

Forschungsbericht BWPLUS

Recover-EWS
Effizienter Rückbau und Sanierung von Erdwärmesonden
- Verlaufsmessung und Richtbohrtechnik, Rückbau
und Recovering von Erdwärmesonden -

von

Frank Burkhardt
Burkhardt Geologische und hydrologische Bohrungen GmbH & Co. KG

Roman Zorn
EIFER (European Institute for Energy Research)

Hagen Steger, Phillip Blum, Ingrid Stober
Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Simeon Meier
enOware GmbH, Karlsruhe

Förderkennzeichen: BWG 14001 - 14004

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit
Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Oktober 2017

Autoren des Abschlussberichts zum Verbundforschungsvorhaben EWS-Recover:



Burkhardt Geologische und hydrologische Bohrungen GmbH & Co. KG
Tulpenstr. 15, 75389 Neuweiler
Tel. +49 7055/9297 - 0
Fax +49 7055/9297 - 77
Projektleitung: B. Eng. Frank Burkhardt
E-Mail: frank@burkhardt-bohrungen.de



EIFER (European Institute for Energy Research)
Emmy-Noether-Str. 11, 76131-Karlsruhe
Projektleitung: Dr. Roman Zorn
Tel.: +49 721/6105 - 1412
Fax: +49 721/6105 - 1332
E-Mail: roman.zorn@eifer.org



Karlsruhe Institut für Technologie
Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe
Projektleitung: Dr. Hagen Steger
Prof. Dr. Phillip Blum
Prof. Dr. Ingrid Stober
Tel.: +49 721/608 - 43096
Fax: +49 721/608 - 47603
E-Mail: hagen.steger@kit.edu



enOware GmbH
Emmy-Noether-Straße 17, 76131 Karlsruhe
Projektleitung: Dipl.-Ing. (FH) Simeon Meier
Tel.: +49 721/6634 - 513
E-Mail: sim@enoware.de

Neben den aufgeführten Autoren haben die folgenden Personen bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens mitgewirkt: Olaf Ukelis, Viktor Zelinski, Christian Dangel, Florian Sonnenfroh, Jens Friderich, Florian Pernau, Phillip Linder.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	XV
VERZEICHNIS DES ANHANGS	XVII
SYMBOLE	XIX
1 KURZFASSUNG	1
1.1 DEUTSCHE KURZFASSUNG.....	1
2 EINLEITUNG	4
2.1 MOTIVATION UND AUFGABENSTELLUNG	4
2.2 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE.....	5
2.3 PLANUNG UND ABLAUF DES PROJEKTES.....	7
2.4 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN.....	8
3 RICHTBOHRMESSTOOL UND KONTRASTMITTEL	9
3.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	9
3.1.1 <i>Magnetismus</i>	9
3.1.1.1 Einführung.....	9
3.1.1.2 Magnetische Dipole	9
3.1.1.3 Magnetisches Moment.....	10
3.1.1.4 Magnetische Feldvektoren	12
3.1.1.5 Dia-, Para- und Ferromagnetismus.....	14
3.1.1.6 Geomagnetik.....	16
3.1.1.6.1 Grundprinzipien.....	16
3.1.1.6.2 Erdmagnetfeld	16
3.1.1.7 Magnetfeldsensoren.....	18

3.1.1.7.1	Grundlagen	18
3.1.1.7.2	Hall-Effekt-Sensoren.....	18
3.1.1.7.3	Fluxgate-Sensoren	20
3.1.2	<i>Elektrische Widerstandsmessung</i>	21
3.2	MATERIALIEN UND METHODEN	24
3.2.1	<i>Werkstoffe zur Herstellung fließfähiger Kontrastmitteln für die Richtbohrtechnik</i>	24
3.2.1.1	Bentonit	24
3.2.1.2	Zement	25
3.2.1.3	Magnetitpulver	26
3.2.1.4	Nano-Eisenpulver.....	27
3.2.2	<i>Stahldrahtseil</i>	27
3.2.3	<i>Spannbetonlitze</i>	27
3.2.4	<i>Stahlkugeln</i>	27
3.2.5	<i>Magnetkugeln</i>	27
3.2.6	<i>Verfüllrohr</i>	27
3.2.7	<i>Bohrrohr</i>	27
3.2.8	<i>Erdwärmerohr</i>	27
3.2.9	<i>Wärmeschrumpfschlauch</i>	28
3.2.10	<i>Neodymmagnete</i>	28
3.2.11	<i>Schwenk Füllbinder H-hs plus</i>	28
3.2.12	<i>Teslameter FM302</i>	29
3.2.13	<i>Cem Trakker</i>	29
3.2.14	<i>Bestimmung der Ausflusszeit</i>	30
3.2.15	<i>Absetzmaß</i>	30
3.2.16	<i>Anmischen der Zement-Bentonit Suspensionen</i>	31

3.2.17	<i>Entwicklung und Bau eines Mess- und Magnetisierungsstands für die Kontrastmittelentwicklung</i>	33
3.2.17.1	Magnetisierungsstand	33
3.2.17.2	Messstand	41
3.2.18	<i>Versuchsaufbau zur elektrischen Widerstandsmessung</i>	48
3.2.18.1	Sand.....	49
3.2.18.2	Lößlehm.....	49
3.2.18.3	Ton	49
3.2.18.4	Verwendete Kontrastmittel.....	49
3.2.18.5	Versuchstand zur elektrischen Widerstandsmessung	50
3.2.19	<i>Technikumsversuchsstand zur Verlaufsmessung</i>	52
3.3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	54
3.3.1	<i>Magnetisch dotierte Zement-Bentonit-Suspensionen als Kontrastmittel</i>	54
3.3.1.1	Herstellung einer stabilen und pumpbaren Zement-Bentonit Suspension	54
3.3.1.2	Vorversuche und Kommentare zur Herstellung einer stabilen und pumpbaren magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspension	58
3.3.1.3	Herstellung einer stabilen und pumpbaren magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspension	59
3.3.1.4	Fazit	69
3.3.2	<i>Stahlkugeln als Kontrastmittel</i>	70
3.3.2.1	Untersuchung der Methode	70
3.3.2.2	Fazit	75
3.3.3	<i>Stahldrahtseile als Kontrastmittel</i>	76
3.3.3.1	Ø 5 mm Stahldrahtseile	76
3.3.3.1.1	Vorbereitungen und Voruntersuchungen	76
3.3.3.1.2	Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	81
3.3.3.1.3	Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder.....	86
3.3.3.1.4	Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	92

3.3.3.1.5	Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	98
3.3.3.1.6	Statistische Fehlerbetrachtung anhand der \varnothing 5 mm Stahldrahtseile.....	101
3.3.3.2	\varnothing 8 mm Stahldrahtseile	105
3.3.3.3	Vergleich der Ergebnisse der \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile	106
3.3.3.4	Einfluss von Magnetfeldern unterschiedlicher Stärke auf das Messsignal.....	111
3.3.3.5	Einfluss der geologischen Gegebenheiten auf das Messsignal – Theoretische Betrachtung und Versuchsbeispiele im Labormaßstab	114
3.3.3.6	Versuche mit Messmodul in einem Bohrrohr	121
3.3.3.7	Kosten der Methode	131
3.3.3.8	Fazit	131
3.3.4	<i>Spannbetonlitze als Kontrastmittel</i>	133
3.3.4.1	Untersuchung der Methode	133
3.3.4.1.1	Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	133
3.3.4.1.2	Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder.....	137
3.3.4.1.3	Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	138
3.3.4.1.4	Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder	140
3.3.4.2	Vergleich der Ergebnisse der Spannbetonlitze	142
3.3.4.3	Versuche mit Messmodul in einem Bohrrohr	143
3.3.4.4	Einfluss von Magnetfeldern unterschiedlicher Stärke auf das Messsignal	145
3.3.4.5	Einfluss von magnetisch dotiertem Zement und Mag-Logs auf das Messsignal	148
3.3.4.6	Kosten der Methode	152
3.3.4.7	Fazit	152
3.3.5	<i>Magnetkugeln als Kontrastmittel</i>	153
3.3.5.1	Untersuchung der Methode	153
3.3.5.1.1	Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	153
3.3.5.1.2	Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder.....	157
3.3.5.1.3	Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)	161

3.3.5.1.4	Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder	163
3.3.5.2	Vergleich der Ergebnisse der Magnetkugeln	165
3.3.5.3	Versuche mit Messmodul in einem Bohrrohr	166
3.3.5.4	Kosten der Methode	169
3.3.5.5	Fazit	169
3.3.6	<i>Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung</i>	170
3.4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	179
4	VERLAUFSMESSUNG (ENOWARE)	187
4.1.1	<i>Prototypentwicklung</i>	187
4.1.2	<i>Versuchsergebnisse</i>	189
4.1.3	<i>Messung an weiteren Testsonden, HW-Entwicklung und Anpassung des Algorithmus</i>	192
4.1.4	<i>Fazit</i>	199
4.2	TECHNIKUMSVERSUCH	201
5	PRAXISTEST	203
5.1	BOHRTECHNIK	203
5.1.1	<i>Stand der Technik auch im Hinblick auf den Rückbau</i>	203
5.1.2	<i>Konzept für Rückbau</i>	205
5.1.3	<i>Erdwärmesonde in Neuweiler</i>	205
5.1.4	<i>Abweichungen von Bohrungen und Mögliche Radian der Bohrgestänge</i>	209
5.1.5	<i>Fazit</i>	211
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	212
7	WISSENSTRANSFER	213
8	WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS DEM ZUWENDUNGSEMPFÄNGER BEKANNTGEWORDENE FORTSCHRITTE AUF DIESEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	215
9	BEITRAG DER ERGEBNISSE ZU DEN ZIELEN DES FÖRDERPROGRAMMS DES ZUWENDUNGSGEBERS	215
10	NUTZEN, INSBESONDERE PRAKTISCHE VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE UND ERFAHRUNGEN	215

11	LITERATUR	216
12	ANHANG	220

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Feldlinien einer langen zylindrischen Spule mit eng aneinanderliegenden Windungen (links) und eines geometrisch vergleichbaren Naturmagneten (rechts) (nach Moeller et al. 2008).	10
Abb. 2:	Durch einen Pfeil gekennzeichnetes magnetisches Moment (erstellt nach Callister & Rethwisch 2013).	10
Abb. 3:	Veranschaulichung der magnetischen Momente, hervorgerufen (a) durch die Bahnbewegung eines Elektrons um einen Atomkern und (b) durch ein rotierendes Elektron (aus Callister & Rethwisch 2013).	11
Abb. 4:	(a) Zylinderförmige Spule im Vakuum und (b) Zylinderförmige Spule mit Werkstoff (modifiziert nach Guy 1976).	12
Abb. 5:	(a) Anordnung atomarer Dipole in einem diamagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld. Ohne äußerem Feld existieren keine Dipole. Durch ein äußeres Feld werden Dipole induziert, die sich antiparallel zur Feldrichtung orientiert. (b) Anordnung atomarer Dipole in einem paramagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld (aus Callister & Rethwisch 2013).	14
Abb. 6:	Schematische Darstellung der wechselseitigen Ausrichtung atomarer Dipole in einem ferromagnetischen Werkstoff, die auch in Abwesenheit eines äußeren Magnetfelds zu beobachten ist (aus Callister & Rethwisch 2013).	16
Abb. 7:	Magnetfeldlinien der Erde, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne in der Umgebung einer homogen magnetischen Kugel. Die Feldlinien gehen vom magnetischen Nordpol aus, der sich in der Nähe des geografischen Südpols befindet, und laufen im magnetischen Südpol (nahe dem geografischen Nordpol) wieder zusammen (Tipler & Mosca 2015).	17
Abb. 8:	Der Hall-Effekt. Das Magnetfeld zeigt in die Papierebene hinein, wie die Kreuze angeben. Wenn der Strom von links nach rechts fließt, übt das Magnetfeld eine nach oben gerichtete Kraft aus – gleichgültig, ob es sich a) um positive Ladungsträger handelt, die sich nach rechts bewegen, oder b) um negative Ladungsträger, die sich nach links bewegen (aus Tipler & Mosca 2015).	19
Abb. 9:	Schema eines Fluxgatesensors. S kennzeichnet die Sendespule, E die Empfängerspule (modifiziert nach Richter n.d.).	20
Abb. 10:	Feldverteilung unterschiedlicher Ladungsträger (nach Vogel 1999).	23
Abb. 11:	Feldverteilung punktförmiger Ladungsträger im heterogenen Untergrund (nach Knödel et al. 1997).	24

Abb. 12:	Messprinzip der Axialsonden, S = Sonde, T [Tesla], x = Anzeigewert.	29
Abb. 13:	Cem Trakker Messkoffer mit Display und Kabeltrommel mit Messsonde (Sanherr Geothermietechnik).	30
Abb. 14:	Rührwerk und Utensilien für die Suspensionsherstellung.	32
Abb. 15:	A: Magnetisierungsstand (452 mm hoch) mit GA und eingebautem Sondenrohr, B: GA mit geöffneten Schächten und Neodym-Magneten (chromfarben) 60x30x15 mm.....	34
Abb. 16:	Maßstabgetreue Darstellung des Querschnitts A-A` (Sondenrohrlänge nicht Maßstabsgetreu) durch GA.	34
Abb. 17:	Magnetfeldlinien um einen geraden stromdurchflossenen Leiter (A), Magnetfeldlinien als Querschnitt um zwei parallele Leiter mit entgegengerichteten Strömen (B), (modifiziert nach Gerthsen 2015).....	35
Abb. 18:	Magnetfeld zweier parallel angeordneter Stabmagneten aus dem KA, Kunststoffgefäßes Ø 43 mm.....	36
Abb. 19:	Roter Einsatz (Ø 4 cm) zur Messung des Magnetfelds in GA und KA (hier in GA) (A), Nahaufnahme des Einsatzes mit 5 Messpunkten (B).	36
Abb. 20:	Verteilung der magnetischen Flußdichte im GA in Abhängigkeit von der Polarität (Roter Einsatz = Ø 4 cm).	37
Abb. 21:	Verteilung der magnetischen Flußdichte im KA in Abhängigkeit von der Polarität (Roter Einsatz = Ø 4 cm).	38
Abb. 22:	Polarität und Stärke des Magnetfelds entlang der Aufnahmebohrung der Magnetaufsätze. Orangene Pfeile zeigen jeweils die Betragzunahmerichtung in den einzelnen Sektoren (S1-S6). Der Aufsatz ist maßstabsgetreu für GA dargestellt. Die Sektordimensionen sind ebenfalls maßstabsgetreu und gelten für beide GA und KA. S = Sensorausrichtung in allen Sektoren. Messwerte der Sektorengrenzen sind für GA und KA (Werte in Klammern) angegeben.	39
Abb. 23:	Magnetfeldlinien (GA) an der Sektorgrenze S1/S2 bzw. S5/S6 aus der (A) Profilsicht und (B) Draufsicht (Schalen Ø = 10 cm).....	40
Abb. 24:	Schematisches Magnetfeld der Aufsätze (nicht Maßstabsgetreu).	41
Abb. 25:	Messstand (295 x 295 mm Grundfläche) mit einem Sondenrohr in der Mitte. Rechts im Bild das Teslameter FM 302 mit GEO-X Messsonde, die in einem Messport steckt. Vor der Platte stehen 5 Adapter-Einsätze (Sondenport zu Messport).	42
Abb. 26:	Messstand (Grundplatte) mit individuellem Sondenrohr und Gußeisenzylinder.....	43
Abb. 27:	Messstand (Grund- und Kopfplatte) mit Gußeisenzylinder.	44
Abb. 28:	Technische Zeichnung der Grundplatten- und Kopfplatten Oberseite in Mastercam Software (Angaben in mm).....	45

Abb. 29:	Schnitt A-A' (Maßstabsgetreu), Szenario = 1 Rohr Mitte mit Zylinder, 1 = Kopfplatte, 2 = Grundplatte, 3 = Sondenrohr, 4 = Stöpsel, 5 = Gußeisenzylinder, Angaben in [mm].....	46
Abb. 30:	Technische Zeichnung der Kopfplattenunterseite in Mastercam Software (Angaben in mm).	47
Abb. 31:	Koordinatensystem der Grundplatte (entspricht auch der Kopfplatte).	48
Abb. 32:	Mittlere Wertebereiche bzw. Einzelwerte des spezifischen elektrischen Widerstands und der Dielektrizitätskonstante (nach Schön 1983).	48
Abb. 33:	Versuchsaufbau zur elektrischen Widerstandsmessung.	51
Abb. 34:	Bohrkopf für Laborversuch zur elektrischen Widerstandsmessung.	51
Abb. 35:	Installierter Bohrkopf im Eisenrohr (links), Messskala zur Orientierungsbestimmung des Bohrkopfs (rechts).	52
Abb. 36:	Skizze des schwenkbaren Fußes des Technikumsversuchsstands zur Verlaufsmessung.	52
Abb. 37:	Aufbau des Technikumsversuch zur Positionsmessung.	53
Abb. 38:	Von links nach rechts: (1) 100 g/l Bentonit, (2) 100 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (3) 125 g/l Bentonit+ 200 g/l CEM1, (4) 150 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (5) 180 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (6) 210 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (7) 250 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (8) 300 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1.	55
Abb. 39:	Von links nach rechts: (1) 150 g/l Bentonit +100 g/l CEM1 (2) 200 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1, (3) 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1.	56
Abb. 40:	Absetzmaßbestimmung in 250 ml Standzylinder für die Suspension mit 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1. Rechts der Stand nach 3 h entsprechend LQS EWS (ca. 1 ml Abnahme entsprechend 0,4 Vol. %).	57
Abb. 41:	Messung der Flussdichte eines jeweils mit Magnetit und Nano-Eisen Pulver gefüllten PE-Verfüllrohrs (Ø 25 mm, 100 mm lang).	58
Abb. 42:	Rezept: 220 g/l Bentonit, 100 g/l Zement, 60 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Nord“.	60
Abb. 43:	Rezept: 220 g/l Bentonit, 100 g/l Zement, 60 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	61
Abb. 44:	Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Nord“.	63
Abb. 45:	Magnetisierung einer Spritze im Feld des Magnetaufsatzes (A), Injektionsszenario mit Aufsatz ohne Magneten und untergestelltem Sondenrohr (B); Höhe Magnetisierungsstand 452 mm.	65
Abb. 46:	Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR Methode mit GA „Nord“.	66

Abb. 47:	Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR + MIR Methode mit GA „Nord“	67
Abb. 48:	Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Nano-Eisenpulver (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR Methode mit GA „Nord“	68
Abb. 49:	Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Nano-Eisenpulver (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR+MIR Methode mit GA „Nord“	69
Abb. 50:	Von links nach rechts : Maßstab, Sondenrohr für Magnetisierungs- und Messstand, Gardena Cord-Schlauch gefüllt mit \varnothing 15 mm Kohlenstoffstahlkugeln, Einzelne Kohlenstoffstahlkugel.	71
Abb. 51:	\varnothing 15 mm Chromstahlkugeln im Schlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	73
Abb. 52:	\varnothing 15 mm Chromstahlkugeln im Schlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Süd“	74
Abb. 53:	Links Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte Stahldrahtseil \varnothing 5 mm.	77
Abb. 54:	Zwei \varnothing 5 mm Stahldrahtseilstücke durch einen Schrumpfschlauch \varnothing 6,4/ \varnothing 3,2 mm miteinander verbunden.	77
Abb. 55:	Purer Sand, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	78
Abb. 56:	Purer Sand, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“	79
Abb. 57:	Zement (W/F = 0,4), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	80
Abb. 58:	Zement (W/F = 0,4), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“	81
Abb. 59:	Mit Schrumpfschlauch ummanteltes Stahldrahtseile (\varnothing 5 mm) im Sondenrohr (\varnothing 25 mm) mit Sand ausgefüllt (Querschnitt bzw. Draufsicht).....	82
Abb. 60:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	82
Abb. 61:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“	83
Abb. 62:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U), MIR mit GA „Süd“	84
Abb. 63:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“	85
Abb. 64:	Erweiterung der Grundplatte in negativer Y-Richtung entlang X = 5, durch Ansetzen der Kopfplatte.....	87

Abb. 65:	Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).	88
Abb. 66:	Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.	89
Abb. 67:	30 cm vertikal Profil zum verfahren der Kopfplatte.	90
Abb. 68:	Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte ,Nicht magnetisiert (NM).	91
Abb. 69:	Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.	92
Abb. 70:	Versuchsaufbau zur Ermittlung der Richtungsabhängigkeit des magnetischen Signals durch den Eisenzylinder.....	93
Abb. 71:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.	95
Abb. 72:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.	96
Abb. 73:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.	97
Abb. 74:	\varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.	97
Abb. 75:	Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).....	98
Abb. 76:	Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.	99
Abb. 77:	Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).	100
Abb. 78:	Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.	101
Abb. 79:	Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) für alle Messpunkte des lateralen Profils ($X/Y = 5/5 - > X/Y = 5/-11$) auf Basis einer Stichprobe von $n = 31$, MIR mit GA „Süd“.....	103
Abb. 80:	Standardabweichungen (2σ) für das Profil $X/Y = 5/5 -> X/Y = 5/-11$ mit Darstellung der natürlichen Hintergrundschwankungen ohne Probe.	103
Abb. 81:	Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) für alle Messpunkte des vertikalen 30 cm Profils an Koordinate $X/Y = 5/5$ (Stichprobe von $n = 31$, MIR mit GA „Süd“).	104

Abb. 82:	Standardabweichungen (2σ) für das vertikale 30 cm Profil an Koordinate X/Y = 5/5 mit Darstellung der natürlichen Hintergrundschwankungen ohne Probe.....	105
Abb. 83:	Links: Ungestörtes Feld eines Hufeisenmagneten, Rechts: Feld eines Hufeisenmagneten mit vorgestellter Eisenplatte (aus Benischke 1907).	109
Abb. 84:	Stabmagnet mit Feldlinien und 2 lateralen Profilen (modifiziert nach Moeller et al. 2008).....	109
Abb. 85:	Vergleich der Messsignalreichweite eines \varnothing 5 mm Stahldrahtseils im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert (NM) und MIR mit KA und GA.	112
Abb. 86:	Vergleich der Messsignalreichweite eines \varnothing 8 mm Stahldrahtseils im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert und MIR mit KA und GA.	113
Abb. 87:	Wertebereich der magnetischen Suszeptibilitäten verschiedener Gestein (aus Schön 1983).	115
Abb. 88:	Versuchsaufbau, Box (H x B x L = 230 x 405 x 565 mm).	116
Abb. 89:	Versuchsaufbau gefüllt mit trockenem Sand (links) und mit wassergesättigtem Sand (rechts).	116
Abb. 90:	Versuchsaufbau gefüllt mit trockenem Bentonit (links) und mit wassergesättigtem Bentonit (rechts).	117
Abb. 91:	Versuchsaufbau ohne Gestein (links) und Versuchsaufbau mit Granitblock (rechts).	118
Abb. 92:	Versuchsaufbau mit Buntsandstein.....	120
Abb. 93:	(A) 1080 mm langes Bohrrohr (168,0 x 7,1 mm) mit 360 ° Skala, (B) Unfertiges drehbares Messmodul (540 mm hoch) mit Gradzeiger und Port für GEO-X Axial Sonde, (C) Fertiges Modul.....	121
Abb. 94:	(A) Innenansicht des Bohrrohrs (\varnothing 168 mm) mit einem Sondenrohr in der Mitte und einem Kunststoffzylinder als Lauffläche für das Messmodul, (B) Messmodul im Bohrrohr.	122
Abb. 95:	Messergebnisse mit einem magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) \varnothing 5 mm Stahldrahtseil von 0 – 350 ° in μ T.....	123
Abb. 96:	Messergebnisse mit einem magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) \varnothing 8 mm Stahldrahtseil von 0 – 350 ° in μ T.....	124
Abb. 97:	I Δ BI in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrrohr.	125
Abb. 98:	Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) der Referenzmessung in μ T für alle Messpunkte des Basisniveaus von 0 – 350 ° mit einer Stichprobe von n = 31.	126
Abb. 99:	Bohrrohr und nebenstehend sandgefüllter Eimer mit Koch Erdwärmerohr 32,0 x 2,9 mm.	127
Abb. 100:	Durchsichtige Kunststoffzylinder (7 Stück übereinander, je 134 mm) neben Bohrrohr und Erdwärmerohr.	129

Abb. 101:	Abstände des Erdwärmerohrs zur Bohrrohraußenwandung in Abhängigkeit zur Tiefenlage des Messmoduls im Bohrrohr. Abstände abgelesen bei einem ΔBI von $2,5 \mu T$, Kontrastmittel: $\varnothing 5$ mm und 8 mm Stahldrahtseil, MIR mit GA „Süd“.....	130
Abb. 102:	Feld eines Stabmagneten mit 3 Positionen eines Flussdichtesensors auf einer Linie parallel zur Stabmagnetlängsachse.....	130
Abb. 103:	Links Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte Spannbetonlitze $\varnothing 15,6$ mm.	134
Abb. 104:	$\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.....	135
Abb. 105:	$\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.....	136
Abb. 106:	Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte ,Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.....	137
Abb. 107:	Vertikale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte ,Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.....	138
Abb. 108:	$\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.	139
Abb. 109:	$\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.....	140
Abb. 110:	Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Eisenzylinder, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.....	141
Abb. 111:	Vertikale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Eisenzylinder, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.....	142
Abb. 112:	Messergebnisse mit magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitzten von $0 - 350^\circ$ in μT	143
Abb. 113:	ΔBI in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrrohr.....	144
Abb. 114:	Abstände des Erdwärmerohrs zur Bohrrohraußenwandung in Abhängigkeit zur Tiefenlage des Messmoduls im Bohrrohr. Abstände abgelesen bei einem ΔBI von $2,5 \mu T$, Kontrastmittel: Spannbetonlitze, MIR mit GA „Süd“.....	145
Abb. 115:	Vergleich der Messsignalreichweite der Spannbetonlitzten, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA und KA „Süd“.....	146
Abb. 116:	(A) Versuchsaufbau mit trockenem Sand und Kunststoffzylinder ($\varnothing 10$ cm) um Sondenrohr vor der Verpressung, (B) Versuchsaufbau nach Eingabe der Füllbinder H-hs Suspension; Cem Trakker Sonde in Sondenrohr eingelassen.....	149
Abb. 117:	Links: Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte: Neodym-Magnetkugelskette bestehend aus $11 \times \varnothing 12,7$ mm Kugeln.....	153

Abb. 118:	Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte nur mit Magnetkugeln bestückt.....	155
Abb. 119:	B-Feld einer Magnetkugel	155
Abb. 120:	Mit Holzklötzen aufgestockte Kopfplatte.....	156
Abb. 121:	Laterale Messsignalreichweite Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + Ø 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Subszszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.....	158
Abb. 122:	Vertikale Messsignalreichweite Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + Ø 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Subszszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.....	160
Abb. 123:	Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte nur mit Magnetkugeln bestückt und mit Zylinder, Probe A & B.....	162
Abb. 124:	Laterale Messsignalreichweite Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + Ø 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder und Subszszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.....	163
Abb. 125:	Vertikale Messsignalreichweite Ø 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + Ø 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder und Subszszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.....	164
Abb. 126:	Potenzfunktionen zur Beschreibung der prozentuellen Abnahme der lateralen und vertikalen Messsignalreichweite.....	166
Abb. 127:	ΔBI in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrrohr.	167
Abb. 128:	Abstände des Erdwärmerohrs zur Bohrrohraussenwandung in Abhängigkeit zur Tiefenlage des Messmoduls im Bohrrohr. Abstände abgelesen bei einem ΔBI von 2,5 μT, Kontrastmittel: Verschiedene Magnet (M)- und Stahlkugel (K) Szenarien.....	169
Abb. 129:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 1 (Sand/Sand/trocken/Rezept 1), (Genauigkeit ±(1,0 %+5)).	172
Abb. 130:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 2 (Sand/Sand/nass/Rezept 1), (Genauigkeit ±(1,0 %+5)).	173
Abb. 131:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 3 (Sand/Sand/gesättigt/Rezept 1), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).	174
Abb. 132:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 4 (Sand/Sand/nass/Rezept 4), (Genauigkeit ±(1,0 %+5)).	175
Abb. 133:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 5 (Sand/Sand/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).	176

Abb. 134:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 6 (Sand/Schluff/nass/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,35 %+3)).	176
Abb. 135:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 7 (Sand/Schluff/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).	177
Abb. 136:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 8 (Sand/Ton/nass/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).	177
Abb. 137:	Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 9 (Sand/Ton/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).	178
Abb. 138:	Vergleich der durchschnittlichen lateralen Signalreichweiten der Stahldrahtseile (GA „Süd“), Spannbetonlitzen (GA „Süd“) und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Szenarien im Bohrrrohr, bei Bestückung eines Sondenstrangs.	180
Abb. 139:	Vergleich der Materialkosten der Stahldrahtseile, Spannbetonlitzen und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Methode für eine Standard 100 m EWS mit der Bestückung eines Sondenstrangs.	181
Abb. 140:	Vergleich der durchschnittlichen vertikalen Signalreichweiten der Stahldrahtseile (GA „Süd“), Spannbetonlitzen (GA „Süd“) und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Szenarien im Bohrrrohr bei Bestückung eines Sondenstrangs.	182
Abb. 141:	Bohrkof (Stufenmeißel) für Realanwendung zur elektrischen Widerstandsmessung.	185
Abb. 142:	Kraftdrehkopf mit Schleifring zur Übertragung der Widerstandsmesswerte.	186
Abb. 143:	Kabelgebundener Prototyp zur Lagebestimmung von Erdwärmesonden (geöffnetes Sensorsystem).	188
Abb. 144:	Blockdiagramm zur Auswertung der Messsignale (Erläuterungen zur Quarternionen siehe in Madgwick 2011).	189
Abb. 145:	Teststrecke im Treppenhaus.	190
Abb. 146:	3D Darstellung des Messverlaufs im Sondenrohr.	191
Abb. 147:	Draufsicht auf die Messung im Sondenrohr (Auflösung im mm Bereich).	192
Abb. 148:	Black-Box für Verlaufssensor.	193
Abb. 149:	Sensorgehäuse für Lagesensor konstruiert als CAD-Modell	194
Abb. 150:	Druckkammer zum Testen der Druckfestigkeit des Gehäuse und der Kabeldurchführung (rechts)	194
Abb. 151:	Oberfläche der LabView Anwendung zum Auslesen der Messdaten	195
Abb. 152:	Prototypelektronik des Verlaufssensor nach der kompletten Bestückung	195
Abb. 153:	Messung mit Verlaufssensor (links) und Prototyp Verlaufssensor (rechts)	196

Abb. 154: Messung mit dem Verlaufssensor an einer 8m Teststrecke	197
Abb. 155: Messung mit dem Verlaufssensor an einer 100m Erdwärmesonde.	198
Abb. 156: Referenzmessung des 100m Bohrlochs.....	199
Abb. 157: Aufbau des Technikumsversuch zur Positionsmessung.	202
Abb. 158: Ausführung der EWS-Testbohrung.....	206
Abb. 159: EWS-Verfüllprotokoll	207
Abb. 160: Bohrprofil der EWS	208
Abb. 161: Verlauf einer Erdwärmesonde.....	210

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Magnetische Volumenssuszeptibilität einiger dia-, para- und ferromagnetischer Minerale (aus Schreiner & Kreysing 1998).	17
Tab. 2: Die Hauptklinkerphasen (Stark & Wicht 2013).....	26
Tab. 3: Kennwerte des Schwenk Füllbinder H-hs plus (Schwenk).....	28
Tab. 4: Rezepturen der elektrisch leitfähigen Kontrastmittel bezogen auf 1 l Wasser:	50
Tab. 5: 2 σ -Werte für zwei Messpunkte auf Grund- und Kopfplatte (keine Probe).....	62
Tab. 6: ΔB Max./Min. Anomalien auf Grund- und Kopfplatte für 6 identische magnetisierte Proben.	75
Tab. 7: Zuordnung der X/Y-Koordinaten des Messstands zu Profildistanzen.	89
Tab. 8: Messergebnisse zur Bestimmung der Richtungsabhängigkeit des magnetischen Messingals durch den Eisenzylinder (B in μT) (Zyl = Zylinder, Ref = Referenz).	94
Tab. 9: Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab 1,5 μT (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).....	107
Tab. 10: Zusammenfassung der vertikalen Signalreichweiten für \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab 1,5 μT (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).....	110
Tab. 11: Zusammenfassung der Messergebnisse (Sand)	117
Tab. 12: Zusammenfassung der Messergebnisse (Bentonit)	118
Tab. 13: Zusammenfassung der Messergebnisse (Granit)	119

Tab. 14:	Zusammenfassung der Messergebnisse (Buntsandstein)	120
Tab. 15:	Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für magnetisierte \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab 2,5 μ T (*4 mal gemessen, jeweils mit einem anderen Stahldrahtseil).	128
Tab. 16:	Zusammenfassung der lateralen und vertikalen Signalreichweiten für die Spannbetonlitze, Signifikantes Signal ab 1,5 μ T (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).....	142
Tab. 17:	Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für die Spannbetonlitze, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA und KA „Süd“. Signifikantes Signal ab 1,5 μ T (OZ = Ohne Zylinder, NM = Nicht magnetisiert, KA = Magnetisiert mit kleinem Aufsatz, GA = Magnetisiert mit großem Aufsatz, Pot = Potenzfunktion, Exp = Exponentialfunktion).....	147
Tab. 18:	Schritte und Ergebnisse des Einflusses des Zements bzw. des Cem Trakkers auf das laterale Messsignal der Spannbetonlitze (CT = Cem Trakker, SBL = Spannbetonlitze).	149
Tab. 19:	Laterale Signalreichweiten der Subszzenarien	159
Tab. 20:	Vertikale Signalreichweiten der Subszzenarien	160
Tab. 21:	Laterale Signalreichweiten der Subszzenarien mit Zylinder	163
Tab. 22:	Vertikale Signalreichweiten der Subszzenarien mit Zylinder	165
Tab. 23:	Zusammenfassung der lateralen und vertikalen Signalreichweiten mit und ohne Zylinder für verschiedene Subszzenarien (Szenario = 1 Rohr Mitte) (L = lateral, V = vertikal, OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder).	165
Tab. 24:	Zusammenfassung der vertikalen Signalreichweiten im Bohrrrohr (M = Magnetkugel, K = Stahlkugel).	167
Tab. 25:	Versuchsbedingungen bei der elektrischen Widerstandsmessung.....	170
Tab. 26:	Spezifischer Widerstand der verwendeten Lockersedimente und Baustoffe.	171
Tab. 27:	Tabellarische Daten ausgewählter Tiefenmesspunkte (cm Auflösung).	191

Verzeichnis des Anhangs

Anhang A: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.	220
Anhang B :Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.	221
Anhang C: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U), MIR mit GA „Süd“.	222
Anhang D: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.	222
Anhang E: Laterale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).	223
Anhang F: Laterale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.....	224
Anhang G: Vertikale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).	225
Anhang H: Vertikale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“	226
Anhang I: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.	227
Anhang J: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“	228
Anhang K: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“	229
Anhang L: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“	229
Anhang M: Laterale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).....	230
Anhang N: Laterale Messsignalreichweite Ø8,0 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“	231
Anhang O: Vertikale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).	232
Anhang P: Vertikale Messsignalreichweite Ø 8 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“	233

Anhang Q: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KMKM.....	234
Anhang R: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KMKMKM.....	235
Anhang S: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKMKKKM.....	236
Anhang T: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKMKKKKM.....	237
Anhang U: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KMKM.....	238
Anhang V: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KMKMKM.....	239
Anhang W: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KKKMKKKM.....	240
Anhang X: \emptyset 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \emptyset 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKMKKKKM.....	241
Anhang Y: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 1.	242
Anhang Z: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 2.	243
Anhang AA: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 3.	244
Anhang BB: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 4.	245
Anhang CC: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 5.	250
Anhang DD: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 6.	255
Anhang EE: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 7.	260
Anhang FF: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 8.	265
Anhang GG: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 9.	270

Symbole

A	Querschnittsfläche	[m ²]
B	magnetische Flussdichte	[Wb m ⁻² oder T]
B	Streifenbreite	[m]
B ₀	magnetische Flussdichte des Vakuums	[Wb m ⁻²]
d	Dicke des Leiters	[m]
E	elektrisches Feld	[V/m]
E _H	elektrisches Hall-Feld	[V/m]
e	Betrag an Elektronen	[C]
F	Kraft	[N]
f _{Send}	Sendefrequenz	[Hz]
G	Leitwert	[1/Ω=S]
H	magnetische Feld	[A m ⁻¹]
I	Stromstärke	[A]
I ₀	Stromstärke	[A]
l	Länge	[m]
M	Magnetisierung	[A m ⁻¹]
N	Anzahl Windungen	[-]
N _{Empf}	Windungszahl der Empfängerspule	[-]
N _{Send}	Windungszahl der Sendespule	[-]
n	Gesamte Teilchenzahl	[-]
Q	Ladung	[C]
q	Ladung	[A s]

R	Widerstand	[Ω]
S	Strecke	[m]
S	Querschnitt der Empfängerspule	[m ²]
t	Zeit	[s]
U	Spannung	[V]
U _H	Hall-Spannung	[V]
V	Volumen	[m ³]
V _{ind}	Induzierte Spannung	[V]
v _d	Driftgeschwindigkeit	[m/s]
W	Arbeit	[N m]
μ	Permeabilität	[Wb A ⁻¹ m ⁻¹]
μ_0	Permeabilität des Vakuums	[Wb A ⁻¹ m ⁻¹]
μ_r	relative Permeabilität	[-]
ρ	spezifischer Widerstand	[Ω m]
σ	elektrische Leitfähigkeit	[1/(Ω m)]
χ_m	magnetische Suszeptibilität	[-]

1 Kurzfassung

1.1 Deutsche Kurzfassung

In dieser Arbeit wurden insgesamt fünf unterschiedliche magnetische Kontrastmittel auf Ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf die Orientierungsmessung zur Bohrausrichtung bei rückbaufälligen Erdwärmesonden (EWS) untersucht.

Mit Magnetit- oder Eisenpartikeln dotierte Zement-Bentonit Suspensionen stellten sich als ungünstig heraus, da sie zum einen ein zu schwaches magnetisches Signal, selbst nach einer gezielten induzierten Magnetisierung, aufwiesen, und zum anderen der nötige Vorgang der Magnetisierung und der darauffolgenden Injektion der Suspensionen in die Sonde als nicht praktikabel bewertet werden konnte. Dies lag daran, dass die aus der Magnetisierung resultierende Ausrichtung der ferromagnetischen Partikel, durch die anschließende Injektion der Suspension in eine EWS und der damit einhergehenden ungeordneten Magnetitverteilung quasi wieder aufgehoben wird.

Stahlkugeln können für den Anwendungsfall ebenfalls als weniger geeignet bewertet werden. Bei den Stahlkugeln ist das Handling im Hinblick auf deren Magnetisierung und Eingabe in eine EWS nicht ausreichend praktikabel bzw. nicht mit einem angemessenen Kosten/Nutzen Verhältnis durchführbar, so dass auch diese ungünstig bewertet wurden.

Die drei übrigen untersuchten Methoden, die Stahldrahtseile, Spannbetonlitzen und Magnet/Stahlkugelketten umfassten, erscheinen allesamt als brauchbare Methoden für das geplante Rückbaukonzept. Unter diesen drei Methoden ist es jedoch möglich, das Verfahren mit der Spannbetonlitze als günstigste Methode für den Anwendungsfall zu identifizieren.

Bei einer Gegenüberstellung von Kosten für das reine Kontrastmittel für eine Standard 100 m EWS und der effektiven Signalreichweite, konnte insbesondere die $\varnothing 15,7$ mm Spannbetonlitze als am besten geeignet identifiziert werden. Eine solche Variante würde nur 325 € reine Materialkosten bedeuten, bei einer ausreichenden lateralen Signalreichweite von max. 80 cm und einer vertikalen Reichweite von ~ 65 cm. Nur Lösungen aus Stahlkugel (K) / Magnetkugel (M)- Ketten konnten diese Reichweiten noch etwas überbieten, allerdings zu einem wesentlich höheren Preis. So könnte die laterale Signalreichweite, mit einer ausschließlich aus Magnetkugeln bestehenden Kugelkette, nur um max. 25 cm gegenüber der Spannbetonlitze erweitert werden, allerdings bei Kosten von 10.000 € für eine 100 m EWS. Im Rahmen von 10.000 € sollten sich die Gesamtkosten für das neue Rückbaukonzept bewegen, somit ist eine K/M-Variante weniger geeignet. Außerdem hat die Spannbetonlitzenmethode den zusätzlichen Vorteil gegenüber allen anderen Varianten, dass Sie zwei Submethoden zur Bohrausrichtung vereint. Eine mechanische Methode, bei der die Spannbetonlitze als Führung für das Bohrgerät genutzt werden kann, und eine messtechnische Bohrausrichtungskomponente, bei der die magnetische Messung eine Neujustierung der

Bohrausrichtung ermöglicht. Zudem besteht nur bei der Spannbetonlitze die Möglichkeit, dass eine noch stärkere Magnetisierung als in dieser Arbeit (40 mT), hervorgerufen werden könnte, indem eine noch stärkere magnetische Prägung auf die Spannbetonlitze induziert wird. In diesem Vorhaben wurde die Signalreichweite des Spannbetonlitz-Verfahrens durch die zusätzliche Magnetisierung um im Schnitt 29,1 % lateral und 40,4 % vertikal gegenüber dem initialen Eigensignal verstärkt.

Die Kosten für eine kommerzielle Anlage zur Magnetisierung für den Feldeinsatz, um die Spannbetonlitze zu magnetisieren, können derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden, da im Feld möglicherweise noch andere und zusätzliche technische Anforderungen erfüllt werden müssen im Vergleich zu einer Magnetisierung im Labormaßstab. Ein einfacher Magnetaufsatz oder Adapter am Eingang eines Sondenstrangs wäre jedoch denkbar, durch den dann die Spannbetonlitze bei gleichzeitiger Magnetisierung in den Sondenstrang abgelassen werden kann. Die Kosten für den in dieser Arbeit als Einzelfertigung hergestellten Magnetaufsatz können mit ~5.400 € - 7.600 € im Falle eines Feldeinsatzes abgeschätzt werden, wobei eine solche Magnetisierungsvorrichtung eine Investition für eine mehrmalige Verwendung in Rückbauprojekten darstellen würde und somit die Kosten nicht erheblich wären.

Weiterhin wurde im Rahmen des Projektes der Einfluss einer vorhandenen Hilfsverrohrung auf die Messmethoden untersucht, da bei einem gegebenen Sanierungsfall im komplexen Untergrund damit gerechnet werden kann, dass die Bohrung bis in Endteufe mit einer Hilfsverrohrung durchgeführt werden muss. Das würde bedeuten, dass mit dem Richtbohrtool nicht im offenen Bohrloch die Ausrichtung gemessen werden kann. Hierbei zeigte sich, dass die Messsignale der Spannbetonlitze durch die Verrohrung um ~30-35 % verringert werden, wobei die Messsignale immer noch eine ausreichende Ausrichtung ermöglichen sollten.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Signalreichweiten ist die Verwendung größerer Seildurchmesser, da somit die Signalreichweite bis zu einem gewissen Grad erweitert werden kann. Diese Tatsache konnte mit den $\varnothing 5$ mm und $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseilen nachgewiesen werden. So hatten die magnetisierten und nicht magnetisierten $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseile durchweg bei allen Experimenten immer eine größere Signalreichweite gegenüber den $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseilen. Dieser Vergleich funktioniert natürlich nur unter der Bedingung, dass die Seile aus einem identischen Stahl hergestellt sind. Sind es unterschiedliche Stähle ist ein Vergleich schwierig, da jeder Stahl über andere magnetische Eigenschaften verfügen kann. Mit $\varnothing 15,7$ mm ist die Spannbetonlitze sicherlich an der Durchmessergränze angelangt, die noch problemlos in eine EWS eingebracht werden kann. Verbesserungen des Messsignals könnte noch über die Auswahl stärker ferritischer Stähle erreicht werden. Diese müssten dann aber sowohl auf die mechanischen Beanspruchungen während des Bohrvorgangs sowie auf bessere Magnetisierbarkeit abgestimmt sein.

Sehr wichtig ist auch hervorzuheben, dass für den Anwendungsfall im Gelände, (und das gilt für alle in dieser Arbeit untersuchten Kontrastmittel) immer eine Referenzmessung des natürlichen Magnetfelds notwendig ist, um letztlich das magnetische Signal der eingesetzten Kontrastmittel herausfiltern zu können. Dies kann z.B. durch ein tiefenorientiertes, magnetisches Vorab-Logging in der rückbaufälligen EWS durchgeführt werden, sowie auch später innerhalb der Rückbaubohrung mit dem Bohrlochmesstool, in einem Tiefenbereich außerhalb der vertikalen Signalreichweite des in die Sonde eingebrachten Kontrastmittels.

In dieser Arbeit konnten keine signifikanten Störeinflüsse aufgrund geologischer Einflüsse auf das Messsignal nachgewiesen werden. Versuche wurden hierzu repräsentativ für alle anderen Kontrastmittel mit den $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseilen durchgeführt. Generell kann bereits auf theoretischem Weg ein Einfluss bei einer Vielzahl von Szenarien ausgeschlossen werden, da nur ferromagnetische Materialien wirklich das Potential für Störeinflüsse haben, und diese sind in der Natur relativ selten. So können viele Sedimente, wie Sand und Ton und entsprechende Gesteine, ob nun trocken oder wassergesättigt, als unproblematisch eingestuft werden. Dieses wurde in den umfangreichen Arbeiten auch experimentell bestätigt. Einflüsse können nur bei eisenhaltigen Gesteinen entstehen, wobei hier natürlich der Eisengehalt in den gesteinsbildenden Mineralen sowie deren Anteil am Gestein selbst eine ausschlaggebende Rolle spielen. Beispielsweise dafür sind Granite, eisenhaltige Oolithe und Basalte. Die im Rahmen des Projektes getesteten natürlichen Störeinflüsse zeigten keine abweichenden Signale auf die getesteten Methoden. Es ist aber nicht auszuschließen, dass es bei bestimmten Untergrundbedingungen doch zu Beeinträchtigungen der auf magnetischen Messungen basierenden Rückbaumethode kommen kann. Deshalb kann es gegebenenfalls bei einem Rückbaufall sinnvoll sein, ein magnetisches Vorablogging durchzuführen, um Erkenntnisse über die tiefenorientierte Hintergrundmesswerte zu bekommen. In Laborversuchen können nicht alle Untergrundbedingungen nachgebildet werden, wie z.B. große Gesteinsvolumina mit hohem Anteil an z. B. ferritischen Mineralen, die dann doch signifikante Störeinflüsse hervorrufen könnten.

Neben dem Einfluss der geologischen Gegebenheiten wurde auch ein möglicher Einfluss von Magnetit dotiertem Zement (Schwenk Füllbinder H-hs plus) auf das magnetische Signal anhand der Spannbetonlitze untersucht.

Die Untersuchungen zeigten keinerlei Einfluss auf das Messsignal. Der Magnetitgehalt im Zement reicht nicht aus, um die Signale des Kontrastmediums zu stören. Auch bei gleichzeitiger Verwendung eines Suszeptibilitätsmessgerätes (Cem Trakker der Fa. Sanherr), das zur Abdichtungsprüfung in Kombination mit dotiertem Zement verwendet wird, konnten keine Einflüsse festgestellt werden. Die Messsonde sendet offensichtlich nur ein sehr schwaches magnetisches Signal in die Umgebung aus.

Die elektrische Widerstandsmessung hat gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist die Position einer einfachen U-Rohrsonde in einer Hilfsverrohrung zu lokalisieren. Dies war besonders im

Sand und Schluff der Fall. Es hat sich aber auch gezeigt, dass das Kontrastmittel an die umgebenden Bedingungen wie Geologie und Grundwasserbedingungen sowie die verwendeten Baustoffe (Art des Hinterfüllmaterials) anzupassen ist, da beispielsweise im Ton aufgrund dessen niedrigen spezifischen Widerstands keine Positionsbestimmung der Erdwärmesonde möglich war. So sollte das Kontrastmittel nicht zwingend einen niedrigen spezifischen Widerstand aufweisen sondern an die jeweiligen Standortbedingungen angepasst werden. Im Bereich von Gesteinen mit einem niedrigen spezifischen Widerstand wären Kontrastmittel mit einem sehr hohen spezifischen Widerstand sinnvoll. In diesen Fällen muss jedoch auch der spezifische Widerstand des Hinterfüllbaustoffs mit Berücksichtigung finden. Um diese Fragen zu klären besteht weiterer Forschungsbedarf. Weiterführende Untersuchungen waren jedoch im Rahmen des Forschungsprojektes nicht mehr möglich. Um die relevanten Fragen zu klären müssten weitere umfangreiche Untersuchungen im Labor-, Technikums- und Feldmaßstab erfolgen, da im Realfall sehr unterschiedliche und komplexe Bedingungen für die Widerstandmessung vorkommen. Dies hängt neben den unterschiedlichen spezifischen Widerständen der vorkommenden Gesteine, Hinterfüllbaustoffe und Erdwärmesonden auch von der Positionierung der Sondenrohre innerhalb der Bohrung, sowie von Bohrspülung und dem vorhandenen Wasser im Bohrloch ab.

2 Einleitung

2.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die zukünftige Entwicklung im Marktbereich der Erdwärmesonden (EWS) ist essentiell von geeigneten Strategien für einen sicheren, effizienten und kostengünstigen Rückbau insbesondere von problembehafteten Erdsonden abhängig. Deshalb ist es Ziel des Vorhabens Recover-EWS, innovative und kostengünstige Methoden zu entwickeln, die einen effizienten Rückbau sowie eine komplette Sanierung, d. h. einen Wiedereinbau („Recover“), von EWS ermöglicht.

