennahme bis zum Messergebnis immer vom selben Personal eines bestimmten Labors mit entsprechenden Qualitätssicherungs-Maßnahmen durchgeführt werden.

Der gewählte Ansatz aus Regressionsgeraden magnetische Richtwerte zu ermitteln scheint prinzipiell zu funktionieren, zukünftige Arbeiten sollten klären, inwiefern die Änderung der Steigung der Regressionsgeraden für die einzelnen Schwermetalle und Elemente korrigiert werden können.

Literaturverzeichnis

Amt der Steiermärkischen Landesregierung, LBD-FA 1a, Referat für Luftgüteüberwachung;
ARGE LÖSS. Klimateignungskarten der Steiermark.

Angenheister, G., Soffel, H. CH., 1972. Gesteinsmagnetismus und Paläomagnetismus.- 110
S.; Gebr. Bornträger, Berlin.

Armbruster T., 2005. ([http://www.ti.uni-mannheim.de/lehrstuhl/lehrveranstaltungen/
seminar/ss2005/dateien/FIB](http://www.ti.uni-mannheim.de/lehrstuhl/lehrveranstaltungen/seminar/ss2005/dateien/FIB))

Bartington operation manual (<http://www.bartington.com/>)

Baumann, L., Leeder, O., 1991. Einführung in die Auflichtmikroskopie, Deutscher Verlag
für Grundstoffindustrie, VLN 152-915/45/91, Leipzig.

Bitjukova, L., Scholger, R., Birke, M., 1999. Magnetic Susceptibility as Indicator of
Environmental Pollution of Soils in Talinn. Physics and Chemistry of the Earth 24, 829-835.

Boyko, T., Scholger, R., Stanjek, H., 2004. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a
tool for pollution monitoring: repeatability of insitu measurements, Journal of Applied
Geophysics 55, 249 – 259; Elsevier

De Boer, C. B., 1999. Rock-Magnetic Studies on Hematite, Maghemite and Combustion-
Metamorphic Rocks.- Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit
Utrecht, No. 177; Utrecht.

Carmichael, R. S., 1989. Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals.
CRC Press, Florida.

Dzyaloshinsky, I., 1958. A thermodynamic theory of „weak“ ferromagnetism of
antiferromagnetics.- J. Phys. Chem. Solids, 4, 241-255; Elsevier, Amsterdam.

Evans, M.E., Heller, F., 2003. Environmental Magnetism, Academic Press, An imprint of Elsevier Science, ISBN: 0-12-243851-5, USA

Fassbinder, J., 1994. Die magnetischen Eigenschaften und die Genese ferrimagnetischer Minerale in Böden, Verlag Marie L. Leidorf.

Flügel, H. W., Neubauer F., 1984. Steiermark. Erläuterungen zur Geologischen Karte der Steiermark 1:200.000, Wien.

Goldhaber, M. B., Callender, E., Chambers, D. B., Reynolds, R. L. Ayuso, R. A., 2002. Geochemical signatures of power plant emissions in soils and sediments of the Northeast U.S. Annual meeting USGS, Denver.

Günther, A., 2003. Magnetische Anisotropie gebänderter Eisenerze und deren Beziehung zu kristallographischen Vorzugsorientierungen GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, ISSN 0344-9629, Geesthacht.

Hanesch, M., Scholger, R., Rey, D., 2003. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves, Atmospheric Environment 37, 5125 – 5133, Elsevier, Amsterdam.

Hoffman, V., Knab, M., Appel, E., 1999. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. Journal of Geochemical Exploration 66, 313 – 326.

Hunt, Ch.P., Moskowitz, B. M., Banerjee, S. K., 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals, Handbook of Physical Constants, American Geophysical Union.

Kapička, A., Jordanova, N., Petrovský, E., Ustjak, S., 2001. Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. J. Appl. Geophys., 48, 93-102.

Lecoanet, H., Lévêque, F., Ambrosi, J.P., 2001. J.-P. Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France). J. Appl. Geophys., 48, 67-81.

Maher, B., Thompson, R., 1999. Quaternary Climates, Environments and Magnetism. Cambridge University Press, Cambridge.