Technische und damit aufwendige Rückbauverfahren stehen jetzt schon bedingt zur Verfügung (Überbohren mit großen Bohrdurchmessern, aufwendige Richtbohrverfahren während dem Bohren). Aber nur kostengünstigere Verfahren haben das Potential flächenhaft angewendet zu werden. Deshalb sollte im Rahmen des geplanten Vorhabens ein Richtbohrtool entwickelt werden, dass eine Korrektur und Ausrichtung gängiger Bohranlagen ermöglicht. Ein weiteres technisches Ziel des Vorhabens ist, ein Messsystem zu entwickeln, welches in der Lage ist, den Verlauf (bzw. Abweichungsmessung gegenüber der Vertikalen) von neuen und bestehenden EWS eindeutig und der Sondengeometrie angepasst zu vermessen.

In dem geplanten Vorhaben sollte ein komplett neues, einfaches Bohrlochmesstool entwickelt werden, welches sukzessive in das überbohrte EWS-Loch eingeführt werden kann und den kürzesten Abstand zur Sonde sicher ermittelt. Mit dem kürzesten Abstand kann dann jedes gängige Bohrgerät neu ausgerichtet werden. Das Bohrlochmesstool kann immer wieder zur Kontrolle eingeführt werden und somit der gerichtete Rückbau der Sonde überwacht werden. Die Abstandsmessung wird ermöglicht durch das Einbringen eines geeigneten Kontrastmittels, welches mit dem eingebrachten Bohrlochmesstool detektiert werden kann. Außerdem wird es durch eine Absolutmessung des Bohrverlaufs mit dem neuen Miniatursensorprinzip unterstützt. Zur Positionsbestimmung der Erdwärmesonde innerhalb des Bohrlochs stehen prinzipiell die Messung der magnetischen Suszeptibilität des Kontrastmittels, als auch elektrische Widerstandsmessungen zur Auswahl. Je nach Messmethode werden unterschiedliche Anforderungen an das Kontrastmittel gestellt.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der Entwicklung eines geeigneten Kontrastmittels. Als Kontrastmittel denkbar sind z.B. Eisenlösungen (Nano- Mikro-Eisenpartikel bzw. -kolloide), die zur Wasserreinigung und Bodensanierung (z. B. reaktive Wände) eingesetzt werden (z. B. Zhang 2003, Mueller & Novak 2010 und Mueller et al. 2012). Folgende Aspekte sollte das Kontrastmittel erfüllen:

- Unbedenklich für Boden und Grundwasser
- Gute Detektierbarkeit gegenüber magnetischer oder elektrischer Sensoren
- Günstige Anschaffung (nach Mueller & Novak 2010 können je nach Eisenanteil und Zusammensetzung für die Suspensionen die mittleren Kosten mit ~30-100 €/kg abgeschätzt werden, d. h. für eine 100 m Sonde müsste dann mit Kosten von 25-80 € pro Eisenlösung gerechnet werden).
- Stabil (homogene Verteilung in der Sonde)
- Gut pumpbar mit gängiger Ausrüstung am Bohrplatz

Als weitere Kontrastmittel sind thixotrope Flüssigkeiten (z. B. angereichert mit Magnetit) denkbar, die, wenn sie nicht mehr in Bewegung sind, einen stabilen und festen Aggregatzustand annehmen.

2.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Steuerbare Bohrverfahren (Richtbohrverfahren) haben in den letzten Jahren viele neue Anwendungsfelder erschlossen. Während in den 70er Jahren gesteuerte Bohrungen fast ausschließlich in den Bereichen Tiefbohrtechnik, Bergbau oder Kavernenbau zu finden waren, werden heute steuerbare Bohrverfahren auch im Felsbau und im großen Umfang oberflächennah zur Verlegung von Ver- und Entsorgungsleitungen eingesetzt (Eschke & Vorhoff 2004). Um die Bohrung gerichtet ausführen zu können, werden spezielle Messsysteme benutzt, die den Azimut und Inklination im Verlauf der Bohrarbeiten in der Nähe

des Bohrmeißels im Bohrstrang, das MWD (Measuring While Drilling, siehe z. B. Reich 2011) oder das LWD (Logging While Drilling), kontinuierlich messen. Diese Tools senden die Daten zur weiteren Auswertung an die Erdoberfläche und können dazu benutzt werden, die Ausrichtung des Bohrwerkzeuges zu verändern (auch automatisiert). Richtbohrverfahren sind auch zur Durchführung von Horizontalbohrungen essentiell und wurden im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte sukzessive verbessert (z. B. Copper 1994, Jurkov et al. 2011 und Liu et al. 2012, etc.). Die im Markt vorhandenen Richtbohrverfahren und –werkzeuge können prinzipiell zumindest teilweise zum Rückbau von Erdsonden eingesetzt werden. Beachtet werden muss aber, dass für gängige Richtbohrverfahren und –werkzeuge erhebliche Investitionen getätigt werden müssen. Im Offshore Magazin vom August 2012 (www.offshore-mag.com) sind die derzeit marktführenden Hersteller von Richtbohrverfahren, -steuerungen und –werkzeugen aufgelistet (z. B. die Firmen Schlumberger, Baker Hughes, Halliburton und viele andere). Rückbauverfahren, die speziell für Erdwärmesonden entwickelt worden sind, gibt es nach unserem Kenntnisstand keine.

Als ein weiteres zentrales Element im Vorhaben sollte ein Miniatorsensor entwickelt werden, der es erlaubt, in bestehenden und neu installierten Erdwärmesonden, eine einfache und kostengünstige Verlaufs- bzw. Orientierungsmessung (gleichzeitige Messung des Azimuts und der Inklination) durchzuführen. Nach eingängiger Recherche konnte ein entsprechendes Messgerät oder etwas Adäquates nicht gefunden werden. Eine Entwicklung für diesen Anwendungsfall wurde im Auftrag des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau in Freiburg durch die Fa. Eberbach Engineering in Gundelfingen gebaut und bei der Erkundung des Schadensfalls in Staufen eingesetzt. Die mögliche Ungenauigkeit von bis zu 7° zeigt jedoch die Grenzen des Systems und schließt einen Einsatz für die gewünschte Anwendung aus (1. Sachstandsbericht Staufen LGRB).

Für eine tiefenorientierte Temperaturmessung in Erdwärmesonden hat die Firma GEOWATT (mittlerweile strategischer Partner der enOware GmbH, Nimo-T ist jetzt baugleich mit dem GEOSniff) einen „Bohrlochmessfühler“ Nimo-T entwickelt, der mit einer dünnen ($\varnothing 23$ mm) länglichen Form senkrecht in eine Sonde eingelassen werden kann (Rohner et al. 2004). Das Nimo-T Messgerät muss nach Beendigung der Datenaufnahme mittels einer kleinen Pumpe wieder an die Oberfläche gespült werden und ist somit auf die Sondengeometrie angepasst. Aber es kann mit diesem Messgerät nicht die Orientierung und Verlauf der Sonden ermittelt werden. Klassische Inklinometermessungen sind Stand der Technik (z. B. Prinz & Strauss 2006) und können nur bedingt in Erdwärmesonden eingesetzt werden, denn die Orientierung der eingeführten Messstangen ist problematisch. Besser wäre der Einsatz von mobilen Deflektometermessketten, bei denen über gelenkig verbundene Stangen deren Winkelabweichung zueinander gemessen wird. Beide Verfahren können nur bedingt oder mit großem Aufwand Absolutmesswerte liefern. Im Vorhaben sollte deshalb mittels neuer elektronischer und mechanischer Verfahren Absolutmessungen von Sondenverläufen ermöglicht werden.

Ein Verfahren für die Sanierung von Erdwärmesonden wurde von der Keller Holding GmbH entwickelt und patentiert (Patentnr: DE 102010002064 B4). Vorrangiges Ziel des Verfahrens ist es bei fehlgeschlagenen Geothermiebohrungen, die verschiedene Grundwasser-Stockwerke miteinander verbunden haben, wieder eine zuverlässige Abdichtung zwischen den Stockwerken zu gewährleisten.

Im Verfahren wird eine Düsenvorrichtung auf die gewünschte Tiefe in ein Sondenrohr eingebracht, und mittels des Schneiddrucks eines Wasserstrahls werden Schlitze in das Sondenrohr entlang dessen Längserstreckung eingebracht. In diese Schlitze wird Bindemittel (z.B. Zement) injiziert, um den Ringraum und das umgebende Erdreich wieder abzudichten. Vorzugsweise erfolgt das Verfahren schrittweise, d.h., dass das Sondenrohr in einzelnen Teilabschnitten geschlitzt und verfüllt wird. Dies ist förderlich um einen hohen Druck beim Einpressen des Bindemittels, und somit ein tiefes Eindringen in den Ringraum und umgebendes Erdreich zu gewährleisten. Nach dem Verpressen eines Teilabschnitts wird das Sondenrohr jedes Mal von überschüssigem Bindemittel freigespült, um einen neuen Teilabschnitt wieder mit Schlitzen versehen zu können

2.3 Planung und Ablauf des Projektes

Innerhalb des Projekts Recover EWS konnten wichtige grundlegende Erkenntnisse für den kostengünstigen Rückbau einer EWS erzielt werden. Die als beste Lösung erarbeitete Technologie für den Sondenrückbau kann, sofern die komplette Fertigstellung erfolgt, erprobt und angewendet werden. Bei der Projektbearbeitung zeigte sich jedoch, dass der Aufwand die Gesamtlösung eines Sondenrückbaus erfolgreich zu testen, einer Weiterentwicklung der Messtechnologie wie auch der weiteren umfangreichen Erprobung bedarf. Innerhalb des verfügbaren Kosten- und Zeitrahmens war dies nicht möglich. Die Projektpartner sind jedoch sehr zuversichtlich, nach Bewertung der bisher erreichten Ergebnisse und Abschätzung der noch offenen Arbeitspakete und des Aufwandes, eine erfolgreiche kostengünstige Lösung für den Sondenrückbau erzielen zu können.

Die Zielsetzung des Vorhabens kann erreicht werden, wenn weitere Entwicklungsschritte durchgeführt werden.

- Bis dato konnte die verfügbare EWS bei Fa. Burkardt noch nicht mit der geplanten Technologie zurückgebaut werden. Dies hat folgende Gründe:
 - Die Genehmigung der Bohrung erfolgte erst zum September 2016
 - Das Verlaufsmesswerkzeug der enOware konnte aufgrund der erst zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Bohrung wie auch weiterer technischer Herausforderungen noch nicht den Status der Fertigstellung erreichen. Vor

dem Rückbau sind weitere umfangreiche Messungen im Vergleich zu vorhandenen Referenzmessung erforderlich.

- Ein geeigneter Bohrkopf für das Überbohren der EWS muss noch gefertigt werden
- Das Orientierungsmesstool mittels Magnetosensorik konnte noch nicht im Realmaßstabsversuch erprobt werden. Hierfür müssen auch noch mit der enOware Messtechnik weitere Messversuche erfolgen und ggf. Anpassungen in Software und Hardware für die Sensorik erfolgen.
- Der Verlaufssensor bedarf hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit von mindestens 0,5% weitere umfangreiche Softwareentwicklungen und Felderprobungen, die deutlich mehr Zeit erfordern, um die für den Rückbau erforderlichen Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere die Softwareentwicklung mit immer kontinuierlich durchzuführenden Feldtests zeigte sich im Projektverlauf als deutlich zeitintensiver als geplant.
- Für den effizienten Rückbau muss der Verlaufssensor drahtlos ausgeführt sein, was mit weiterem Entwicklungsaufwand und weiterer Felderprobung verbunden ist.

Eine weitere Test EWS soll zur Validierung des gesamten Rückbauverfahrens mit einem extra schrägen Bohrverlauf mit Referenzmessung gebohrt werden. Damit kann das Gesamtergebnis für den effizienten Rückbau als Projektergebnis erreicht werden.

2.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fand ein regelmäßiger Austausch mit dem Landesforschungszentrum Geothermie des Landes Baden-Württembergs (LFZG) statt.

3 Richtbohrmesstool und Kontrastmittel

In diesem Arbeitspaket wurden magnetische und elektrisch leitfähige Kontrastmittel auf Ihre Anwendbarkeit im Hinblick auf die Orientierungsmessung zur Bohrausrichtung bei rückbaufälligen Erdwärmesonden (EWS) untersucht.

3.1 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln werden die theoretischen Grundlagen zum Magnetismus und zum elektrischen Widerstand im Hinblick auf die Entwicklung und Beurteilung von Kontrastmitteln erörtert, die auf Basis einer Zement-Bentonit Suspension und speziellen Zuschlagsstoffen entwickelt wurden.

3.1.1 Magnetismus

3.1.1.1 Einführung

Der Magnetismus bzw. das magnetische Feld äußert sich ähnlich wie ein Gravitationsfeld oder ein elektrisches Feld in Kraftwirkung. Besonders auffällig ist diese an Eisenteilen in der Nähe von Naturmagneten oder stromdurchflossenen Leitern. Neben solchen direkt zu beobachtenden äußeren Kräften kann das magnetische Feld auch Kräfte im inneren elektrischer Leiter bewirken. Diese nicht direkt als mechanische Kräfte messbaren Wirkungen verursachen Ladungstrennungen, die als elektrische Spannungen in Erscheinung treten. Üblicherweise werden sie als Induktionsvorgang beschrieben, d.h. das magnetische Feld kann elektrische Spannungen induzieren. Man unterscheidet also zwei Wirkungen des magnetischen Feldes, die Kraftwirkungen und die Induktionswirkungen (Moeller et al. 2008).

Alle hier beschriebenen Wirkungen können gleichermaßen in der Umgebung elektrischer Ströme als auch in der von Naturmagneten beobachtet werden. Man nimmt nach dem heutigen Kenntnisstand die Bewegung elektrischer Ladungen als die primäre Ursache magnetischer Erscheinungen an. In Naturmagneten handelt es sich um die Eigenbewegung der Ladungsträger im atomaren Verband, bei fließenden Strömen um die makroskopisch messbare Bewegung freier Ladungsträger (z.B. freie Elektronen im metallischen Leiter) (Moeller et al. 2008).

3.1.1.2 Magnetische Dipole

Es ist hilfreich sich magnetische Kräfte mithilfe von magnetischen Feldern zu veranschaulichen. Imaginäre Feldlinien geben die Richtung der Kraftwirkung an Punkten in der Umgebung der Quelle des Feldes an (Callister & Rethwisch 2013). Die als Kraftlinien dargestellten Magnetfelder, die durch eine Spule und durch einen Stabmagneten erzeugt werden, sind in Abb. 1 dargestellt.

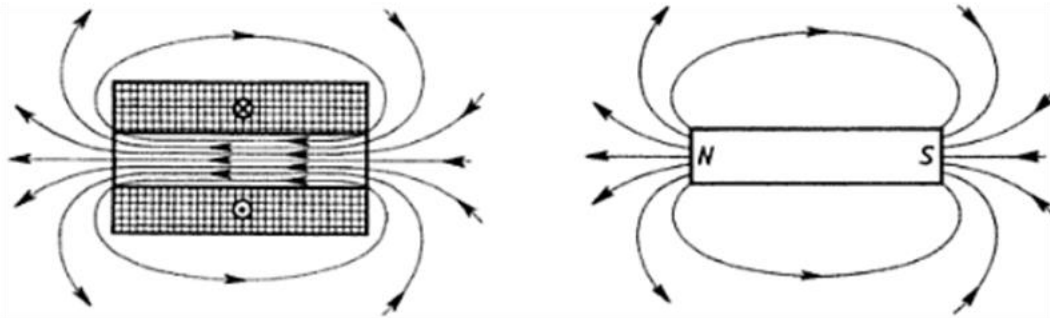


Abb. 1: Feldlinien einer langen zylindrischen Spule mit eng aneinanderliegenden Windungen (links) und eines geometrisch vergleichbaren Naturmagneten (rechts) (nach Moeller et al. 2008).

In magnetischen Werkstoffen existieren magnetische Dipole, die sich in mancher Hinsicht ähnlich wie elektrische Dipole verhalten. Magnetische Dipole kann man sich in Analogie zu positiven und negativen Ladungen als kleine Stabmagneten mit Nord- und Südpol vorstellen, wobei das magnetische Moment durch Pfeile dargestellt wird (Abb. 2). In einem Magnetfeld führt die Wechselwirkung zwischen Feld und Dipol zu einem Drehmoment, das einen frei beweglichen Dipol in Feldrichtung ausrichtet. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Orientierung einer Kompassnadel in Richtung des Erdmagnetfelds (Callister & Rethwisch 2013).



Abb. 2: Durch einen Pfeil gekennzeichnetes magnetisches Moment (erstellt nach Callister & Rethwisch 2013).

3.1.1.3 Magnetisches Moment

Die makroskopisch beobachtbaren magnetischen Eigenschaften in Werkstoffen sind Ausdruck der magnetischen Momente, die auf einzelne Elektronen zurückführbar sind. Jedes Elektron eines Atoms erzeugt aus zwei Gründen magnetische Momente. Erstens ist dies seine Bahnbewegung: Durch die ständige Bewegung um den Kern kann das geladene Elektron als kleine Stromschleife betrachtet werden, die ein sehr kleines Magnetfeld erzeugt und der ein magnetisches Moment in Richtung der Rotationsachse zugeordnet werden kann. Diese Überlegung ist in Abb. 3, a veranschaulicht.

Zweitens kann ein Elektron als ausgedehnter geladener Körper betrachtet werden, der um eine Achse rotiert (also einen Eigendrehimpuls oder Spin besitzt) und dadurch ein zusätzliches magnetisches Moment erzeugt, das die Richtung der Spinachse inne hat (Abb. 3, b).

Für das mit dem Elektronenspin verknüpfte magnetische Moment sind nur zwei Richtungen zulässig: Parallel (Spin aufwärts) oder antiparallel (Spin abwärts) zur Rotationsachse. So kann man sich jedes Elektron eines Atoms als kleinen Magneten mit permanentem magnetischen Bahn- und Spinmoment vorstellen (Callister & Rethwisch 2013).

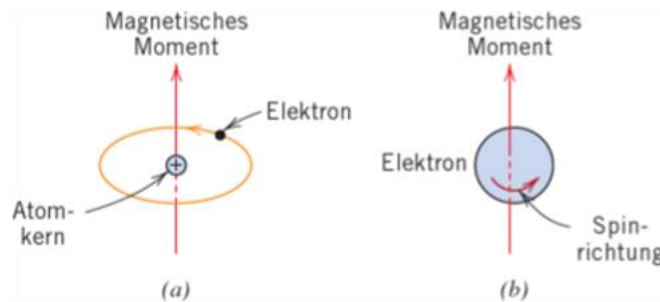


Abb. 3: Veranschaulichung der magnetischen Momente, hervorgerufen (a) durch die Bahnbewegung eines Elektrons um einen Atomkern und (b) durch ein rotierendes Elektron (aus Callister & Rethwisch 2013).

In jedem einzelnen Atom heben sich die Bahndrehimpulse und die entsprechenden magnetischen Momente der Elektronenpaare auf. Gleiches gilt für die Spinmomente. Zum Beispiel gleicht das Moment eines Elektrons mit parallelem Spin das Moment eines Elektrons mit antiparallelem Spin aus. Das effektive magnetische Moment eines Atoms ist folglich die Summe der magnetischen Momente seiner Elektronen unter Berücksichtigung sowohl der Bahn- als auch der Spinanteile sowie gegenseitiger Kompensationseffekte. Für Atome mit vollständig gefüllten Elektronenschalen und –unterschalen ist das resultierende magnetische Moment null, d.h. Bahn- und Spinmomente heben sich vollständig auf. Daher können aus solchen Atomen aufgebaute Stoffe nicht dauerhaft magnetisiert werden. Zu dieser Kategorie von Stoffen gehören Edelgase (He, Ne, Ar usw.) sowie einige Stoffe mit ionischer Bindung (Callister & Rethwisch 2013).

Es werden drei Hauptformen des Magnetismus unterschieden: Diamagnetismus, Paramagnetismus und Ferromagnetismus. Alle Stoffe zeigen zumindest einen dieser Formen des Magnetismus und ihr Verhalten hängt von der Wechselwirkung der magnetischen Dipole von Elektronen und Atomen mit einem äußeren Magnetfeld ab (Callister & Rethwisch 2013).

3.1.1.4 Magnetische Feldvektoren

Bevor im folgenden Kapitel 3.1.1.5 die drei Hauptformen des Magnetismus näher erläutert werden, müssen zuerst einige Größen zu deren Beschreibung definiert werden.

Magnetisches Verhalten kann durch verschiedene Feldvektoren beschrieben werden. Ein von außen einwirkendes magnetisches Feld wird mit H bezeichnet. Im Inneren einer Zylinderspule mit N dicht benachbarten Windungen und einer Gesamtlänge l , die von einem Strom der Stärke I durchflossen wird (Abb. 4) entsteht ein Magnetfeld der Stärke (Callister & Rethwisch 2013):

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Magnetfelder, die durch die Spule und durch den Stabmagneten in Abb. 1 erzeugt werden, werden als H -Felder bezeichnet. Die Einheit von H ist Ampere pro Meter (A m^{-1}).

Die magnetische Flussdichte B (gelegentlich noch als magnetische Induktion bezeichnet) ist die Flächendichte des magnetischen Flusses, der durch ein Flächenelement eines Stoffes tritt, das einem äußeren Feld H ausgesetzt wird. Die SI-Einheit von B ist das Tesla (T), auch Weber pro Quadratmeter (Wb m^{-2}). B und H sind Feldvektoren, gekennzeichnet durch jeweils einen skalaren Betrag und eine Richtung im Raum (Callister & Rethwisch 2013).

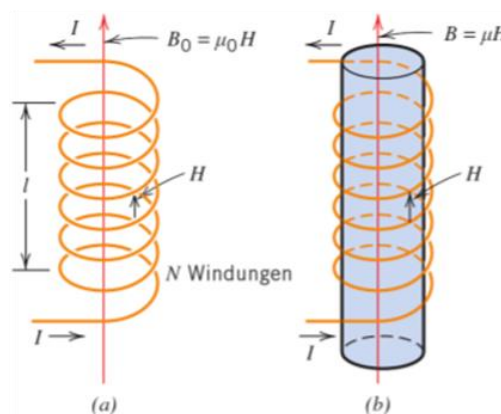


Abb. 4: (a) Zylinderförmige Spule im Vakuum und (b) Zylinderförmige Spule mit Werkstoff (modifiziert nach Guy 1976).

Magnetische Feldstärke und Flussdichte sind über die Beziehung

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Gl. 2}$$

miteinander verknüpft. Die Größe μ wird als Permeabilität bezeichnet. Die Permeabilität ist eine Eigenschaft des Werkstoffs, der dem H -Feld ausgesetzt ist und in dem B gemessen wird,

wie in Abb. 4b veranschaulicht. Die Dimensionen der Permeabilität sind Weber pro Ampere-Meter ($\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$) oder Henry pro Meter (H m^{-1}) (Callister & Rethwisch 2013).

Im Vakuum gilt:

$$B_0 = \mu_0 \cdot H \quad \text{Gl. 3}$$

wobei die Permeabilität des Vakuums μ_0 als universelle Konstante den Wert $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ besitzt. Die Größe B_0 ist die magnetische Flussdichte im Vakuum (Abb. 4a) (Callister & Rethwisch 2013).

Zur Beschreibung der magnetischen Eigenschaften von Festkörpern können verschiedene Größen verwendet werden. Eine dieser Größen ist das Verhältnis der Permeabilität in einem Werkstoff zur Permeabilität im Vakuum (Callister & Rethwisch 2013):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Gl. 4}$$

Die dimensionslose Größe μ_r wird als relative Permeabilität (oder Permeabilitätszahl) bezeichnet. Permeabilität und relative Permeabilität sind ein Maß dafür, in welchem Grad ein Werkstoff magnetisierbar ist, mit anderen Worten: dafür, wie leicht durch ein äußeres Magnetfeld H im Werkstoff selbst ein B -Feld induziert werden kann (Callister & Rethwisch 2013).

Eine andere Feldgröße, die Magnetisierung M eines Festkörpers, ist wie folgt definiert (Callister & Rethwisch 2013):

$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M \quad \text{Gl. 5}$$

In einem Feld H versuchen die im Werkstoff vorliegenden magnetischen Momente, sich in Feldrichtung anzuordnen wobei sie mit ihren eigenen Feldern das äußere Feld verstärken. Der Ausdruck $\mu_0 \cdot M$ in Gl. 5 ist ein Maß für diesen Beitrag (Callister & Rethwisch 2013).

Der Wert der Magnetisierung ist proportional zum äußeren Feld (Callister & Rethwisch 2013):

$$M = \chi_m \cdot H \quad \text{Gl. 6}$$

und der dimensionslose Proportionalitätsfaktor χ_m wird als magnetische Suszeptibilität bezeichnet. Magnetische Suszeptibilität und relative Permeabilität stehen in folgender Beziehung zueinander (Callister & Rethwisch 2013):

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad \text{Gl. 7}$$

3.1.1.5 Dia-, Para- und Ferromagnetismus

Der Diamagnetismus ist eine sehr schwache Form des Magnetismus, die nur in einem äußeren Magnetfeld auftritt und nicht von dauerhaftem Bestand ist. Er wird dadurch hervorgerufen, dass das äußere Feld die Bahnbewegung der Elektronen beeinflusst. Das dadurch induzierte magnetische Moment ist extrem klein und entgegengesetzt zum äußeren Feld gerichtet. Daher ist die relative Permeabilität μ_r kleiner als eins (jedoch nur geringfügig) und die magnetische Suszeptibilität ist negativ. Das bedeutet, dass die magnetische Flussdichte B in einem diamagnetischen Festkörper geringer ist als im Vakuum. Die Suszeptibilität χ_m liegt für diamagnetische Festkörper in der Größenordnung $\times 10^{-5}$. Werden diamagnetische Werkstoffe in das Feld eines starken Elektromagneten gebracht, wirkt auf sie eine Kraft in Richtung abnehmender Feldstärke; der Körper wird aus dem Feld heraus in Richtung schwacher Feldstärke gedrängt (Callister & Rethwisch 2013).

Abb. 5 zeigt schematisch die Konfiguration atomarer magnetischer Dipole in einem diamagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld. Es ist zu beachten, dass die Pfeile in der Abbildung atomare magnetische Dipolmomenten darstellen, während sie in der vorangegangenen Diskussion die Momente einzelner Elektronen bezeichnet haben (Callister & Rethwisch 2013).

Diamagnetismus tritt in allen Stoffen auf. Er ist aber so schwach, dass er nur beobachtet werden kann, wenn keine anderen Formen des Magnetismus vorliegen. Der Diamagnetismus hat keinerlei praktische Bedeutung (Callister & Rethwisch 2013).

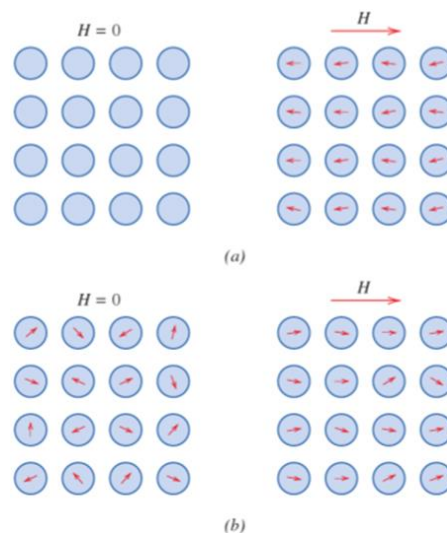


Abb. 5: (a) Anordnung atomarer Dipole in einem diamagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld. Ohne äußerem Feld existieren keine Dipole. Durch ein äußeres Feld werden Dipole induziert, die sich antiparallel zur Feldrichtung orientiert. (b) Anordnung atomarer Dipole in einem paramagnetischen Werkstoff mit und ohne äußerem Magnetfeld (aus Callister & Rethwisch 2013).

Die Atome einer Reihe von festen Stoffen besitzen permanente Dipolmomente, da sich die aus Bahnbewegung und Spin der einzelnen Elektronen resultierenden magnetischen Momente nicht vollständig kompensieren. Ohne ein äußeres Magnetfeld sind die Richtungen der atomaren magnetischen Momente zufällig verteilt, sodass in einer makroskopischen Probe keine Magnetisierung beobachtbar ist. Diese atomaren Dipole können jedoch ihre Richtung ändern: Paramagnetismus entsteht, wenn sie sich unter dem Einfluss eines äußeren Feldes H in eine Vorzugsrichtung orientieren, wie es in Abb. 5, b dargestellt ist. Auf die einzelnen magnetischen Dipole wirkt allein das äußere Feld. Zwischen benachbarten Dipolen selbst besteht keine Wechselwirkung. Da sich die Dipole in Richtung des äußeren Feldes drehen, verstärken sie es und die relative Permeabilität μ_r wird größer als 1. Dementsprechend nimmt die magnetische Suszeptibilität relativ kleine, aber im Gegensatz zum Diamagnetismus positive Werte an. Suszeptibilitäten paramagnetischer Werkstoffe liegen im Bereich von etwa 10^{-5} bis 10^{-2} (Callister & Rethwisch 2013).

Sowohl diamagnetische als auch paramagnetische Stoffe werden als unmagnetisch angesehen, da eine Magnetisierung nur in einem äußeren Feld H auftritt. Außerdem unterscheidet sich die magnetische Flussdichte in ihrem Inneren in beiden Fällen kaum vom Wert im Vakuum (Callister & Rethwisch 2013). Einige metallische Werkstoffe weisen auch ohne äußeres Feld ein dauerhaftes magnetisches Moment auf und haben eine sehr große und permanente Magnetisierung. Dieses als Ferromagnetismus bezeichnete Verhalten tritt bei den Übergangsmetallen Eisen, Kobalt, Nickel sowie bei einigen Seltenen Erden, wie z.B. Gadolinium (Gd), auf. Bei ferromagnetischen Werkstoffen werden Werte der magnetischen Suszeptibilität von bis zu 10^6 erhalten. Folglich gilt $H \ll M$ und Gl. 5 wird in guter Näherung zu (Callister & Rethwisch 2013):

$$B \cong \mu_0 \cdot M \quad \text{Gl. 8}$$

Die dauerhaften magnetischen Momente in ferromagnetischen Stoffen haben ihren Ursprung in der spezifischen Struktur der Elektronenhülle durch nichtkompensierte Elektronenspins. Im Vergleich dazu ist das mit der Bahnbewegung verknüpfte magnetische Moment niedrig. Zusätzlich führt in ferromagnetischen Werkstoffen die Wechselwirkung (Kopplung) der Spin-Momente benachbarter Atome dazu, dass sich diese – selbst ohne äußeres Feld – parallel zueinander ausrichten. Dieses Verhalten ist in Abb. 6 schematische dargestellt. Der Ursprung dieser Kopplungskräfte ist noch nicht vollständig verstanden, aber es wird angenommen, dass sie ihre Ursache in der Elektronenstruktur der Metalle haben. Die parallele Ausrichtung der Spins erstreckt sich über vergleichsweise große Bereiche eines Kristalls, die als Domänen bezeichnet werden (Callister & Rethwisch 2013).

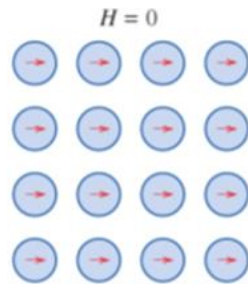


Abb. 6: Schematische Darstellung der wechselseitigen Ausrichtung atomarer Dipole in einem ferromagnetischen Werkstoff, die auch in Abwesenheit eines äußeren Magnetfelds zu beobachten ist (aus Callister & Rethwisch 2013).

Die maximal mögliche Magnetisierung oder Sättigungsmagnetisierung M_s eines ferromagnetischen Werkstoffs entspricht einem Zustand, in dem alle magnetischen Dipole parallel zueinander und zum äußeren Feld ausgerichtet sind. In diesem Zustand erreicht die magnetische Flussdichte ihren Sättigungswert B_s (Callister & Rethwisch 2013).

3.1.1.6 Geomagnetik

3.1.1.6.1 Grundprinzipien

Magnetische Methoden der angewandten Geophysik verwenden das natürliche Erdmagnetfeld. Es zeigt sich, dass magnetische Eigenschaften des Untergrunds stark variieren und abhängig sind von dessen Zusammensetzung. Es sind diese Variationen, die es ermöglichen bestimmte Gesteinsschichten (z.B. Eisenlagerstätten) im Untergrund direkt nachzuweisen. Die Geomagnetik bedient sich Anomalien, die im natürlichen Erdmagnetfeld auftreten, um direkte Hinweise auf Minerallagerstätten zu erhalten, sowie zum Aufspüren magnetischer Gesteinskörper (Dohr 1981).

3.1.1.6.2 Erdmagnetfeld

Wir können uns die Entstehung des Erdmagnetfelds mit einem großen Magneten vorstellen, dessen Achse derzeit $11,4^\circ$ zur Rotationsachse der Erde liegt. Die Punkte an denen dieser Magnet die Erdoberfläche trifft, bezeichnet man als magnetische Pole (Dohr 1981). Abb. 7 zeigt exemplarisch das Magnetfeld der Erde.

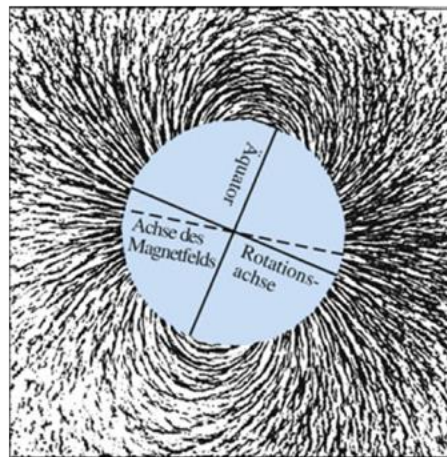


Abb. 7: Magnetfeldlinien der Erde, sichtbar gemacht durch Eisenfeilspäne in der Umgebung einer homogen magnetischen Kugel. Die Feldlinien gehen vom magnetischen Nordpol aus, der sich in der Nähe des geografischen Südpols befindet, und laufen im magnetischen Südpol (nahe dem geografischen Nordpol) wieder zusammen (Tipler & Mosca 2015).

Die magnetischen Pole weichen stark von den geografischen Polen ab, aber noch viel wichtiger ist, dass sie nicht stationär sind wie die geographischen Pole. Das magnetische Feld der Erde ist dabei dem einer Spule bzw. Stabmagneten (siehe Abb. 1) sehr ähnlich.

In der Geomagnetik macht man sich die unterschiedlichen magnetischen Suszeptibilitäten der Gesteine und Minerale der Erdkruste zu Nutze. Vor allem die Untersuchung entsprechender Anomalien spielt hier eine wesentliche Rolle. Tab. 1 zeigt eine Auswahl spezifischer magnetischer Suszeptibilitäten einiger gängiger Minerale.

Tab. 1: Magnetische Volumenssuszeptibilität einiger dia-, para- und ferromagnetischer Minerale (aus Schreiner & Kreysing 1998).

Verhalten	Material	χ_m [10^{-6}]
Diamagnetisch	Quarz	-13,4
	Calcit	-13,8
	Dolomit	-38,0
	Orthoklas	-13,7
	Plagioklas	-2,7
Paramagnetisch	Olivin	124-4270
	Hornblende	746-1368
	Augit	555-1111
	Muskovit	36-711
	Biotit	873-3040

Weiter auf nächster Seite

Paramagnetisch	Chlorit	70-1550
	Granat	553-6230
	Turmalin	1690
	Ilmenit	6750
	Siderit	3980
	Pyrit	-6,3-63
Ferromagnetisch	Magnetit	3000000
	Pyrrhotin	460-92000
	Hämatit	1300-7000
	Goethit	2150-6450

Auffällig ist hier die besonders hohe magnetische Suszeptibilität beim Magnetit (Fe_3O_4). Die Schwankungsbreite bei einigen Mineralen ergibt sich aus dem unterschiedlichen Eisen-Einbau bei der Mischkristallbildung.

Entsprechend Gl. 6 nimmt beim Anlegen eines konstanten H-Felds, die Magnetisierung mit zunehmender magnetischer Suszeptibilität zu, d.h. das Materialien mit höherer magnetischer Suszeptibilität stärker vom gleichen Feld magnetisiert werden als solche mit geringerer. Entsprechend Gl. 5 führt dies dazu, dass das im Material induzierte B-Feld höher ist bei Materialien mit höherer magnetischer Suszeptibilität. Im Feld macht sich das mit Anomalien bemerkbar, die mittels Sensortechnik detektiert werden können.

3.1.1.7 Magnetfeldsensoren

3.1.1.7.1 Grundlagen

Unter Magnetfeldsensoren versteht man Sensoren, die eine von der magnetischen Feldstärke oder der magnetischen Induktion abhängige Größe in eine elektrische Größe umwandeln. Als interessante Größen kommen zum Beispiel Winkel, Abstand, die Permeabilität als Stoffgröße oder aber die Feldstärke oder Induktion selbst in Betracht. Magnetische Sensoren nutzen verschiedene physikalische Effekte, um diese Größen in eine elektrische Ausgangsgröße zu wandeln (Hauptmann et al. 2004).

3.1.1.7.2 Hall-Effekt-Sensoren

Um Magnetfeldstärken zu messen wird u.a. der sogenannte Hall-Effekt ausgenutzt (Tipler & Mosca 2015). Der Hall-Effekt entsteht durch die Lorentzkraft: Bewegt sich ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld senkrecht zur Feldrichtung, so übt das Feld eine Kraft auf das Teilchen aus, deren Richtung sowohl zur Feldrichtung als auch zur Bewegungsrichtung des Teilchens senkrecht ist (Callister & Rethwisch 2013).

Das Prinzip des Hall-Effekts bzw. von Hall-Effekt-Sensoren ist in Abb. 8 dargestellt. Hier werden zwei aus einem leitfähigen Material bestehende Streifen jeweils von links nach rechts von einem Strom I durchflossen (die linke Seite jedes Streifens ist mit dem positiven, die rechte mit dem negativen Pol einer Spannungsquelle verbunden).

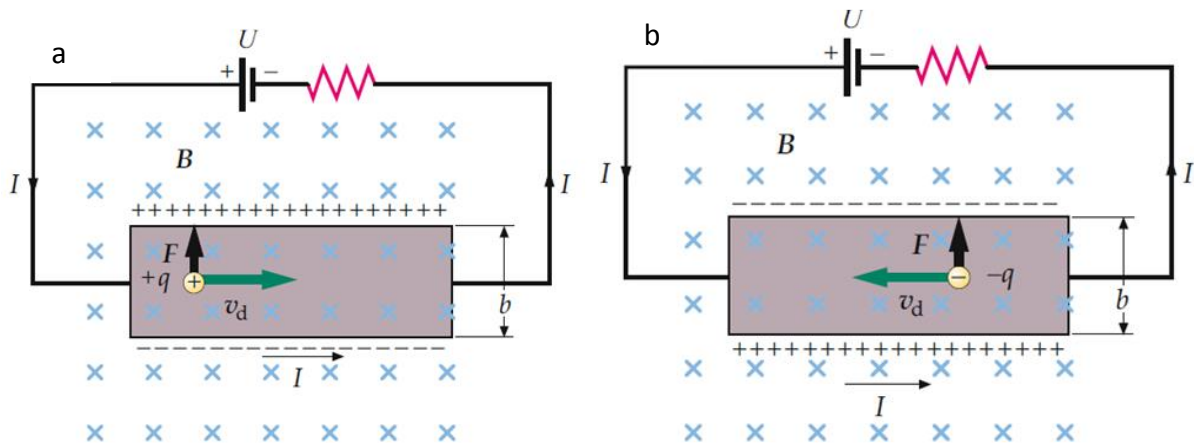


Abb. 8: Der Hall-Effekt. Das Magnetfeld zeigt in die Papierebene hinein, wie die Kreuze angeben. Wenn der Strom von links nach rechts fließt, übt das Magnetfeld eine nach oben gerichtete Kraft aus – gleichgültig, ob es sich a) um positive Ladungsträger, die sich nach rechts bewegen, oder b) um negative Ladungsträger, die sich nach links bewegen (aus Tipler & Mosca 2015).

Die Streifen sind von einem Magnetfeld B umgeben, das in die Papierebene hineinzeigt (blaue Kreuze). Handelt es sich nun um positive Ladungsträger, die sich nach rechts bewegen (Abb. 8, a) wirkt im Mittel die magnetische Kraft $q \cdot v_d \cdot B$ (v_d ist die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger, q ist die Ladung) auf diese Teilchen, die in der Papierebene nach oben zeigt. Die positiv geladenen Teilchen bewegen sich deshalb in Richtung des oberen Rands des Streifens, im Bereich des unteren Rands verbleibt ein Überschuss an negativen Ladungen. Infolge dieser Ladungstrennung entsteht im Streifen ein elektrisches Feld E , das auf die Ladungsträger eine Kraft ausübt, die der magnetischen Kraft entgegengesetzt gerichtet ist. Gleichen sich die Kräfte gerade aus, dann hört die Bewegung der Ladungsträger auf. Da das elektrische Feld in Richtung abnehmenden Potentials zeigt, befindet sich in diesem Moment die obere Kante des Streifens auf höherem Potenzial als die untere. Diese Potentialdifferenz kann man mit einem empfindlichen Voltmeter messen (Tipler & Mosca 2015).

Negative Ladungsträger (Abb. 8, b) hingegen müssen sich im Leiter nach links bewegen (da der Strom, definiert als die Bewegung der positiven Ladungsträger, wieder von links nach rechts fließen soll). Die magnetische Kraft $q \cdot v_d \cdot B$ zeigt auch in diesem Fall nach oben (sowohl q als auch v_d haben das Vorzeichen geändert). Die Ladungsträger bewegen sich wie zuvor zur oberen Kante; dort sammelt sich nun aber ein Überschuss negativer Ladung an, während die untere Kante positiv geladen zurückbleibt (Tipler & Mosca 2015).

Die Potenzialdifferenz zwischen dem oberen und dem unteren Rand des Streifens nennt man Hall-Spannung. Ihren Wert können wir als Funktion der Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger angeben. Das Magnetfeld übt auf die Ladungsträger im Streifen eine Kraft $q \cdot v_d \cdot B$ aus. Diese Kraft wird kompensiert durch die elektrostatische Kraft $q \cdot E_H$, wobei E_H das elektrische Feld ist, das durch die Ladungstrennung im Leiter entsteht. Wir schreiben daher für den Gleichgewichtszustand:

$$E_H = v_d \cdot B \quad \text{Gl. 9}$$

Ist die Breite des Streifens gleich b , so beträgt die Potenzialdifferenz $E_H \cdot b$, und für die Hall-Spannung erhalten wir (Tipler & Mosca 2015):

$$U_H = E_H \cdot b = v_d \cdot B \cdot b \quad \text{Gl. 10}$$

Die Hall-Spannung bietet einen bequemen Weg zur Messung von Magnetfeldern nach folgender Gleichung (Tipler & Mosca 2015):

$$U_H = \frac{|I|}{(n/V) \cdot d \cdot e} \cdot B \quad \text{Gl. 11}$$

mit I als Strom [A], n/V Anzahldichte der Ladungsträger [e^-/m^3], d Dicke des Leiters [m], e Betrag an Elektronen [C] und B Magnetfeld [T].

Hierzu eicht man einen Leiter durch Messung der Hall-Spannung bei gegebener Stromstärke in einem bekannten Magnetfeld. Anschließend bringt man den Streifen in ein unbekanntes Magnetfeld, misst die Hall-Spannung, wenn ein gegebener Strom fließt, und berechnet daraus die Stärke des Magnetfelds (Tipler & Mosca 2015).

3.1.1.7.3 Fluxgate-Sensoren

Der grundlegende Aufbau eines Fluxgate-Sensors besteht aus einem ferromagnetischen Kern, der im einfachsten Fall von einer Sendespule S und Empfängerspule E umgeben ist (Abb. 9).

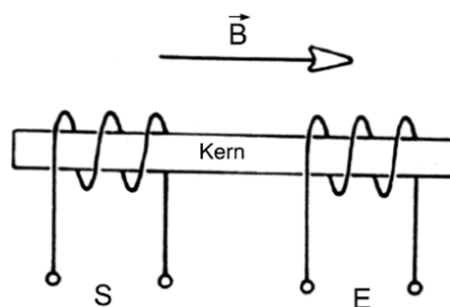


Abb. 9: Schema eines Fluxgatesensors. S kennzeichnet die Sendespule, E die Empfängerspule (modifiziert nach Richter n.d.).

Ein sinusförmiger Wechselstrom, der an S angelegt wird, bringt die nichtlineare Magnetisierungskennlinie des Kerns periodisch bis zur Sättigung. Das angelegte Signal induziert in E eine Spannung, welche abgegriffen wird. Der detektierte Signalverlauf gleicht dem des gesendeten Signals. Bei Anwesenheit eines externen Magnetfeldes B, erzeugt dessen Komponente in Kernrichtung eine Veränderung des Signals an der Empfängerspule. Diese Änderung kann nun erfasst und ausgewertet werden (Nelkenbrecher 2008). Die Amplitude der induzierten Spannung kann mit dem Faraday'schen Gesetz beschrieben werden (Marchesi 2006):

$$\begin{aligned}
 V_{Ind} &= -N_{Empf} \cdot S \cdot \frac{dB(t)}{dt} \\
 &= -N_{Empf} \cdot S \cdot \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{\mu \cdot N_{Send} \cdot I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{Send} \cdot t)}{l} \right)
 \end{aligned}
 \quad \text{Gl. 12}$$

mit V_{Ind} als Induzierte Spannung [V], N_{Empf} als Windungszahl der Empfängerspule [-], S als der Querschnitt der Empfängerspule, B die magnetischen Flussdichte [T], t die Zeit [s], μ die magnetische Permeabilität des ferromagnetischen Kerns [V·s/A·m], N_{Send} die Windungszahl der Sendespule [-], I_0 die Stromstärke [A], f_{Send} die Sendefrequenz und l die Länge der Sendespule.

Fluxgate-Sensoren messen schwache Felder im Bereich 100 pT bis 1 mT (Heywang 1993).

3.1.2 Elektrische Widerstandsmessung

In den Geowissenschaften werden viele verschiedenartige geoelektrische Verfahren eingesetzt (z.B. Eigenpotentialmessungen, Gleich- oder Wechselstromverfahren; Wenner-, Schlumberger-, Dipol-Dipol-Anordnung) um Informationen über die geologischen Bedingungen im Untergrund zu erkunden. Dabei gibt es Verfahren, die durch Messungen an der Erdoberfläche Informationen über den Untergrund liefern, aber es gibt auch geoelektrische Verfahren, die mittels Bohrlochsonden direkt in fertiggestellten Bohrlöchern zur Anwendung kommen. An den 1-2 m langen Bohrlochsonden sind Ringelektroden in unterschiedlichen Abständen angebracht, und die Messwerte werden über ein Kabel an die Erdoberfläche übertragen (Kertz 1969). Im Rahmen des Recover-EWS-Projektes soll die elektrische Widerstandsmessung jedoch nicht zur Identifizierung geologischer Einheiten herangezogen werden, sondern die Ermittlung der Position der mit Kontrastmittel gefüllten Erdwärmesonden bezüglich der Hilfsverrohrung und dem Bohrkopf ermöglichen. Hierbei dient die Hilfsverrohrung, welche die mit elektrisch leitfähigem Kontrastmittel gefüllte Erdwärmesonde umgibt, als Gegenelektrode. Die Messelektrode ist direkt am Bohrkopf montiert. Durch Drehen des Bohrgestänges wird die Position zwischen Messelektrode und Erdwärmesonde verändert, was sich in einer Veränderung des gemessenen Widerstands zeigt.

Die Spannung U ist die Ursache jedes elektrischen Stromes I und herrscht zwischen den Polen einer Spannungsquelle. Am Minuspol besteht ein Elektronenüberschuss, am Pluspol ein Elektronenmangel. Der Elektronenfluss zwischen den Polen wird als elektrischer Strom bezeichnet, wobei die Elektronen außerhalb der Spannungsquelle vom Elektronenüberschuss zum Elektronenmangel fließen. Dabei übt der Strom je nach den gegebenen Bedingungen thermische, chemische und magnetische Wirkungen aus (Kuchling 1991). Böden sind im Gegensatz zu Metallen keine Elektronenleiter. In ihnen findet das Ladungsausgleichsbestreben in Form einer Ionenwanderung im elektrischen Feld statt, die an den Elektroden mit elektrochemischen Reaktionen gekoppelt ist. Hierbei handelt es sich um Redox-Reaktionen, die durch Elektronenübergänge zu bzw. von den Ionen charakterisiert sind (Krajew 1957).

In ohmschen Materialien, zu denen Metalle und Elektrolytlösungen gehören, verhält sich der elektrische Strom direkt proportional zur angelegten Spannung ($I \sim U$; Ohm'sches Gesetz). Der Proportionalitätsfaktor G heißt Leitwert G [$1/\Omega = S$], dessen Kehrwert $R = 1/G$ der Widerstand R [Ω] ist:

$$U = R \cdot I \quad \text{Gl. 13}$$

Bei homogenen ohmschen Materialien ist der Widerstand proportional zur Länge l und umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche A :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad \text{Gl. 14}$$

ρ ist hierbei der temperaturabhängige spezifische Widerstand ρ [$\Omega \cdot m$], dessen Kehrwert $\sigma = 1/\rho$ die elektrische Leitfähigkeit σ [$1/(\Omega \cdot m) = S/m$] ist (Vogel 1999).