Matschullat, J., Tobschall, H.J., Voigt H.J., 1997. Geochemie und Umwelt., Relevante Prozesse in Atmo-, Pedo-, und Hydrosphäre.- Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

Matzka, J., Maher, B., 1999. Magnetic Biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. Atmospheric Environment 33, pp 4565-4569.

McElhinny, McFadden, P. L., 2000. Paleomagnetism, Continents and Oceans. Academic Press, 386 pp.

Merrill, R., 1983. The Earth Magnetic Field.- 396 Seiten; London.

Neinavaie, H., Pirkl, H. & Trimbacher C., 2000. Herkunft und Charakteristik von Stäuben. UBA-BE-171, Umweltbundesamt Wien.

Neinavaie, H., Pirkl, H., 1996. Bewertung von Schwermetallverteilungen in Böden und Flußsedimenten mit Hilfe angewandter mineralogischer und geostatistischer Werkzeuge. – Berichte der Geologischen Bundesanstalt, Band 34, Wien/Eisenerz.

Oldfield, F., Richardson, N., 1990. Lake sediment magnetism and atmospheric deposition. Phil.Trans.R. Soc., London.

Orlicky, O., 1990. Detection of magnetic carriers in rocks: results of susceptibility changes in powdered rock samples induced by temperature.- Phys. Earth Planet. Int., 63, S. 66-70; Elsevier, Amsterdam.

Özdemir, Ö., 1990. High temperature hysteresis and thermoremanence of single-domain-magnetite.- Phys. Earth. Planet. Int., 65; Amsterdam (Elsevier).

Peters, C., Thompson, R., 1998. Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulphides J. Magn. Mater, 183,pp. 365-374.

Pirkl, H., Neinavaie, H., 2002. Mineralogisch-geochemische Methoden zur Bewertung der Umweltrelevanz von Schwermetallen in Staubdepositionen. Endbericht, Wien.

Qin Y., Wang X. S., 2006. Magnetic properties of urban topsoils and correlation with heavy metals: a case study from the city of Xuzhou, Environ Geol 49: 897-904, China.

Scholger, R., 1998. Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of the river Mur (Styria, Austria). European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 3:25 – 37.

Schön, J. 1983. Petrophysik: Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. Enke; Stuttgart.

Semmelrock, G., 2004. Messung der Staub- und Schwermetalldeposition in Niklasdorf-Leoben-Donawitz 1997 bis 2002, LU 05-04 Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz.

Soffel, Ch., 1991. Paläomagnetismus und Archäomagnetismus. Springer, Berlin.

Strangway, D. W., 1970. History of the Earth's Magnetic Field.- 168 Seiten; New York.

Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental Magnetism. Allen & Unwin, London.

Tarling, D. H., 1971. Principles and Applications of Palaeomagnetism. Chapman and Hall, London.

Tarling, D. H., Hrouda, F., 1993. The magnetic anisotropy of rocks. Chapman and Hall, London.

Tauxe, L., 2005. Lectures in Paleomagnetism, <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>

Trimbacher C., Neinavaie, H., 2002. Studie zur Ermittlung der Herkunft von Stäuben an sechs ausgewählten Messpunkten in Graz. UBA-BE-210, Umweltbundesamt Wien.

Trojer, F., 1963. Die oxidischen Kristallphasen der anorganischen Industrieprodukte. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Umweltbundesamt Wien, 1997. Bericht über die Umweltsituation an ausgewählten langjährigen Industriestandorten, 1992, Umweltbundesamt, Wien. In: Trimbacher, C., 1997. Fichtennadeluntersuchungen in der Steiermark. Rasterlektronenmikroskopische und chemisch-analytische Ergebnisse. Zwischenbericht. UBA-BE-082, Umweltbundesamt, Wien.

Weber L. (Hrsgb.), 1997. Archiv für Lagerstättenforschung, Geologische Bundesanstalt, Wien.

Weiss, P., Trimbacher, C., 1998. Nadeloberflächenparameter und Elementgehalte von Fichtennadeln ausgewählter Industriestandorte, R-154, Umweltbundesamt, Wien.