In der Umgebung eines elektrisch geladenen Körpers bzw. zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern (z. B. Elektroden) besteht ein elektrisches Feld, das auf alle geladenen Teilchen in diesem Feld mit einer elektrischen Kraft (Coulomb-Kraft) wirkt. Die Stärke des elektrischen Feldes E [V/m] wird durch die Kraft F , die auf eine kleine Punktladung Q in diesem Feld wirkt, ausgedrückt und wird als Feldstärke E bezeichnet. Sie ist das Verhältnis der auf eine Ladung im Feld wirkenden Kraft F [N] zur Größe der Ladung Q [C]:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad \text{Gl. 15}$$

In einem homogenen Feld wird zum Verschieben einer Ladung die Arbeit $W = U \cdot I \cdot t = U \cdot Q = F \cdot s$ benötigt, wodurch für die Gl. 16 gilt:

$$\vec{E} = \frac{\vec{U}}{s}$$

Gl. 16

Mit t als Zeit t [s] und s als Strecke s [m] (Kuchling 1995).

Das elektrische Feld wird durch Kraft- bzw. Feldlinien dargestellt, deren Verlauf sowohl durch die Art der Ladungsträger (Abb. 10), als auch durch den Aufbau des Untergrunds (Abb. 11) bestimmt wird.

Abb. 10 a zeigt das homogene elektrische Feld zweier räumlich ausgedehnter, unterschiedlich geladener Ladungsträger. Die Feldlinien zwischen den Ladungen verlaufen parallel zueinander und die Äquipotentiallinien weisen im Homogenitätsbereich gleiche Abstände zueinander auf. Demgegenüber ist in Abb. 10 b das Dipolfeld zweier punktförmiger unterschiedlich geladener Ladungen aufgezeigt, bei dem die Feldstärke von der Symmetrieebene zwischen den Ladungen nach außen hin abnimmt. Bei zwei punktförmigen Ladungsträgern gleicher Ladung tritt zwischen den Ladungen ein Bereich auf, an dem die Feldstärke den Wert Null annimmt (Abb. 10, c). In heterogenen Materialien ist die Feldverteilung durch den spezifischen Widerstand der einzelnen Homogenitätsbereiche gegeben. An den Grenzflächen kommt es analog zur Wellenausbreitung in unterschiedlichen Medien zur Brechung der Feldlinien (Abb. 11). Am Fuß einer überbohrten Erdwärmesonde sind neben der mit elektrisch leitfähigen Kontrastmittel gefüllten Erdwärmesonde, die auf Zement und Ton basierende Hinterfüllmasse, sowie das anstehende Gestein und das vorhandenen Wasser für die Entwicklung des elektrischen Felds maßgeblich.

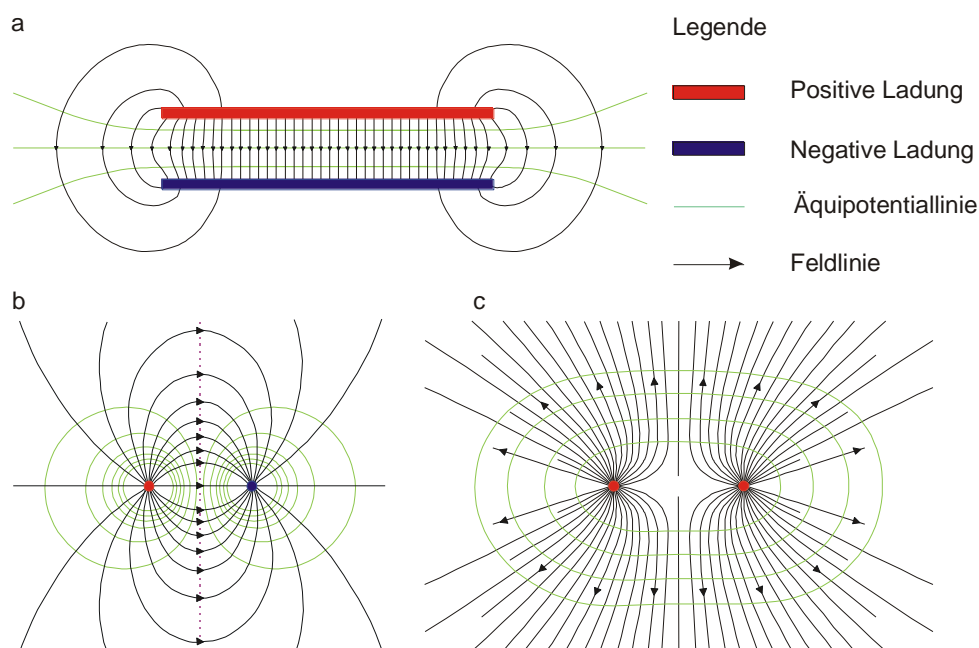


Abb. 10: Feldverteilung unterschiedlicher Ladungsträger (nach Vogel 1999).

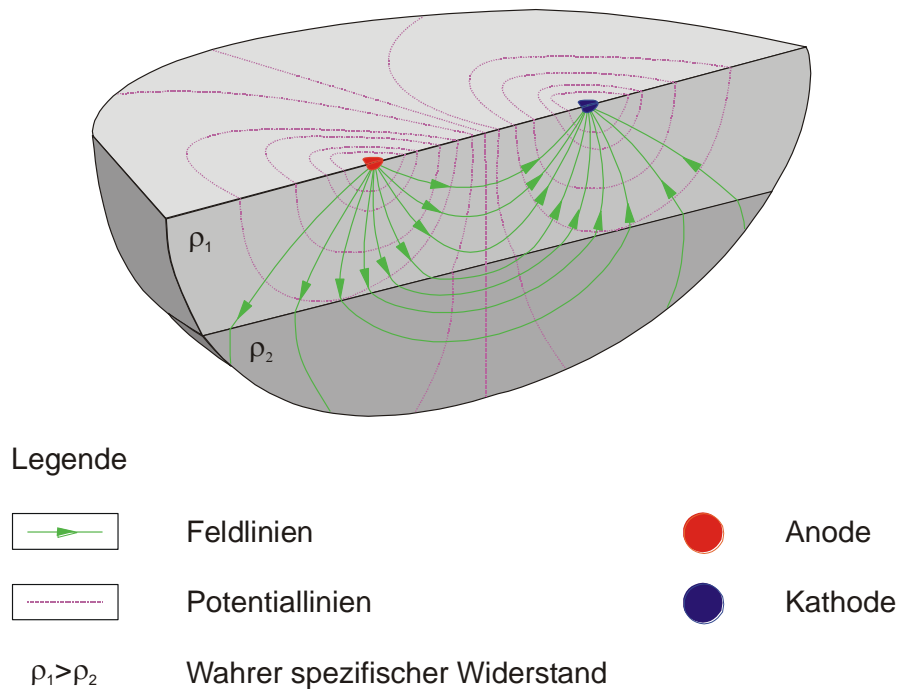


Abb. 11: Feldverteilung punktförmiger Ladungsträger im heterogenen Untergrund (nach Knödel et al. 1997).

3.2 Materialien und Methoden

3.2.1 Werkstoffe zur Herstellung fließfähiger Kontrastmitteln für die Richtbohrtechnik

3.2.1.1 Bentonit

Bentonite sind monomineralische Gesteine bestehend aus Tonmineralen der Smektitgruppe (Montmorillonit) und dem Kaolinit (Meunier 2005). Sie zeichnen sich durch hohe Wasseraufnahme, hohe Adsorptions-, Ionenaustausch- und Quellfähigkeit sowie besondere thixotrope Eigenschaften aus und finden entsprechend weite technische Anwendung. Der Name Bentonit kommt von dem Vorkommen bei Fort Benton (Montana, USA). Für viele technische Anwendungen werden die häufiger vorkommenden Calcium-Bentonite durch Behandlung mit Soda aktiviert. Die aktivierten Calcium-Bentonite kommen in ihrer Quellfähigkeit und dem Wasserbindevermögen den selteneren Natrium-Bentoniten sehr nahe. Bentonite gelten allgemein als umweltverträglich, es sei denn, es werden Chemikalien zugemischt, welche die Quellbarkeit und die Stützfähigkeit verbessern sollen (Prinz & Strauß 2011).

Zur Herstellung einer stabilen, pumpbaren und magnetisch dotierten Zement-Bentonit-Suspension wurde der IBECO Bentonit B1 verwendet. IBECO B1 Aktivbentonit von der S&B Industrial Minerals GmbH wird als Bohrspülmittel als Zusatz für eine Zement-Bentonit Verpresssuspension oder als Stützmedium für Horizontalvortriebsarbeiten verwendet. Das Einsatzgebiet als Bohrspülmittel erstreckt sich vornehmlich auf sandige und kiesige Geologien. Hierbei sind die Hauptfunktionen dieses Natrium-Bentonits das Stabilisieren der Bohrlochwand sowie das Austragen des Bohrkleins (STÜWA Konrad Stückerjürgen GmbH).

3.2.1.2 Zement

Nach DIN EN 197-1 ist Zement ein hydraulisches Bindemittel, d. h. ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der, mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt. Zement nach EN 197-1, CEM-Zement genannt, muss bei entsprechender Dosierung und nach entsprechendem Mischen mit Gesteinskörnung und Wasser, Beton oder Mörtel ergeben, der ausreichend lange verarbeitbar ist. Außerdem muss er nach einer bestimmten Zeit ein festgelegtes Festigkeitsniveau erreichen und langfristig raumbeständig sein.

Bei den Zementarten wird grundsätzlich unterschieden in (Stark & Wicht 2013):

- Portlandzemente (CEM I)
- Portlandkompositzemente (CEM II)
- Hochofenzemente (CEM III)
- Puzzolanzemente (CEM IV)
- Kompositzemente (CEM V)

Innerhalb der Hauptarten CEM II, CEM III, CEM IV und CEM V sind je nach Zusammensetzung der Hauptbestandteile weitere unterschiedliche Benennungen für einzelne Zementarten vorgesehen. Die Zemente werden nach DIN EN 197-1 (Normalzemente) und DIN EN 14216 (Sonderzemente) in 4 Festigkeitsklassen eingeteilt (Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen in N/mm²) (Stark & Wicht 2013):

- 22,5
- 32,5
- 42,5
- 52,5

In Portlandzementen (CEM I) ist der Portlandzementklinker (PZ-Klinker) mit 95 bis 100 % der Hauptbestandteil, ohne Berücksichtigung des Abbindereglers Gips/Anhydrit. In den Portlandzementen (CEM II-V) ist er in unterschiedlichen Anteilen zwischen 20 und 94 % vorhanden, wobei er dominant für die Festigkeitsbildung dieser Zemente ist. PZ-Klinker sind

die Basis hydraulischer Bindemittel, d.h. sie sind wasserbindend und wasserfest. Die Hauptbestandteile sind CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 auch abgekürzt mit C, S, A und F. Die Nebenbestandteile sind MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 (Stark & Wicht 2013).

Aus den oxidischen Hauptbestandteilen des Klinkers CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 setzen sich die in Tab. 2 genannten Klinkerphasen zusammen.

Tab. 2: Die Hauptklinkerphasen (Stark & Wicht 2013).

Bezeichnung des reinen Minerals	Formel	Abkürzung	Bezeichnung des im Klinker vorliegenden Minerals
Tricalciumsilicat	$3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Alit
Dicalciumsilicat	$2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Belit
Tricalciumaluminat	$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminat
Calciumaluminoferrit	$4 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	Aluminateferrit

Die Gesamtwirkung aller 4 Klinkerphasen im technischen Erhärtungsprozess bestimmt die anwendungstechnischen Eigenschaften, vorrangig die hydraulische Aktivität des Klinkers. Alit dominiert dabei als wichtigster Klinkerbestandteil. Er ist Träger des Festigkeitspotentials und bestimmt das Niveau der Anfangs- und Endfestigkeit (Stark & Wicht 2013).

Zur Herstellung einer stabilen, pumpbaren und magnetisch dotierten Zement-Bentonit-Suspension wurde der Zement CEM1 32,5 R der Firma Heidelberger Cement verwendet. CEM I 32,5 R ist ein Portlandzement nach DIN EN 197-1, der u.a. im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus zum Einsatz kommt. Er besteht aus Portlandzementklinker und Sulfatträger, der als Erstarrungsregler benötigt wird. Die Festigkeitsklasse 32,5, gibt eine Mindestdruckfestigkeit von 32,5 MPa entsprechend DIN 197-1 an. Der Zement wurde von der Firma Heidelberger Cement vom Lieferwerk Leimen erhalten (Technisches Merkblatt Lieferwerk Leimen).

3.2.1.3 Magnetitpulver

Magnetitpulver (Fe_3O_4) wurde von der Firma S3 Chemicals bezogen mit einer vorherrschenden Teilchengröße von 300 nm und einer Dichte von $5,2 \text{ g/cm}^3$.

3.2.1.4 Nano-Eisenpulver

Nano-Eisenpulver wurde von der Firma Nano Iron, s.r.o bezogen mit einem $d_{50} < 50$ nm und einer Dichte von $1,15 - 1,25$ g/cm³. Die Produktbezeichnung lautet „Nanofer Star“ und wird in erster Linie für die Bodensanierung verwendet.

3.2.2 Stahldrahtseil

Verzinkte Stahldrahtseile (Werkstoffnummer: 1.0611) im \varnothing 5 und 8 mm wurden im Baumarkt (Hornbach) als Meterware von der Stange gekauft. Herstellerfirma ist die Fa. Pösamo Vauka.

3.2.3 Spannbetonlitze

Eine 7-dräftige Spannbetonlitze \varnothing 15,7 mm (Werkstoffnummer: 1.1366) wurde von der Nedri Spanstaal BV bezogen.

3.2.4 Stahlkugeln

Es wurden Stahlkugeln mit einem Durchmesser von \varnothing 15,0 mm (Material: 1.0401) von der Fa. IHDS-Klarmann bezogen.

3.2.5 Magnetkugeln

Für Versuche mit Neodym-Magnetkugeln wurden \varnothing 12,7 mm Kugeln der Fa. Otom Group GmbH verwendet, mit einer Haftkraft von ca. 2,9 kg.

3.2.6 Verfüllrohr

Zum Simulieren der EWS-Rohren wurde in dieser Arbeit ein RAUGEO Verfüllrohr der Fa. Rehau Unlimited Polymer Solutions in den Dimensionen ($d \times s = 25 \times 2,3$ mm) verwendet.

3.2.7 Bohrrohr

Zum Simulieren einer verrohrten Bohrung wurde ein Bohrrohr $168 \times 7,1$ mm mit 1080 mm Länge von der Fa. Nordmeyer Smag Drilling Technologies verwendet.

3.2.8 Erdwärmerohr

Zum Simulieren einer EWS wurde ein Erdwärmerohr $32 \times 2,9$ mm der Fa. Koch verwendet.

3.2.9 Wärmeschrumpfschlauch

Wärmeschrumpfschlauch $\varnothing 6,4/\varnothing 3,2$ und $\varnothing 12,7/\varnothing 6,4$ mm wurde als Meterware im Baumarkt (Hornbach) von der Fa. CELLPACK Electrical Products gekauft

3.2.10 Neodymmagnete

Magnete zur Magnetisierung der Kontrastmittel wurden von der Fa. Webcraft GmbH bezogen. Die Entscheidung fiel auf Neodymmagnete, da diese zu den stärksten erhältlichen Magneten gehören. Für die Versuche wurden je 2 der folgenden Magnete erworben:

- Q-50-15-15-N, Quadermagnet 50 x 15 x 15 mm aus dem Werkstoff NdFeB mit einer Haftkraft von ca. 33 kg
- Q-60-30-15-N, Quadermagnet 60 x 30 x 15 mm aus dem Werkstoff NdFeB mit einer Haftkraft von ca. 56 kg

3.2.11 Schwenk Füllbinder H-hs plus

Schwenk Füllbinder H-hs plus ist ein markiertes Spezialbindemittel, zusammengesetzt aus hydraulischen Bindemitteln, ausgewählten Gesteinsmehlen und einer speziellen Markierung.

Der Baustoff wird im Bereich der Geothermie für die Einbettung von EWS sowie im Brunnenbau für die Verfüllung und Abdichtung von Ringräumen eingesetzt. Durch die Verwendung von Füllbinder H-hs plus kann das Vorhandensein des Materials im Bohrlochringraum geophysikalisch nachgewiesen werden. Durch die Möglichkeit der Messung der magnetischen Suszeptibilität kann markierter Füllbinder H-hs plus die Qualitätssicherung der Ringraumverfüllung wesentlich verbessern (Schwenk). Die Kennwerte des Schwenk Füllbinder H-hs plus sind in Tab. 3 aufgelistet (Schwenk).

Tab. 3: Kennwerte des Schwenk Füllbinder H-hs plus (Schwenk).

Wasser/Füllbinder-Wert	0,70
Menge Füllbinder H-hs plus [t/m ³]	0,93
Menge Wasser [l/m ³]	650
Ergiebigkeit [l/t]	1,075
Suspensionsdichte [kg/l]	1,59
Auslaufzeit (Marsh-Trichter) [s/l]	>50
Absetzmaß [Vol.%]	-1,5
Druckfestigkeit (Prismen 40 x 40 x 160 mm), 28 d [N/mm ²]	8,0

3.2.12 Teslameter FM302

Zur Messung der magnetischen Flussdichte der zu entwickelnden Kontrastmittel wurde ein Teslameter der Fa. Projekt Elektronik Mess- und Regelungstechnik GmbH verwendet. Hierzu kamen die 3 Axialsonden zum Einsatz:

- GEO-X Axialsonde (AS-UAP GEO-X) mit einem Messbereich bis 200 μT (Fluxgate-Sensor)
- Axialsonde (AS-LAP) mit einem Messbereich bis 200 mT (Hall-Sensor)
- Axialsonde (AS-NAP) mit einem Messbereich bis 2000 mT (Hall-Sensor)

Das Messprinzip der Axialsonden ist in Abb. 12 anhand eines Stabmagneten dargestellt. Ein positiver Anzeigewert [Tesla] ergibt sich, wenn die magnetischen Feldlinien senkrecht aus der Stirnseite der Axialsonde (S) austreten. Treten die Feldlinien in die Stirnseite ein so ist der Anzeigewert negativ. Der maximale Feldwert wird gemessen, wenn die magnetischen Feldlinien parallel zur Axialsonde verlaufen. Wenn die magnetischen Feldlinien nicht parallel zur Sonde verlaufen, wird nur der Flussdichteanteil parallel zur Sonde angezeigt, der senkrechte hingegen nicht.

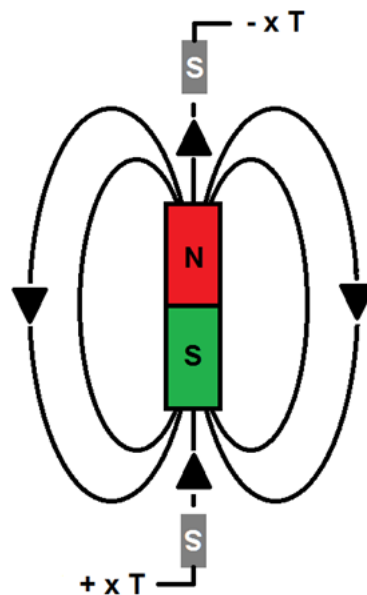


Abb. 12: Messprinzip der Axialsonden, S = Sonde, T [Tesla], x = Anzeigewert.

3.2.13 Cem Trakker

Der CemTrakker (Abb. 13) ist ein Messgerät zur Detektion ferromagnetischer und elektrisch leitfähiger Materialien. Es kann zwischen elektrisch leitfähigen und magnetisch leitfähigen Stoffen unterscheiden. Damit ist es ideal für den Einsatz in der Materialprüfung und bei der

Qualitätskontrolle bei Bohrlochverfüllungen z.B. von EWS einsetzbar. Verwendungsmöglichkeiten sind die automatische Verpressüberwachung während des Verpressvorganges mit Protokoll, als auch zeitlich unabhängige Kontrollmessungen bei denen die EWS mit der Messsonde mit einer gleichbleibenden mäßigen Geschwindigkeit befahren wird (Santherr Geothermietechnik).



Abb. 13: Cem Trakker Messkoffer mit Display und Kabeltrommel mit Messsonde (Santherr Geothermietechnik).

3.2.14 Bestimmung der Ausflusszeit

Die Ausflusszeit der Zement-Bentonit Suspension erfolgte nach der DIN EN 14117 (2004). Bei diesem Prüfverfahren wird die Ausflusszeit von zementartigen Rissfüllstoffen auf der Grundlage der Messung der Zeit, die eine genormte Menge des Rissfüllstoffes benötigt, um durch einen genormten Konus (Marsh-Konus) zu fließen, bestimmt. Diese Ausflusszeit ist ein Maß für die Viskosität von zementartigen Rissfüllstoffen. Sie wird in dieser Arbeit zur Abschätzung der Pumpbarkeit der hergestellten Zement-Bentonit Suspensionen verwendet.

3.2.15 Absetzmaß

Die Stabilität einer Suspension wird über das Sedimentationsverhalten beurteilt und über das Wasserabsetzmaß (Vol. %) bestimmt. Die Bestimmung des Absetzmaßes erfolgte in Anlehnung an die LQS-EWS des Landes Baden-Württemberg (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2012). Hiernach wurde zur Bestimmung des Absetzmaßes ein 250 ml Glaszylinder direkt nach Anmischende mit 250 ml Suspension befüllt (Eichstrich) und erschütterungsfrei gelagert. Der Zylinder wurde dampfdicht verschlossen. Die

Erfassung des überstehenden Wassers erfolgte durch Ablesen an der Eichskala. Nach 3 h wird das Volumen des überstehenden Wassers bestimmt und ins Verhältnis zum Gesamtvolumen gebracht. Je größer das Wasserabsetzen ist, desto geringer ist die Suspensionsstabilität. Eine geringe Suspensionsstabilität kann zu ungleichmäßigen Dichteverteilungen im Bohrlochringraum und damit bis zum Abriss der Füllsäule führen. Daher sollte das Wasserabsetzen einer Suspension einen Wert von 2 % nicht überschreiten.

3.2.16 Anmischen der Zement-Bentonit Suspensionen

Zum Anmischen der Baustoffe mussten die Eigenschaften der Einzelkomponenten der Kontrastmittel berücksichtigt werden, vor allen vor dem Hintergrund, dass erhebliche Anteile an Magnetit- und Eisenpulver verwendet wurden. Speziell das in Kap. 3.2.1.4 vorgestellte Nano-Eisenpulver bedarf nach Herstellerangaben einer besonderen Behandlung, da die Eisenteilchen als Agglomerate vorliegen. Um zu gewährleisten, dass sich die Agglomerate zerteilen und somit die vom Hersteller angegebene Teilchengröße erreicht wird, muss das Pulver bei höheren Drehzahlen für ca. 10 min gerührt werden.

Somit wurde nach folgender Vorgehensweise das Anmischen durchgeführt (Abb. 14):

Verwendete Arbeitsmittel:

- Rührwerk IKA RE-166
- Dissolverscheibe R 1302 (\varnothing 80 mm)
- Kunststoffmessbecher
- Waage (Ablesegenauigkeit mind. 0,1 g)
- Stoppuhr

Anmischvorgang:

- Zugabe von Nano-Eisenpulver in Leitungswasser und 10 min umrühren bei 1000 U/min
- Nach 10 min Drehzahl auf 650 U/min stellen. Zugabe von Zement und dann Bentonit, und dann anschließendes weiterrühren für 5 min.



Abb. 14: Rührwerk und Utensilien für die Suspensionsherstellung.

3.2.17 Entwicklung und Bau eines Mess- und Magnetisierungsstands für die Kontrastmittelentwicklung

3.2.17.1 Magnetisierungsstand

Zur Messung der magnetischen Detektierbarkeit der Kontrastmittel wurde eigens ein Stand zur Magnetisierung und Messung entwickelt und gebaut. Dieser Messstand basiert auf den Prinzipien der Geomagnetik wie in Kap. 3.1.1.6 beschrieben, d.h. auf der Untersuchung von Anomalien, nur hier eben im Labormaßstab.

Zur Magnetisierung werden die Kontrastmittel in PE Verfüllrohre (\varnothing 25 mm, $l=152$ mm) eingefüllt (Abb. 41 und Abb. 15), die am Boden mit einem Stopfen versehen sind. Diese Rohre sollen EWS-Rohre simulieren (und werden ab hier auch immer als solche bezeichnet). Die Magnetisierung der gefüllten Sondenrohre erfolgt in einem dafür gefertigten Stand (Abb. 15, A). Dieser besteht aus einer Bodenplatte, die in der Mitte eine durchgehende Bohrung hat, in die das mit Kontrastmittel gefüllte Rohr, mitsamt Stopfen, gestellt werden kann. Weiter Außen zu den vier Ecken der Bodenplatte hin befindet sich jeweils ein Führungsstab, der mit der Bodenplatte verschraubt ist. Die insgesamt vier Stäbe dienen als Führungen für einen gefertigten Aufsatz (Abb. 15, A und B), der händisch und kontrolliert über das Rohr (von oben nach unten) geführt wird. Hierzu gibt es ebenfalls eine Bohrung in der Mitte des Aufsatzes mit entsprechendem Durchmesser. Der Aufsatz ist mit zwei Schächten versehen die jeweils mit einem Deckel und vier Inbus-Schrauben verschlossen werden können. In diese Schächte sind Neodymmagnete zur Magnetisierung eingebaut. Bis auf die Inbus-Schrauben, die aus einem nicht magnetischen Stahl bestehen, ist der gesamte Aufbau aus PVC. PVC sowie PE, aus dem die Sondenrohre gefertigt sind, sind Kunststoffe, die im Allgemeinen als magnetisch neutral gelten und somit keinen magnetischen Interferenzen erzeugen können.

In dieser Arbeit sind zwei solcher Aufsätze für ein paar kleine und ein paar größere Neodymmagneten angefertigt worden (siehe Kap. 3.2.10), um zwei Magnetisierungsstufen zu erhalten. Beide Aufsätze sind ansonsten identisch, genauso wie die Ausrichtung der Magnete zueinander. Deshalb werden im Folgenden die Aufsätze vor allem anhand des „großen“ Aufsatzes mit den großen, stärkeren Magneten beschrieben. Die Beschreibung gilt aber für beide Aufsätze zugleich. Zur Vereinfachung wird im Folgenden die Abkürzung „GA“ für großer Aufsatz und „KA“ für kleiner Aufsatz verwendet.

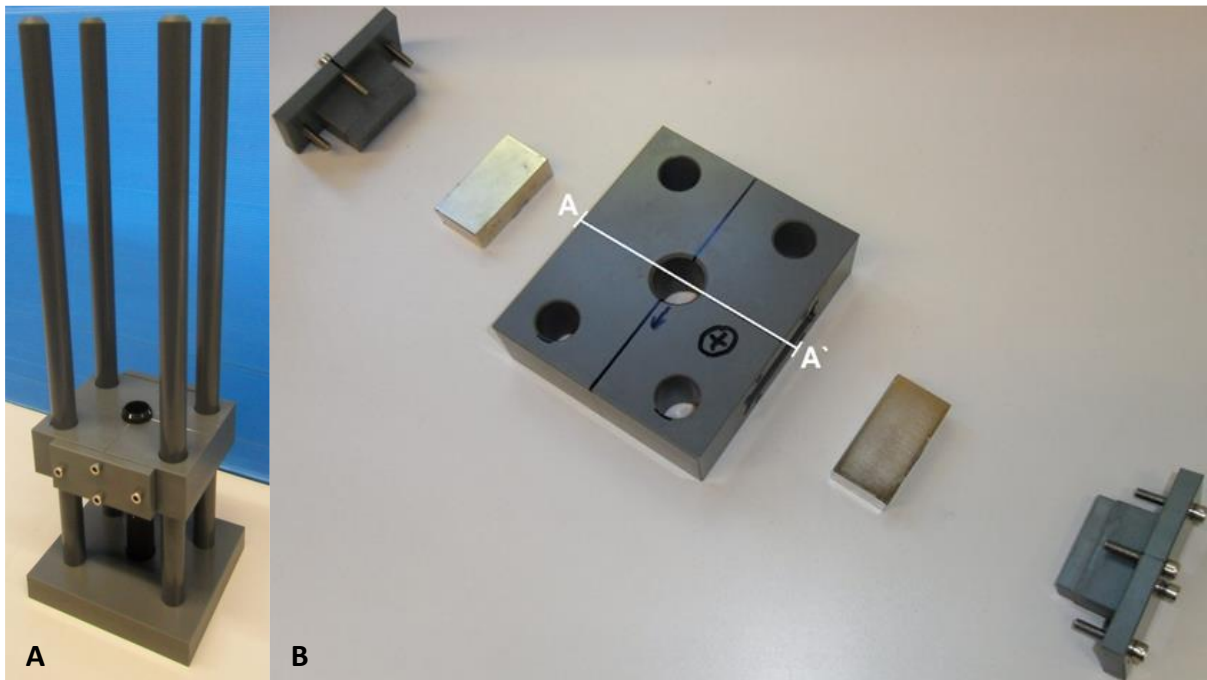


Abb. 15: A: Magnetisierungsstand (452 mm hoch) mit GA und eingebautem Sondenrohr, B: GA mit geöffneten Schächten und Neodym-Magneten (chromfarben) 60x30x15 mm.

Die Ausrichtung der Magnete ist in Abb. 16 maßstabsgetreu (nicht die Sondenrohlänge) dargestellt. Die Darstellung entspricht dem Schnitt A-A` wie in Abb. 15, B eingezeichnet.

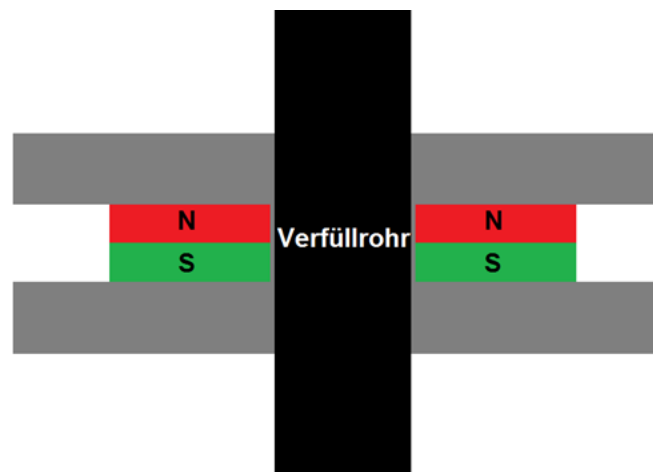


Abb. 16: Maßstabgetreue Darstellung des Querschnitts A-A` (Sondenrohlänge nicht Maßstabsgetreu) durch GA.

Eine solche Anordnung der Magnete führt zu einer hohen Dichte der magnetischen Feldenergie zwischen den Magneten, im Vergleich zu einem einzelnen Magneten. Dieser Effekt ist bekannt aus der Leitertechnik. In einem einzelnen stromdurchflossenen Leiter bilden sich Feldlinien als konzentrische Kreise aus, deren Mittelpunkt der Leiterlängsachse entspricht

(Abb. 17, A). Bei zwei nebeneinanderliegenden, parallelen Leitern mit entgegengerichteten Strömen (Abb. 17, B) kommt es zwischen den beiden Leitern zu einer Erhöhung der magnetischen Feldenergiedichte.

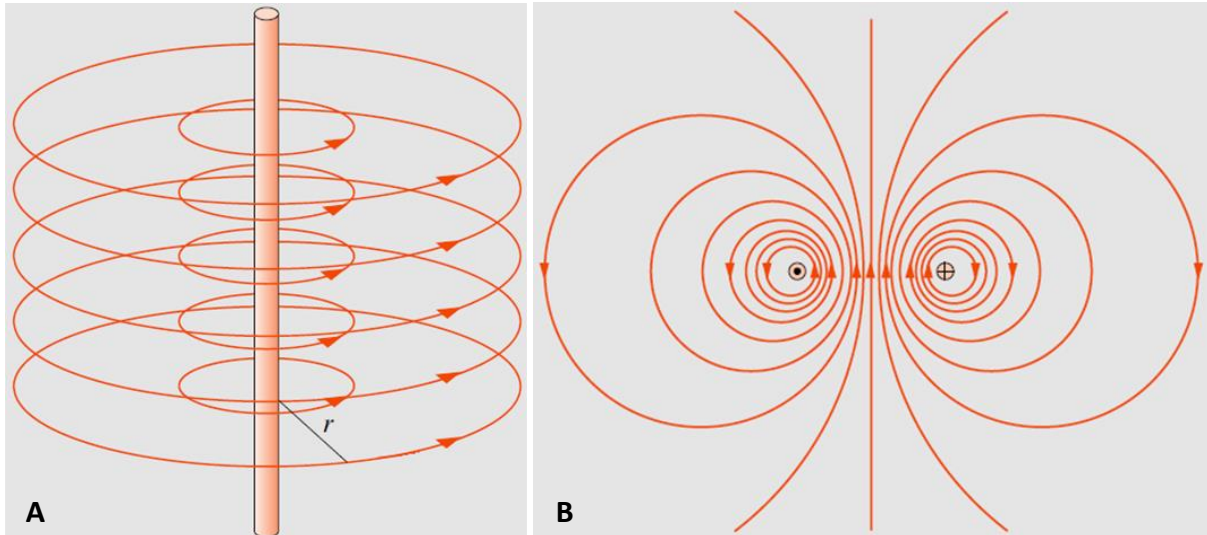


Abb. 17: Magnetfeldlinien um einen geraden stromdurchflossenen Leiter (A), Magnetfeldlinien als Querschnitt um zwei parallele Leiter mit entgegengerichteten Strömen (B), (modifiziert nach Gerthsen 2015).

Mittels eines kleinen Experiments konnte das Magnetfeld der Magnetaufsätze nachvollzogen werden (Abb. 18). Hierzu wurden die beiden Magnete mit der Ausrichtung entsprechend Abb. 16 an ein Kunststoffgefäß (\varnothing 43 mm) mit Tesafilm befestigt. Die Magnete wurden vorher in Karton verpackt, um Verschmutzungen zu vermeiden. Das Gefäß wurde nun mit Eisenpulver gefüllt, um das Feld zwischen den Magneten darstellen zu können. Anschließend wurde dieses Paket auf eine Plexiglasscheibe gestellt, unter der ein mit Eisenpulver beschichtetes Blatt Papier gelegt wurde. Das resultierende Muster ähnelt dem aus Abb. 17 B, der Unterschied ist nur, dass die Feldlinien ihren Ursprung in den Stabmagneten haben und nicht um diese herumlaufen wie bei den Leitern. Aus Sicherheits- und praktischen Gründen wurden für das Experiment die kleineren, weniger starken Magnete des KA verwendet (siehe Kap.3.2.10), gelten dabei aber auch repräsentativ für die Magnete des GA.



Abb. 18: Magnetfeld zweier parallel angeordneter Stabmagneten aus dem KA, Kunststoffgefäßes \varnothing 43 mm.

Zusätzlich zu diesem anschaulichen Experiment wurden Messungen an beiden Aufsätzen mittels eines Teslameter durchgeführt, dabei war vor allem der Zwischenraum, durch den das Sondenrohr geführt wird, interessant. Beim GA hat die magnetische Flussdichte im Zentrum zwischen den beiden Magneten an deren N/S Grenze einen Betrag von 204,8 mT, beim KA 57,4 mT als Mittelwert von 5 Messpunkten. Dies konnte mittels eines angefertigten Einsatzes, der mit der Axialsonde AS-NAP (Messbereich bis 2000 mT) kompatibel ist, gemessen werden (siehe Abb. 19). Die eingefräßten Fadenkreuze auf dem roten Einsatz sowie auf dem Magnetaufsatz ermöglichen eine genaue Ausrichtung der Messpunkte des Einsatzes.

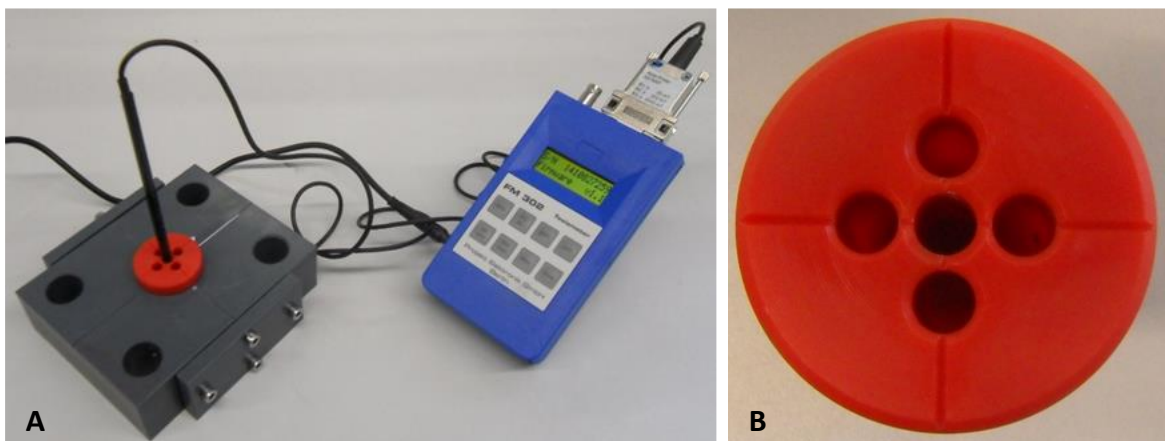


Abb. 19: Roter Einsatz (\varnothing 4 cm) zur Messung des Magnetfelds in GA und KA (hier in GA) (A), Nahaufnahme des Einsatzes mit 5 Messpunkten (B).

Die Messwerte teilen sich dabei, abhängig von der Polarität bzw. Aufsatzseite, wie in Abb. 20 dargestellt auf. Entsprechend dem erläuterten Messprinzip in Kap. 3.2.12 können Nord- und Südseite definiert werden. Die Zuordnung von Aufsatz-Nord und Süd erfolgt in dieser Arbeit auf Basis der Polung der Magnete im Aufsatz, d.h. in Abb. 20 zeigen bei der Aufsatz-Nordseite (linkes Bild) die Nordpole beider Magnete nach oben (siehe auch Abb. 16), und bei der Aufsatz-Südseite zeigen die Südpole der Magnete nach oben.

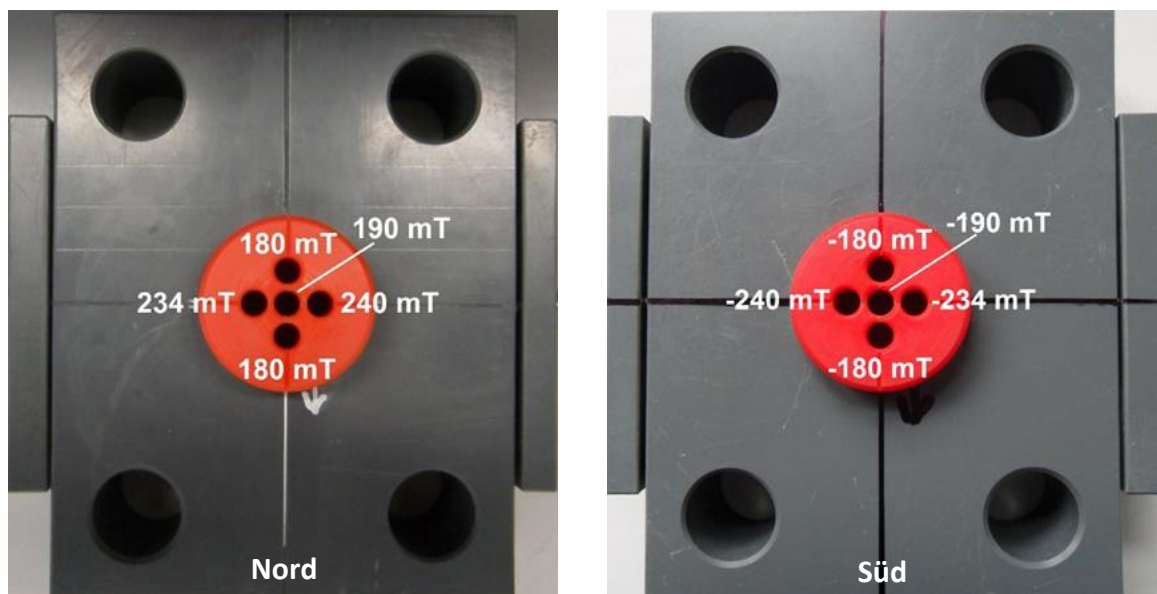


Abb. 20: Verteilung der magnetischen Flußdichte im GA in Abhängigkeit von der Polarität (Roter Einsatz = \varnothing 4 cm).

Zu erkennen ist, dass sich die größten Beträge für Nord- und Südseite an den beiden Messpunkten, die direkt an den Magnetschächten liegen, zeigen. Die ist plausibel, da der Betrag der Flussdichte mit geringer werdender Entfernung der Messsonde zu den Magneten ansteigen sollte. Entsprechend ist der Betrag in der Mitte zwischen beiden Magneten geringer. Die Tatsache, dass es eine kleine Abweichung von 7 mT zwischen den beiden Messpunkten direkt an den Schächten gibt, kann mit kleinsten Abweichungen bei der Fertigung der Schächte bzw. Schachttiefen erklärt werden. Bereits geringste Unterschiede in der Schachttiefe und daraus resultierende Distanzabweichungen zwischen Messpunkt und Magnetoberfläche können solche Abweichungen hervorrufen. Die beiden Messpunkte ober- und unterhalb des mittleren Messpunkts bzw. parallel zu den Magnetschächten sind vom Betrag her identisch (180 mT) und erwartungsgemäß niedriger als die beiden Messpunkte direkt neben den Schächten. Eine identische Aufteilung, nur mit niedrigeren Beträgen, ergibt sich auch beim KA (Abb. 21).

Trotz der geringeren Größe und fast halber Haftkraft (laut Herstellerangaben) der kleinen Magnete im KA, lag dessen Flussdichte noch bei rund 83 % der Flussdichte des GA. Um ein deutlich geringeres Magnetfeld erzeugen zu können, gab es so nur noch die Möglichkeit, die

Distanz zwischen den beiden Magneten im KA zu vergrößern. Dies konnte dadurch erreicht werden, dass die Inbusschrauben der Deckel aufgeschraubt wurden wie in Abb. 21 angedeutet. Da die Magnete im Aufsatz so orientiert sind, dass sie sich gegenseitig abstoßen, werden die Deckel beim Aufschrauben durch die Abstoßungskräfte beider Magneten aufgedrückt. Das bringt den Vorteil mit sich, dass die Deckel durch die Magnete und durch die Inbusschrauben in beliebiger Position fixiert werden. Die Schrauben können somit zum genauen Einstellen eines Magnetfelds bestimmter Flussdichte auf und zuge dreht werden. Um ein kleinstmögliches Magnetfeld erzeugen zu können, wurden die Schrauben soweit aufgedreht, dass sie gerade noch die Deckel im Magnetschacht festhielten. Auf diese Weise konnte eine Flussdichte mit einem Betrag von nur 57,4 mT (als Mittelwert der 5 Messpunkte) erzeugt werden, was nur noch ca. 28% der maximal möglichen Flussdichte mit den größeren Magneten im GA entspricht.

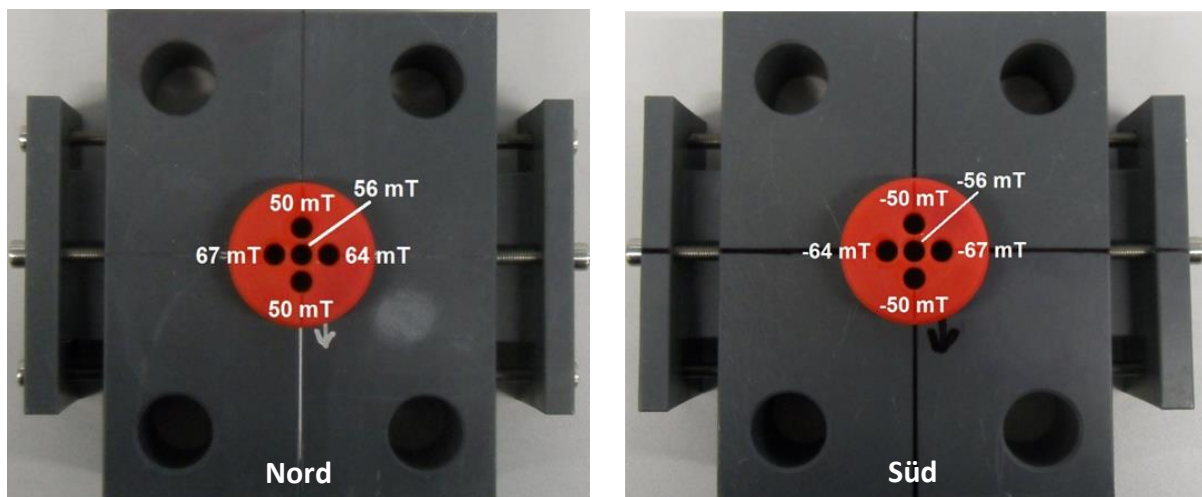


Abb. 21: Verteilung der magnetischen Flußdichte im KA in Abhängigkeit von der Polarität (Roter Einsatz = \varnothing 4 cm).

Nach Fertigstellung der Aufsätze ergaben erste Tests, bei denen Proben magnetisiert und anschließend gemessen wurden, dass die Proben ein genau entgegengesetztes Magnetfeld aufwiesen als der Magnetfeldaufsatz im Bereich der Aufnahmebohrung. Dies erschien zuerst unlogisch, und um dem auf den Grund zu gehen, wurden die Felder noch genauer untersucht. Es konnte dabei festgestellt werden, dass sich das Magnetfeld entlang der Aufnahmebohrung verändert, bzw. beidseitig einen Polwechsel aufweist, und zwar bei beiden Aufsätzen nahezu identisch. Dies konnte anhand der Messwerte beim langsamen herausfahren der Axialsonde AS-NAP aus der Aufnahmebohrung festgestellt werden.

Auf Basis dieser Beobachtungen konnte eine grobe Einteilung der Polarität der Magnetaufsätze entlang der Aufnahmenbohrungen erfasst werden (Abb. 22). Diese Einteilung gilt für beide Aufsätze. In Klammern sind die entsprechenden Werte des Aufsatzes mit den kleinen Magneten (KA) angegeben, die alle vom Betrag her erwartungsgemäß geringer sind.

In Abb. 22 ist das Szenario mit Polarität Nord dargestellt, d.h. die Nordpole der Magnete zeigen nach oben. In den Sektoren 3 und 4 sind bei dieser Konstellation die gemessenen B-Feldwerte (bei gegebener Sensororientierung, siehe Abb. 22) positiv und nehmen zur N/S Grenze der Magnete hin zu (bis zum Durchschnittswert 204,8 mT (57,4 mT)). Die Richtung der Betragszunahme ist immer mit orangenen Pfeilen markiert. Beide Sektoren reichen ca. bis zur Ober- und Unterkante der Magnetaufsätze. Die Kante markiert einen Scheitelpunkt an dem die Messwerte 0 μ T erreichen. Die auf beiden Seiten angrenzenden Sektoren 2 und 5 weisen ein entgegengesetztes Vorzeichen der Messwerte auf, und die Beträge nehmen in diesen Sektoren mit zunehmender Entfernung von den Aufsatzoberkanten bis zu einem Scheitelpunkt zu. Dieser Scheitelpunkt markiert die Sektorgrenzen S1/S2 und S5/S6 und liegt auf beiden Seiten ca. 2 cm oberhalb der Aufsatzober- bzw. unterkante. Über diesem Scheitelpunkt nehmen die Beträge wieder ab und gleichen sich allmählich, mit zunehmender Entfernung zu den Aufsatzkanten, dem umgebenden Erdmagnetfeld an.

Wie schon angedeutet gelten die Dimensionen der Sektorgrenzen, entsprechend Abb. 22, für beide Magnetaufsätze. Da die Sektorgrenzen bei KA und GA nur um wenige mm differierten, wurden zur Vereinfachung für Abb. 22 einfach Durchschnittswerte aus beiden verwendet.

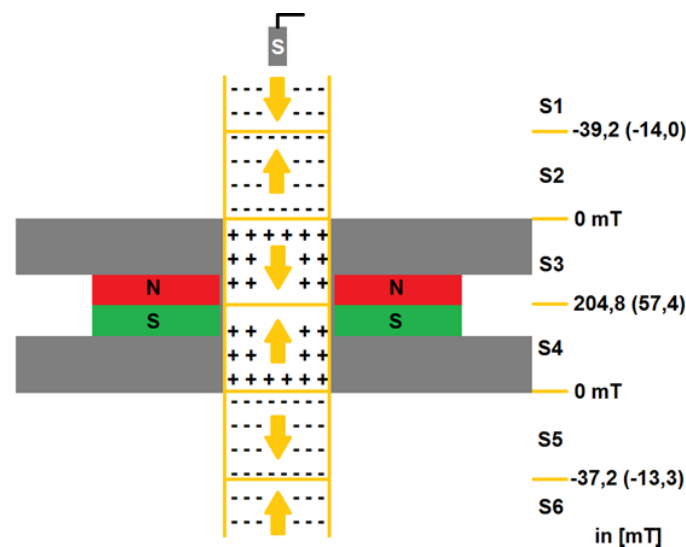


Abb. 22: Polarität und Stärke des Magnetfelds entlang der Aufnahmebohrung der Magnetaufsätze. Orangene Pfeile zeigen jeweils die Betragszunahmerichtung in den einzelnen Sektoren (S1-S6). Der Aufsatz ist maßstabsgetreu für GA dargestellt. Die Sektordimensionen sind ebenfalls maßstabsgetreu und gelten für beide GA und KA. S = Sensorausrichtung in allen Sektoren. Messwerte der Sektorengrenzen sind für GA und KA (Werte in Klammern) angegeben.

Stellt man sich nun den Vorgang der Magnetisierung vor (Abb. 15, A) bei dem der Aufsatz von oben über die Probe bzw. das Sondenrohr gezogen wird, so wird klar, dass eine Probe drei

Stufen der Magnetisierung durchläuft, wobei die letzte Stufe die finale Prägung, d.h. die Polarität und auch die Stärke der Magnetisierung festlegt. Entsprechend dem Beispiel in Abb. 22 durchläuft die Probe nacheinander die Sektoren absteigend von S6 zu S1. Die erste Magnetisierungsstufe erfolgt in den Sektoren S5 und S6 wobei hier die stärkste Magnetisierung an der Grenze S5/S6 erfolgt. Der dort mit dem Einsatz gemessene B-Feldwert kann mit $-37,2$ mT ($-13,3$ mT) angegeben werden. Die zweite Magnetisierungsstufe erfolgt in den Sektoren S4 und S3. Hier wird die Probe umgepolt mit der stärksten Magnetisierung an der Grenze S3/S4. Der Wert liegt hier, wie schon erwähnt, bei $204,8$ mT ($57,4$ mT). Die dritte und relevante Magnetisierungsstufe erfolgt in den Sektoren S1 und S2. Hier wird die Probe nochmal umgepolt mit der stärksten Magnetisierung bei der Sektorgrenze S1/S2. Diese kann mit $-39,2$ mT ($-14,0$ mT) angegeben werden. Die Probe wird in dieser letzten Stufe final geprägt, und wird in diesem Zustand in den Messstand überführt.

In Abb. 23 wurde schließlich noch ein Experiment durchgeführt, das den Aufbau des Magnetfelds genau an der Grenze S1/S2 bzw. S5/S6 zeigen soll. Hierzu wurde der rote Einsatz entsprechend ausgefahren und in seiner Position fixiert und eine Schale mit Eisenpulver draufgestellt (hier am Beispiel GA). Das Eisenpulver zeichnet die Feldlinien nach. Diese erscheinen aus dem Profil und der Draufsicht sehr homogen im Bereich der Aufnahmebohrung und parallel zu dessen Längsachse. Somit ist eine relativ homogene Magnetisierung der Proben mit Feldlinien nahezu parallel zur Probenlängsachse gegeben.

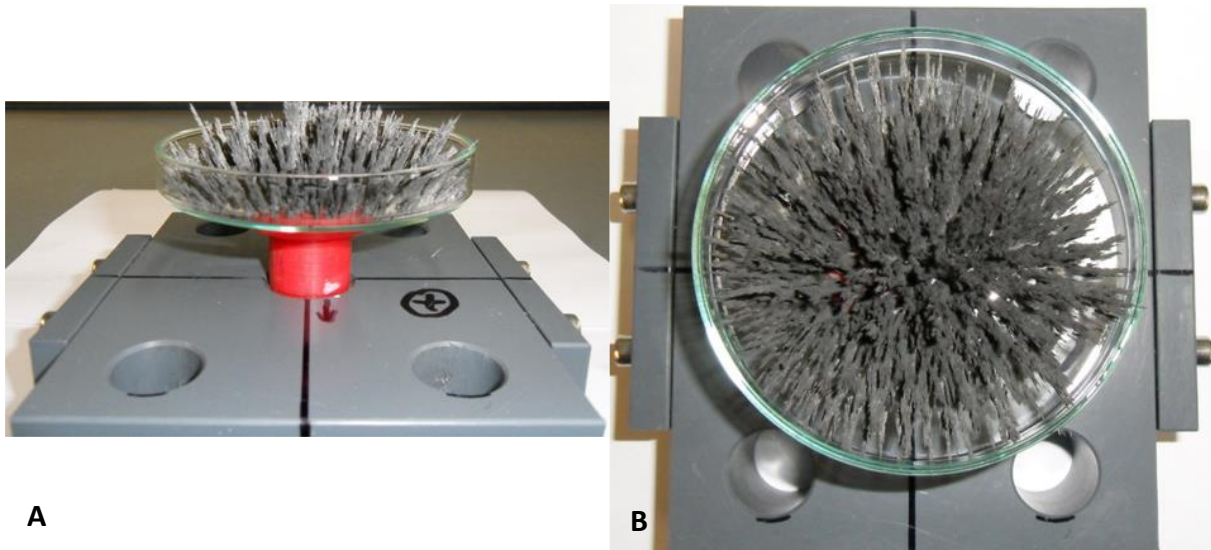


Abb. 23: Magnetfeldlinien (GA) an der Sektorgrenze S1/S2 bzw. S5/S6 aus der (A) Profilsicht und (B) Draufsicht (Schalen $\varnothing = 10$ cm).

Aus allen vorgenannten experimentellen Beobachtungen und der Literaturrecherche kann ein grobes Schema des Magnetfelds der Aufsätze erstellt werden (Abb. 24). Es ist wichtig klarzustellen, dass dieses Schema das Magnetfeld wirklich nur sehr grob und nicht

maßstabsgetreu darstellen kann, aber es hilft, die Beobachtungen vor allem aus Abb. 22 besser erklären zu können.

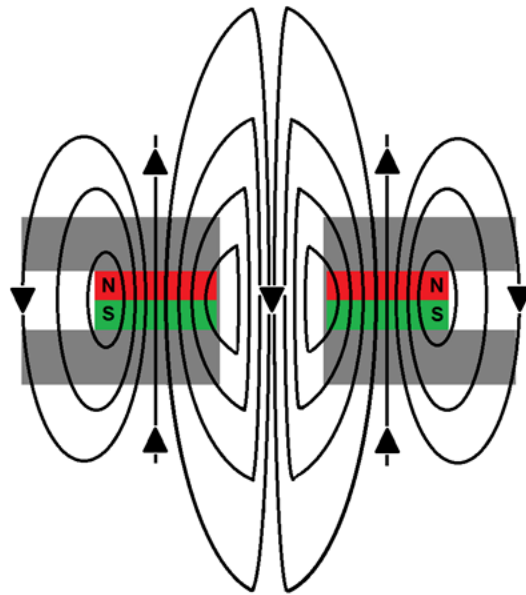


Abb. 24: Schematisches Magnetfeld der Aufsätze (nicht Maßstabsgetreu).

Die Besonderheit des Feldes liegt zwischen den beiden Magneten entlang der Aufnahmebohrung. Wie in Abb. 17 kommt es zu einer Erhöhung der magnetischen Feldenergiedichte, welches durch die dicht aneinander liegenden Feldlinien zu erkennen ist. Betrachtet man die Feldlinien innerhalb und parallel zur Aufnahmebohrung, so wird klar, dass in diesem Bereich sowohl eine positive als auch eine negative Feldkomponente auf sehr engem Raum vorhanden sind. Die Tatsache, dass wie in Abb. 22 empirisch belegt, die Flussdichte von Zentrum (Sektorgrenze S3/S4) nach außen (Sektorgrenze S2/S3 und S4/S5) von 204,8 mT auf 0 mT abnimmt, kann durch die zunehmende Dominanz der negativen Komponente erklärt werden. An dieser Stelle ist das Schema nicht ausreichend genug für detailliertere Erläuterungen, da zum einen nicht klar ist, wie dicht die Feldlinien gelagert sind vor allem auch im Verhältnis zur effektiven Sensoroberfläche der AS-NAP Sonde. Die Beobachtungen sprechen jedoch dafür, dass der Sensor gleichzeitig positive und negative Äste der Feldlinie misst, die Feldlinien im Umkehrschluss also relativ spitz zulaufen müssen, wie in Abb. 24 angedeutet.

3.2.17.2 Messstand

In nächsten Schritt wird das nun mit Kontrastmittel gefüllte und das magnetisierte Sondenrohr in einen Messstand überführt (Abb. 25). Der Messstand besteht aus einer PVC-Grundplatte, die in der Mitte mit 5 Ports (durchgehende Bohrungen) für das Einführen von Sondenrohren ausgestattet ist. Je nachdem wie man diese bestückt lassen sich verschieden Szenarien, wie

z.B. in Abb. 25 ein einzelnes Rohr in der Mitte, aber auch zwei oder vier Rohre nebeneinander (entsprechend Einfach-U- und Doppel-U-Sonde) nachstellen.

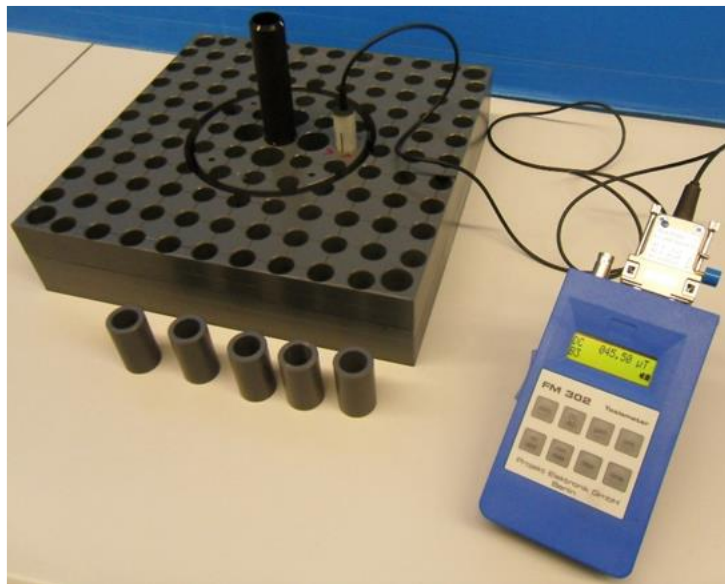


Abb. 25: Messtool (295 x 295 mm Grundfläche) mit einem Sondenrohr in der Mitte. Rechts im Bild das Teslameter FM 302 mit GEO-X Messsonde, die in einem Messport steckt. Vor der Platte stehen 5 Adapter-Einsätze (Sondenport zu Messport).

Weiterhin ist die gesamte Platte mit einem Messnetz von 117 kleineren Ports überzogen, die mit der GEO-X Axialsonde (AS-UAP GEO-X) mit einem Messbereich bis 200 μT kompatibel sind. Diese Sonde, angeschlossen an ein Teslameter, kann die magnetische Flussdichte um das Sondenrohr messen. Je nach Besetzung der 5 Sondenports können, z.B. wie im Fall in Abb. 25, die 4 unbesetzten Ports mittels eines Adapter-Einsatzes in Messports überführt werden.

Eine kreisförmige Nut erlaubt zudem das Einsetzen eines Gusseisenzyinders, der ein Bohrrohr (bzw. Hilfsverrohrung) simulieren soll, um dessen Einfluss auf die magnetische Flussdichte zu ermitteln (Abb. 26).

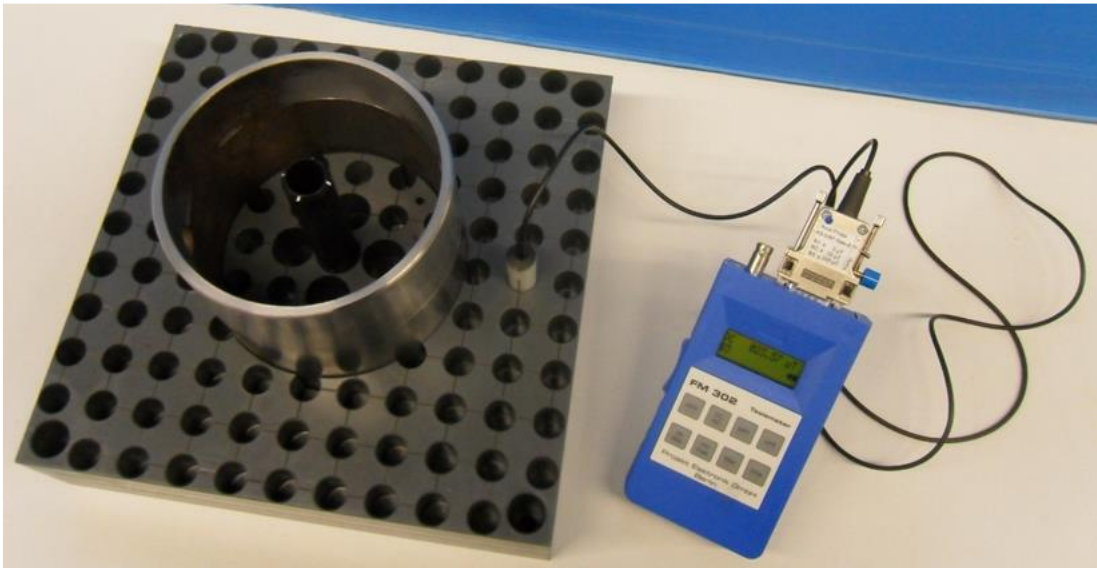


Abb. 26: Messstand (Grundplatte) mit individuellem Sondenrohr und Gußeisenzylinder.

Weiterhin ist die PVC-Grundplatte an den Ecken mit jeweils einer Bohrung versehen, in die Führungsstäbe eingesteckt werden können. Diese dienen als Führungen für eine weitere PVC-Kopfplatte, die mit 122 Messports versehen ist und eine Messung der magnetischen Flussdichte von oben ermöglicht (Abb. 27). Die Messports der Grund- und Kopfplatte liegen dabei exakt übereinander.

Schließlich können die Ergebnisse der magnetischen Flussdichtemessung der einzelnen Ports der Grund- und Kopfplatte, mittels geeigneter Software (z.B. Surfer 8.0) als Kontourkarten dargestellt werden.



Abb. 27: Messstand (Grund- und Kopfplatte) mit Gußeisenzylinder.

Eine technische Zeichnung mit den Abmessungen der Grund- und Kopfplattenoberseite ist in Abb. 28 dargestellt. Die Zeichnung entstammt der Mastercam Fräse Software, die für die Herstellung des Messstands, in der Geo-Werkstatt des Instituts für angewandte Geowissenschaften, verwendet wurde. Die Kopfplattenoberseite entspricht exakt der Grundplattenoberseite mit dem Unterschied, dass die 5 Sondenports ($\varnothing 25,5$ mm) auf der Grundplatte, Messports ($\varnothing 16,5$ mm) auf der Kopfplatte entsprechen, und die Kopfplatte keine kreisförmige Nut auf der Oberseite aufweist.

Alle Messports auf Grund und Kopfplatte sind 30 mm tief, die 5 Sondenports auf der Grundplatte sind durchgängige Bohrungen, die eine Tiefe, entsprechend der Grundplattenmächtigkeit, von 69 mm aufweisen (siehe Schnitt A-A` in Abb. 29). Die Nut ist 39,4 mm tief in die Grundplatte eingefräßt. Die Kopfplatte ist 60,5 mm mächtig. Zu beachten ist, dass beim Einsetzen des Eisenzylinders einige der Messports auf der Grundplatte nicht verwendbar sind, da sie von der Nut bzw. dem Eisenzylinder geschnitten werden. Die betroffenen Ports sind in Abb. 28 als unvollständige Kreise zu erkennen. Ohne Eisenzylinder können diese jedoch zur Messung verwendet werden.

In Abb. 28 ist ein Profil A-A' mit einer orange gestrichelten Linie eingezeichnet. Die Querschnittszeichnung entlang dieses Profils ist maßstabsgetreu in Abb. 29 dargestellt. Dabei wurde ein Szenario mit einem Rohr in der Mitte und Eisenzylinder angenommen (siehe auch Abb. 26) und mit aufgesetzter Kopfplatte entsprechend Abb. 27.

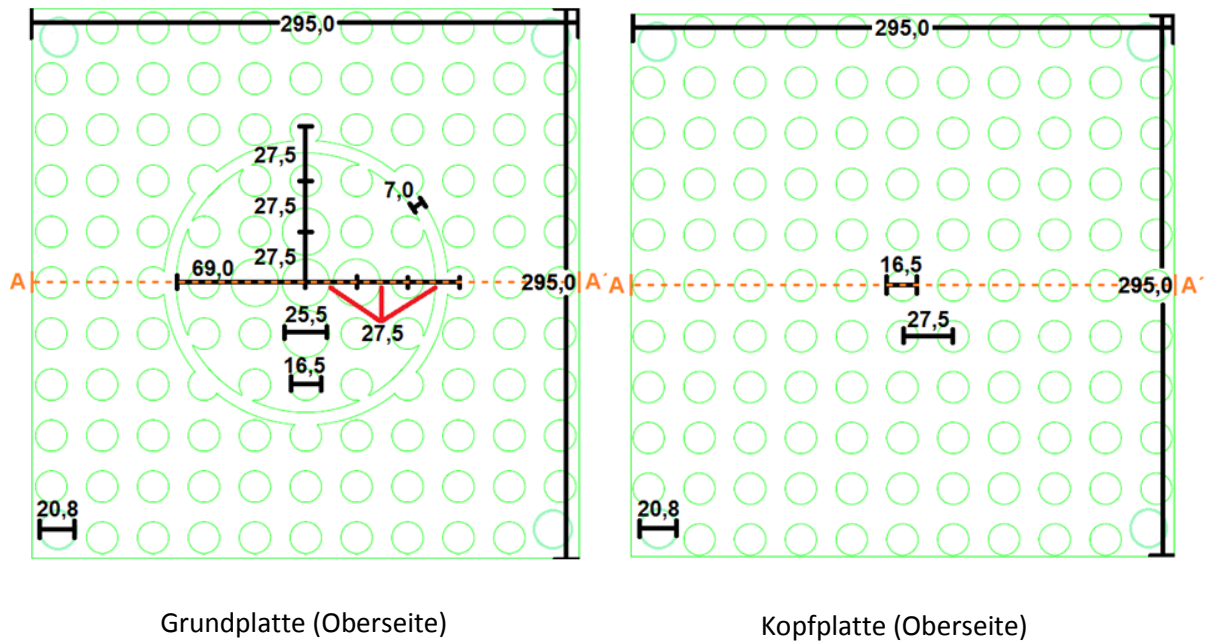


Abb. 28: Technische Zeichnung der Grundplatten- und Kopfplatten Oberseite in Mastercam Software (Angaben in mm).

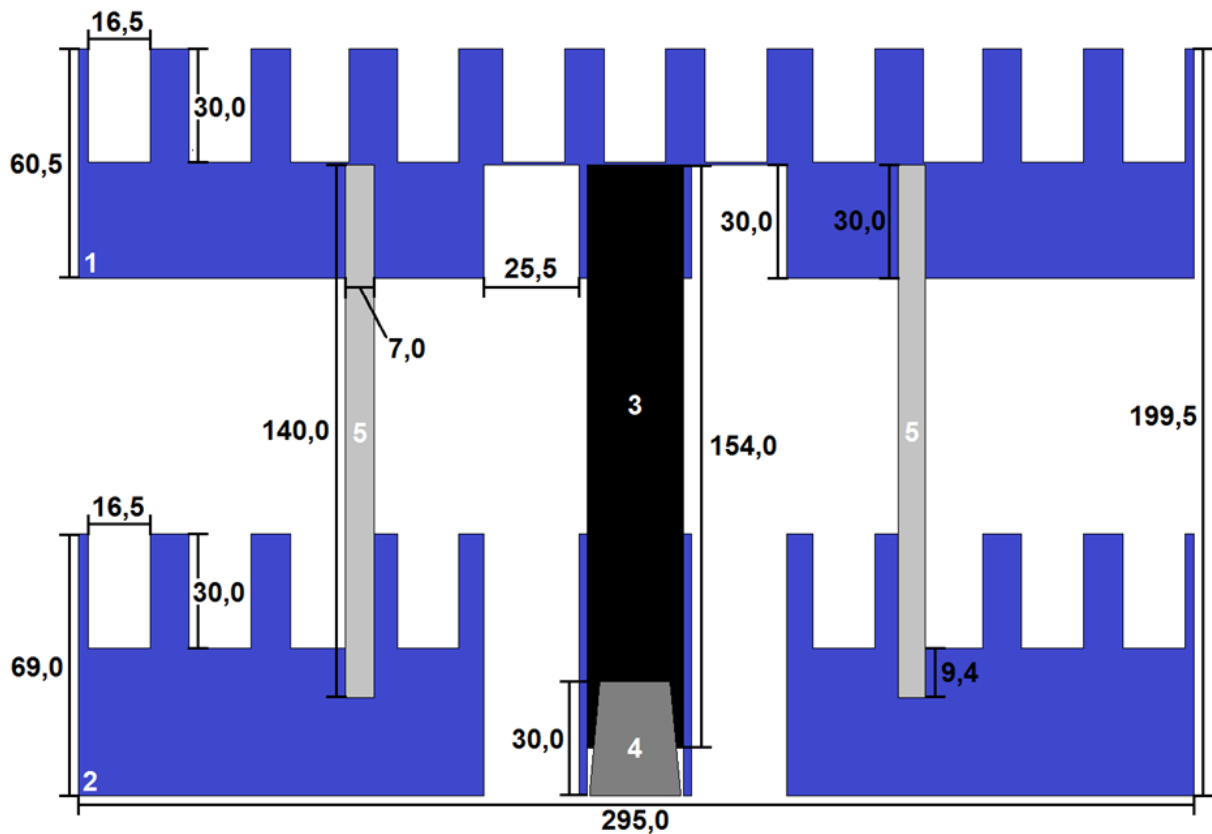


Abb. 29: Schnitt A-A' (Maßstabsgetreu), Szenario = 1 Rohr Mitte mit Zylinder, 1 = Kopfplatte, 2 = Grundplatte, 3 = Sondenrohr, 4 = Stöpsel, 5 = Gußeisenzylinder, Angaben in [mm].

Die Kopfplattenunterseite ist in Abb. 30 dargestellt. Diese hat wiederum eine kreisförmige Nut, entsprechend der Grundplattenoberseite mit einer Tiefe von 30 mm. Weiterhin hat sie 5 Bohrungen, die den Sondenports der Grundplatten entsprechen mit einer Tiefe von 30 mm. Nut und Sondenports auf der Kopfplattenunterseite dienen zur Aufnahme der Sondenrohre, sowie des Zylinders beim Herablassen der Kopfplatte, zur Messung von oben, entsprechend Abb. 27.

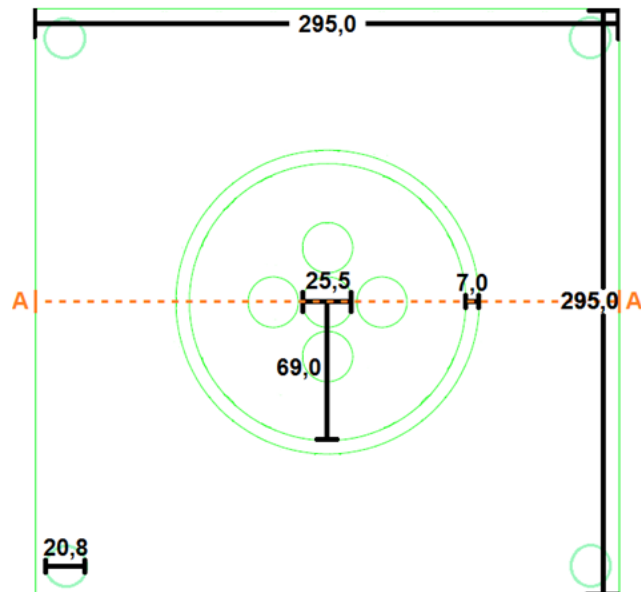


Abb. 30: Technische Zeichnung der Kopfplattenunterseite in Mastercam Software (Angaben in mm).

Ausgehend von der Mächtigkeit der Kopfplatte von 60,5 mm, den 30 mm tiefen Messports auf deren Oberseite und den 30 mm tiefen Aufnahmebohrungen an deren Unterseite ergibt sich eine PVC-Trennwand von nur 0,5 mm zwischen Sondenrohr und Messsonde. Es wurde hier bewusst an die Materialgrenze gegangen, da wie bereits erwähnt, die Distanz zwischen Sonde und Probe wesentlich das Ergebnis beeinflusst. Das Ziel war es letztlich ein maximales Signal zu erhalten.

Für die Darstellung als Konturkarten müssen den Messports auf Grund- und Kopfplatte X/Y-Koordinaten zugeordnet werden. Abb. 31 zeigt die Aufteilung der Koordinaten auf der Grundplatte. Diese sind ebenfalls für die Kopfplatte gültig, die das gleiche Muster und Anzahl an Messports besitzt. Die Eckkoordinaten 0/0, 0/10, 10/0 und 10/10 sind hier nur der Vollständigkeit halber eingetragen. An dieser Stelle befinden sich jedoch keine Messports, sondern die Bohrungen für die Führungsstäbe der Kopfplatte. Diese Punkte werden in der Konturkartenauswertung, sowohl für Grund- als auch Kopfplatte, ausgelassen.

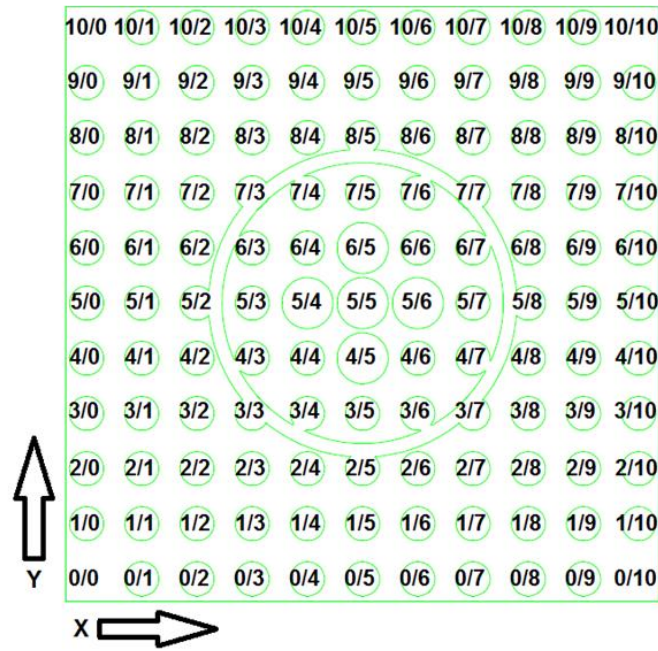


Abb. 31: Koordinatensystem der Grundplatte (entspricht auch der Kopfplatte).

3.2.18 Versuchsaufbau zur elektrischen Widerstandsmessung

Zur Durchführung der elektrischen Widerstandsmessung wurde ein Laborversuchsaufbau entwickelt. Um verschiedene geologische Bedingungen darstellen zu können, wurden hierbei unterschiedliche Lockergesteine (Sand, Lößlehm, Ton) verwendet, deren spezifische elektrische Widerstände sich in Abhängigkeit von deren Wassergehalt um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden (Abb. 32).

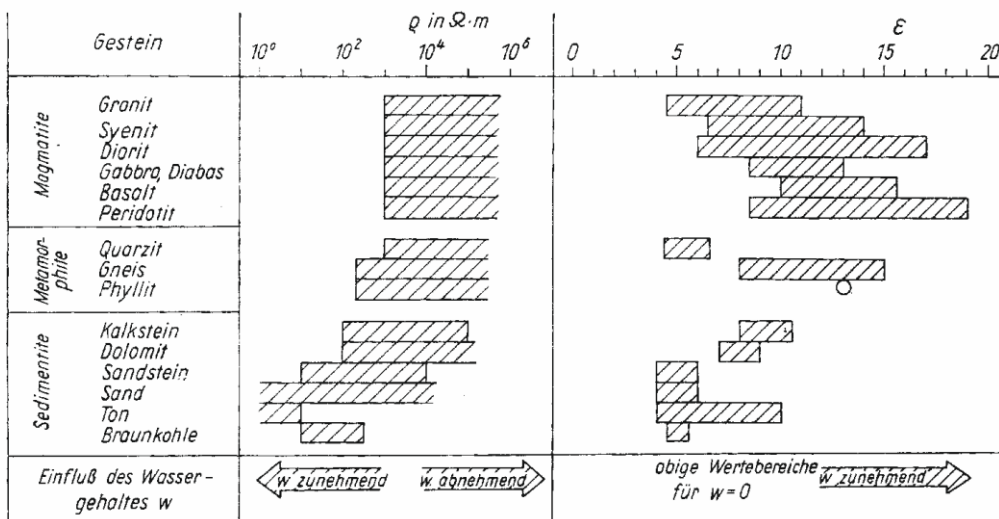


Abb. 32: Mittlere Wertebereiche bzw. Einzelwerte des spezifischen elektrischen Widerstands und der Dielektrizitätskonstante (nach Schön 1983).

3.2.18.1 Sand

Als Sand wurde der Industriesand Dorsilit Quarzsand 0,1 – 0,8 mm (von Gebr. Dorfner GmbH & Co.) verwendet. Hierbei handelt es sich um einem quarzhaltigen (ca. 95 %), feinen bis mittelfeinen Sand mit einem geringen Feldspatanteil von < 5 %.

3.2.18.2 Lößlehm

Aufgrund seiner homogenen Eigenschaften eignet sich der Lößlehm im besonderen Maße für diese Art von Versuchen. Er stammt aus einer Baugrube bei Berghausen im Pfinztal. Der Untergrund wird hier von triassischen Gesteinen des Oberen Buntsandsteins bis Unteren Muschelkalks gebildet, welche die paläozoischen Sedimente der saxothuringischen Zone des variszischen Orogens überlagern (Geyer & Gwinner 1991). Über dem mesozoischen Deckgebirge erreichen quartäre Lößlehm- und Schwemmlößablagerungen Mächtigkeiten zwischen 2 und 10 m. Hierbei handelt es sich um Verwitterungsprodukte des Lösses, einem äolischen Sediment, das während der Kaltzeiten des Pleistozäns von Westen in Landsenken eingeweht wurde. Der aus den ausgedehnten vegetationsarmen Tundragebieten ausgeblasene feinkörnige (Schluff bis Feinsand) Gesteinsstaub wird durch Verwitterungsprozesse entkalkt und die silikatischen Anteile (Feldspäte) in Tonminerale umgewandelt. Bei dem in den Laborversuchen verwendeten umgelagerten Lößlehm handelt es sich um einen schwach sandigen, tonigen Schluff (DIN 4022, Teil 1) mit einem Gehalt an Tonmineralen von ca. 35 %.

3.2.18.3 Ton

Als Ton wurde der Ca-Bentonit Florisol® B-extra (von der Stephan Schmidt Gruppe) verwendet, der sich durch ein geringes Quellvolumen auszeichnet. Er besteht mineralogisch aus 5 % Illit, 80 % Smectit, 5 % Kaolinit, Kalk < 0,5 % und 10 % Quarz. Der Anteil < 2 µm liegt bei 40 %.

3.2.18.4 Verwendete Kontrastmittel

In Analogie zu den Versuchen mit den magnetisch dotierten Kontrastmitteln wurden für die elektrische Widerstandsmessung hochleitfähige Kontrastmittel eingesetzt. Hierbei wurden dieselben Einzelkomponenten (Bentonit (Kapitel 3.2.1.1), Zement (Kapitel 3.2.1.2) und Nano-Eisenpulver (Kapitel 3.2.1.4) verwendet, wobei die Mischungsverhältnisse entsprechend der neuen Anwendung modifiziert wurden. Der Anmischvorgang sowie die Bewertung des Kontrastmittels unterlagen jedoch denselben Kriterien wie bei den magnetisch dotierten Kontrastmitteln (Kapitel 3.2.16, Kapitel 3.3.1). Die untersuchten Rezepturen sind in Tab. 4 aufgelistet.

Tab. 4: Rezepturen der elektrisch leitfähigen Kontrastmittel bezogen auf 1 l Wasser:

Rezeptur	Wasser [l]	Bentonit [g]	Zement [g]	Nano-Eisen [g]
1	1	180	80	30
2	1	180	120	100
3	1	200	240	200
4	1	160	240	200

3.2.18.5 Versuchstand zur elektrischen Widerstandsmessung

Für die Messung des elektrischen Widerstands zur Positionsbestimmung einer Erdwärmesonde innerhalb eines Bohrlochs wurde ein einfacher Laborversuch entwickelt. Hierzu wurde in die Mitte eines Plexiglasbeckens (L = 500 mm, T = 300 mm, H = 400 mm) ein Eisenrohr aus Baustahl (H = 225 mm, Außen- \varnothing = 160, Innen- \varnothing = 152 mm) gestellt und mit einer 200 mm Schicht aus Quarzsand (Kapitel 3.2.18.1) umgeben (Abb. 33). Da das Eisenrohr bei der eigentlichen Widerstandsmessung die Gegenelektrode (Kapitel 3.1.2) darstellt, wurde am oberen Rand mittels einer Bandschelle ein Kupferdraht angebracht. Am Boden des Eisenrohrs wurde eine runde PVC-Plate fixiert, die über zwei Aussparungen für die Montage der Erdwärmesonden verfügte, damit diese bei jedem Versuch gleich positioniert waren. Auf die PVC-Montageplatte wurden bei jedem Versuch zwei mit Kontrastmittel gefüllte Erdwärmesonden platziert. Anschließend wurde das Eisenrohr mit Lockersediment befüllt. Hierzu wurde Sand, Lößlehm oder Ton verwendet, um verschiedene geologische Bedingungen nachzustellen. Der Wasserspiegel innerhalb des Plexiglasbeckens wurde über einen seitlich angebrachten PVC-Schlauch geregelt. Da für das Überbohren der Erdwärmesonde der Einsatz eines Stufenmeißels geplant war, wurde dieser zur Messelektrode umgebaut (Abb. 34). Hierzu wurde ein Edelstahldrahtgeflecht, an das ein Kupferdraht installiert war, mit ein Zweikomponentensilikonkautschuk KDSV25 (R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH) vergossen. Um diese Elektrode am Stufenmeißel montieren zu können, wurde im Vorfeld am Stufenmeißel eine Nut gefräst sowie zwei M4er Löcher gebohrt (Abb. 34 rechts). Diese Anordnung sollte nur für den Laborversuch Verwendung finden, da sie für den rauen Realbetrieb mit einer herkömmlichen Bohranlage nicht geeignet ist. Der Plan für einen Bohrkopf für den Realbetrieb befindet sich in Kapitel 3.4 (Abb. 141). Zur eigentlichen Widerstandsmessung wurde der Bohrkopf in das Eisenrohr des Laborversuchsstands eingesetzt und mit einem Führungsdeckel mit aufgeprägter Messskala abgedeckt (Abb. 35). Nach angeschlossener Installation aller Bauteile, wurden die Gegenelektrode sowie die Messelektrode an das Voltcraft LCR-Messgerät (LCR-300) angeschlossen. Die Messungen erfolgten im Wechselstromwiderstandsbetrieb. Der Grund hierfür liegt darin begründet, dass die Spannung bei der Gleichstromwiderstandsmessung in der Regel über der Zersetzungsspannung des Wassers liegt. Dadurch würden im Bereich der Elektroden

elektrochemische Prozesse stattfinden (Elektrolyse, Veränderung der pH- und Eh-Bedingungen, Fällungs- Lösungsreaktionen), die die Widerstandsmesswerte negativ beeinträchtigen können. Bei der eigentlichen Messung wurde der Bohrkopf händisch um jeweils 10° im Uhrzeigersinn gedreht und der entsprechende Widerstandswert abgelesen. Insgesamt wurden je Versuch 10 Umdrehungen durchgeführt.

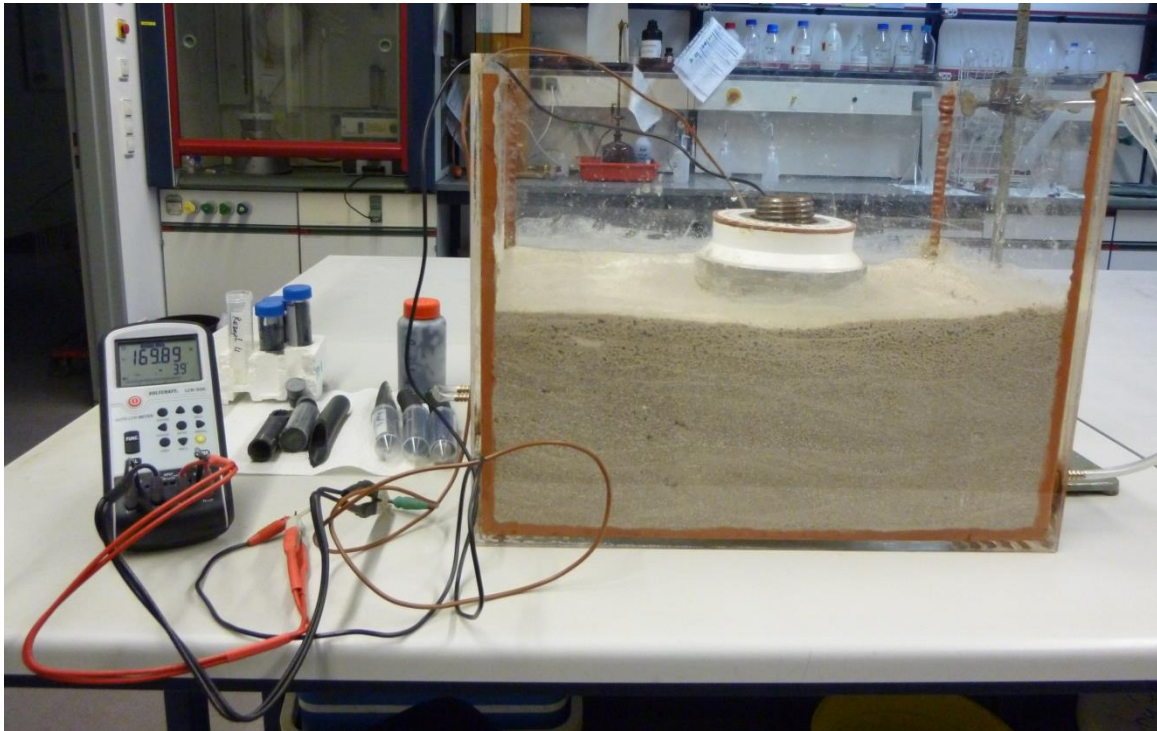


Abb. 33: Versuchsaufbau zur elektrischen Widerstandsmessung.



Abb. 34: Bohrkopf für Laborversuch zur elektrischen Widerstandsmessung.

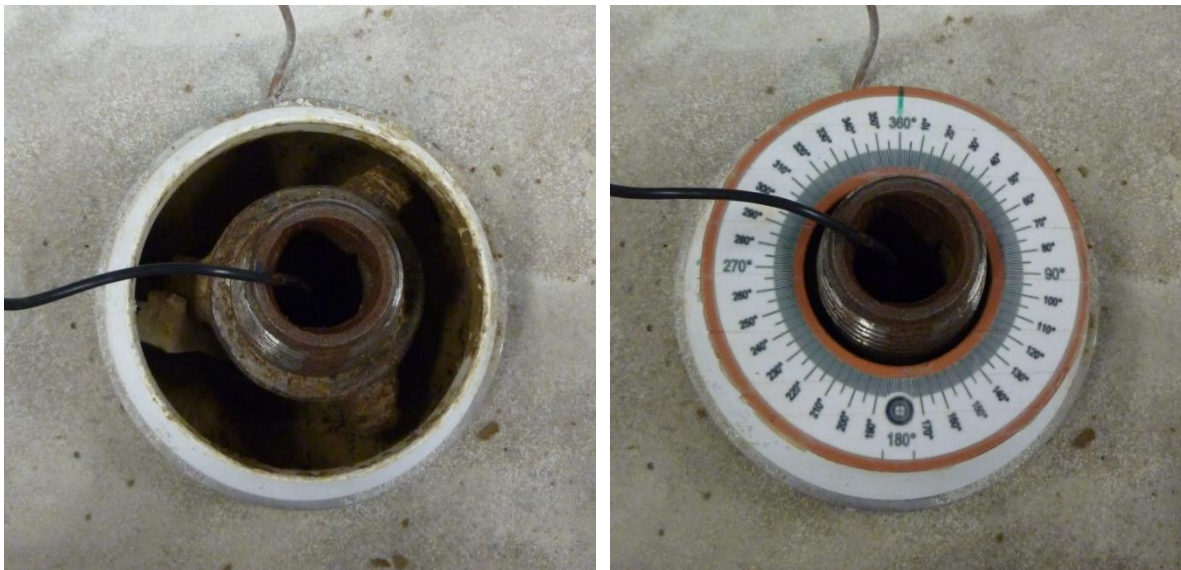


Abb. 35: Installierter Bohrkopf im Eisenrohr (links), Messskala zur Orientierungsbestimmung des Bohrkopfs (rechts).

3.2.19 Technikumsversuchsstand zur Verlaufsmessung

Um die Verlaufsmessung unter definierten Bedingungen durchführen zu können, wurde ein 6 m hoher Versuchsaufbau im Technikumsmaßstab aufgebaut. Hierzu wurde ein um die X-Achse kippbarer Metallfuß (Abb. 36) gebaut, in den ein 6 m PMMA-Rohr (Polymethylmethacrylat-Rohr, $\varnothing 180/172$ mm, Athex GmbH & Co. KG) montiert wurde. In das PMMA-Rohr wurde eine PE 100-RC Doppel-U-Erdwärmesonde (32 x 2,9) möglichst stark verwunden eingebaut (Abb. 37, links) und mit einem nicht dotierten Baustoff hinterfüllt (Abb. 37, Mitte). Der kippbare Fuß wurde mittels Ösen (Abb. 37, rechts unten) und einem Seil an eine Säule fixiert. Eine zweite Befestigungsschelle (Abb. 37, rechts oben), an die ebenfalls ein Seil befestigt wurde, ist am Kopfende des Plexiglasrohrs angebracht. Diese bauliche Anordnung dient dazu, dass das Rohr mitsamt der EWS kontrolliert geneigt werden kann und damit unterschiedliche Sondenverläufe simuliert werden können.

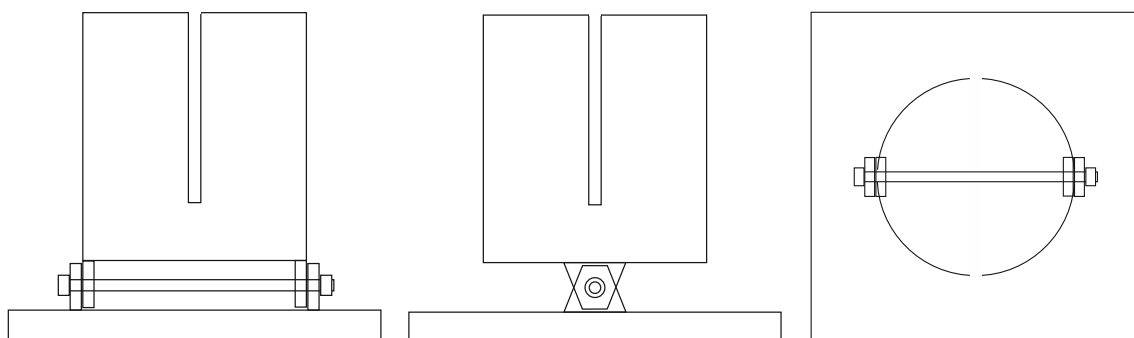


Abb. 36: Skizze des schwenkbaren Fußes des Technikumsversuchsstands zur Verlaufsmessung.



Abb. 37: Aufbau des Technikumsversuch zur Positionsmessung.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Magnetisch dotierte Zement-Bentonit-Suspensionen als Kontrastmittel

3.3.1.1 Herstellung einer stabilen und pumpbaren Zement-Bentonit Suspension

Bei der Herstellung einer stabilen und pumpbaren, magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspension ist eine systematische Vorgehensweise relevant, da die Suspensionseigenschaften letztlich von den 3 Komponenten, Bentonit, Zement und magnetischem Material sowie deren Interaktion abhängen. Deshalb wurde zuerst lediglich versucht, eine stabile und pumpbare Zement-Bentonit Suspension herzustellen ohne Zusatz der magnetischen Materialien.

Die Pumpbarkeit wurde dabei im ersten Schritt außeracht gelassen, sondern lediglich die Verarbeitbarkeit (Gießbarkeit) und die Suspensionsstabilität untersucht. Hierzu wurden für den Anfang, um Material zu sparen und um sich auch etwas mit den Materialien vertraut machen zu können, Versuche durchgeführt, die nicht den LQS EWS Vorgaben im Hinblick auf die Suspensionsstabilität entsprechen.

Zuerst wurde der IBECO Bentonit auf sein Verhalten in Suspensionen untersucht. Als Startpunkt wurde hier eine Menge von 200 g Bentonit auf 1 l Leitungswasser (200 g/l¹) eingegeben und gerührt, das dem Mindestwert für eine stabile Calciumbentonitsuspension entspricht. Bei Na-Bentonit ist dieser Wert wesentlich geringer (40 g/l) (Osebold 2008).

Die Suspension mit 200 g/l war direkt nach Abstellen des Rührvorgangs nicht mehr gießbar, so dass klar war, dass der Wert zu hoch angesetzt war. Im nächsten Versuch wurde die Menge halbiert, also 100 g/l. Diesmal war die Suspension gut gießbar und wurde in ein Zentrifugenröhrchen mit Messskala gegossen. Das Ergebnis zeigte auch nach Tagen keinerlei Bildung von Freiwasser (Abb. 38, (1)), sodass die Suspension als stabil angesehen werden konnte.

¹ Im Folgenden bezieht sich g/l immer auf das Rezept für die Suspension, also Zugabe von x Gramm in einen Liter Leitungswasser, und nicht auf die Konzentration nach der Herstellung der Suspension.

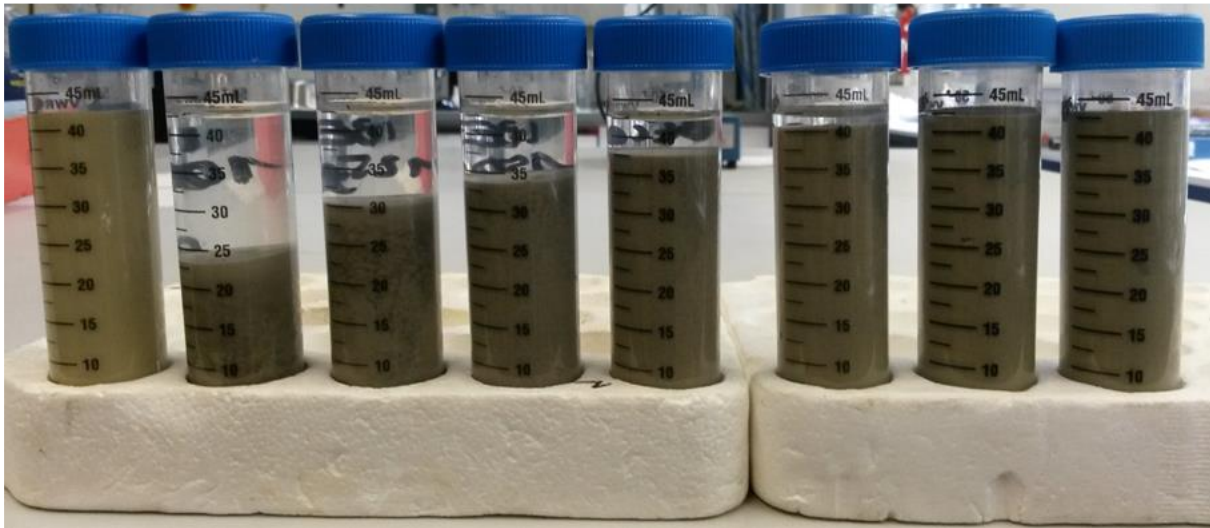


Abb. 38: Von links nach rechts: (1) 100 g/l Bentonit, (2) 100 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (3) 125 g/l Bentonit+ 200 g/l CEM1, (4) 150 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (5) 180 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (6) 210 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (7) 250 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1, (8) 300 g/l Bentonit + 200 g/l CEM1.

Im nächsten Schritt konnte man also bereits an eine Zugabe des Zements (CEM1) denken. Hier wurde als Startwert 200 g/l CEM1 festgesetzt, die zusätzlich zum Bentonit eingegeben werden sollten. Dies war ein Wert der aus Osbold (2008), der Bentonit-Zementsuspensionen mit entfernt ähnlichem Anwendungsbereich (Abdichtung von Rohrleitungen) herstellte, entnommen wurde.

In Abb. 38 (2) ist dieser Versuch zu sehen. Nach Eingabe der Suspension in das Zentrifugenröhrchen kam es zu einer relativ schnellen Bildung von Freiwasser um fast 50 % der ursprünglichen Suspensionssäule. Der Hauptteil dieser Freiwasserbildung war bereits nach 1 h abgeschlossen. Offensichtlich schien die Zugabe des CEM1 die Stabilität im Vergleich zur reinen Bentonitsuspension negativ zu beeinflussen.

In weiteren Versuchen wurde die Menge an Bentonit kontinuierlich erhöht, während die Menge an CEM1 konstant bei 100 g/l gehalten wurde, was zu einer stetigen Abnahme des Freiwassers sorgte. Schritte waren 100, 125, 150, 180, 210, 250 und 300 g/l für den Bentonit. Letztere Bentonitmenge sorgte für eine vollständig stabile Suspension ohne jeglichen Freiwasserfilm.

Die Bildung von Freiwasser muss für das im Recover-EWS Projekt geplante Verfahren klein gehalten werden (z.B. entsprechend LQS EWS), da später bei Verwendung magnetisch dotierter Zement-Bentonit Suspension, bei einem Absetzen der Suspension, kein magnetisches Signal in den betroffenen Abschnitten detektiert werden könnte.

Die Suspension mit 300 g/l Bentonit (B) und 200 g/l CEM1 (Z) ($B/Z = 1,5$) war allerdings nicht mehr pumpbar. Dies konnte mit dem Marshtrichterversuch mit größeren Suspensionsvolumina nach DIN 14117 nachgewiesen werden. Die Marshzeit sollte laut Angaben von Frank Burkhardt (Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG) 90 s nicht überschreiten, um noch mit gängigem Bohrequipment auf Baustellen pumpbar zu sein. Auch die LQS EWS gibt Werte von 50 bis 100 s für gut zu verarbeitende Suspensionen an. Im Fall der Suspension mit 300 g/l Bentonit und 200 g/l CEM1 waren nicht einmal 100 ml nach 90 s geflossen, sodass der Versuch abgebrochen wurde.

Als Konsequenz müsste nun, unter Beibehaltung des B/Z-Verhältnisses von 1,5 für eine stabile Suspension, die Gesamtfeststoffmenge reduziert werden, um die Viskosität zu verringern. Hierzu wurde in einem ersten Versuch die Gesamtfeststoffmenge halbiert, also 150 g/l Bentonit und 100 g/l CEM1. Zuerst war zu prüfen, ob die Annahme mit einem konstanten B/Z Verhältnis von 1,5 für eine stabile Suspension zutrifft. Abb. 39 zeigt hierzu weitere Versuche.

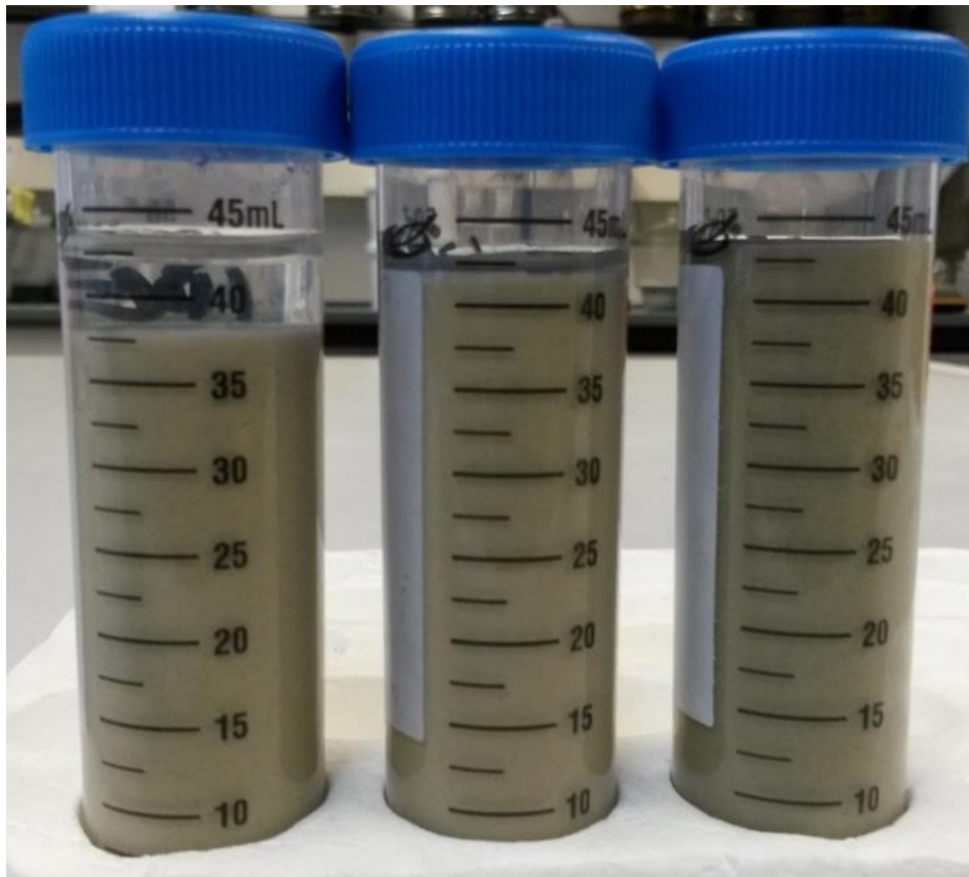


Abb. 39: Von links nach rechts: (1) 150 g/l Bentonit +100 g/l CEM1 (2) 200 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1, (3) 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1.

Das Ergebnis in Abb. 39(1) zeigt, dass unter Beibehaltung des B/Z-Verhältnisses, und einer Halbierung der Stoffmenge die Suspension nicht stabil bleibt. Erst eine Erhöhung der Stoffmenge an Bentonit stabilisiert die Suspension wieder (Abb. 39 (2)&(3)).

Entsprechend dieser Ergebnisse wurde entschieden, mit der 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1 Suspension weiter zu arbeiten, da man damit stabile Suspensionen erreichen kann. Der nächste Schritt war die Untersuchung mittels DIN 14117 zur Bestimmung der Marshzeit und damit Überprüfung der Pumpbarkeit. In diesem Fall ergab sich eine Marshzeit von 52 s unmittelbar (< 1 min) nach dem Mischen. Dieser Wert lag deutlich unter den Angaben von Frank Burkhardt und im Bereich der LQS EWS, so dass von einer Pumpbarkeit mit gängigem Bohrequipment auszugehen war.

Da nun also von einer brauchbaren Suspension ausgegangen werden konnte, wurde im nächsten Schritt die Stabilität, nochmals korrekt nach der LQS EWS, bestimmt. Es ergab sich eine Abnahme von ca. 0.4 Vol. %, auf jeden Fall aber < 1 Vol. % (Abb. 40).



Abb. 40: Absetzmaßbestimmung in 250 ml Standzylinder für die Suspension mit 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1. Rechts der Stand nach 3 h entsprechend LQS EWS (ca. 1 ml Abnahme entsprechend 0,4 Vol. %).

Dies bestätigt im Prinzip die Ergebnisse in Abb. 39 (3). Dort hat sich bei entsprechender Suspension nur ein feiner Film Freiwasser gebildet, der aufgrund der groben Skalierung der Zentrifugenröhrchen nicht zu quantifizieren war.

Für eine 100 m Erdwärme-Sonde würde dies eine Freiwassersäule von nur 0,4 m in einem einzelnen Sondenrohr bedeuten. Für den Anwendungsfall im Projekt ist dies als völlig unproblematisch zu betrachten, da, wenn überhaupt, erst in größeren Tiefen von einer signifikanten Abweichung einer Rückbaubohrung auszugehen ist, die dann eine Messung des Kontrastmittels erfordern könnte. Selbst bei Annahme einer 400 m Sonde, was dem Grenzbereich für oberflächennahe geothermische Anlagen entspricht, würde eine Säule von nur 1,6 m entstehen, die ebenfalls noch unproblematisch wäre für einen Anwendungsfall.

3.3.1.2 Vorversuche und Kommentare zur Herstellung einer stabilen und pumpbaren magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspension

Mit den in Kap. 3.3.1.1 beschriebenen Untersuchungen konnte eine stabile und pumpbare Zement-Bentonit Suspension hergestellt werden. Im nächsten Schritt müssten nun erste Versuche mit der stabilen 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1 Suspension durchgeführt werden, unter Zugabe von magnetischem bzw. magnetisierbarem Material.

An dieser Stelle ist zu bemerken, dass die ferromagnetischen Materialien Magnetit und Nano-Eisen, die in dieser Arbeit verwendet werden, in Ihrem Rohzustand kaum eine messbare bzw. sich vom Erdmagnetfeld (30-50 μT im europäischen Raum) abhebende magnetische Flussdichte aufweisen. Dies konnte ganz einfach mit dem Teslameter FM302 festgestellt werden. Dazu wurde die GEO-X Axialsonde an einem Stativ fixiert und ein mit purem Magnetit- oder Nano-Eisenpulver gefülltes PE-Verfüllrohr ($\varnothing 25$ mm) angenähert bzw. untergestellt (Abb. 41).



Abb. 41: Messung der Flussdichte eines jeweils mit Magnetit und Nano-Eisen Pulver gefüllten PE-Verfüllrohrs ($\varnothing 25$ mm, 100 mm lang).

Das Signal für Magnetit wich um nur max. 1 μT vom Erdmagnetfeld (ca. 38 μT) an diesem Punkt ab, das für Nano-Eisen um nur max. 5 μT . Die Abweichungen hingen dabei von der Lage der gefüllten PE-Rohre zur Sonde ab, sowie natürlich von der Entfernung zur Sonde, da die Flussdichte eines magnetischen Materials mit der Entfernung dazu abnimmt. Die maximalen Abweichungen (1 μT für Magnetit und 5 μT für Nano-Eisen) wurden jeweils in der Stellung entsprechend Abb. 41 gemessen und der Abstand war minimal bzw. kurz vor Berührung der GEO-X Sonde mit dem Material im PE-Rohr. Diese sehr kleinen gemessenen Abweichungen sind für den Anwendungsfall im Recover-EWS Projekt nicht ausreichend, da zu bedenken ist, dass später im Kontrastmittel mit Bentonit und Zement, der Feststoffanteil an Magnetit oder Nano-Eisen wesentlich geringer sein wird, als wie in diesem Fall 100 %. Dies würde eine nicht mehr zu messende Abweichung gegenüber dem Erdmagnetfeld zur Folge haben. Aus diesen Gründen müssen die magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspensionen zuerst in einem externen Magnetfeld, z.B. in Form eines Magneten, magnetisiert werden, damit eine brauchbare Messung zustande kommen kann.

Aus diesen sehr einfachen ersten Vorversuchen konnte auch festgestellt werden, dass für die weiteren Untersuchungen ein Messstand entwickelt werden muss (siehe Kap. 3.2.17), um die magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspensionen untersuchen zu können. Ein solcher Messstand muss vor allem gewährleisten, dass die Messbedingungen reproduzierbar sind, um so unterschiedliche Feststoffanteile an Magnetit oder Nano-Eisen messen und vergleichen zu können. Auch muss der Vorgang der Magnetisierung der Stoffe reproduzierbar sein.

3.3.1.3 Herstellung einer stabilen und pumpbaren magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspension

Mit dem in Kap. 3.2.17 beschriebenen Mess- und Magnetisierungsstand sollten nun im nächsten Schritt erste Versuche mit der stabilen 220 g/l Bentonit + 100 g/l CEM1 Suspension aus Kap. 3.3.1.1 durchgeführt werden, unter Zugabe von magnetisierbarem Material.

Ein erster Versuch wurde unter Zugabe einer Menge an Magnetit von 60 g/l durchgeführt. Der Versuch zeigte, dass die Menge an Magnetit zu einer deutlichen Erhöhung der Viskosität führt, so dass die Suspension nur noch schwer in Zentrifugenröhrchen gegossen werden konnten.

Das Rezept wurde jedoch vorerst nicht genauer nach DIN EN 14117 und LQS EWS untersucht, da in erster Linie interessant war zu erfahren, ob man hier eine brauchbare Messung der magnetischen Flussdichte durchführen kann.

In Abb. 42 sind die Messergebnisse des einfachsten Szenarios mit einem Sonderrohr in der Mitte (entsprechend Abb. 25) und zuvor genannter Suspensionszusammensetzung gezeigt. Die Abbildung zeigt Differenzkarten der Grund- und Kopfplatte. Es wurde zuerst eine Messung der Grund- und Kopfplatte mit nicht magnetisierter Suspension im Rohr durchgeführt, danach wurde das Rohr mitsamt Suspension magnetisiert und nochmal

gemessen. Schließlich wurden die Ergebnisse der Flussdichtemessung mit nicht magnetisiertem Material von der Flussdichtemessung nach der Magnetisierung abgezogen ($=\Delta B$), jeweils für Grund- und Kopfplatte. Um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen wurde auch eine B Probe gemessen.

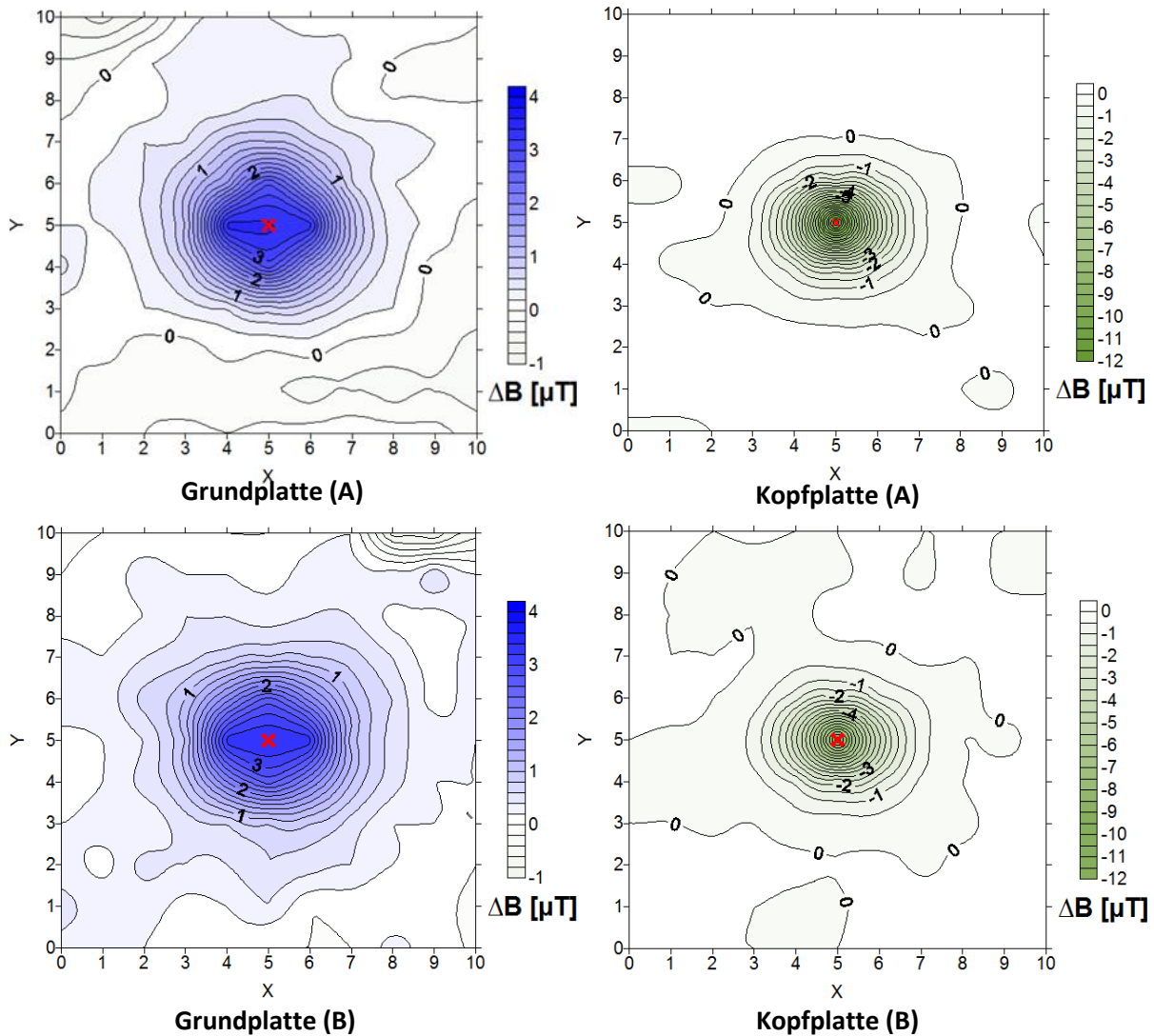


Abb. 42: Rezept: 220 g/l Bentonit, 100 g/l Zement, 60 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Nord“.

Die B Probe wurde aus der gleichen Suspensionsmischung entnommen wie die A Probe, mit dem Ziel ausschließlich die Reproduzierbarkeit der Magnetisierung und anschließenden Flussdichtemessung ohne eventuelle Einflüsse, resultierend aus Abweichungen im Herstellungsprozess der Suspension, zu bestimmen. Die Reproduzierbarkeit kann als gut eingestuft werden. Die Flussdichteanomalie resultierend aus der Magnetisierung ist bei beiden Proben auf der Grundplatte vom Wert her nahezu identisch, bei einem ΔB von $+3,5 \mu T$. Auch ist das kreisförmige Muster der Anomalien bei beiden Proben reproduzierbar. Bei der

Kopfplatte liegen die Anomalien bei $-12 \mu\text{T}$ (A) und $-9,5 \mu\text{T}$ (B), das Muster der Anomalien ist wiederum sehr gut reproduziert.

Es ist noch zu erwähnen, dass ein Vergleich der Flussdichtemessung eines leeren Rohrs, mit dem mit Suspension gefüllten, jedoch nicht magnetisierten Rohr, unauffällig war. D.h., dass die dotierten Suspensionen vor der Magnetisierung keinerlei messbaren Einfluss auf die natürliche Flussdichte haben, also keine Anomalien hervorrufen. Dies war bereits aus den Messungen in Kap. 3.3.1.2 zu erwarten. Die Messungen dazu sind in Abb. 43 dargestellt. Zu deren Berechnung wurden die Daten der nicht magnetisierten Proben aus Abb. 42 verwendet. Es wurde die gemessene natürliche Flussdichte (leeres Rohr) von der Flussdichte mit nicht magnetisierter Suspension abgezogen, jeweils für Grund- und Kopfplatte.

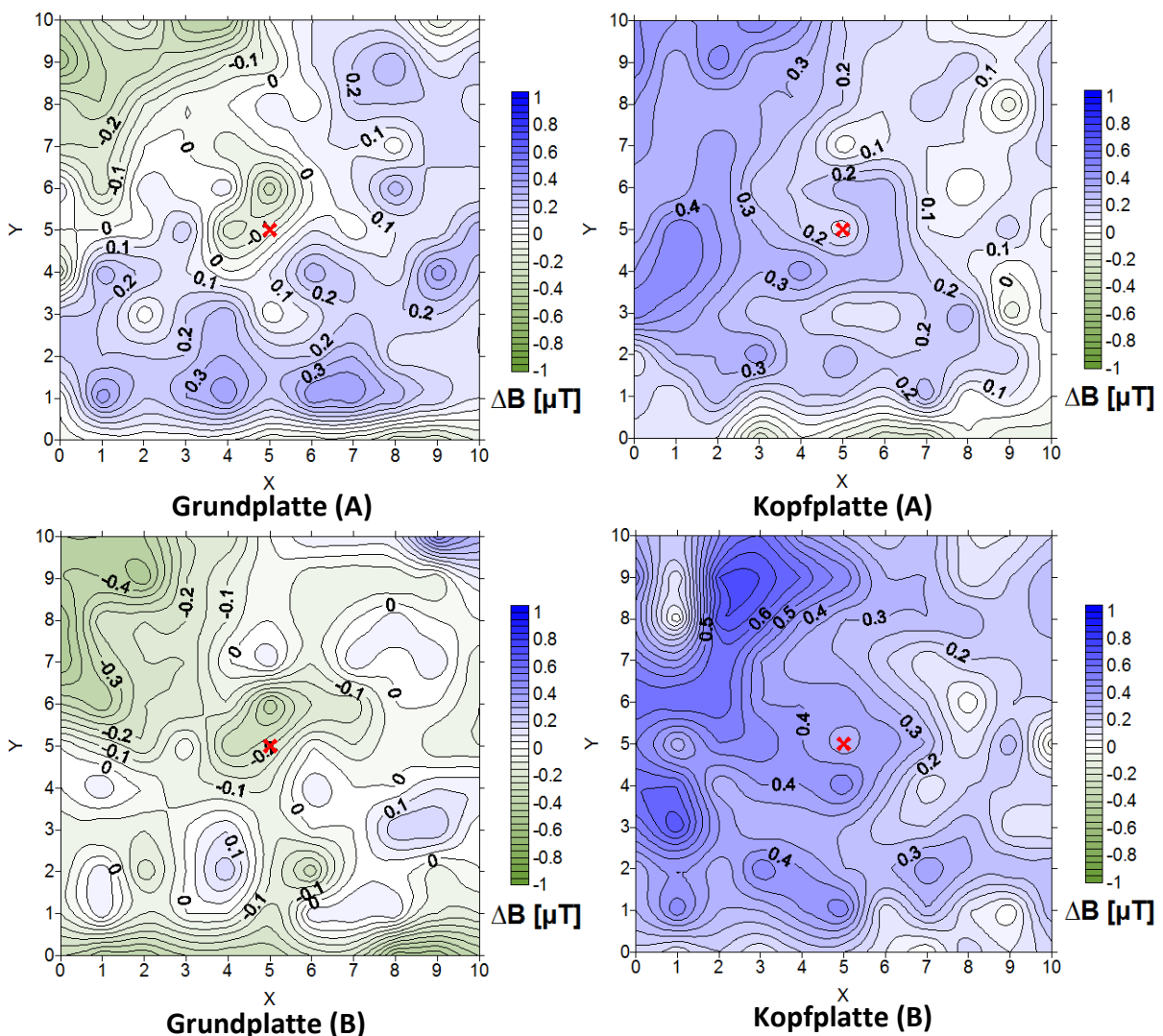


Abb. 43: Rezept: 220 g/l Bentonit, 100 g/l Zement, 60 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass das ΔB in einem Bereich $< \pm 1 \mu\text{T}$ schwankt. Mehrere Hintergrundmessungen und eine statistische Fehlerbetrachtung ergaben, dass dies innerhalb der natürlichen Hintergrundschwankungen liegt. Der nicht magnetisierte Magnetit hat also keinen Einfluss auf die natürliche Flussdichte bzw. kein signifikantes eigenes B-Feld. In den Versuchen aus Abb. 42 sowie im Folgenden wurde die Polarität „Nord“ entsprechend Abb. 20 verwendet. Ob Nord oder Süd verwendet wird ist letztlich irrelevant, da das Material im nichtmagnetisierten Zustand kein initiales B-Feld mit einer bestimmten Polarität aufweist.

Für die zuvor genannte statistische Fehlerbetrachtung wurden je zwei Messpunkte auf der Grund- und Kopfplatte ($X/Y = 0/1$ und $10/9$) insgesamt 31 mal gemessen. Dabei war ein leeres Rohr in der Mitte ($X/Y = 5/5$) eingebaut, um die Kopfplatte aufsetzen zu können. Eine Stichprobe $n > 30$ gilt als Faustregel, um zufällige Prozesse, die sich aus der Überlagerung einer Vielzahl von zufälligen Einzeleffekten ergeben, hinreichend genau durch das theoretische Modell einer Normalverteilung beschreiben zu können. Die Normalverteilung wiederum ist Voraussetzung für die Regel, die in der statistischen Methodenlehre auch als Drei-Sigma (σ)-Regel bezeichnet wird: Im Intervall vom arithmetischem Mittel $\pm k \times$ Standardabweichung liegen für $k = 1$ ca. 68 %, für $k = 2$ ca. 95 % und für $k = 3$ ca. 99 % aller beobachteten Merkmalswerte (Eckstein 2015).

Im Bereich der Messtechnik und Analytik ist es gängig 2σ , also das arithmetische Mittel $\pm 2 \times$ Standardabweichung anzugeben.

Für die oben beschriebene Fehlerbetrachtung ergeben sich folgende Werte für 2σ :

Tab. 5: 2σ -Werte für zwei Messpunkte auf Grund- und Kopfplatte (keine Probe).

	2σ Grundplatte	2σ Kopfplatte
	[μT]	[μT]
X/Y= 0/1	$\pm 0,77$	$\pm 0,62$
X/Y =10/9	$\pm 0,97$	$\pm 0,55$

Die stärkste Abweichung ist auf der Grundplatte bei $X/Y = 10/9$ mit gerundet $\pm 1 \mu\text{T}$. Alle vier betrachteten Punkte ergeben jedoch grob gerundet $\pm 1 \mu\text{T}$, so dass dieser Wert die Hintergrundschwankungen gut beschreibt.

Im weiteren Verlauf wurde nun das in Abb. 42 untersuchte Rezept Schritt für Schritt verfeinert unter Berücksichtigung der Stabilität, Viskosität und magnetischen Detektierbarkeit.

Schlussendlich konnte nach weiterer Variation der Bentonit, Zement und Magnetit Konzentration folgendes Rezept ermittelt werden:

- 180 g Bentonit
- 80 g Zement
- 30 g Magnetit

auf 1 l Leitungswasser.

Eine Suspension solcher Zusammensetzung wies nach DIN EN 14117 eine Marshzeit von 51 s auf sowie eine Stabilität nach LQS EWS von 0,6 %. Die Messung der magnetischen Flussdichte ist als Differenzkarte in Abb. 44 dargestellt.

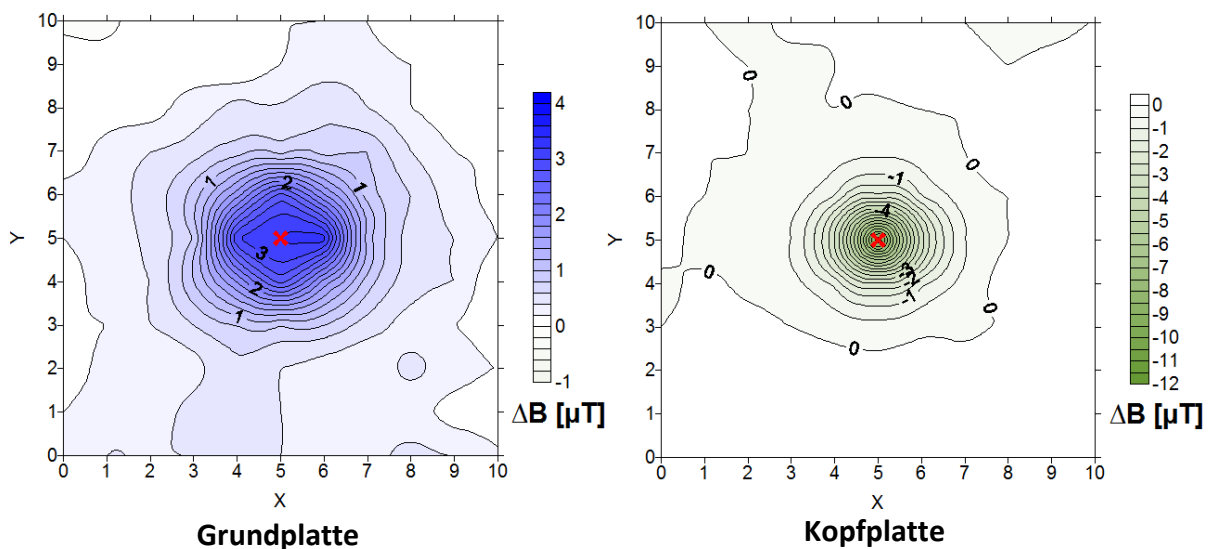


Abb. 44: Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Nord“.

Auffällig ist in erster Linie, dass die Muster und vor allem die Messwerte der Anomalien nach Magnetisierung sehr nahe an denen aus Abb. 42 liegen, obwohl die Zugabe an Magnetit halbiert wurde. Eine Erklärung hierfür können Abweichungen in der Herstellung der Suspensionen sein, so wurden die Proben A & B aus Abb. 42 in einem 1 l Gefäß hergestellt, da nur wenig Material zum Auffüllen der Sondenrohre nötig war. Die Probe aus Abb. 44 wurde in größeren Mengen in einem 5 l Gefäß hergestellt, da aus dieser Mischung auch Versuche nach LQS EWS und DIN 14117 durchgeführt wurden. Weiterhin können natürlich unterschiedliche Suspensionsvolumenausbildungen aufgrund der unterschiedlichen Rezeptur eine Rolle spielen.

Da nun eine Rezeptur vorlag, die im Hinblick auf Pumpbarkeit, Stabilität und das magnetische Signal brauchbar erschien, wurden im nächsten Schritt Überlegungen getroffen inwieweit es tatsächlich möglich ist, die hier angewandten Labormethoden im Feld anzuwenden. Als

Schwachpunkt wurde dabei der Vorgang der Magnetisierung identifiziert. Entsprechend Abb. 15 wird die Magnetisierung im Labor durchgeführt, nachdem das Kontrastmittel in das Sondenrohr eingefüllt wurde (im Folgenden abgekürzt mit MIR = Magnetisierung im Rohr). Hierzu wird der Magnetaufsatz bzw. das magnetische Feld am Sondenrohr entlanggeführt. Im Feld wäre dies nicht möglich, da es keine Möglichkeit gibt ein magnetisches Feld entlang der im Boden verbauten EWS zu führen (zumindest nicht ohne einen unverhältnismäßigen Aufwand).

Folglich sollte im Feld die Magnetisierung des Kontrastmittels vor der Injektion in die EWS stattfinden (im Folgenden abgekürzt mit MAR = Magnetisierung außerhalb Rohr). Um dieses Szenario mit den vorhandenen Mittel im Labor simulieren zu können, wurde die MIR-Methode abgeändert.

In Abb. 45 ist das neue Konzept (MAR) zur Magnetisierung dargestellt. Hierzu wird der bereits entwickelte Magnetisierungsstand verwendet. Der Aufsatz wird dabei entsprechend Abb. 45 (A) mit einfachen Holzklötzen in erhöhter Position fixiert. Durch die Bohrung in der Mitte des Aufsatzes kann nun eine mit Kontrastmittel gefüllte Spritze (hier wurde zur Darstellung nur eine leere Spritze verwendet) eingeführt und wieder entnommen werden. Dabei wird sie im Magnetfeld magnetisiert. Im nächsten Schritt Abb. 45 (B) wird ein Sondenrohr in der Bodenplatte aufgestellt und ein Aufsatz ohne Magnete aufgesetzt. Die vorher magnetisierte Spritze wird eingelassen, so dass deren Spritzenauslass direkt über der Öffnung des Sondenrohrs liegt. Ein Aufsatz ohne Magnete ist in diesem Schritt wichtig, um sicher zu sein, dass die Suspension nach Injektion in das Rohr nicht mehr von den Magneten beeinflusst werden kann, was zu Fehlinterpretationen führen könnte. Nun kann das in der Spritze befindliche Kontrastmittel langsam in das Sondenrohr injiziert werden (in Abb. 45 wurde zur Darstellung wieder nur eine leere Spritze verwendet).

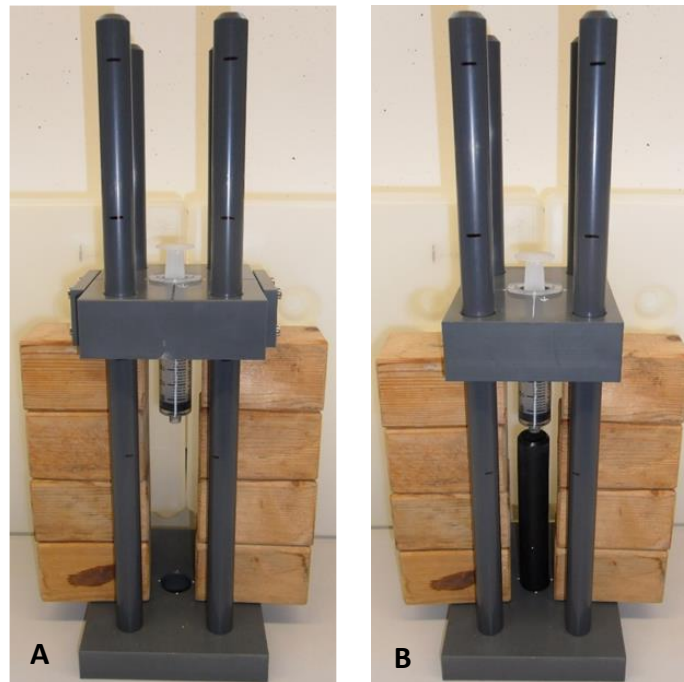


Abb. 45: Magnetisierung einer Spritze im Feld des Magnetaufsatzes (A), Injektionsszenario mit Aufsatz ohne Magneten und untergestelltem Sondenrohr (B); Höhe Magnetisierungsstand 452 mm.

Um diese für das Feld relevante Methode zu testen, wurde nun erneut eine Suspension entsprechend dem Rezept aus Abb. 44 hergestellt und mit der MAR-Methode im einfachsten Szenario (1 Rohr in der Mitte) getestet. Die Ergebnisse der Flussdichtemessung sind in Abb. 46 als Differenzkarten dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass bei der MAR-Methode das Material bereits vor dem injizieren in das Sondenrohr magnetisiert wird, ist eine Referenzmessung des nicht magnetisierten Kontrastmittels im gleichen Rohr nicht mehr möglich. Es wurden deshalb die Ergebnisse des nicht magnetisierten Rohrs aus Abb. 44 als Referenz verwendet. Dies ist angebracht, da in beiden Fällen das gleiche Rezept verwendet wurde. In Abb. 46 wurde im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit wieder Probe A und B gemessen. Beide Proben wurden aus der gleichen Suspensionsmischung entnommen, um wieder die Reproduzierbarkeit der Magnetisierungs- und Messung, unabhängig von eventuellen Abweichungen in der Suspensionsherstellung, ermitteln zu können.

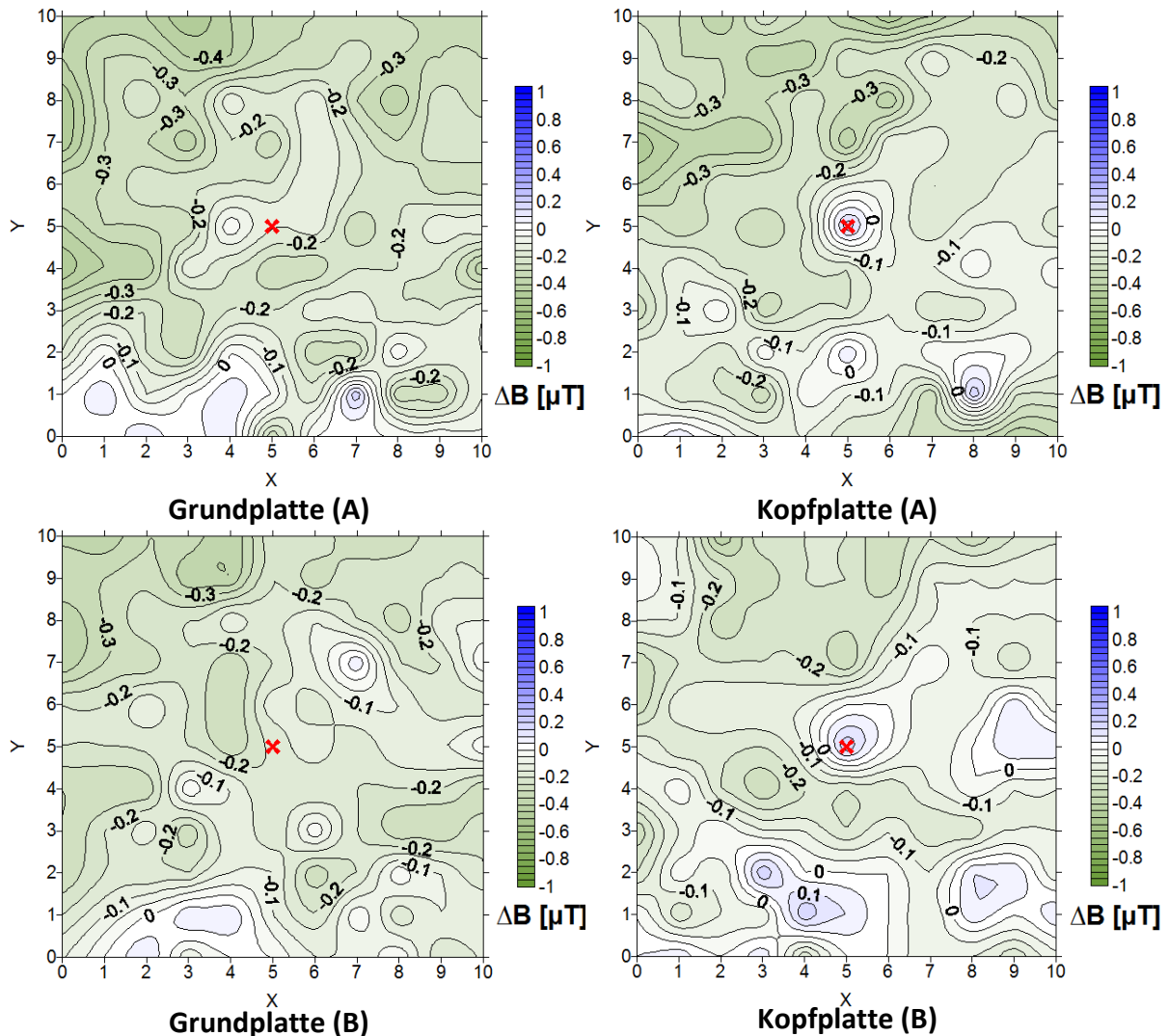


Abb. 46: Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR Methode mit GA „Nord“.

Die Ergebnisse in Abb. 46 zeigen keinerlei messbare Anomalie, weder auf Grund- noch Kopfplatte für beide Proben. Der Wertebereich liegt bei beiden Proben sowohl für die Kopf- als auch für die Grundplatte bei $< \pm 1 \mu\text{T}$. Dies entspricht den Hintergrundschwankungen, somit kann man sagen, dass hier die Magnetisierung im Vergleich zum nicht magnetisierten Material keinerlei Einfluss zeigt.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die MAR Methode nicht praktikabel ist für eine Magnetisierung. Um letzte Sicherheit zu haben, dass tatsächlich die Methode dafür verantwortlich ist, dass keine Flussdichteanomalie gemessen werden kann, und nicht etwa ein Fehler in der Herstellung der Suspension, wurden die beiden bereits gemessenen Proben A und B nochmal in den Magnetisierungsstand eingebaut und mit der MIR-Methode behandelt und wiederholt gemessen. Die Ergebnisse der Probe A und B sind in Abb. 47 gezeigt, die Referenzmessung wieder der Abb. 44 entsprechen.

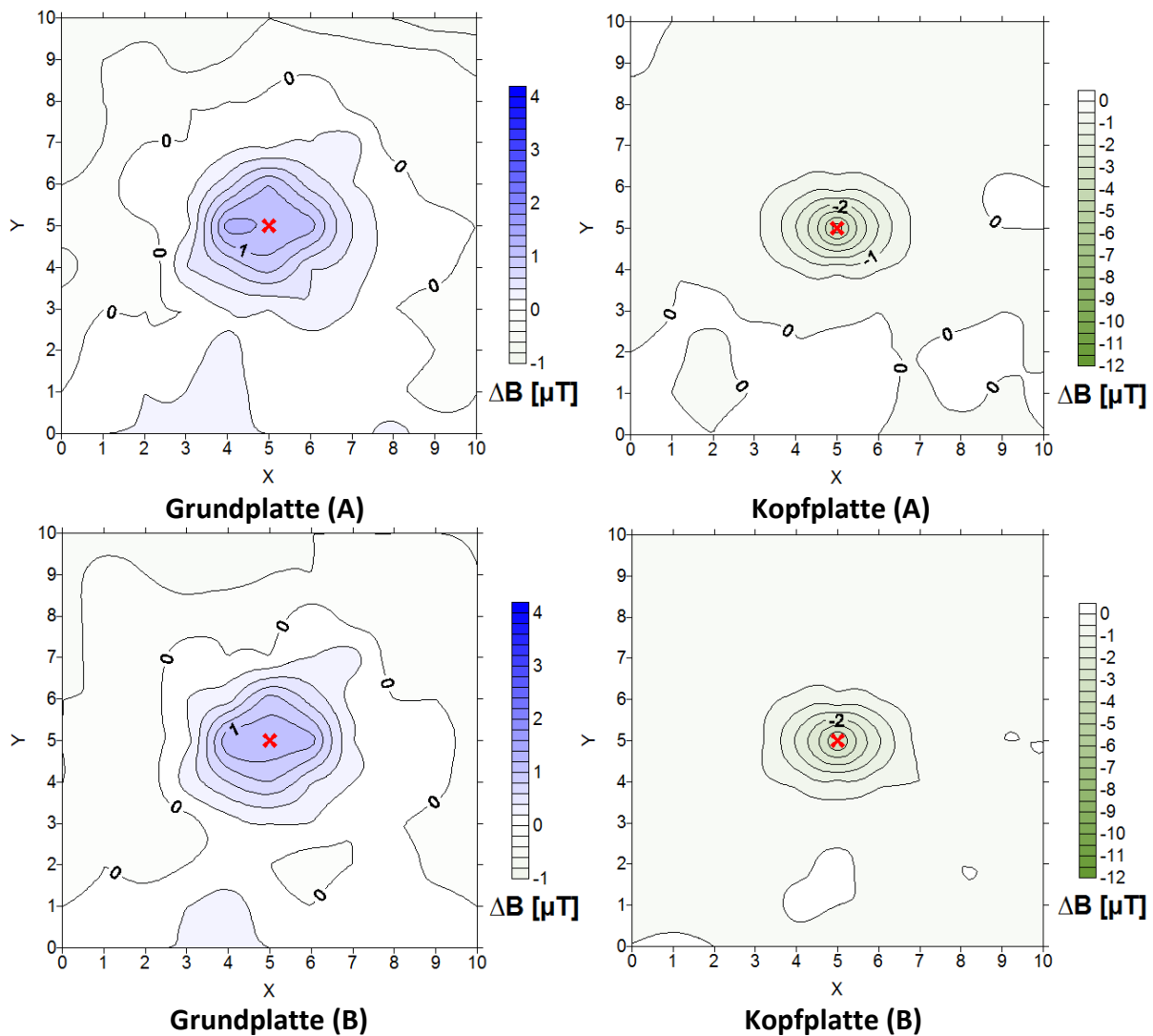


Abb. 47: Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR + MIR Methode mit GA „Nord“.

Die Ergebnisse zeigen, dass nach Anwendung der MIR-Methode auf die zuvor mit der MAR-Methode behandelte Probe, wieder Flussdichteanomalien auftreten. Diese sind zwar schwächer als in Abb. 44, in der die gleiche Rezeptur nur mit der MIR-Methode behandelt und gemessen wurde, aber sind vom Muster her wieder übereinstimmend und vor allem signifikant, insbesondere auf der Kopfplatte. Der Vollständigkeit halber wurde an dieser Stelle eine weitere Untersuchung durchgeführt mit einem Kontrastmittel, in das Nano-Eisenpulver anstatt Magnetit eingegeben wurde. Dabei wurde die Rezeptur für das Kontrastmittel beibehalten, also 180 g/l Bentonit, 80 g Zement und statt 30 g/l Magnetit, die gleiche Menge Nano-Eisenpulver zugegeben. Die Ergebnisse für die MAR-Methode sind in Abb. 48 gezeigt. Es wurde wiederum eine Mischung hergestellt, aus der eine Referenzprobe und zwei Proben für die Magnetisierung entnommen wurden. Die Differenzkarten der Referenzprobe und der magnetisierten Probe A und B sind in Abb. 48 dargestellt.

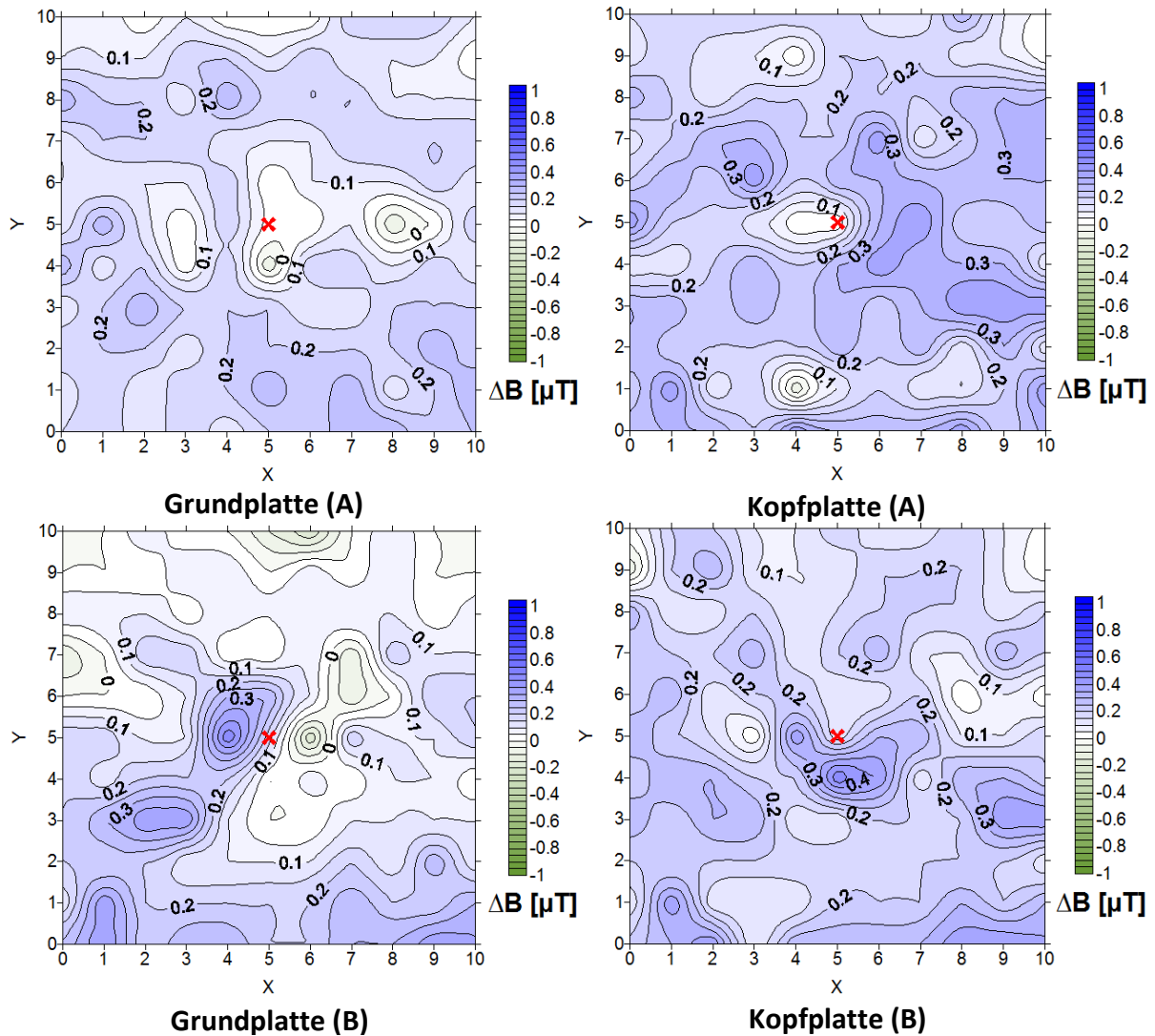


Abb. 48: Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Nano-Eisenpulver (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR Methode mit GA „Nord“.

Ähnlich wie bei der Anwendung der MAR-Methode beim magnetithaltigen Kontrastmittel (Abb. 46) ist die Situation auch beim nano-eisenhaltigen Kontrastmittel, d.h. keinerlei messbare Anomalie weder auf Grund- noch Kopfplatte für beide Proben. Der Wertebereich liegt bei beiden Proben sowohl für die Kopf- als auch für die Grundplatte bei $< \pm 1 \mu\text{T}$. Dies entspricht den Hintergrundschwankungen, somit kann man sagen, dass hier die Magnetisierung keinerlei Einfluss zeigt im Vergleich zum nicht magnetisierten Material.

Um sicher zu gehen, dass auch hier wieder wirklich die MAR-Methode für das Fehlen eines deutlichen Flussdichtesignals verantwortlich ist, wurden die gemessenen Proben A und B, nochmals mit der MIR-Methode behandelt und nochmals gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 49 für die zwei Proben dargestellt.

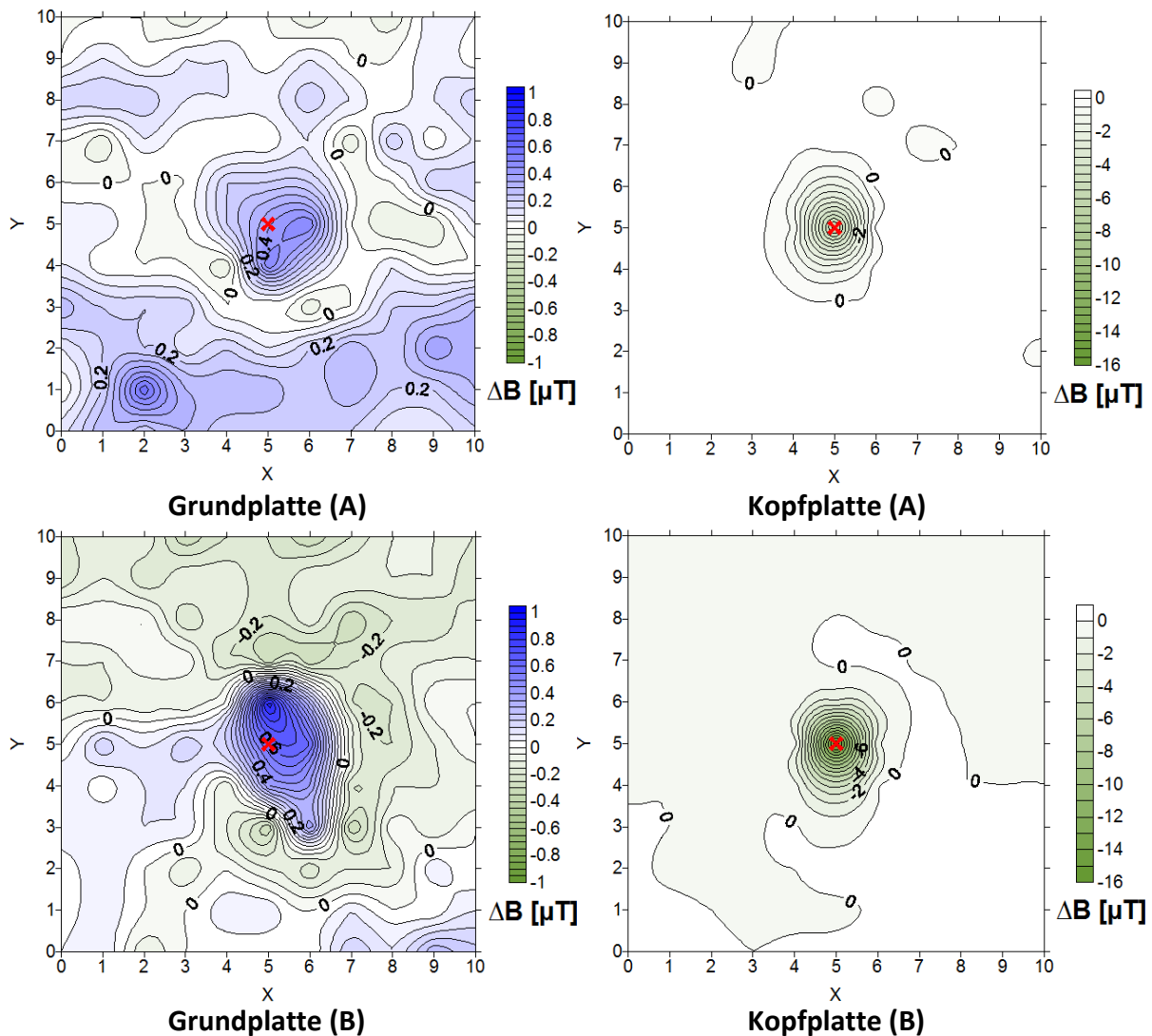


Abb. 49: Rezept: 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Nano-Eisenpulver (g/l = Zugabe von x g in 1 l Leitungswasser), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MAR+MIR Methode mit GA „Nord“.

Wie bei den magnetithaltigen Kontrastmitteln zeigt sich auch hier, dass die Magnetisierungsmethode für das Fehlen eines deutlichen Flussdichtesignals verantwortlich ist. So zeigen die zwei Proben nach Anwendung der MIR Methode, vor allem auf den Kopfplatten eine signifikante, kreisförmige und negative Flussdichte-Anomalie im Bereich des Rohrs an. Die Grundplatten zeigen hingegen wenig signifikante positive Anomalien im Bereich des Rohrs an.

3.3.1.4 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, stabile, pumpbare und magnetisch detektierbare Zement-Bentonit Suspensionen herzustellen. Jedoch erscheinen diese für den Anwendungsfall im Recover-EWS Projekt als unbrauchbar. Die Methode scheitert am Einbringen der Suspensionen in die Sonde. Es ist nämlich nicht möglich, das magnetische Signal einer im Ruhezustand magnetisierten Suspension, nach

Einbringen in eine EWS zu erhalten. Die magnetischen Momente, die sich während der Magnetisierung der ruhenden Suspension ausrichten, verlieren Ihre Ausrichtung wieder bei der Injektion in die EWS. Das wird hervorgerufen durch das Fließen und erneute Durchmischen der Suspension beim Injektionsprozess. Umgekehrt ist es nicht möglich, nach Eingabe einer Suspension in eine EWS, diese mit einer externen magnetischen Quelle, entlang des gesamten Sondenverlaufs zu magnetisieren, jedenfalls nicht ohne einen unverhältnismäßig großen Aufwand.

Außer der Problematik mit dem Einbringen der Suspension in eine EWS erscheint deren Signal auch ungenügend. Zwar lassen sich z.B. auf der Grundplatte, die dem lateralen Messsignal entspricht, deutliche Muster ausmachen, allerdings liegen deren B-Feld Werte (z.B. bei der Rezeptur 180 g/l Bentonit, 80 g/l Zement, 30 g/l Magnetit/Nano-Eisen) gerade im Bereich der Hintergrundschwankungen (siehe Abb. 47 und Abb. 49) oder knapp darüber (siehe Abb. 44). Das Potential für signifikante und große Signalreichweiten ist also nicht gegeben.

Aus den oben genannten Gründen wurde eine weitere Untersuchung der magnetisch dotierten Zement-Bentonit Suspensionen an dieser Stelle unterbrochen. Einige Ideen wurden zwar diskutiert, wie z.B. das Einbringen der Suspensionen in einen Schlauch, dessen Magnetisierung und schließlich das Einbringen des Schlauchs in eine EWS. Dies würde jedoch eine Verringerung an Suspensionsmenge und somit auch ein schwächeres Signal bedeuten. Unter weiterer Verringerung des Gehalts an Zement und Bentonit bei gleichzeitiger Steigerung des Magnetit- bzw. Nano-Eisengehalts könnte das Signal ggf. noch erhöht werden, unter Erhaltung der Stabilität und Pumpbarkeit. Allerdings wurde das Potential im Hinblick auf die Anwendbarkeit für das Richtbohrkonzept als äußerst gering eingeschätzt, zumal Alternativen mit weitaus größerem Potential im Raum standen. Diese werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

3.3.2 Stahlkugeln als Kontrastmittel

3.3.2.1 Untersuchung der Methode

Ausgehend von den Ergebnissen in Kap. 3.3.1 musste für die, als Kontrastmittel nicht geeigneten, magnetisch dotierten Zement-Bentonit-Suspensionen, Alternativen gefunden werden. Eine Idee war es, ferromagnetische Kugeln in einer Art Kette in eine EWS einzubringen. Eine „Verkettung“ der Kugeln sollte es verhindern, dass deren Magnetisierung (MAR), durch eine Neuorientierung der Kugeln, nach deren Einbringen, verschwindet (ähnlich wie bei den Magnetit- und Nano-Eisenteilchen Suspensionen nach Injektion beobachtet).

Um das Signal der magnetisierten Kugeln nach deren Einbringen in die Sonde beibehalten zu können, müssen diese kontrolliert magnetisiert und dann ebenfalls kontrolliert in die Sonde eingegeben werden. Um das zu bewerkstelligen war eine Idee, die Kugeln in einen engen

Schlauch einzubringen (Abb. 50), in dem dann die Kugeln fixiert und verkettet sind und kontrolliert magnetisiert und in die Sonde eingebracht werden können.

Erste Versuche zur Untersuchung der Methode wurden mittels \varnothing 15 mm Chromstahlkugeln durchgeführt. Der Gedanke war im ersten Schritt, relativ große Kugeln zu benutzen, die quasi übereinander wie in einer Kette in die Sonde eingelassen werden. Die Sondenrohre für den Versuchstand haben einen Innendurchmesser von knapp 20 mm und konnten mit 9 solcher Kugeln in einem Schlauch (Abb. 50) bis zum oberen Rand aufgefüllt werden. Der Schlauch mitsamt Rohren passte gerade in das Sondenrohr.



Abb. 50: Von links nach rechts : Maßstab, Sondenrohr für Magnetisierungs- und Messstand, Gardena Cord-Schlauch gefüllt mit \varnothing 15 mm Kohlenstoffstahlkugeln, Einzelne Kohlenstoffstahlkugel.

Für die Magnetisierung wurde die MIR-Methode verwendet. Es ist jedoch klar, dass später im Geländeeinsatz der Schlauch mit Kugeln vor dem Einbringen in eine Sonde magnetisiert werden muss (analog MAR). Jedoch ist dies bei den Stahlkugeln im Schlauch, im Vergleich zu den dotierten Suspensionen, unproblematisch, da der Schlauch mit Kugeln einen Festkörper bildet, der seine Magnetisierung beibehält und dessen Orientierung zu jeder Zeit bekannt ist. So könnte später im Gelände der mit Kugeln gefüllte Schlauch zur Magnetisierung durch eine entsprechende Magnetfeldvorrichtung (ähnlich den Magnetaufsätzen) geleitet und dann anschließend in die Sonde abgelassen werden. Die Orientierung der Gesamtprobe und somit der darin enthaltenen magnetischen Momente ist zu jeder Zeit bekannt und fix. Somit ist es für die Laborversuche irrelevant, ob nun der Magnetaufsatz über den im Sondenrohr befindlichen Schlauch mit Stahlkugeln gezogen wird, oder der Schlauch durch den Aufsatz

gezogen wird und dann in das Sondenrohr eingebracht wird. Der Einfachheit halber wurde deshalb die MIR Methode verwendet.

Die Flussdichtemessungen für zwei Proben (A & B) sind als Differenzkarten in Abb. 51 dargestellt. In diesen ersten Versuchen wurden die Proben jedoch zuerst im nichtmagnetisierten Zustand gemessen, da hier bereits von einem gewissen Eigensignal auszugehen war. Als Referenz wurde die Flussdichte der Grund- und Kopfplatte mit einem leeren Rohr herangezogen.

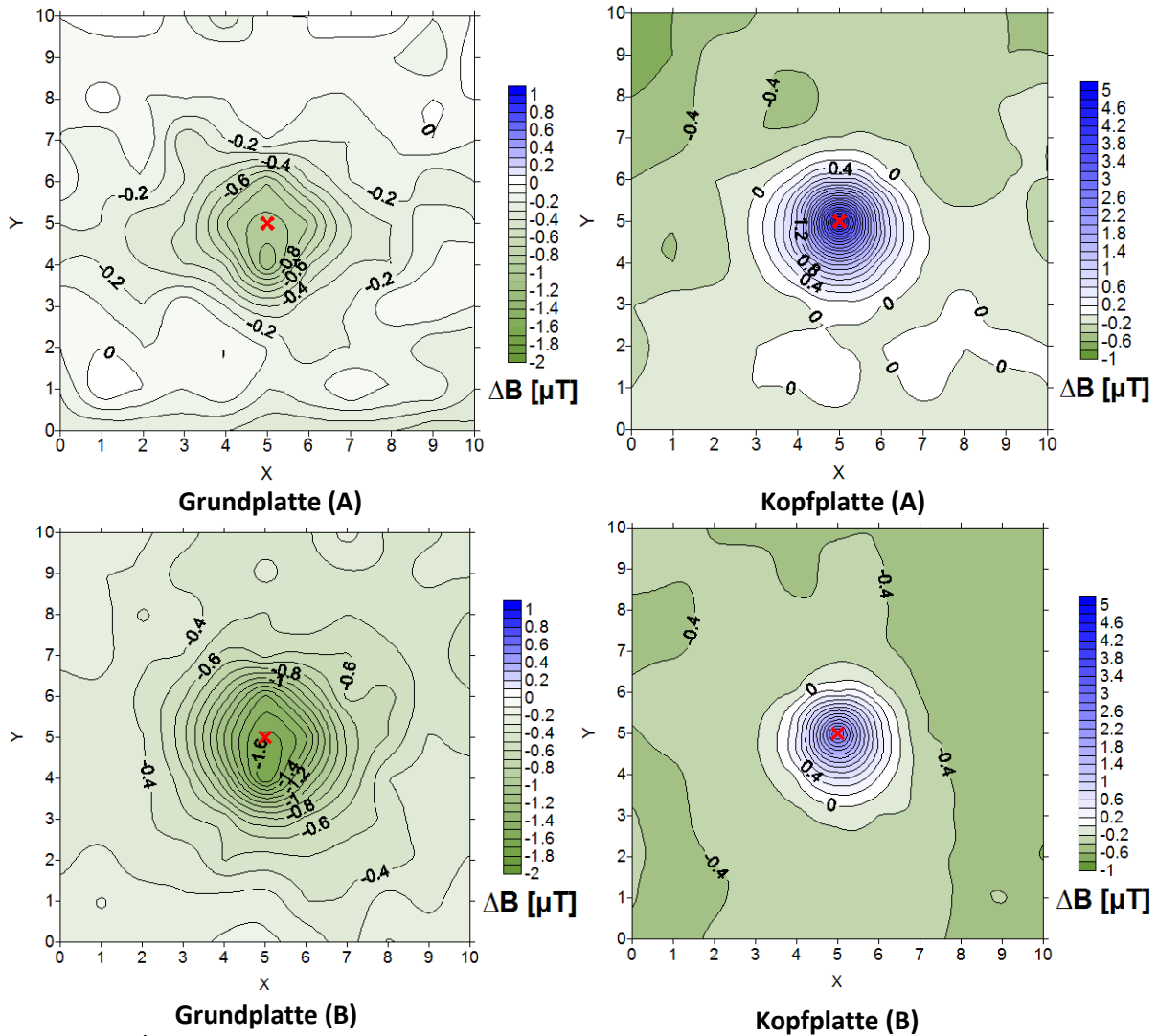


Abb. 51: Ø 15 mm Chromstahlkugeln im Schlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Die Messungen weisen ein schwaches, negatives Signal in der Mitte der Grundplatten beider Proben auf. Diese sind jedoch im Bereich der Hintergrundschwankungen und deshalb als nicht signifikant zu bewerten. Auf den Kopfplatten hingegen bildet sich bei beiden Proben eine signifikant positive Anomalie aus.

Dieselben Proben wurden nun magnetisiert und nochmals gemessen und mit derselben Referenz (Leeres Rohr Szenario) verrechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 52 dargestellt. Die Magnetisierung wurde hier entsprechend Abb. 20 mit GA „Süd“ durchgeführt. Auf diese Weise sollte man theoretisch die schon natürlich vorhandene Tendenz der Feldrichtung der Kopfplatte verstärken und somit auch eine Basis für einen Vergleich der magnetisierten und nicht magnetisierten Proben schaffen können.

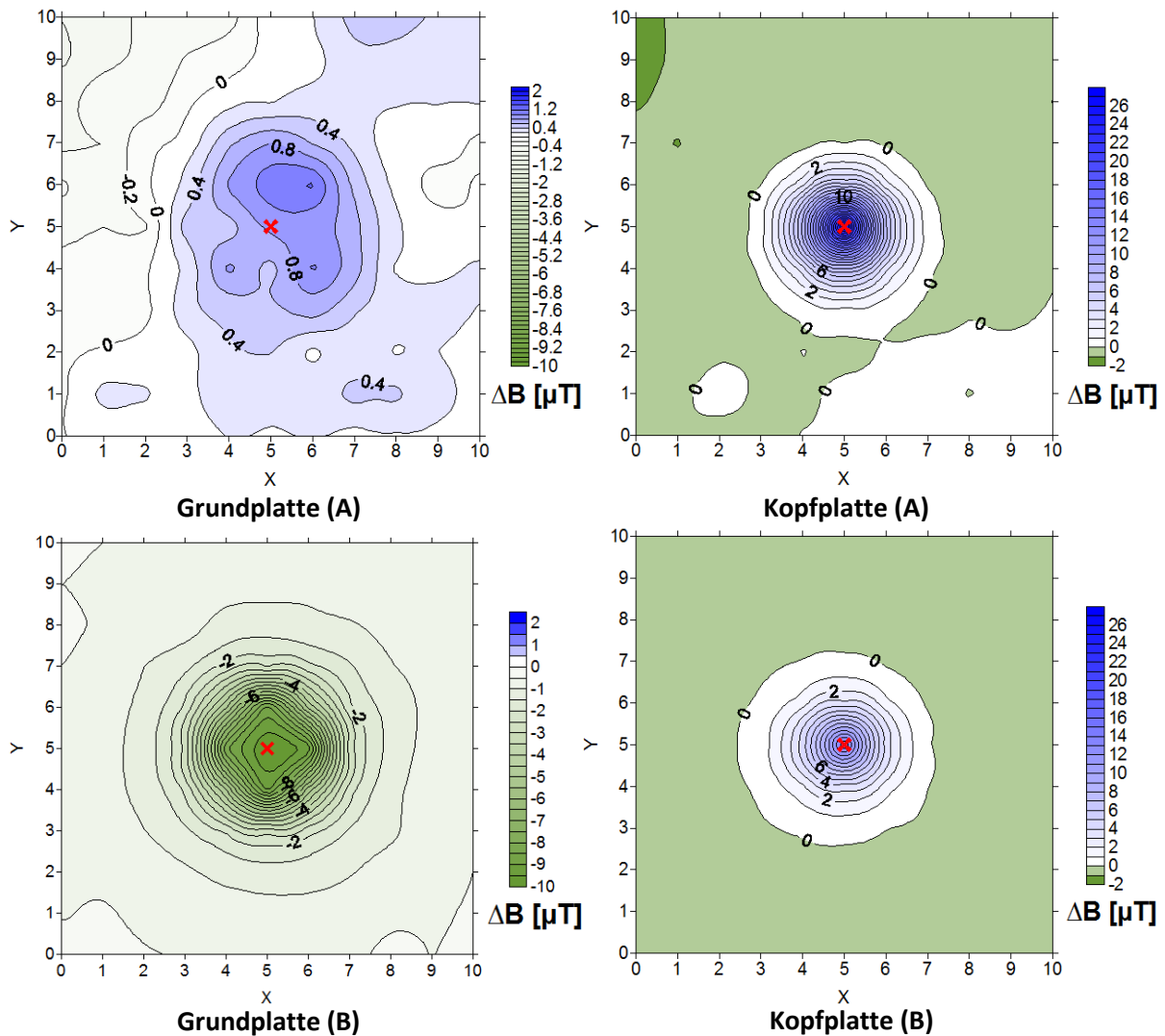


Abb. 52: \varnothing 15 mm Chromstahlkugeln im Schlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Magnetisiert mit GA „Süd“.

Insgesamt ist die Reproduzierbarkeit der magnetisierten A & B Probe als ungenügend einzustufen, vor allem die Grundplatte zeigt bei A & B Probe entgegengesetzte Vorzeichen. Die Kopfplatten zeigen zwar beide eine positive Anomalie, Probe A ist aber etwa um den Faktor 2 größer als Probe B. Generell wurde aber, wie vermutet, eine Verstärkung des Signals auf der Kopfplatte gegenüber den nicht magnetisierten Proben erreicht.

Aus Gründen der bereits erwähnten schlechten Reproduzierbarkeit wurden vier weitere Proben hergestellt, magnetisiert und gemessen. Allerdings erbrachten auch diese keine Klarheit, sondern zeigten nur, dass die Kugelmethode insgesamt nicht reproduzierbar ist. Bei zwei von insgesamt sechs Proben zeigte die Grundplatte eine negative, bei zwei weiteren eine positive Anomalie, und bei den letzten zwei keine Anomalie, da die Werte nicht signifikant sind bzw. nach abrunden im Bereich von $2\sigma = \pm 1 \mu\text{T}$ liegen (Tab. 6).

Innerhalb der Grundplattenproben mit gleichem Vorzeichen gab es zudem starke Abweichungen der einzelnen Anomaliewerte voneinander. Die Kopfplatten waren zwar alle positiv, jedoch gab es auch hier starke Abweichungen der Anomaliewerte von 14 – 38 μT , also fast um den Faktor 3 ausgehend vom Minimalwert 14.

Tab. 6: ΔB Max./Min. Anomalien auf Grund- und Kopfplatte für 6 identische magnetisierte Proben.

Probe	Anomalie	Anomalie
	(ΔB max./min.)	(ΔB max./min.)
	Grundplatte	Kopfplatte
	[μT]	[μT]
A	1,4 (NS)	27
B	-10	14
C	4,4	38
D	-3,4	21
E	-1,2 (NS)	25
F	6,5	34

NS = nicht signifikant

3.3.2.2 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass mittels der Kugelmethode kein verlässliches Signal generiert werden kann, da die Ergebnisse nicht reproduzierbar sind. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der Tatsache, dass die Kugeln im Schlauch unbeweglich sind und sich somit nicht im Magnetfeld ausrichten können. Somit hat jede Probe ein eigenes diffuses Feld nach der Magnetisierung. Um dem entgegenwirken zu können, müssten die Kugeln während dem Magnetisierungsvorgang frei beweglich sein, um sich entsprechend im Feld ausrichten zu können. Gleichzeitig müssten die Kugeln, sobald sie sich im Feld ausgerichtet haben, direkt in Ihrer Endstellung fixiert werden. Auf diese Weise müsste es möglich sein, auch reproduzierbare Ergebnisse bei mehreren gleichartigen Proben zu erhalten. Allerdings wäre eine entsprechende technische Umsetzung des Magnetisierungs- und Fixierungsvorgangs für den Realfall im Feld sehr schwierig bzw. nicht praktikabel, da mit einem unverhältnismäßigen Aufwand verbunden. Eine Möglichkeit wäre z.B. die Kugeln mit Zementpaste in die Sondenrohre einzugeben und direkt einem Magnetfeld auszusetzen. Die Kugeln würden sich entsprechend dem Feld orientieren und dann durch den Zement in Ihrer Position fixiert. Vor allem im Hinblick auf die Anwendung im Feld erscheint dies jedoch als völlig impraktikabel, und scheitert schon an der Tatsache, dass die Magnetisierung vor dem Einbringen in die Sonde

erfolgen müsste, ähnlich wie bei den magnetisch dotierten Zement/Bentonit Suspensionen (Kap. 3.3.1.3).

Die weitere Untersuchung dieser alternativen Methode als Kontrastmittel wurde an dieser Stelle abgebrochen, aufgrund der oben genannten Gründe und zumal wiederum Alternativen mit größerem Potential im Raum standen, die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.

3.3.3 Stahldrahtseile als Kontrastmittel

3.3.3.1 Ø 5 mm Stahldrahtseile

3.3.3.1.1 Vorbereitungen und Voruntersuchungen

Ausgehend von den Ergebnissen in Kap. 3.3.1 und 3.3.2 musste für die nicht praktikablen Zement-Bentonit-Suspensionen und Stahlkugeln eine Alternative gefunden werden. Eine Idee war es, ein aus magnetischem Material bestehendes relativ starres Kabel oder Seil in eine EWS einzuführen, das dort einzementiert als Kontrastkörper dienen sollte.

Die Entscheidung fiel schließlich auf verzinkte Stahldrahtseile, die günstig und von der Stange in den meisten Baumärkten erhältlich sind. Im Vergleich zu einer magnetisierten Suspension, die bei der Injektion in eine Sonde ihre magnetische Orientierung verliert, würde ein magnetisiertes Seil, als Festkörper in die Sonde eingelassen und einzementiert, seine magnetische Orientierung im Seilkörper beibehalten.

Die Zementierung würde mit dem bereits verwendeten CEM1 durchgeführt werden, unter Anwendung eines W/F-Verhältnisses von 0,4, was dem API-Standard für Öl & Gas-Bohrungen entspricht.

Die Untersuchung der Methode wurde so geplant, dass der in Kap. 3.2.17 entwickelt Magnetisierungs- und Messstand zum Einsatz kommen kann. Hierzu wurde das Stahldrahtseil in Stücke geschnitten um genau in die Sondenrohre und somit den Messstand zu passen (Abb. 53). Nach Rücksprache mit Fa. Burkhardt ist die Verwendung eines durchgehenden Stahldrahtseils in bohrtechnischer Hinsicht ungeeignet. Es würde schwierig werden, das Stahldrahtseil zu überbohren bzw. das Seil könnte sich, trotz Einzementierung, um das Bohrgestänge wickeln. Um diese Herausforderung anzugehen, war eine Überlegung, die Herstellung und das Einführen eines in regelmäßigen Abständen (z.B. 0,5 m im Realmaßstab) unterbrochenen Stahldrahtseils. Das Verbinden der Stahldrahtseilstücke würde mittels eines Wärmeschrumpfschlauchs durchgeführt. Dabei würden die einzelnen Stahldrahtseilstücke in einen passenden Schrumpfschlauch geschoben und anschließend mit einer Heißluftpistole bearbeitet, so dass sich eine ummantelte Kette aus Stahldrahtseilstücken bildet, die dann in eine EWS eingeführt und einzementiert werden kann. In Abb. 54 ist exemplarisch das Verbinden zweier Ø 5 mm Stahldrahtseilstücke mit einem Schrumpfschlauch gezeigt. Zwischen 135 und 140 mm ist die Schnittstelle zwischen beiden Stahldrahtseilstücken durch

eine Einbuchtung des Schrumpfschlauchs erkennbar. Diese Schwachstelle würde beim Überbohrvorgang zuerst abreißen und somit ein Umwickeln des Bohrgestänges verhindern.



Abb. 53: Links Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte Stahldrahtseil \varnothing 5 mm.



Abb. 54: Zwei \varnothing 5 mm Stahldrahtseilstücke durch einen Schrumpfschlauch \varnothing 6,4/ \varnothing 3,2 mm miteinander verbunden.

Aus praktischen und zeitlichen Gründen wurde entschieden, bei den Versuchen mit den Stahldrahtseilen keinen Zement für die Fixierung im Sondenrohr zu verwenden. Erste Versuche zeigten nämlich, dass es durch den aushärtenden Zement zu Verformungen der Sondenrohre kommt, so dass diese nicht mehr oder nur noch schwer in den Messstand überführt werden können. Außerdem war es nicht mehr möglich, den Zement mitsamt Stahldrahtseil aus den Rohren zu entfernen ohne diese z.T. massiv zu beschädigen, so dass die Rohre nur einmalig verwendet werden könnten. Die Herstellung der Sondenrohre aus dem

Rauhgeo-Verfüllrohr ist schwierig und zeitlich aufwendig, da diese zugeschnitten, immer wieder erhitzt und begradigt werden müssen, um schließlich in den Magnetisierungs- und Messstand zu passen. Um die guten Rohre wiederverwenden zu können, wurde deshalb entschieden, die Stahldrahtseile mit Sand im Sondenrohr zu fixieren. Zum Nachweis, dass vom Sand erwartungsgemäß kein Einfluss auf die natürliche Flussdichte ausgehen sollte (siehe auch magnetische Suszeptibilität Tab. 1, Quarz), wurden zwei Proben (A & B) purer Sand im Sondenrohr gemessen, wieder unter Anwendung des einfachsten Szenarios (1 Rohr in der Mitte). Die Ergebnisse der nicht magnetisierten A und B Probe sind als Differenzkarten in Abb. 55 dargestellt. Als Referenz wurde wieder die Flussdichte der Grund- und Kopfplatte mit einem leeren Rohr herangezogen bzw. von den Ergebnissen der Grund- und Kopfplatte, der mit Sand gefüllten Rohre abgezogen.

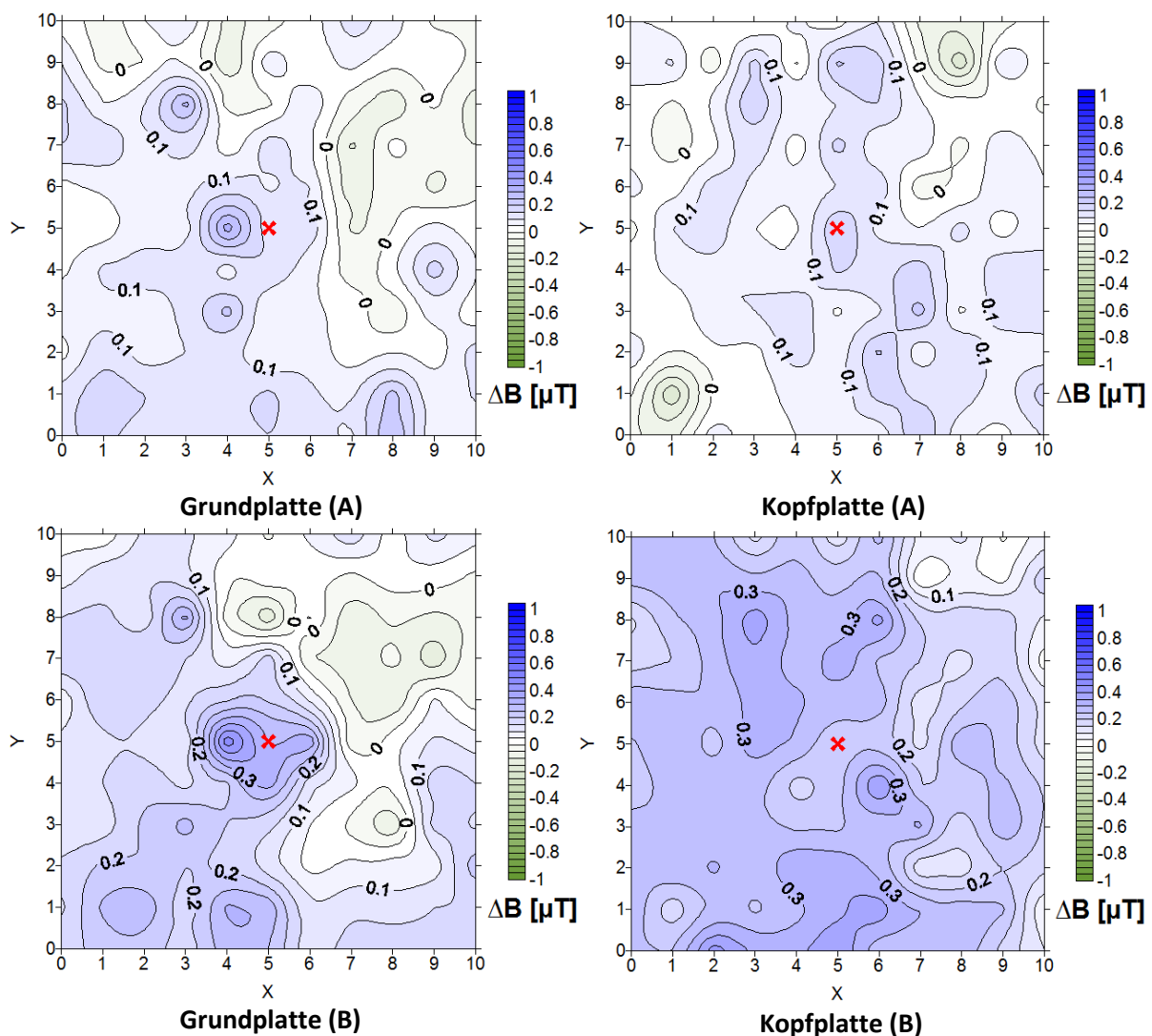


Abb. 55: Purer Sand, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Erwartungsgemäß zeigt sich keinerlei Auffälligkeit der Werte für beide Proben sowohl auf Kopf- und Grundplatte. Die Schwankung liegt im Bereich der Hintergrundschwankungen von

$\pm 1 \mu\text{T}$. Die gleichen Proben wurden nochmal nach Magnetisierung mit GA „Süd“ gemessen (Abb. 56). Ob Nord oder Süd verwendet wird ist letztlich irrelevant, da das Material im nichtmagnetisierten Zustand kein initiales B-Feld mit einer bestimmten Polarität aufweist.

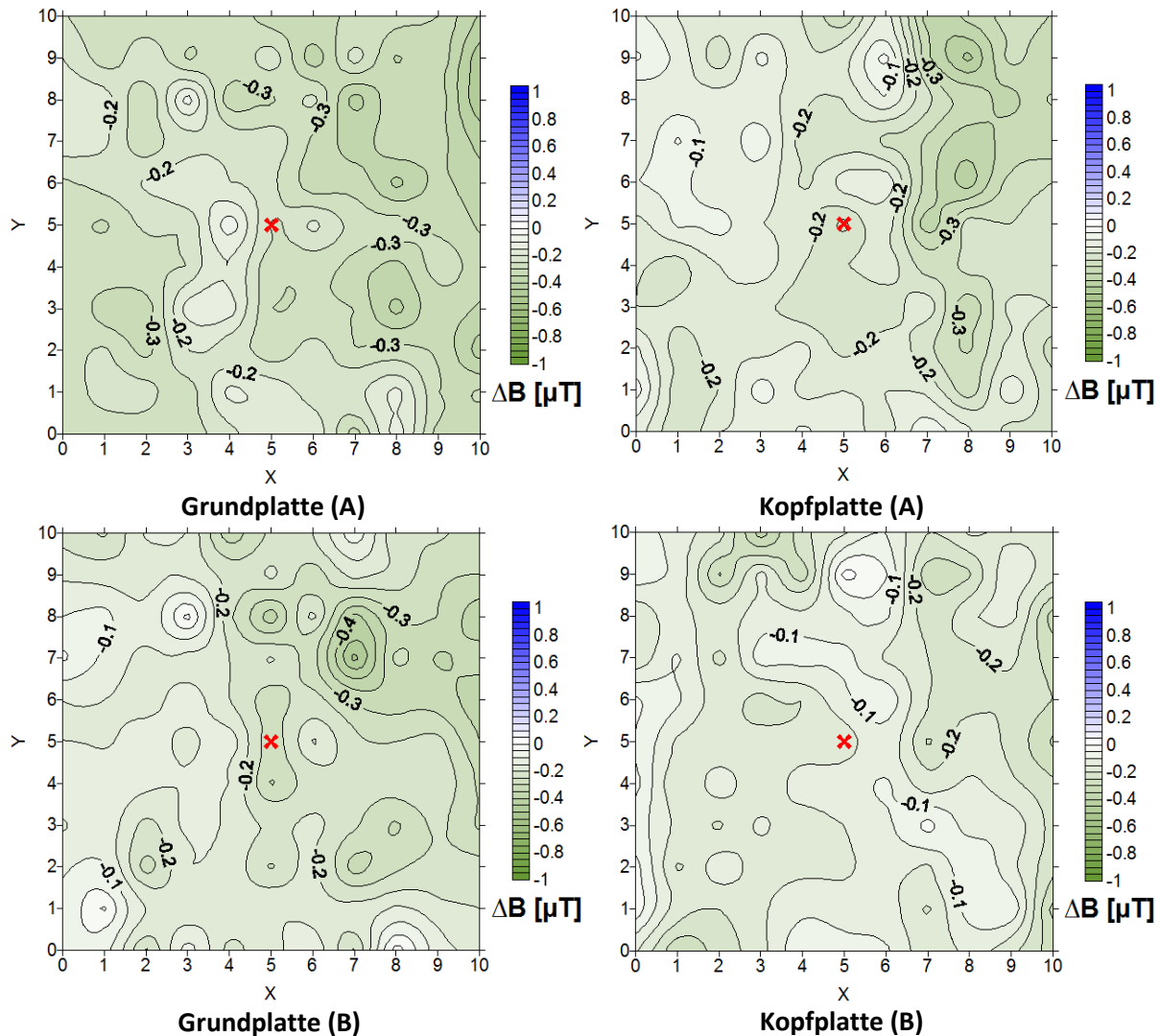


Abb. 56: Purer Sand, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.

Auch die magnetisierten Proben zeigen keinerlei auffälliges Signal, da die Schwankungen wieder bei $< \pm 1 \mu\text{T}$ liegen. Basierend auf den gezeigten Ergebnissen werden für die Messungen in den folgenden Kapiteln, in denen Sand zum Fixieren verwendet wird, als Referenz immer die Hintergrundmessung der Grund- und Kopfplatte mit einem leeren Rohr herangezogen werden. Dies ist möglich, da die Ergebnisse mit einem leeren Rohr, mit Sand sowie mit magnetisiertem Sand identisch sind.

Da jedoch im realen Anwendungsfall Zement zur Fixierung der Stahldrahtseile verwendet werden würde, wurde auch dessen Flussdichtefeld untersucht. Abb. 57 zeigt hierzu die

Untersuchung zweier nicht magnetisierter Zementproben (A & B). Als Referenzmessung wurde ein Szenario mit leerem Rohr herangezogen.

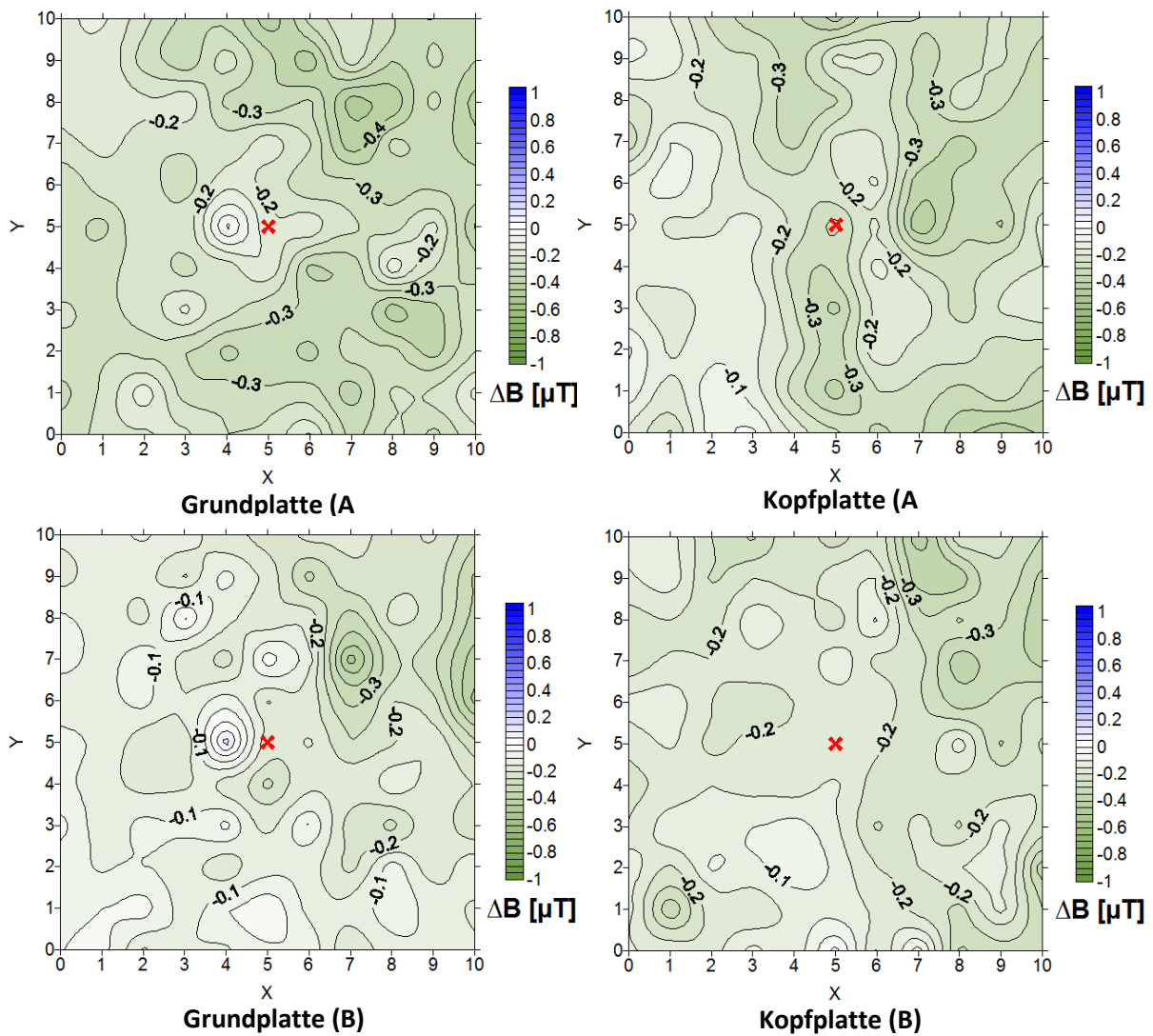


Abb. 57: Zement (W/F = 0,4), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Die nicht magnetisierten Proben zeigen keinerlei auffälliges Signal und die Schwankungen liegen bei $< \pm 1 \mu\text{T}$. Im Folgenden wurden die beiden gleichen Proben nochmals nach Magnetisierung gemessen (Abb. 58). Als Referenz wieder ein Szenario mit einem leeren Rohr.

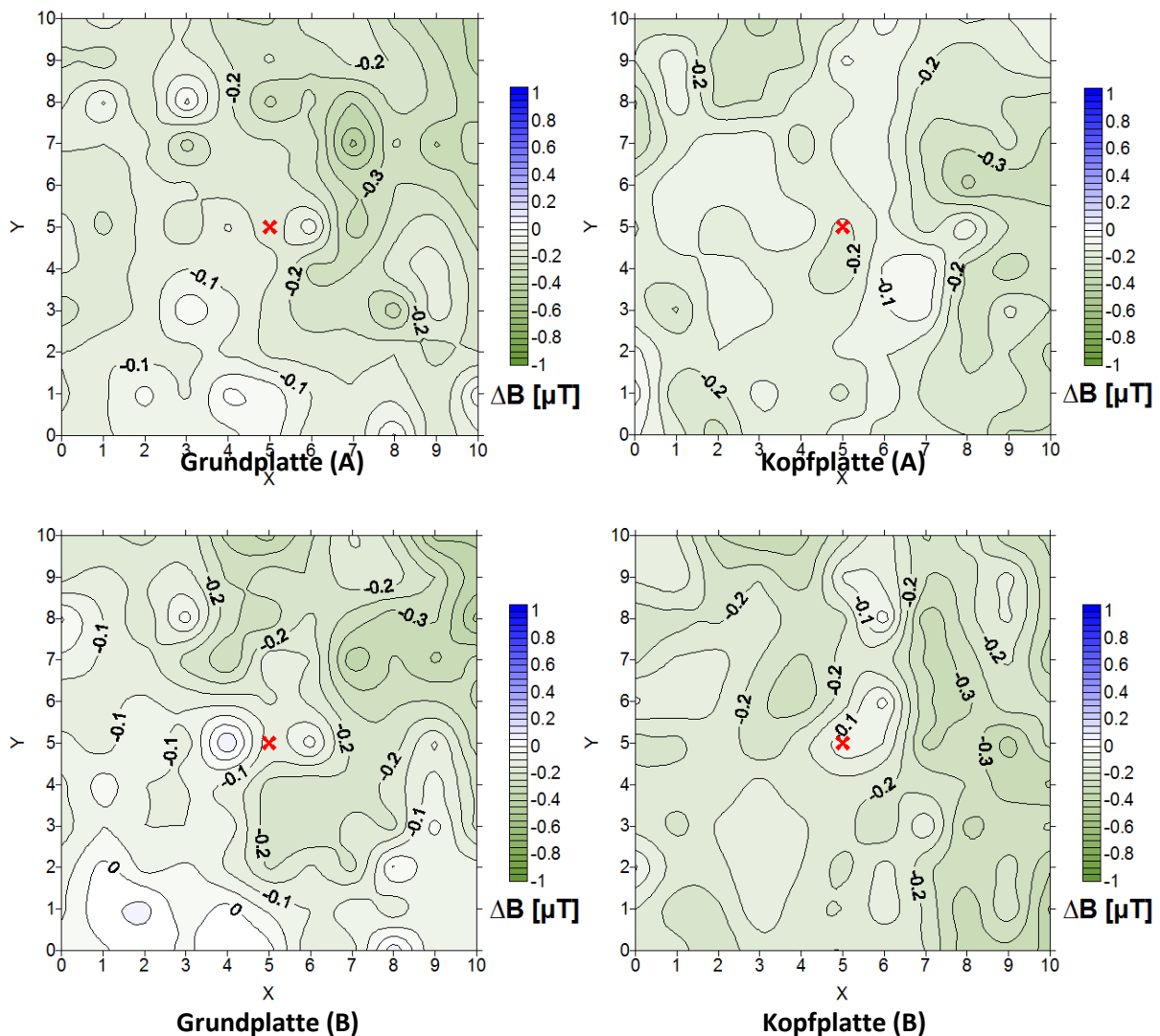


Abb. 58: Zement (W/F = 0,4), Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.

Auch nach der Magnetisierung zeigen die B-Feld Messungen keinerlei auffälliges Signal und die Schwankungen liegen bei $< \pm 1 \mu\text{T}$. Somit kann festgestellt werden, dass der Zement keinen Einfluss auf die magnetischen Untersuchungen hat.

3.3.3.1.2 Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Es wurden in einem ersten Schritt zwei Proben hergestellt, in denen jeweils ein mit Schrumpfschlauch ummanteltes $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseil eingegeben und mit Sand fixiert wurde. In Abb. 59 ist ein solches Rohr von oben gezeigt. Voruntersuchungen mittels dem Teslameter ergaben, dass die Stahldrahtseile bereits ein deutliches Eigensignal haben, d.h. auch ohne Magnetisierung Flussdichteanomalien aufweisen. Aus diesem Grund wurden die Proben zuerst im nicht magnetisierten Zustand gemessen. Abb. 60 zeigt die Ergebnisse der Messungen als Differenzkarten.

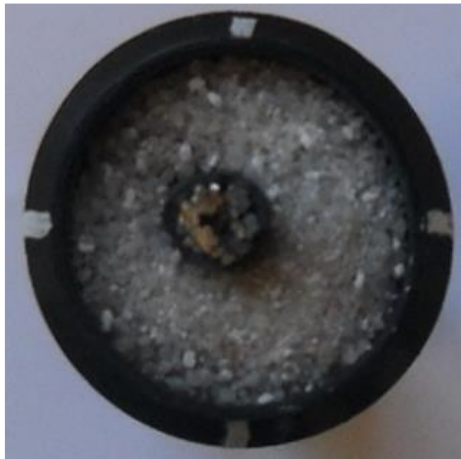


Abb. 59: Mit Schrumpfschlauch ummanteltes Stahldrahtseile (\varnothing 5 mm) im Sondenrohr (\varnothing 25 mm) mit Sand ausgefüllt (Querschnitt bzw. Draufsicht).

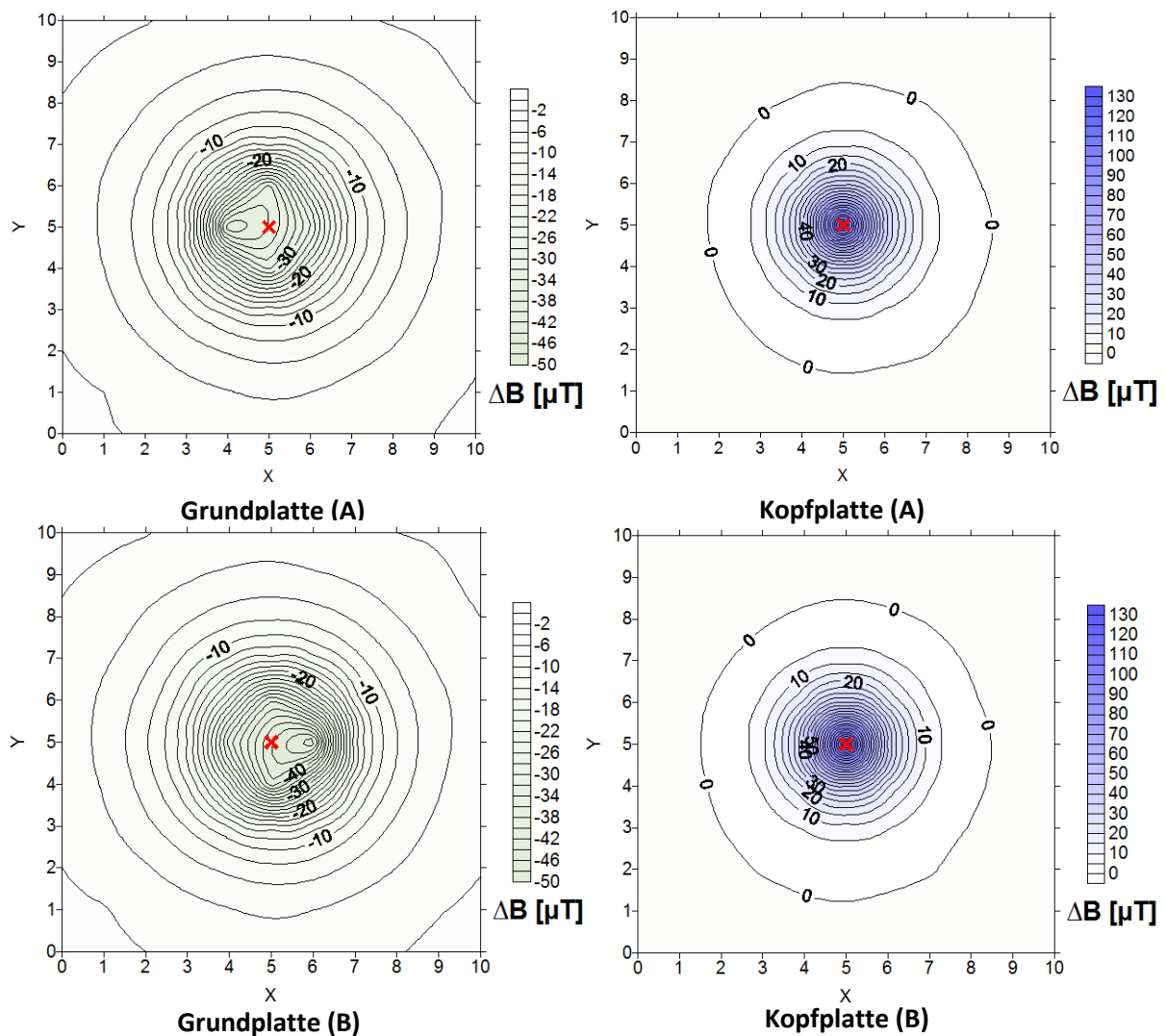


Abb. 60: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Die Ergebnisse sind sehr gut reproduzierbar und zeigen auf Grund- und Kopfplatte ein kreisförmiges Muster. Die Ausbreitung auf der Grundplatte ist wesentlich größer als auf der Kopfplatte, außerdem haben Grund- und Kopfplatte entgegengesetzte Vorzeichen, das auch schon bei den Messungen der magnetisch dotierten Bentonit/Zement Suspensionen und Stahlkugeln beobachtet werden konnte. Letzteres deutet auf ein Eigensignal hin, das einem Stabmagneten ähnelt (Abb. 1), genauso wie die Tatsache, dass die beiden Enden der Stahldrahtseilstücke entgegengesetzte Vorzeichen der Flussdichte aufweisen, das ebenso vor dem Einbau in den Messstand festgestellt werden konnte. Die Längsachse des Stahldrahtseils bzw. des Rohrs entspricht dabei der Längsachse des imaginären Stabmagneten. Beim Zerschneiden der Stahldrahtseile in beliebig viele Stücke haben die einzelnen Stücke immer einen Nord- und Südpol, je an einem der beiden Enden des Seilstücks. Im nächsten Schritt wurden die gleichen Proben magnetisiert, die Ergebnisse dazu sind in Abb. 61 dargestellt. Die Magnetisierung wurde mit GA „Süd“ durchgeführt, um die bereits bestehende positive Tendenz der Kopfplatte zu verstärken und mit den nicht magnetisierten Proben vergleichbar zu machen.

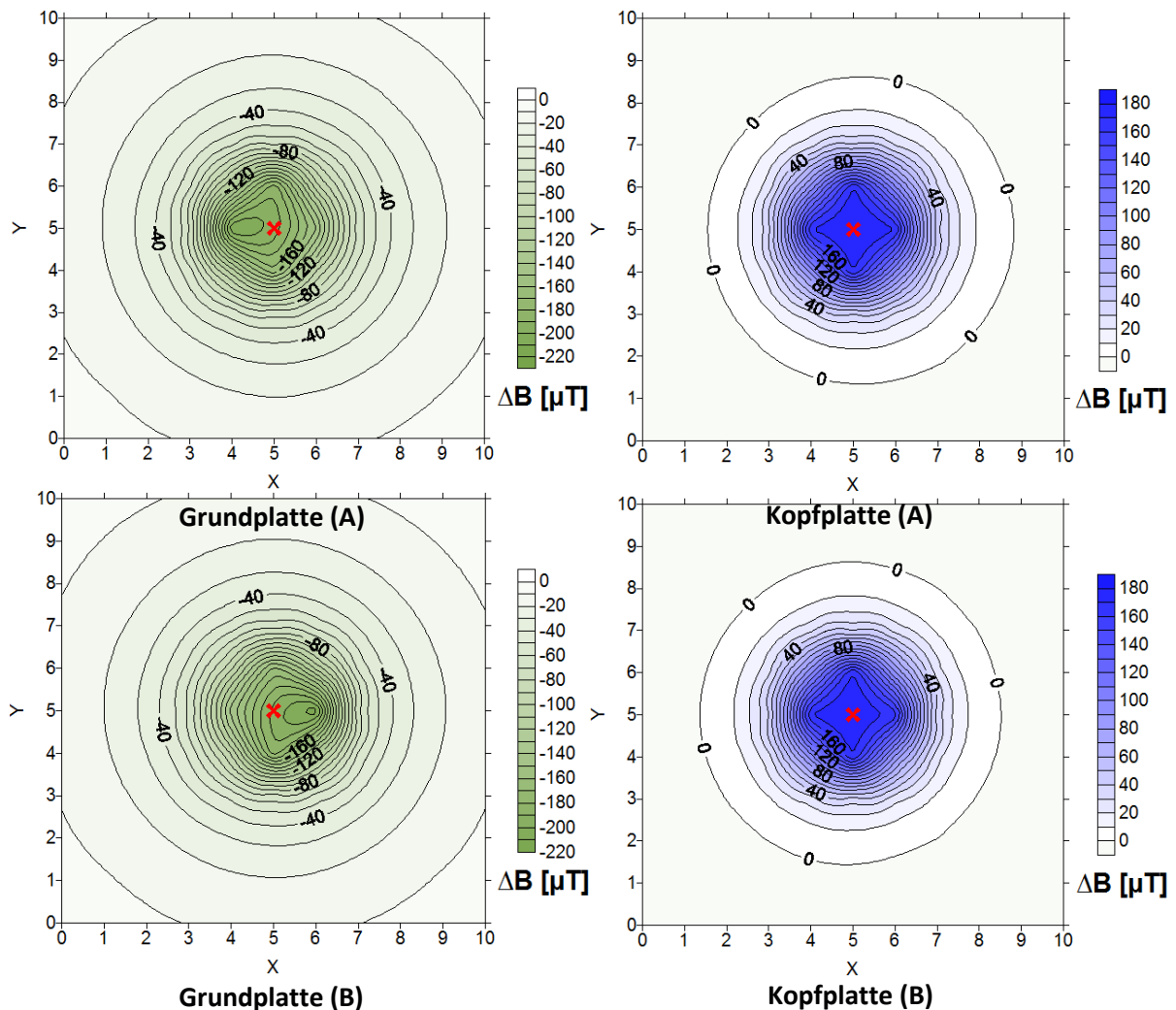


Abb. 61: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.

Auch hier sind die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar. Die Anomaliebeträge haben sich sowohl auf der Grund- als auch auf der Kopfplatte im Vergleich zu den nicht magnetisierten Proben deutlich erhöht. Die Kreismuster bestehen nach wie vor. Sowohl auf den Grund- als auch auf den Kopfplatten hat sich der Radius des Signals gegenüber dem nicht magnetisierten Zustand vergrößert. Es muss erwähnt werden, dass bei beiden Proben in unmittelbarer Nähe zum Stahldrahtseil die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Kopfplatte, bei den Koordinaten X/Y = 4/5, 5/4, 5/5, 5/6 und 6/5 (nur bei Probe A), jeweils Werte von 200 μT erreicht haben. Dies entspricht der oberen Messgrenze der GEO-X Sonde. Das heißt, dass diese Werte in Wirklichkeit noch höher sein können, entsprechend können die tatsächlichen ΔB Werte in Abb. 61 an den entsprechenden Koordinaten noch höher und die Anomalie somit noch deutlicher sein.

Im nächsten Schritt wurden mit den beiden Proben ein Szenario einer Einfach-U Sonde unter Annahme simuliert, dass in beide Stränge ein Stahldrahtseil eingegeben wird. Die Ergebnisse sind wiederum als Differenzkarten in Abb. 62 dargestellt.

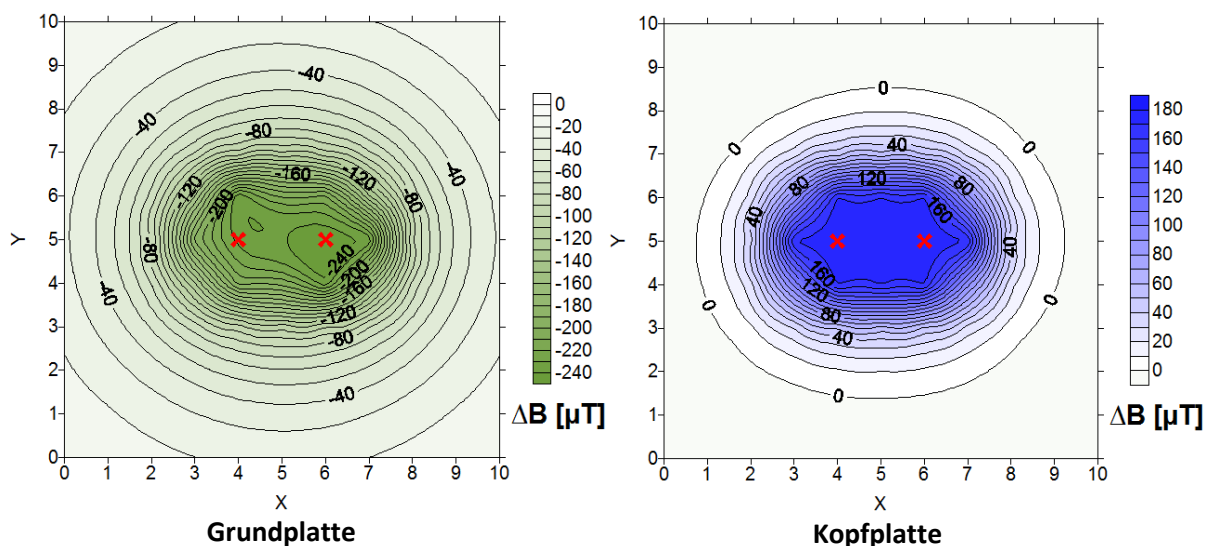


Abb. 62: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U), MIR mit GA „Süd“.

Die Ergebnisse zeigen, dass es auf der Grundplatte zu einer deutlichen Zunahme des Signalradius gegenüber dem 1 Rohr Szenario kommt. Dies ist vor allem in X-Richtung der Fall, das zu einem nicht mehr kreisförmigen, sondern eher ovalen Muster, sowohl auf der Grund- als auch Kopfplatte führt.

Wie beim 1 Rohr Szenario haben auch hier die Messpunkte auf der Kopfplatte in unmittelbarer Nähe zu den Stahldrahtseilen den oberen Grenzwert der GEO-X Sonde erreicht. Diese Punkte sind X/Y = 3/5, 4/4, 4/5, 4/6, 5/4, 5/5, 5/6, 6/4, 6/5, 6/6 und 7/5. Die tatsächlichen ΔB Werte können hier also noch höher sein. In diesem Fall gibt es solche Punkte auch auf der Grundplatte in unmittelbarer Nähe zu den Stahldrahtseilen. Dazu gehören 4/6, 5/5, 6/4 und

7/5. Hier wurde der untere Grenzwert der GEO-X Sonde von $-200 \mu\text{T}$ erreicht. Die ΔB Werte an diese Koordinaten können also in Wirklichkeit noch niedriger sein.

Im nächsten Schritt wurden zwei zusätzliche Proben hergestellt, um ein Szenario mit 4 Rohren bzw. Doppel-U Sonde nachzustellen. Die Ergebnisse sind in Abb. 63 dargestellt.

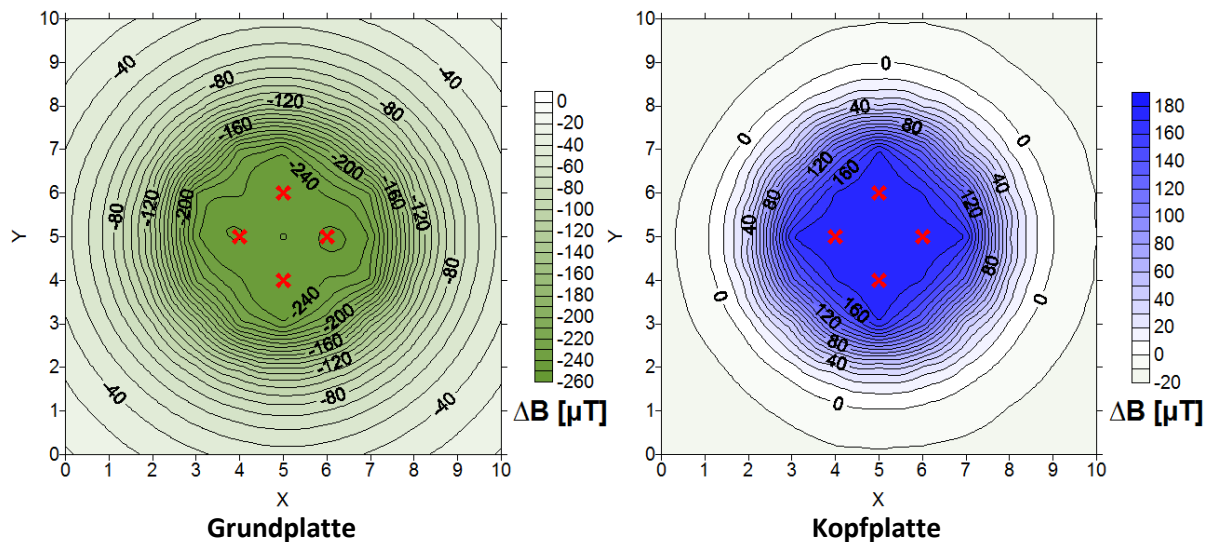


Abb. 63: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das ovale Muster, wie es beim Einfach-U Szenario aufgetreten ist, durch die Zugabe von zwei weiteren Proben wieder mehr ins kreisförmige verwandelt. Der Signalradius hat sich außerdem gegenüber dem Einfach-U Szenario erweitert.

Bei diesem Szenario haben die folgenden Koordinaten der Grundplatte den unteren Grenzwert der GEO-X Sonde erreicht: $X/Y = 3/5, 4/4, 4/6, 5/3, 5/5, 5/7, 6/4, 6/6$ und $7/5$, und folgenden Koordinaten der Kopfplatte den oberen Grenzwert der GEO-X Sonde erreicht: $X/Y = 3/5, 4/4, 4/5, 5/3, 5/4, 5/5, 5/6, 5/7, 6/4, 6/5, 6/6$, und $7/5$.

Die Tatsache, dass einige der Messpunkte aufgrund der Messgrenze der GEO-X Sonde nicht vollständig korrekt aufgenommen werden konnten hat keine besonderen Auswirkungen auf die Interpretation der Daten. So kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass sich die Signalmuster bzw. Anomalien, bei korrekter Aufnahme der Messpunkte im Nahbereich der Stahldrahtseile (sowohl auf Grund- als auch auf der Kopfplatte), für alle Szenarien, zu den Stahldrahtseilenden hin zuspitzen würden. Dies würde dann ähnlich aussehen wie die Ergebnisse der nicht magnetisierten Stahldrahtseile in Abb. 60. Dort erreichte keiner der Messpunkte den Grenzwert der GEO-X Sonde, so dass das Muster vollständig und korrekt abgebildet ist, mit der Spitze des Signalmusters direkt über bzw. unter dem Stahldrahtseil. Die spätere Magnetisierung hat keinen Einfluss auf das konzentrische sich zuspitzende Muster, sondern nur auf dessen Beträge (Abb. 61). Einzig eine Aussage über die

maximal möglichen Signalbeträge kann aufgrund der unvollständigen Daten nicht getroffen werden. Diese Information ist jedoch nicht von entscheidender Wichtigkeit, sondern eher die Frage bis in welcher Entfernung die Anomalien noch messbar sind. Diese Frage wird im folgenden Kapitel mit weiteren Versuchen beantwortet.

3.3.3.1.3 Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder

Um eine genauere Quantifizierung der Messsignalreichweite der Stahldrahtseile ermitteln zu können, wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt und zwar auf Basis zweier grundlegender Betrachtungsweisen, die für den Einsatz im Feld relevant sein können.

Zum einen werden die Grundplattenergebnisse analysiert, um die horizontale Reichweite des Messsignals zu untersuchen. Dies ist vor allem wichtig im Hinblick auf Fälle, in denen eine Rückbaubohrung bereits so stark fehlgeleitet ist, dass Sie quasi als lateraler Ast neben der EWS zum Liegen kommt. Somit könnte nur noch das laterale Signal des Stahldrahtseils mittels eines Messmoduls mit Flusssdichtesensor in der fehlgeleiteten Bohrung erfasst werden.

Für die Regressionsanalyse wird, für diesen Fall, ausgehend vom Grundplattenmittelpunkt des Messtands ($X/Y = 5/5$), ein Profil bis zum Rand der Grundplatte gelegt. Da es sich im Laufe der Untersuchungen auch rausstellte, dass die Anzahl der Messpunkte auf der Grundplatte nicht ausreichend für eine aussagekräftige Regressionsanalyse ist, wurde entschieden, weitere Messpunkte aufzunehmen. Hierzu wurde die Kopfplatte einfach vor die Grundplatte gestellt und die Grundplatte somit in negativer Y-Richtung entlang $X = 5$ erweitert (Abb. 64). Auf diese Weise konnten 11 neue Messpunkte für das Regressionsprofil erstellt werden. Die Höhendifferenz von 85 mm zwischen Grund- und Kopfplatte wurde durch das einfache Unterlegen eines 85 mm hohen Papierstapels unter die Kopfplatte kompensiert.

Bei dem Szenario mit einem und mit vier Rohren ohne Zylinder ist das Feldmuster kreisförmig und nahezu konzentrisch, so dass unabhängig von der Richtung des Profils die Ergebnisse der Regression identisch sein sollten (siehe Abb. 61 & Abb. 63). Bei dem Szenario mit 2 Rohren ohne Zylinder ist das Muster eher oval (Abb. 62). Das Muster hat dabei eine schwächere Ausbreitung in Y-Richtung, so dass für eine worst case-Betrachtungen, das Profil, wie oben beschrieben, vom Mittelpunkt aus parallel zur Y-Achse zu legen ist. Für die Vergleichbarkeit wurde entschieden, für alle gezeigten Szenarien das gleiche Messprofil zu legen. Entsprechend Abb. 64 beginnt dies bei der Koordinate $X/Y = 5/5$ und erstreckt sich bis Koordinate $X/Y = 5/-11$. Der Punkt $X/Y = 5/5$ ist kein Messpunkt, da dieser entweder von einem Rohr belegt ist oder bei Szenarien mit mehreren Rohren genau zwischen diesen liegt und somit keine Relevanz für die Auswertung hat. Der Messpunkt $X/Y = 5/4$ ist nur für das Szenario mit 1 und mit 2 Rohren vorhanden. Beim Szenario mit 4 Rohren ist der Messpunkt $X/Y = 5/4$ mit einem der 4 Sondenrohre belegt. Hier fehlt also ein Messpunkt für die Regressionsgerade. Bei Messungen mit Zylinder entfallen die Koordinaten $X/Y = 5/4$, $5/3$ und $5/2$, die sich innerhalb bzw. auf

dessen Schnittkante befinden. In diesem Kapitel werden allerdings erstmal nur Messungen ohne Zylinder betrachtet.

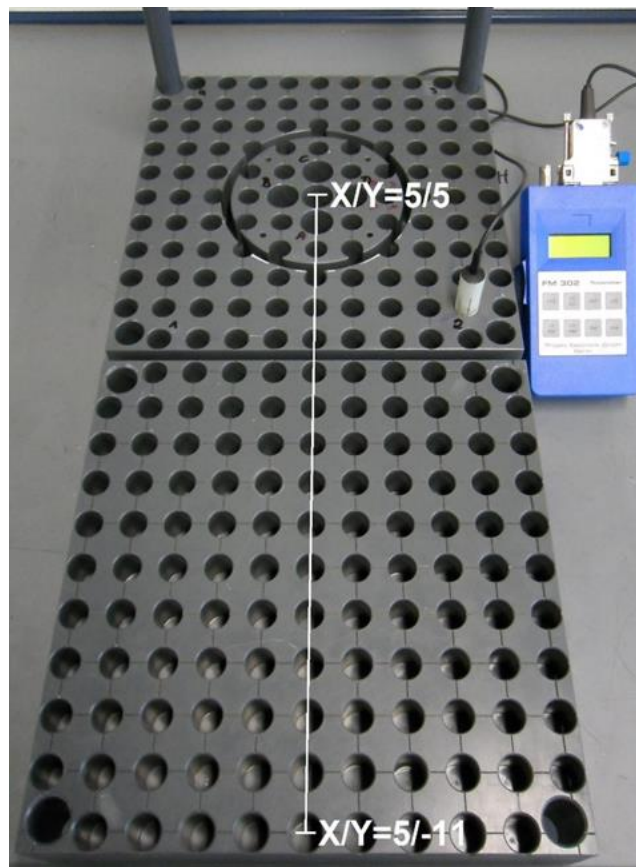


Abb. 64: Erweiterung der Grundplatte in negativer Y-Richtung entlang $X = 5$, durch Ansetzen der Kopfplatte.

In Abb. 65 ist die laterale Messsignalreichweite für das Szenario aus Abb. 60 mit nicht magnetisierten Stahldrahtseilen gezeigt. Die Abbildung zeigt dabei ΔBI . ΔB ergibt sich aus der Differenz der Profilmessung mit Probe und einer Referenzmessung ohne Probe.

Unter Beachtung der ermittelten Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu T$) wird im Folgenden festgelegt, dass ein signifikantes Signal bei einem $\Delta BI \geq 1,5 \mu T$ vorliegt. Für die folgenden Berechnungen der maximalen lateralen Signalreichweite wird somit ein Wert von $1,5 \mu T$ für y eingesetzt. Angewendet auf die Regressionsgleichungen in Abb. 65 kann somit ein signifikantes Signal bis 11,9 cm vom Sondenmittelpunkt für Probe A und 13,6 cm vom Sondenmittelpunkt für Probe B ermittelt werden.

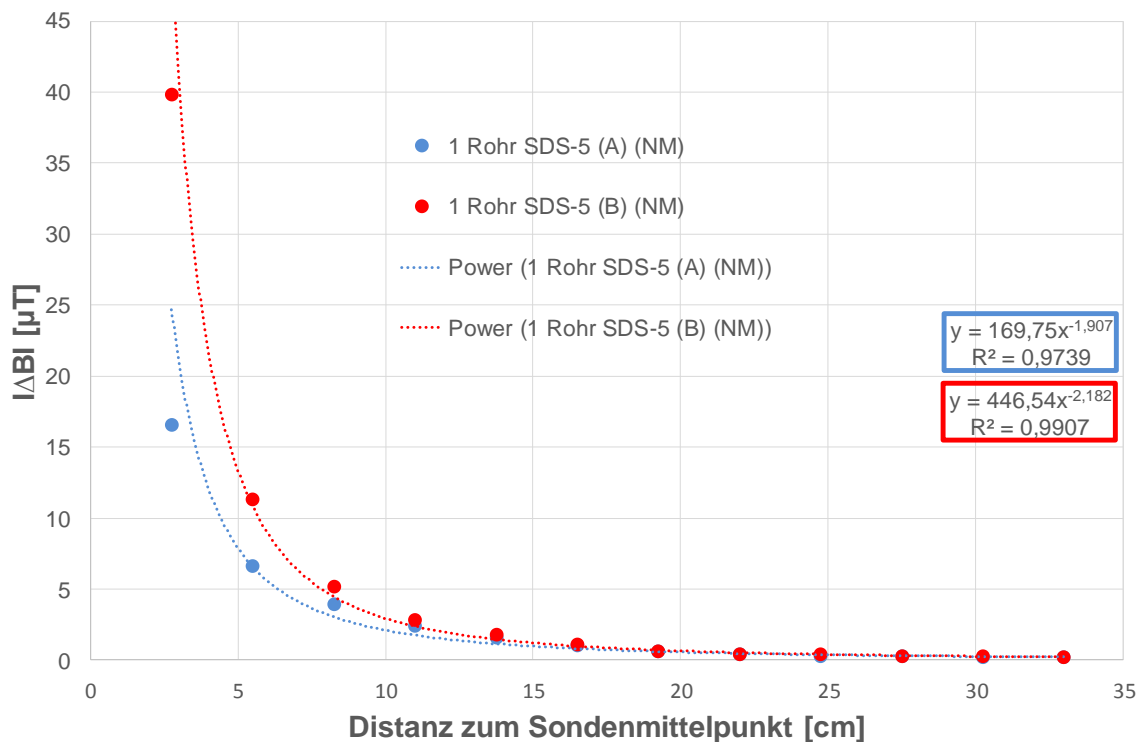


Abb. 65: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).

In Abb. 66 ist die laterale Messsignalreichweite für die drei Szenarien aus Abb. 61, Abb. 62 und Abb. 63 mit magnetisierten Stahldrahtseilen gezeigt. Ein signifikantes Signal kann bis 33,8 cm vom Sondenmittelpunkt für das 1 Rohr Szenario, 45,2 cm vom Sondenmittelpunkt für das 2 Rohr (Einfach-U) Szenario, und 50,9 cm vom Sondenmittelpunkt für das 4 Rohr (Doppel-U) Szenario ermittelt werden. Die Überlagerung mehrerer Stahldrahtseile führt also zu einer Ausbreitung des lateralen Messsignals.

Es sei erwähnt, dass beim Doppel-U Szenario außer dem Punkt $X/Y = 5/4$, auch für den Punkt $X/Y = 5/3$ kein Wert aufgenommen wurde, da dieser, wie bereits erwähnt, der unteren Messgrenze der GEO-X Sonde entspricht (siehe vorheriges Unterkapitel) und somit nicht für eine korrekte Regressionsanalyse verwendet werden kann. Eine weitere wichtige Beobachtung ist auch, dass die Messsignalreichweite des magnetisierten Stahldrahtseils (1 Rohr Szenario) fast 3-mal so groß ist wie das der nicht magnetisierten Stahldrahtseile. Das zeigt, dass eine vorherige Magnetisierung essentiell für ein weitreichendes Signal ist.

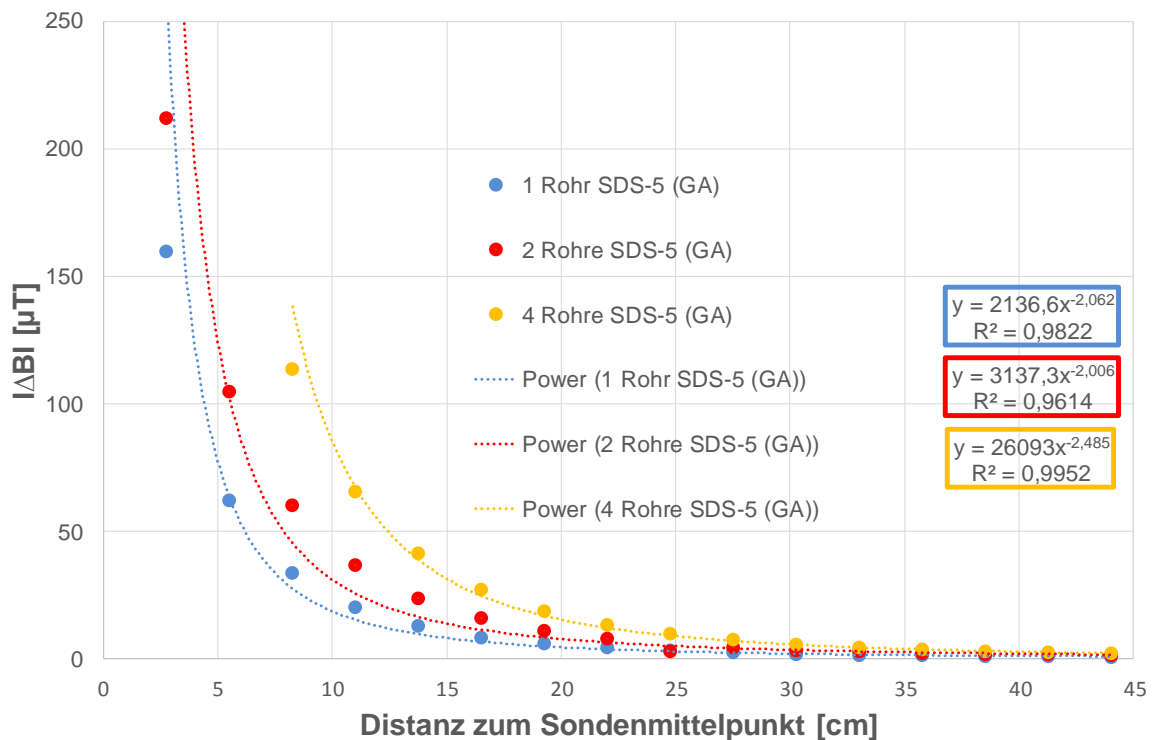


Abb. 66: Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.

Für ein besseres Verständnis sind in Tab. 7, den Messpunkten aus Abb. 64 die entsprechenden Distanzen zum Sondenmittelpunkt gegenübergestellt. Dies gilt für alle bisherigen und folgenden Abbildungen in denen die laterale Signalreichweite dargestellt wird.

Tab. 7: Zuordnung der X/Y-Koordinaten des Messstands zu Profildistanzen.

X/Y-Koordinate	Distanz zum Sondenmittelpunkt [cm]
5/5	0
5/4	2,75
5/3	5,5
5/2	8,25
5/1	11
5/0	13,75
5/-1	16,5
5/-2	19,25

Weiter auf nächster Seite

5/-3	22
5/-4	24,75
5/-5	27,5
5/-6	30,25
5/-7	33
5/-8	35,75
5/-9	38,5
5/-10	41,25
5/-11	44

Für die zweite grundlegende Betrachtungsweise werden die Ergebnisse der Kopfplatte analysiert. Hierzu wird die GEO-X Sonde in den Port X/Y = 5/5 gesteckt, der bei allen Szenarien einen Maximalwert der Flussdichte aufweist, da die Sonde direkt über dem Stahldrahtseil liegt. Die Kopfplatte wird dann Schrittweise entlang der 30 cm überstehenden Führungsstäbe, vertikal in 2 cm Schritten angehoben und jeweils ein Messwert aufgenommen, um ein Profil zu erhalten (Abb. 67).



Abb. 67: 30 cm vertikal Profil zum verfahren der Kopfplatte.

Diese Betrachtungsweise zielt vor allem auf eine Lösung ab, bei der während dem Bohren kontinuierlich ein Messsignal aufgenommen wird. Eine solche Lösung sollte es erlauben, die Bohrrichtung bei einer Fehlleitung zeitnah zu korrigieren, so dass es erst gar nicht zu einem Szenario mit einem lateralen Ast kommt, das Messsignal also immer von oben vom Messmodul erfasst wird. Eine wichtige Frage bei diesem Szenario ist, wie nahe das Messmodul bzw. der Flussdichtesensor über der Sonde liegen muss, um überhaupt noch ein Signal

erfassen zu können. Diese Frage kann mittels des ermittelten vertikalen Profils geklärt werden.

Unter Beachtung der ermittelten Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu\text{T}$) wird im Folgenden festgelegt, dass ein signifikantes Signal bei einem $|\Delta\text{BI}| \geq 1,5 \mu\text{T}$ vorliegt. Für die folgenden Berechnungen der maximalen vertikalen Signalreichweite wird somit ein Wert von $1,5 \mu\text{T}$ für y eingesetzt.

Angewendet auf die Regressionsgleichungen in Abb. 68 für das 1 Rohr Szenario mit nicht magnetisierten Stahldrahtseil kann ein signifikantes Signal bis 12,7 cm oberhalb der Sondenoberkante für Probe A und 12,0 cm für Probe B ermittelt werden.

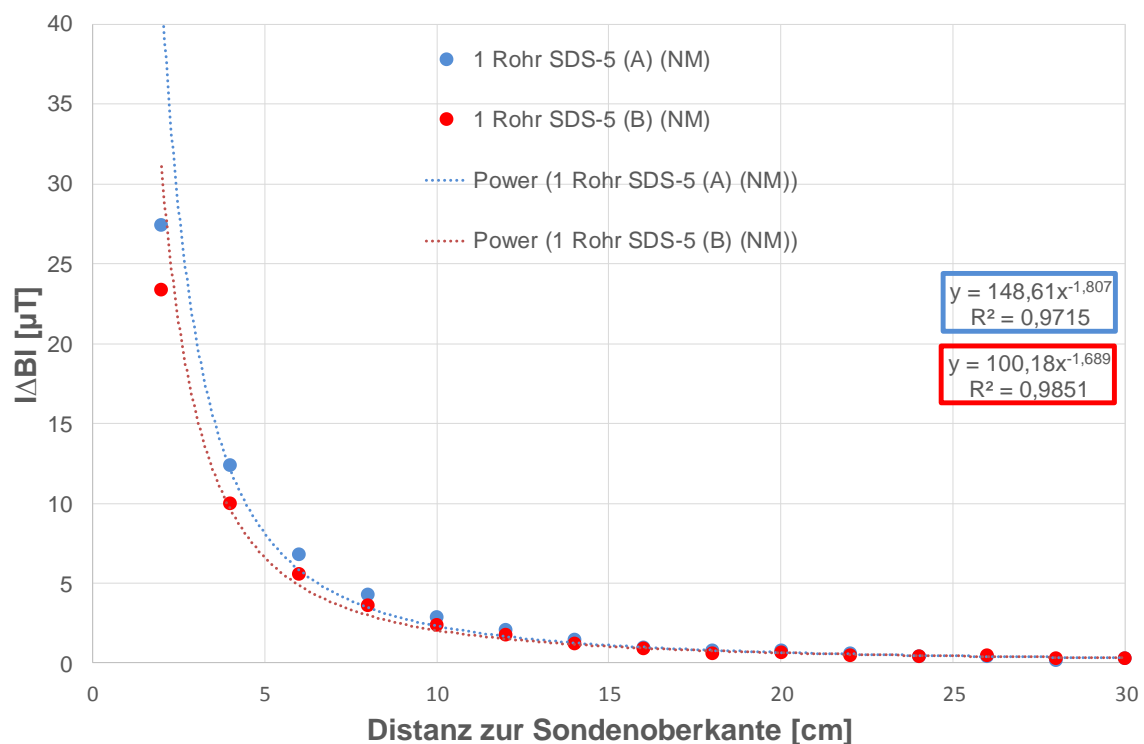


Abb. 68: Vertikale Messsignalreichweite $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).

Für den magnetisierten Fall (Abb. 69) kann ein signifikantes Signal bis 38,8 cm oberhalb der Sondenoberkante für das 1 Rohr Szenario, 57,2 cm für das 2 Rohr (Einfach-U) Szenario und 69,5 cm für das 4 Rohr (Doppel-U) Szenario ermittelt werden. Sowohl die Magnetisierung als auch die Überlagerung mehrerer Stahldrahtseile führt also zu einer Ausbreitung des vertikalen Messsignals.

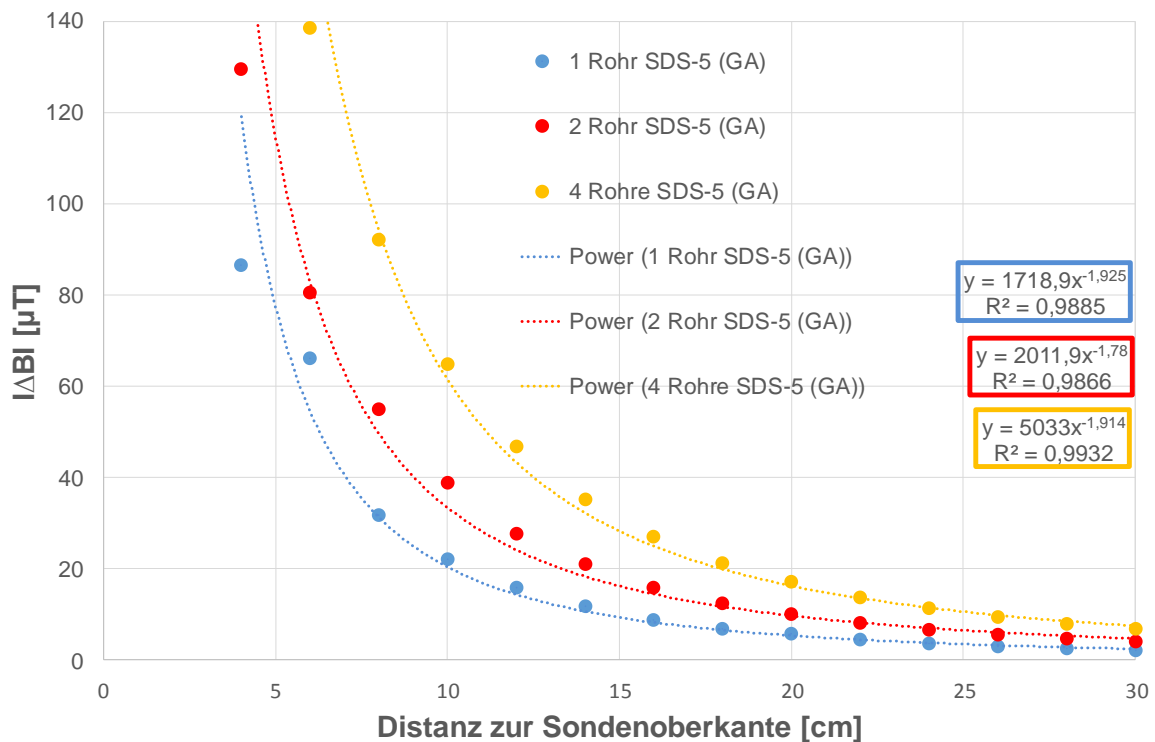


Abb. 69: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.

3.3.3.1.4 Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Im nächsten Schritt wurden die Messungen der magnetisierten Proben aus Kap. 3.3.3.1.2, unter Einsatz des Eisenzylinders zur Simulation der Hilfsverrohrung im Bohrloch, wiederholt. In diesem Fall wurde als Referenz die Kopf- und Grundplatte mit Eisenzylinder ohne Probe gemessen und entsprechend von den Messungen mit Probe und Zylinder abgezogen.

Vorab zu erklären ist, dass die Laborversuche mit diesem speziellen Messstand die Problematik aus einem anderen Blickwinkel betrachten, als es letztlich im Gelände beim Überbohren der Fall ist. Bei Annahme einer fehlgeleiteten verrohrten Bohrung im Gelände würde das Messmodul mit Flussdichte-Sensor in diese eingeführt werden. Die Verrohrung wäre also um den Sensor herum, und nicht wie bei diesen Laborversuchen, um die mit Kontrastmittel gefüllte Sonde. Letztlich ist jedoch das Ziel, eine Aussage über die Barrierewirkung der Verrohrung zu treffen, dabei ist es irrelevant, ob nun der Sensor, oder wie in diesem Fall die Sonden, im Rohr stecken, da die Durchlässigkeit des Eisenzylinders für das magnetische Signal isotrop erscheint. Diese Behauptung konnte empirisch mittels eines einfachen Versuchsaufbaus nachgewiesen werden, der in Abb. 70 dargestellt ist.

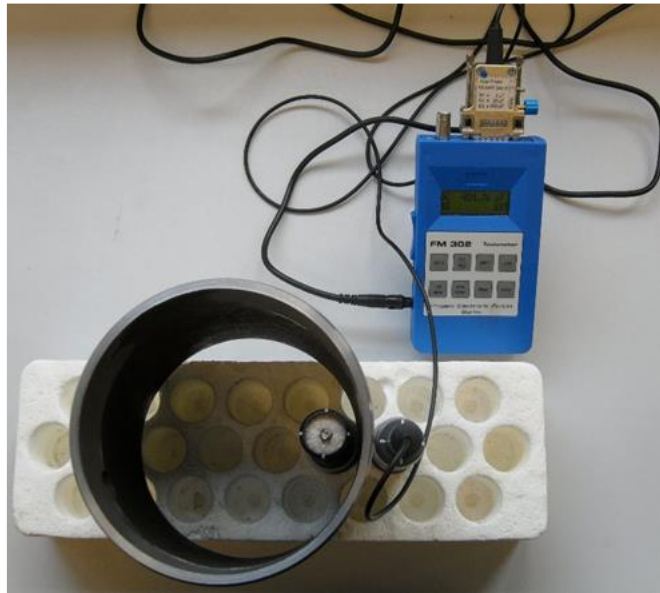


Abb. 70: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Richtungsabhängigkeit des magnetischen Signals durch den Eisenzylinder.

Hier wurde der im Messstand verwendete Eisenzylinder auf einen aus Styropor bestehenden Zentrifugenröhrchenständer aufgestellt, und zwar so, dass die Wandung des Zylinders genau zwischen zwei Stellplätzen zum Liegen kam. Es wurden links und rechts der Wandung in beide Stellplätze ein Zentrifugenröhrchen gestellt. Der Innendurchmesser der Röhrchen ist gerade minimal größer als der Sondenrohrdurchmesser und somit konnte in einem ersten Schritt, durch das Einführen der Sondenport zu Messportadapter eine Referenzmessung der beiden Stellplätze durchgeführt werden. Anschließend wurde eines der magnetisierten Stahldrahtseilproben in einen der beiden Plätze gestellt und der benachbarte Platz auf der anderen Seite der Rohrwandung mit der GEO-X Sonde gemessen, und umgekehrt. Nach Abzug der Referenzmessungen konnte nun das jeweils auf beiden Seiten ankommende magnetische Signal errechnet werden. Hierzu wurden 2 der oben gezeigten Stahldrahtseilproben gemessen (Probe A und B). Zusätzlich wurden bei jeder Probe 2 Positionen des Eisenzylinders gemessen. Dabei wurde der Zylinder jeweils um 90° um die Längsachse gedreht. Dies Messungen sollte zeigen, dass zum einen keine Formanisotropie in Bezug auf das Messsignal besteht (Konvexe bzw. konkave Wölbung des Zylinders je nachdem ob die Probe außerhalb oder innerhalb des Zylinders steht), und zum anderen sollte gezeigt werden, dass dieses Fehlen einer Formanisotropie entlang der Zylinderwandung reproduzierbar ist.

Tab. 8 zeigt eine Zusammenfassung der Messergebnisse.

Tab. 8: Messergebnisse zur Bestimmung der Richtungsabhängigkeit des magnetischen Messingals durch den Eisenzylinder (B in μT) (Zyl = Zylinder, Ref = Referenz).

Probe A (Zyl. 0°)	Innen	Außen	Probe A (Zyl. 90°)	Innen	Außen
B (Initial ohne Zyl.)	-146,6	-144,4	B (Initial ohne Zyl.)	-146,6	-144,4
B (Zyl. Ref.)*	42,5	32,8	B (Zyl. Ref.)*	3,1	-8,7
B (Probe+Zyl.)**	22,4	14,5	B (Probe+Zyl.)**	-15,0	-26,6
ΔB (**-*)	-20,1	-18,3	ΔB (**-*)	-18,1	-17,9
Probe B (Zyl. 180°)	Innen	Außen	Probe B (Zyl. 270°)	Innen	Außen
B (Initial ohne Zyl.)	-162,2	-162,8	B (Initial ohne Zyl.)	-162,6	-162,8
B (Zyl. Ref.)*	0,0	-14,1	B (Zyl. Ref.)*	16,0	4,3
B (Probe+Zyl.)**	-22,1	-33,8	B (Probe+Zyl.)**	-4,6	-15,5
ΔB (**-*)	-22,1	-19,7	ΔB (**-*)	-20,6	-19,8

Wie bereits vorweggenommen, zeigen die Messergebnisse, dass die Durchlässigkeit des Eisenzylinders für das magnetische Signal isotrop erscheint. Dies ergibt sich aus dem Vergleich des ΔB innen und außen, das bei allen vier Messungen sehr nahe beieinander liegt mit einer maximalen Differenz zwischen innen und außen von $2,4 \mu\text{T}$ bei Probe B (Zyl. 180°). Dies ist eine sehr geringe Differenz, wenn man bedenkt, dass dieser Messaufbau eher provisorisch errichtet wurde und nicht die gleiche nötige Stabilität für Proben und Sonde bietet wie der aufwendig gebaute Messstand aus PVC, der trotzdem bereits eine Standardabweichung (2σ) von $1 \mu\text{T}$ aufweist. Die kleinste Differenz in Tab. 6 ist bei der Probe A (Zyl. 90°) mit nur $0,2 \mu\text{T}$.

Da die Isotropie des Eisenzylinders somit nachgewiesen werden konnte, werden im Folgenden die Ergebnisse der Versuche mit Eisenzylinder gezeigt. Die roten Kreise in den Karten zeigen die Lage des Zylinders. Die Dicke des roten Kreises ist dabei maßstabgetreu entsprechend der Dicke der Zylinderwandung.

Abb. 71 zeigt die nicht magnetisierten Proben A & B (aus Abb. 60), nur diesmal mit Eisenzylinder. Die Ergebnisse der Proben A & B können als sehr gut reproduzierbar betrachtet werden, sowohl von den Mustern als auch von den Wertebereichen her. Bei einem grob visuellen Vergleich mit den gleichen Proben ohne Zylinder (Abb. 60) kann man erkennen, dass auf Grund- und Kopfplatte das Flussdichtesignal abgeschwächt wird. Ein genauere Vergleich bzw. Berechnungen im Hinblick auf die Messsignalreichweite für Szenarien mit einem Rohr, zwei Rohren und vier Rohren, werden im folgenden Kap. 3.3.3.1.5 noch genauer betrachtet. Das vorliegende Kapitel dient nur einer ersten darstellenden Beschreibung.

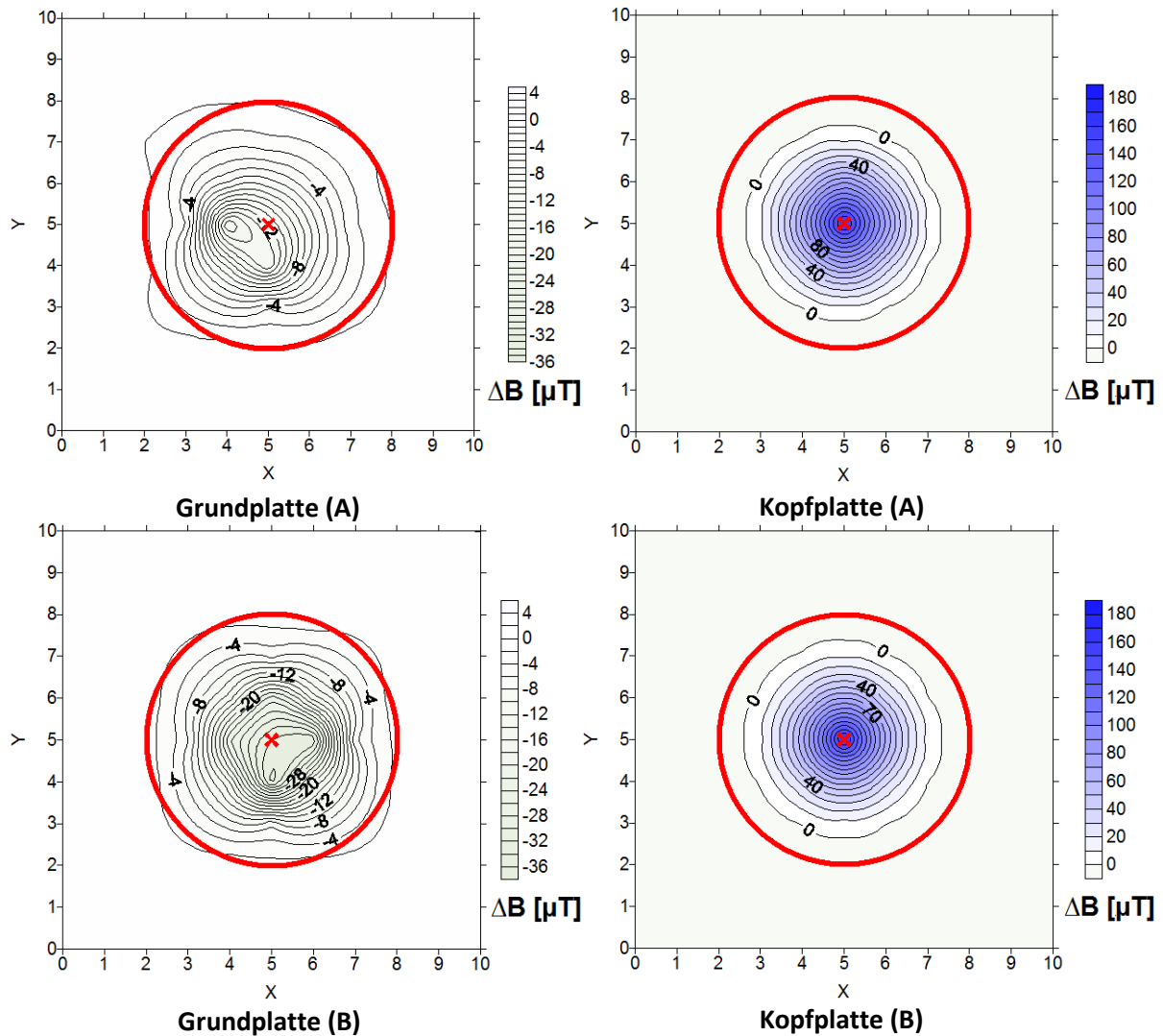


Abb. 71: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.

Abb. 72 zeigt die magnetisierten Probe A & B (aus Abb. 61) mit Eisenzyylinder. Die Beobachtungen sind hier im Prinzip die gleichen wie bei den nicht magnetisierten Proben nur mit einer insgesamt größeren Signalreichweite.

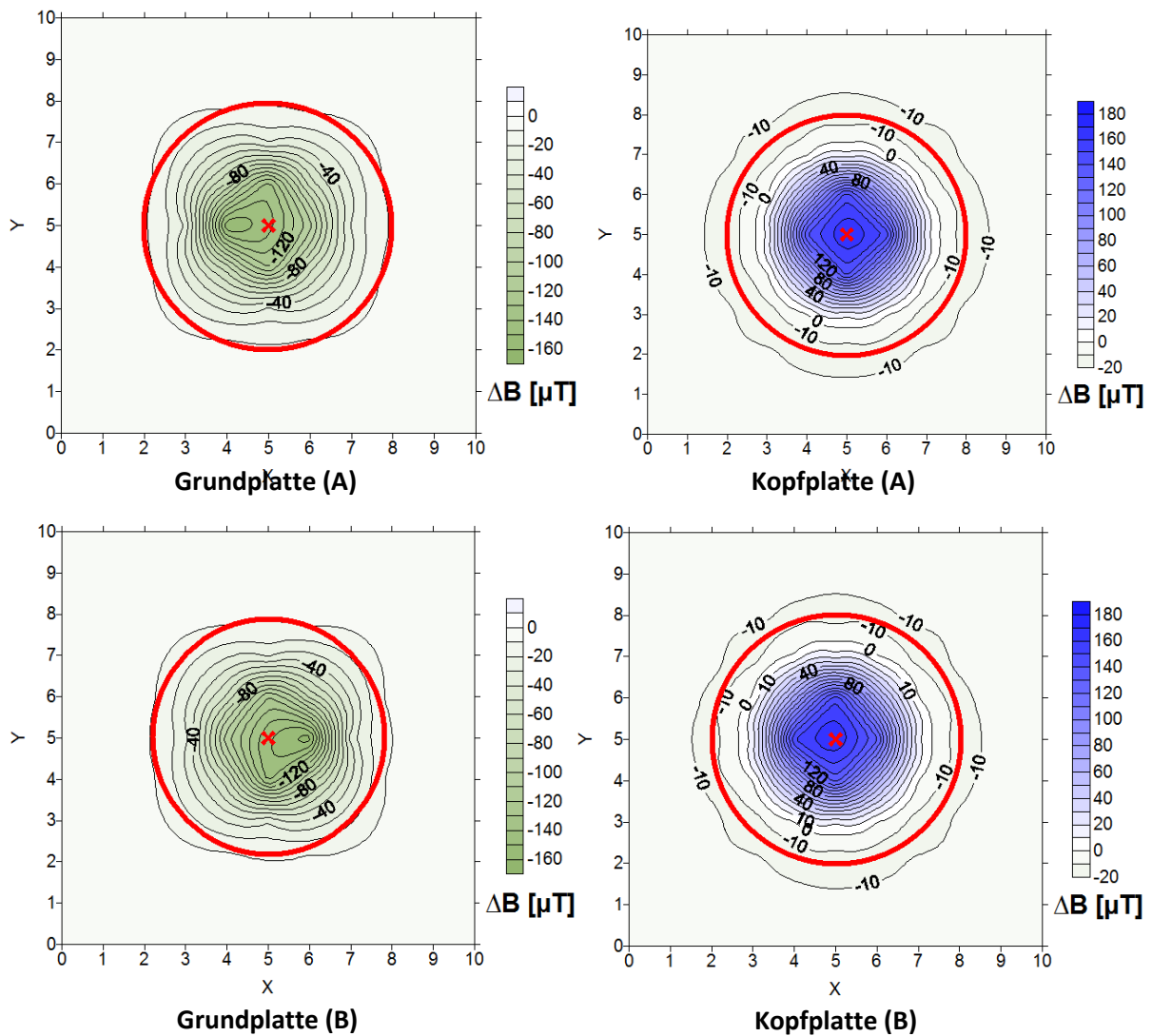


Abb. 72: \varnothing 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.

Es muss erwähnt werden, dass bei beiden magnetisierten Proben in unmittelbarer Nähe zum Stahldrahtseil, die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Kopfplatte, bei der Koordinaten X/Y = 5/5, jeweils einen Wert von 200 μT bzw. die obere Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht haben. In Wirklichkeit können diese Werte also größer sein.

Abb. 73 zeigt die Ergebnisse mit 2 Rohren (Einfach-U) und Zylinder.

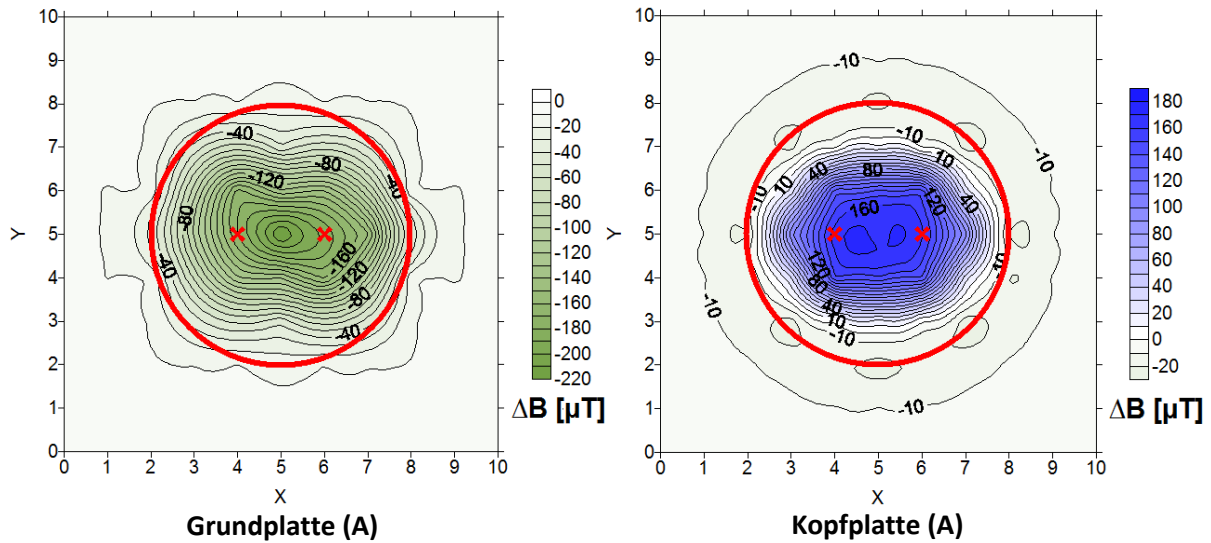


Abb. 73: Ø 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.

Diese Ergebnisse zeigen ebenfalls wieder ein stark abgeschwächtes Signal der Grundplatte im Vergleich zur gleichen Messung ohne Zylinder (Abb. 62). Genauso stellt sich auch das Doppel-U Szenario in Abb. 74 dar.

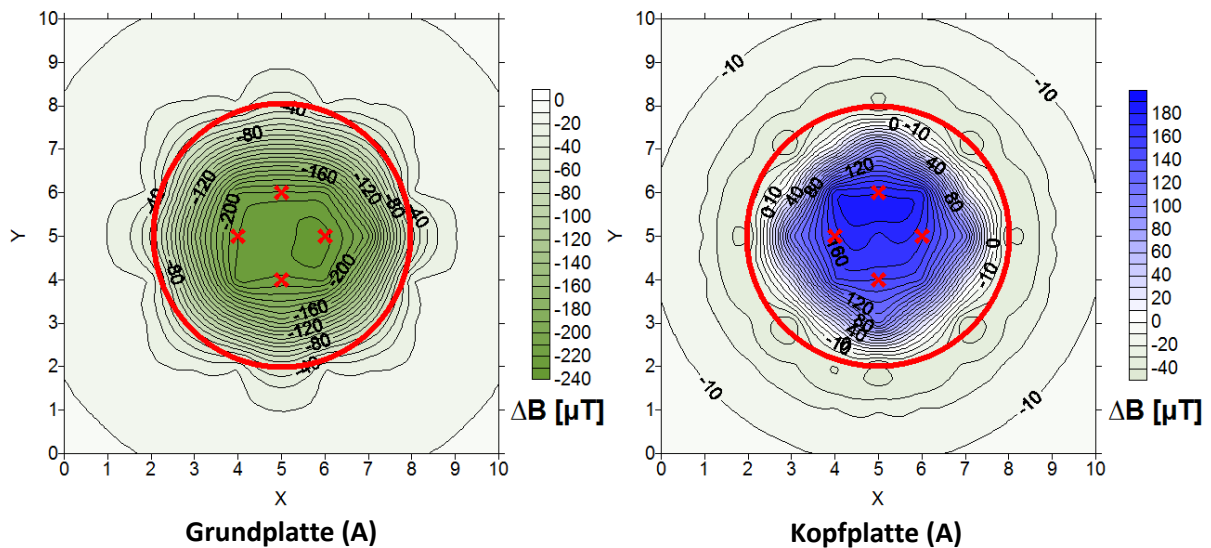


Abb. 74: Ø 5 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.

Die auf den Grundplatten zu beobachtende laterale Abschwächung des Messsignals spiegelt sich auch in den Mustern der Kopfplatten wieder, so sind bei allen Szenarien mit Zylinder die Anomalien im Vergleich zu den gleichen Messungen ohne Zylinder, „eingengt“ innerhalb des Zylinders.

Es muss erwähnt werden, dass beim 2 Rohr Szenario (Abb. 73) auf der Grundplatte bei Koordinate X/Y = 5/5, die untere Messgrenze von $-200 \mu\text{T}$ der GEO-X Sonde erreicht wurde. Auf der Kopfplatte ist die obere Messgrenze ($200 \mu\text{T}$) bei den Koordinaten X/Y = 4/4, 4/5, 5/4, 5/5, 6/4 und 6/5 erreicht.

Beim 4 Rohr Szenario (Abb. 74) ist dies der Fall bei den Koordinaten X/Y = 4/4, 4/6, 5/5, 6/4 und 6/6 der Grundplatte, und bei den Koordinaten X/Y = 4/4, 4/5, 4/6, 5/3, 5/4, 5/5, 5/6, 6/4, 6/5 und 6/6 der Kopfplatte.

3.3.3.1.5 Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

In Abb. 75 ist die laterale Messsignalreichweite für das Szenario aus Abb. 71 mit nicht magnetisierten Stahldrahtseilen und Eisenzylinder gezeigt. Es kann kein signifikantes Signal ermittelt werden. Der Eisenzylinder schirmt also das gesamte Signal ab.

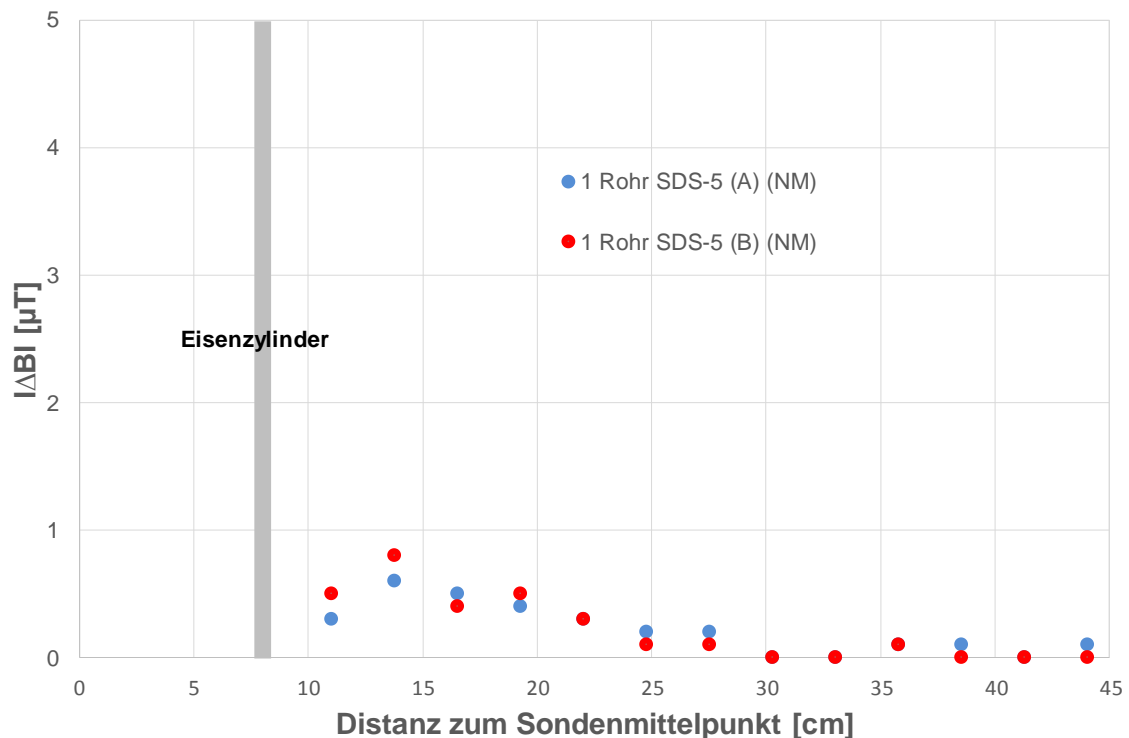


Abb. 75: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).

In Abb. 76 ist die laterale Messsignalreichweite für die drei Szenarien aus Abb. 72, Abb. 73 und Abb. 74 mit magnetisierten Stahldrahtseilen und Eisenzylinder gezeigt. Es kann ein signifikantes Signal (bei $1,5 \mu\text{T}$) bis 20,5 cm vom Sondenmittelpunkt für das 1 Rohr Szenario, 26,7 cm vom Sondenmittelpunkt für das Einfach-U Szenario, und 35,9 cm vom

Sondenmittelpunkt für das Doppel-U Szenario ermittelt werden. Sowohl die Magnetisierung als auch die Überlagerung mehrerer Stahldrahtseile führt also zu einer Ausbreitung des lateralen Messsignals.

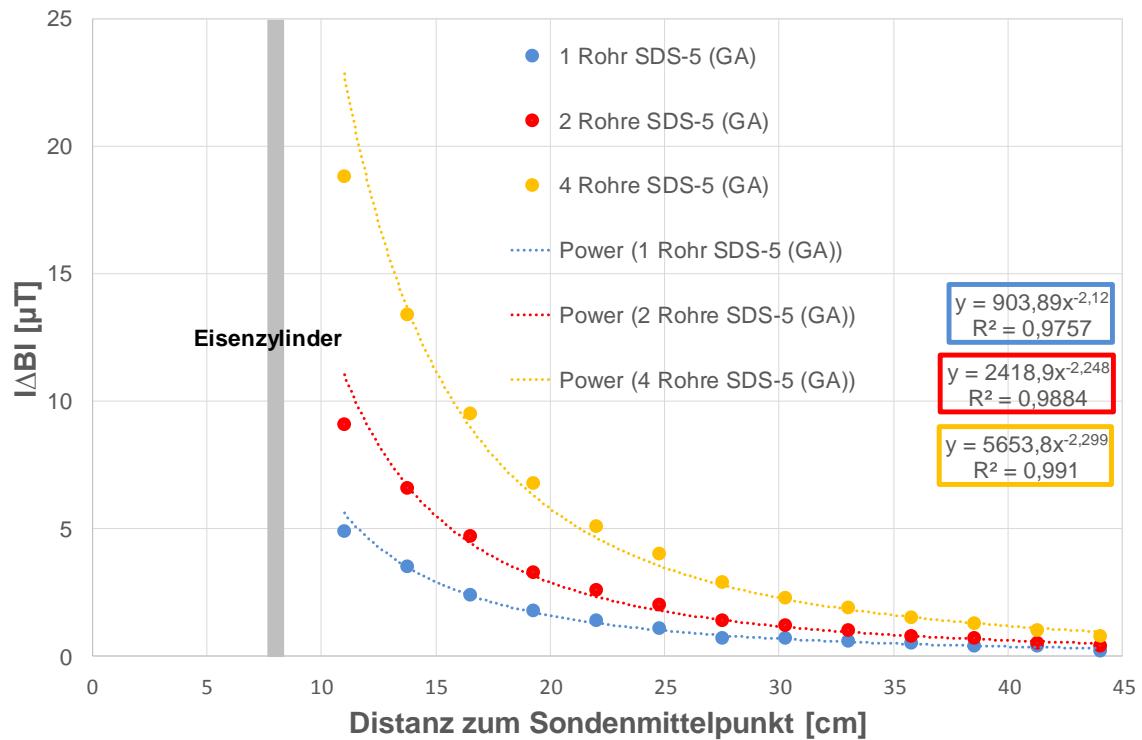


Abb. 76: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.

In Abb. 77 ist die vertikale Messsignalreichweite für nicht magnetisierte Stahldrahtseile dargestellt. Ein signifikantes Signal ($1,5 \mu\text{T}$) kann bis 10,7 cm oberhalb der Sondenoberkante für Probe A und 9,4 cm für Probe B ermittelt werden.

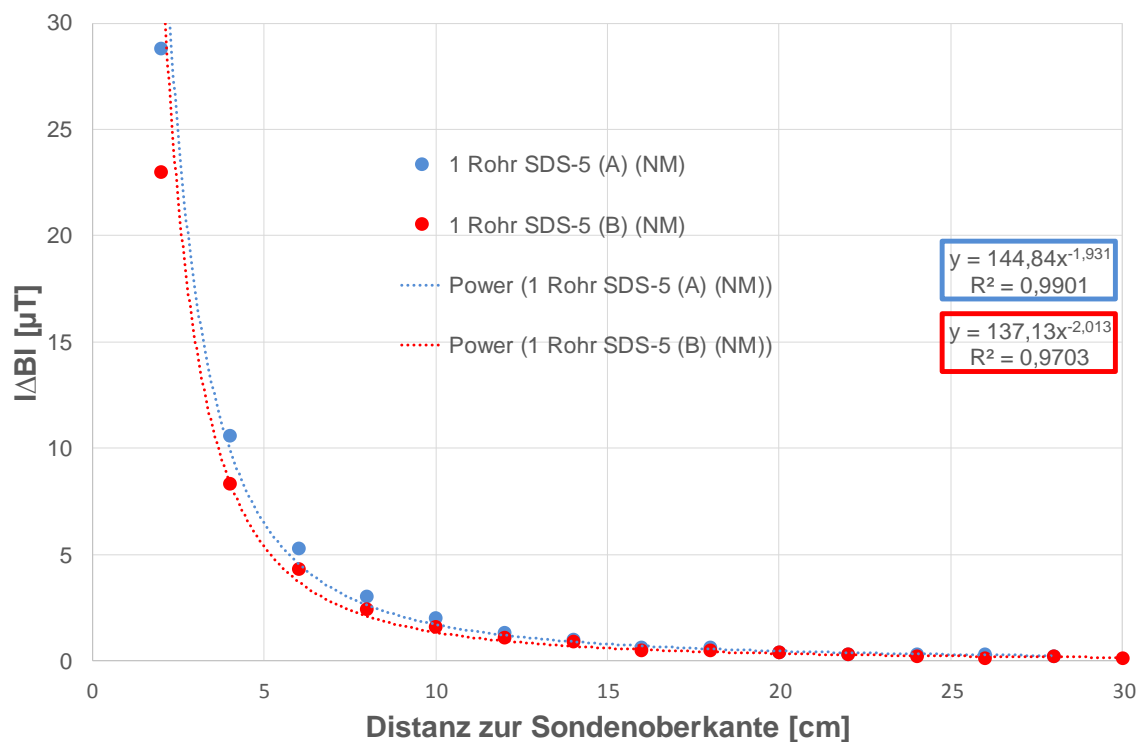


Abb. 77: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).

In Abb. 78 ist die vertikale Messsignalreichweite für magnetisierte Stahldrahtseile dargestellt. Ein signifikantes Signal ($1,5 \mu T$) kann bis 28,0 cm oberhalb der Sondenoberkante für das 1 Rohr Szenario, 36,4 cm für das 2 Rohr (Einfach-U) Szenario und 44,8 cm für das 4 Rohr (Doppel-U) Szenario ermittelt werden. Sowohl die Magnetisierung als auch die Überlagerung mehrerer Stahldrahtseile führt also zu einer Ausbreitung des vertikalen Messsignals. Beim 4 Rohr Szenario fehlt ein Messpunkt bei 4 cm Distanz zur Sondenoberkante, da hier die obere Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht wurde.

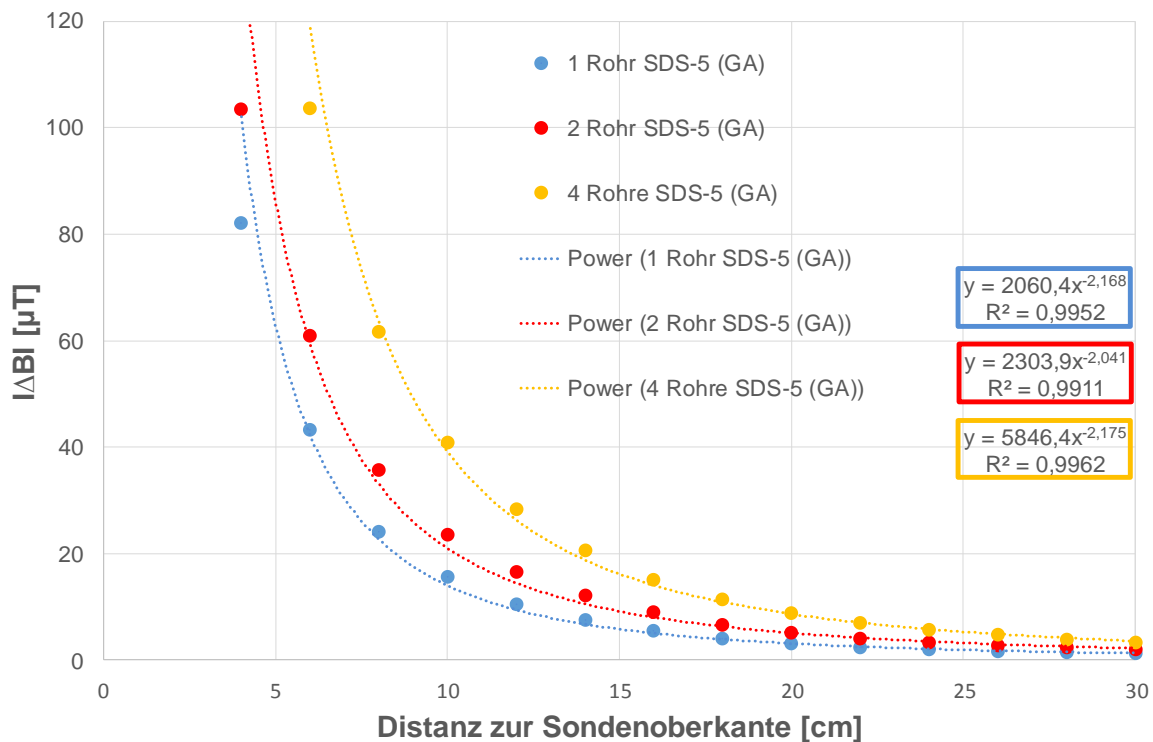


Abb. 78: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 5 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.

3.3.3.1.6 Statistische Fehlerbetrachtung anhand der \varnothing 5 mm Stahldrahtseile

Anhand der Ergebnisse der vorhergehenden Unterkapitel hat sich gezeigt, dass sich die Stahldrahtseilmethode im Vergleich zu den magnetisch dotierten Suspensionen und magnetisierten Kugeln als eine brauchbare Methode für den Anwendungsfall darstellt.

Messungen der Parallelproben A & B in Kap. 3.3.3.1.2 und 3.3.3.1.4 haben bereits die gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse vor allem im Hinblick auf deren Feldmuster gezeigt. Unklar erscheint jedoch bisher, inwieweit die Ergebnisse der Messsignalreichweitemessungen aus Kap. 3.3.3.1.3 verlässlich sind bzw. wie groß der statistische Fehler der Messmethode insgesamt ist.

Um dies beurteilen zu können, wurden insgesamt 31 Proben mit \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen hergestellt, und für diese, entsprechend Kap. 3.3.3.1.3, jeweils ein laterales und vertikales Profil gemessen. Als Szenario wurde das Einfachste gewählt, also 1 Rohr in der Mitte ($X/Y = 5/5$) ohne Zylinder. Jeder Punkt des lateralen und vertikalen Profils wurde statistisch ausgewertet, d.h. dass für jeden Punkt anhand der Stichprobe $n = 31$ eine Standardabweichung (2σ) errechnet wurde.

Abb. 79 zeigt die Ergebnisse der Statistik für das laterale Profil. Zu erkennen ist, dass die Standardabweichung (2σ) mit zunehmender Entfernung vom Sondenmittelpunkt bzw. Stahldrahtseil abnimmt. Das heißt, dass die Genauigkeit der Messmethode mit zunehmender Entfernung zum Rohr zunimmt. Dies erscheint plausibel, wenn man nochmal die Feldmuster (z.B. Abb. 61) betrachtet. Die nahezu konzentrischen Muster zeigen eine Zunahme der Dichte der magnetischen Feldlinien (B-Feld) zum Sondenmittelpunkt hin. Dadurch können kleinste Heterogenitäten bei einzelnen Proben, enorme Abweichungen an Messpunkten hervorrufen, die in unmittelbarer Nähe zum Rohr liegen.

Alles in allem sind diese Ergebnisse jedoch als sehr positiv zu bewerten, da die Genauigkeit der Entfernungsmessung, die mit dieser Statistik bewertet werden soll, als sehr gut eingestuft werden kann.

So kann für die Entfernungsmessung aus Abb. 58 für das 1 Rohr Szenario, basierend auf dieser Statistik, eine Standardabweichung 2σ (Gesamtfehler) angegeben werden, die sich im Bereich $\pm 1 \mu\text{T}$ bei 33,8 cm befindet. Sie befindet sich also im Bereich der Hintergrundschwankungen, die bereits in Kap.3.3.1.3 ermittelt wurden. Um das zu veranschaulichen ist in Abb. 80 das 12σ aus Abb. 79 nochmal gegen die Distanz aufgetragen, sowie die Hintergrundschwankung. Ab ca. 20 cm Distanz entspricht das 2σ der Probe (Gesamtfehler) den Hintergrundschwankungen ohne Probe. Die Hintergrundschwankungen sind also ausreichend, um den Gesamtfehler der Messmethode im Hinblick auf die Entfernungsmessung zu beschreiben.

Allerdings lässt sich diese Statistik nicht direkt auf das 2 Rohr und 4 Rohr Szenario anwenden, da hier die Steilheit der IABI-Kurven größer ist (Abb. 66). In diesen Fällen wäre also die Distanz bei der sich Gesamtfehler und Hintergrundschwankung schneiden > 20 cm, gleichzeitig ist aber auch die Distanz bei der noch ein signifikantes Signal gemessen werden kann größer als beim 1 Rohr Szenario. Ganz allgemein kann man also sagen, dass es ausreichend ist die Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu\text{T}$) als Richtwert für die Beurteilung bzw. Ermittlung der lateralen Entfernungsmessungen heranzuziehen.

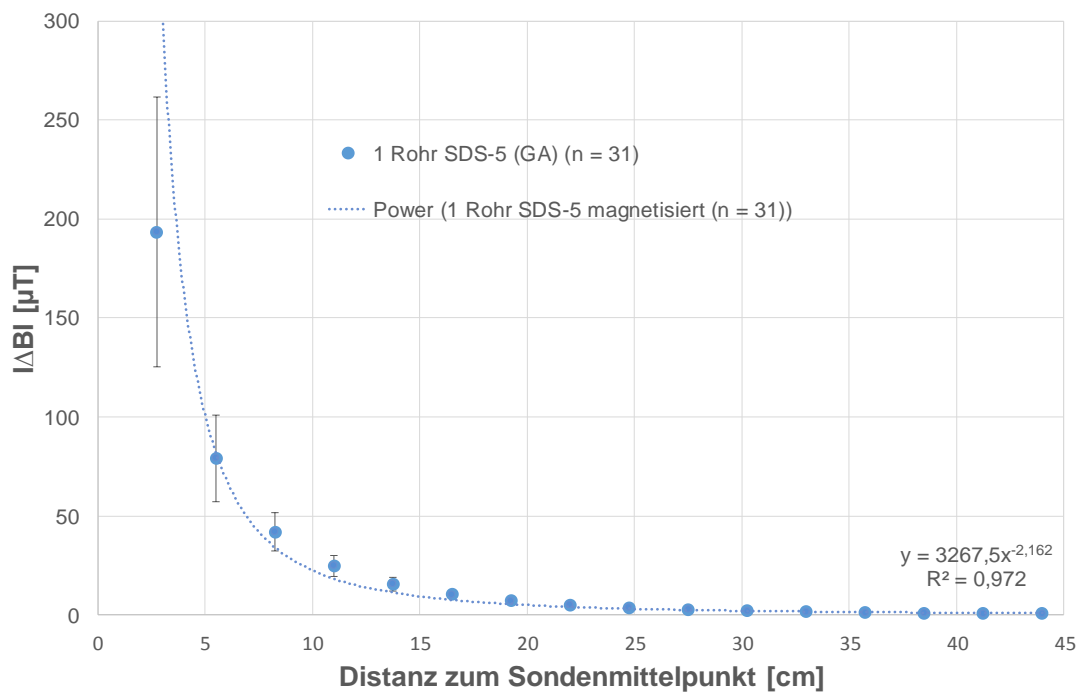


Abb. 79: Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) für alle Messpunkte des lateralen Profils ($X/Y = 5/5 \rightarrow X/Y = 5/-11$) auf Basis einer Stichprobe von $n = 31$, MIR mit GA „Süd“.

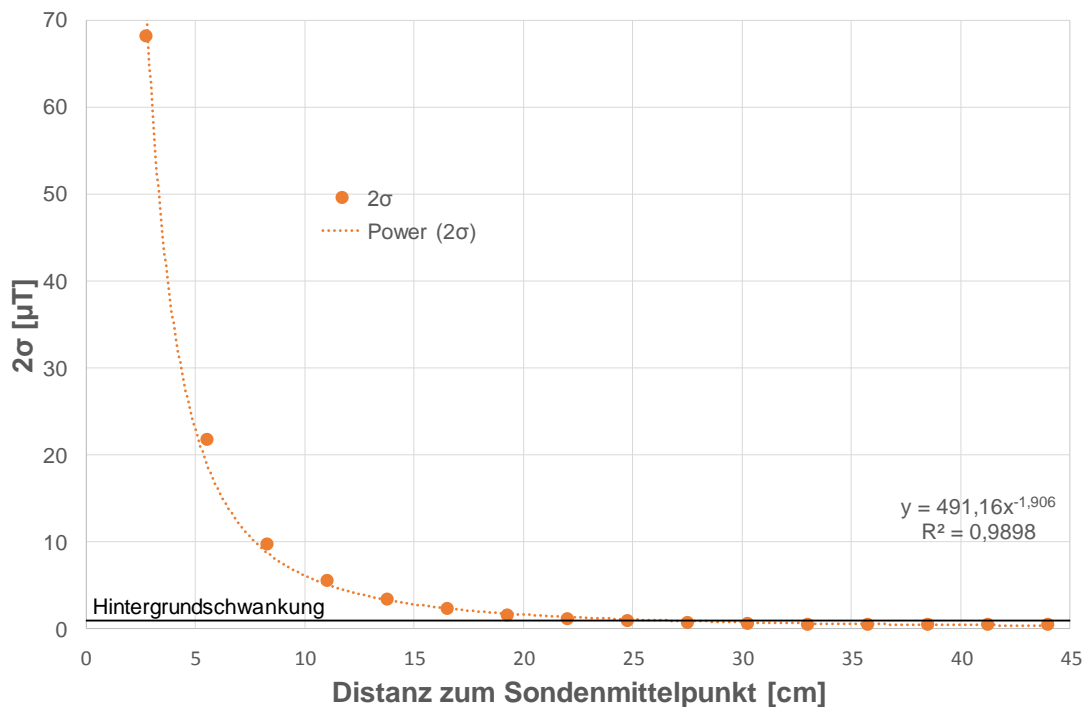


Abb. 80: Standardabweichungen (2σ) für das Profil $X/Y = 5/5 \rightarrow X/Y = 5/-11$ mit Darstellung der natürlichen Hintergrundschwankungen ohne Probe.

Abb. 81 zeigt die Ergebnisse der Statistik für das vertikale Profil. Zu erkennen ist, dass die Standardabweichung (2σ) mit zunehmender Entfernung von der Sondenoberkante abnimmt. Das heißt, dass die Genauigkeit der Messmethode mit zunehmender Entfernung zum Rohr zunimmt. Dies erscheint wieder plausibel, da die Dichte der magnetischen Feldlinien nicht nur (wie beobachtet) lateral, sondern entsprechend auch vertikale zur Sonde hin zunehmen sollte. Kleinste Heterogenitäten bei einzelnen Proben, können hier wieder, in unmittelbarer Nähe zum Sondenrohr, enorme Abweichungen am Messpunkt hervorrufen.

Abb. 82 zeigt das 12σ aus Abb. 81 nochmal gegen die Distanz aufgetragen sowie die Hintergrundschwankung. Ab ca. 20 cm vertikaler Distanz entspricht auch hier das 2σ der Probe (Gesamtfehler), den Hintergrundschwankungen ohne Probe. In Kap. 3.3.3.1.2 konnte ein signifikantes Signal bis 38,8 cm oberhalb der Sondenoberkante für das 1 Rohr Szenario festgestellt werden. Die Hintergrundschwankung ist also ausreichend im Hinblick auf die vertikale Entfernungsmessung um den Gesamtfehler der Messmethode zu beschreiben. Allerdings lässt sich auch diese Statistik nicht direkt auf das 2 Rohr und 4 Rohr Szenario anwenden, da hier die Steilheit der ΔBI -Kurven größer ist (Abb. 69). In diesen Fällen wäre also die Distanz bei der sich Gesamtfehler und Hintergrundschwankung schneiden > 20 cm, gleichzeitig ist aber auch die Distanz, bei der noch ein signifikantes Signal gemessen werden kann, größer als beim 1 Rohr Szenario. Ganz allgemein kann man also sagen, dass es auch in diesem Falle ausreichend ist, die Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu T$) als Richtwert für die Beurteilung bzw. Ermittlung der vertikalen Entfernungsmessungen heranzuziehen.

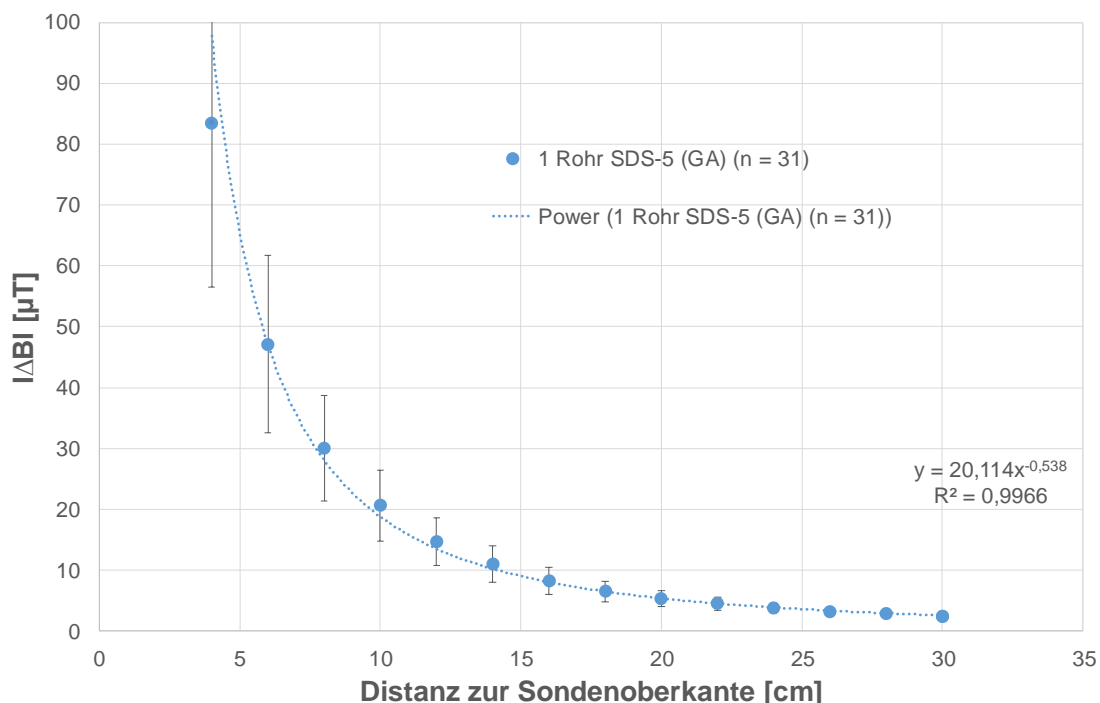


Abb. 81: Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) für alle Messpunkte des vertikalen 30 cm Profils an Koordinate X/Y = 5/5 (Stichprobe von $n = 31$, MIR mit GA „Süd“).

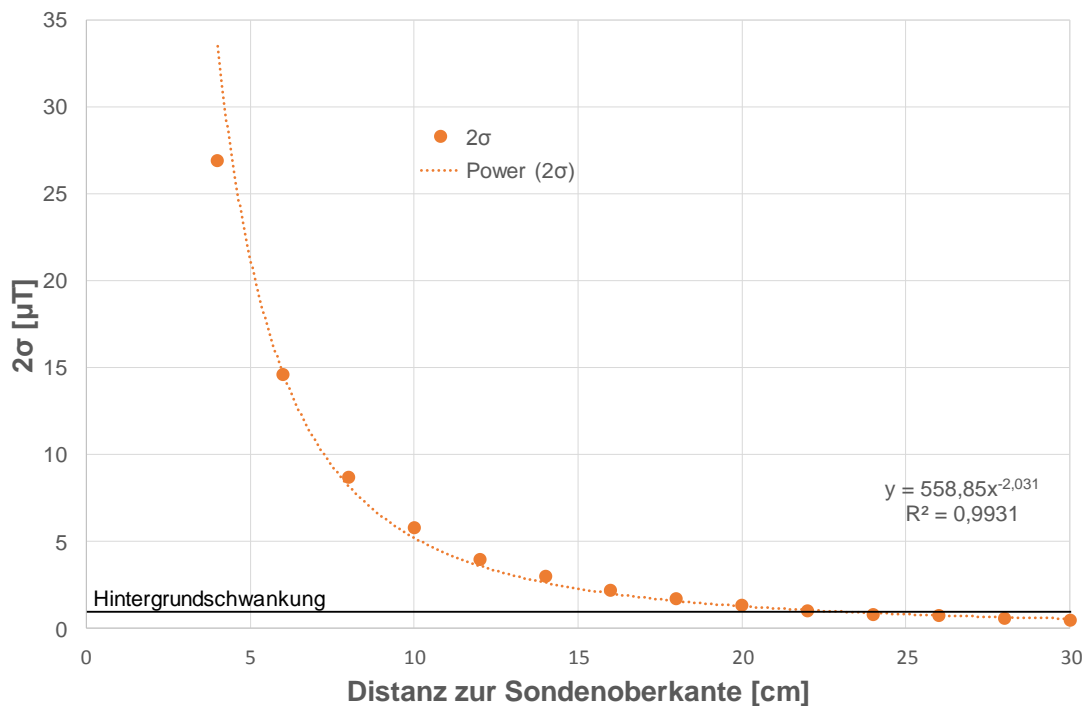


Abb. 82: Standardabweichungen (2σ) für das vertikale 30 cm Profil an Koordinate X/Y = 5/5 mit Darstellung der natürlichen Hintergrundschwankungen ohne Probe.

3.3.3.2 \varnothing 8 mm Stahldrahtseile

Im Zuge dieser Arbeit wurden, neben dem \varnothing 5 mm Stahldrahtseil, auch ein \varnothing 8 mm Stahldrahtseil auf die gleiche Weise untersucht. Es wird vorweggenommen, dass die Beobachtungen im Hinblick auf die Signalmuster im Prinzip identisch wie bei den \varnothing 5 mm Stahldrahtseil sind. Einzig die berechneten Signalreichweiten aus der Regressionsanalyse sind unterschiedlich. Es wird deshalb darauf verzichtet die kompletten Ergebnisse darzustellen. Alle relevanten Abbildungen können jedoch bei Bedarf im Anhang eingesehen werden:

Versuche ohne Eisenzyylinder (Hilfsverrohrung)

- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert. (Anhang A)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“ (Anhang B)
- Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U), MIR mit GA „Süd“ (Anhang C)
- Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“ (Anhang D)

Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzyylinder

- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert, lateral (Anhang E)

- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“, lateral (Anhang F)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert, vertikal (Anhang G)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“, vertikal (Anhang H)

Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, nicht magnetisiert (Anhang I)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“ (Anhang J)
- Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“ (Anhang K)
- Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“ (Anhang L)

Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder

- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, nicht magnetisiert, lateral (Anhang M)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“, lateral (Anhang N)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert, vertikal (Anhang O)
- Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“, vertikal (Anhang P)

3.3.3.3 Vergleich der Ergebnisse der \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile

Tab. 9 zeigt eine Zusammenfassung der lateralen Signalreichweite für die Szenarien 1 Rohr, 2 Rohre (Einfach-U), 4 Rohre (Doppel-U) für die \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile ohne und mit Eisenzylinder mit magnetisierten und nicht magnetisierten Proben.

Tab. 9: Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab $1,5 \mu\text{T}$ (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).

Laterale Signalreichweite \varnothing 5 mm						Laterale Signalreichweite \varnothing 8 mm					
Stahldrahtseil [cm]						Stahldrahtseil [cm]					
1 Rohr		2 Rohre		4 Rohre		1 Rohr		2 Rohre		4 Rohre	
OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ
33,8 (M)	20,5 (M)	45,2 (M)	26,7 (M)	50,9 (M)	35,9 (M)	38,7 (M)	24,7 (M)	50,8 (M)	32,0 (M)	60,9 (M)	43,5 (M)
11,9/13,6 (NM)	0,0/0,0 (NM)	---	---	---	---	19,9/18,9 (NM)	15,6/15,7 (NM)	---	---	---	---

Es ist festzustellen, dass zum einen bei allen Szenarien mit magnetisierten Stahldrahtseilen höhere Werte für das \varnothing 8 mm Stahldrahtseil gegenüber dem \varnothing 5 mm Stahldrahtseil auftreten. Dies kann mit der höheren Sättigungsmagnetisierung M_s der \varnothing 8 mm Stahldrahtseile gegenüber den \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen erklärt werden. M_s ergibt sich als Produkt aus dem effektiven magnetischen Moment eines einzelnen Atoms und der Gesamtzahl der Atome (Callister & Rethwisch 2013). Im Fall der \varnothing 8 mm Stahldrahtseile ist von einer höheren Anzahl an Atomen gegenüber den \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen auszugehen, wenn man zwei gleich lange Stücke miteinander vergleicht. Entsprechend Gl. 5 resultiert die höhere Sättigungsmagnetisierung in einem höheren B-Wert. Es wird an dieser Stelle vorweggenommen, dass bei den Versuchen in den zuvor beschriebenen Kapiteln 3.3.3.1 und 3.3.3.2, mit dem verwendeten Magnetfeldaufsatz „GA“ annähernd eine Sättigungsmagnetisierung erreicht werden konnte. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

Vergleicht man alle 6 magnetisierten Einzelszenarien des \varnothing 5 mm mit den 6 Szenarien des \varnothing 8 mm Stahldrahtseils, so ergibt sich eine durchschnittliche Prozentuelle Zunahme der Signalreichweite von 18 %, mit einem Minimum von 12,4 % beim 2 Rohre Szenario ohne Zylinder und einem Maximalwert von 21,2 % für das 4 Rohre Szenario mit Zylinder.

Betrachtet man die nicht magnetisierten Szenarien (NM), so ist auch hier das Signal bei den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen höher als bei den \varnothing 5 mm Seilen. Die prozentuelle Zunahme beträgt im Schnitt 52,2 % bei dem 1 Rohr Szenario ohne Zylinder. Mit Zylinder konnte beim \varnothing 5 mm Stahldrahtseil überhaupt kein Signal gemessen werden. Die Begründung für die Zunahme ist analog zu den magnetisierten Proben, d.h. im Fall der \varnothing 8 mm Stahldrahtseile ist von einer höheren Anzahl an ferromagnetischen Atomen gegenüber den \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen auszugehen, wenn man zwei gleich lange Stücke miteinander vergleicht. Daraus folgt ein höheres B-Feld.

Vergleicht man im nächsten Schritt die magnetisierten Szenarien 1 Rohr, 2 Rohre und 4 Rohre separat für die \varnothing 5 mm und für die \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen, so ist jeweils eine Zunahme der lateralen Signalreichweite zu erkennen. Dieser Effekt ergibt sich aus der zunehmenden Anzahl an mit Stahldrahtseilen gespickten Rohren, die mit ihrem Signal einen zunehmend größeren Radius um den Sondenmittelpunkt ($X/Y = 5/5$) einnehmen, aber auch durch die Überlagerung und gegenseitige Verstärkung der Felder (siehe Gl. 5 und Gl. 6). Bei den \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen nimmt die Signalreichweite, ausgehend vom 1 Rohr Szenario, um 33,7 % (ohne Zylinder) bzw. 30,2 % (mit Zylinder) zum 2 Rohre Szenario zu, und 50,6 % (ohne Zylinder) bzw. 75,1 % (mit Zylinder) zum 4 Rohre Szenario zu. Bei den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen beträgt die Zunahme vom 1 zum 2 Rohre Szenario 31,3 % (ohne Zylinder) und 29,6 % (mit Zylinder), und vom 1 zum 4 Rohre Szenario 57,4 % (ohne Zylinder) bzw. 76,1 % (mit Zylinder).

Vergleicht man im letzten Schritt alle magnetisierten und nicht magnetisierten Szenarien ohne Zylinder mit den entsprechenden Szenarien mit Zylinder, so ist immer eine deutliche Abschwächung der Signalreichweite zu erkennen. Bei den magnetisierten \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen beträgt die Abnahme hervorgerufen durch den Zylinder 39,4 % beim 1 Rohr Szenario, 40,9 % beim 2 Rohr Szenario und 29,5 % beim 4 Rohr Szenario. Bei den magnetisierten \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen sind es 36,2 % beim 1 Rohr, 37,0 % beim 2 Rohr und 28,6 % beim 4 Rohr Szenario. Dieser abschwächende Effekt kann mit der Schirmwirkung von Eisen auf magnetische Felder erklärt werden. Der Effekt lässt sich anschaulich mit zwei Bildern erklären (Abb. 83).

Während die Feldlinien des Hufeisenmagneten beim ungestörten Feld bogenförmig an den beiden Enden vom Nord zum Südpol laufen, werden viele der Feldlinien, beim Vorhandensein einer entsprechend starken Eisenplatte, von dieser aufgenommen. Somit ist der Raum hinter der Platte nahezu frei von jeder magnetischen Wirkung. Die magnetische Schirmwirkung ist eine unvollkommene; sie hängt von der Dicke der Platte und ihrer magnetischen Durchlässigkeit bzw. dem Material ab. Nur hinter einer unendlich dicken Platte oder hinter einer, deren Durchlässigkeit unendlich groß ist, wäre die magnetische Kraft null (Benischke 1907).

Der Eindruck, den man aus Abb. 83 gewinnt, als ob die Feldlinien vom Eisen angesaugt würden kommt daher, dass das Eisen eine weit größere Magnetisierungsfähigkeit besitzt (Gl. 6 und Gl. 7) als die umgebende Luft oder irgendein anderer Stoff. Anders ausgedrückt: Der „magnetische Widerstand“ des Eisens ist geringer als der der Luft oder anderer Stoffe. Infolgedessen ist der in ihm induzierte Magnetismus so stark, dass er in seiner Nähe über das magnetisierende Feld das Übergewicht hat. Das resultierende Feld sieht daher in der Nähe des Eisenstücks so aus, als ob es ein selbständiger Magnet mit ausgeprägten Polen wäre (Benischke 1907, Kaltenbach & Meldau 1936).

In ähnlicher Weise werden auch die Feldlinien der Stahldrahtseile vom Eisenzylinder aufgenommen, so dass sich dahinter die magnetische Wirkung verringert.

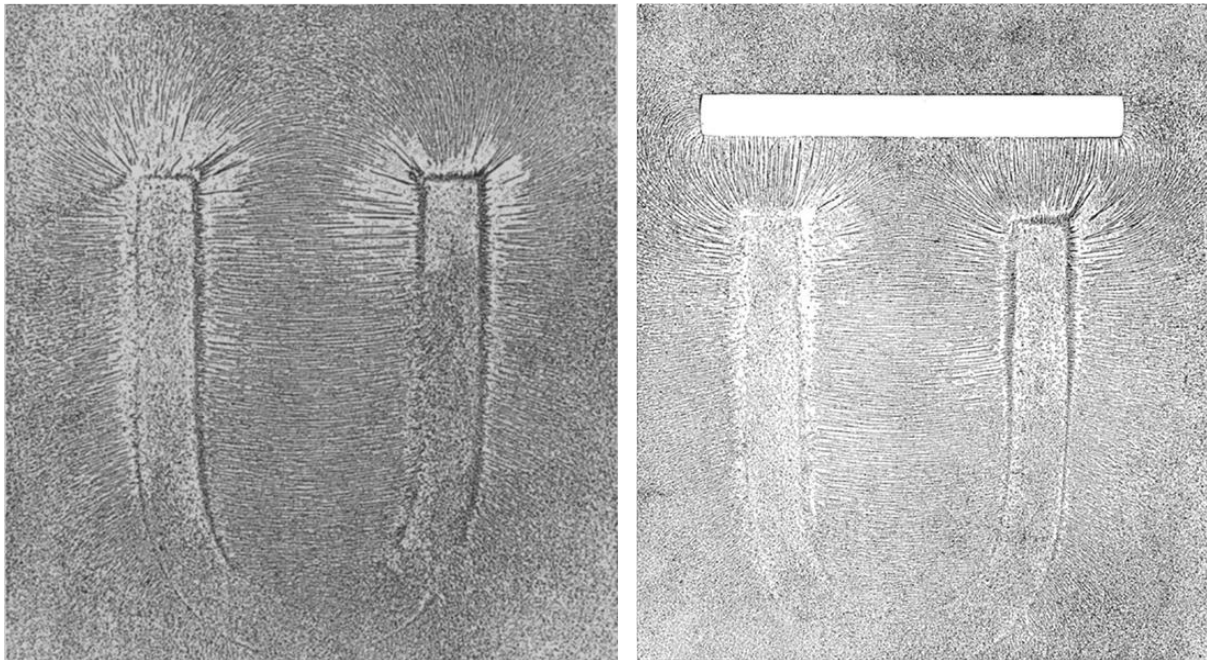


Abb. 83: Links: Ungestörtes Feld eines Hufeisenmagneten, Rechts: Feld eines Hufeisenmagneten mit vorgestellter Eisenplatte (aus Benischke 1907).

Es ist an dieser Stelle noch abschließend zu klären, dass die hier vorgenommene laterale Signalreichweitmessung nicht auf die Gesamtlänge eines Stahldrahtseils übertragen werden kann. Wie bereits erwähnt stellt sich das Feld einzelner Stahldrahtseilstücke wie ein Stabmagnet dar. Indikatoren dafür sind entgegengesetzte Vorzeichen auf Grund- und Kopfplatte sowie an den beiden Enden der Stahldrahtseile. Betrachtet man nun nochmal das Feld eines Stabmagneten, so wird klar, dass die laterale Signalreichweite nicht konstant sein kann. In Abb. 84 sind beispielhaft zwei laterale Profile in das Feld eines Stabmagneten eingezeichnet.

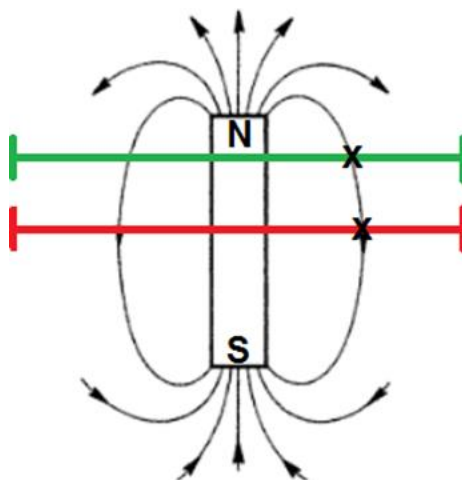


Abb. 84: Stabmagnet mit Feldlinien und 2 lateralen Profilen (modifiziert nach Moeller et al. 2008).

Das rote Profil schneidet den Magneten an seiner Polgrenze, so dass die Scheitelpunkte aller Feldlinien geschnitten werden. Ein weiteres grünes Profil ist etwas darüber eingezeichnet. Schaut man sich die Schnittpunkte (x) beider Profile mit einer Feldlinie an, so wird klar, dass die Distanz vom Magneten bis zu diesem Punkt, beim roten Profil größer ist als beim grünen Profil, d.h., dass die laterale Signalreichweite an der Polgrenze am größten ist und zu den Polrändern hin abnimmt.

Im Hinblick auf die hier durchgeführten Messungen bedeutet das auch, dass die Grundplattenergebnisse nur einen einzigen Schnitt durch das Feld darstellen. Die damit gewonnenen Daten können somit nur für einen relativen Vergleich der unterschiedlichen Messszenarien herhalten. Eine absolute Angabe für die laterale Signalreichweite ist aus oben genannten Gründen nicht möglich. Ein weiterer Grund dafür ist auch, dass der genaue Aufbau des Feldes um das Stahldrahtseil nicht bekannt ist und mit den zur Verfügung stehenden Daten und dem Messstand nicht im Detail ermittelt werden kann, zumal die Stahldrahtseilstücke im Messstand verhältnismäßig klein sind und der Flussdichtesensor verhältnismäßig groß ist, welches eine gute Auflösung des Feldes schwierig gestaltet. Ein Versuch, das Feld mit Eisenspännen sichtbar zu machen, funktionierte nicht, da das Signal zu schwach ist, um diese zu magnetisieren und auszurichten. Aus der Literatur sind unterschiedliche Darstellungen des Feldes eines Stabmagneten zu finden, die sich allesamt ähneln, aber doch Unterschiede im Detail aufweisen. Somit ist Abb. 84 nur als schematische Annäherung an das reale Feld zu betrachten.

Tab. 10 zeigt die Zusammenfassung für die vertikale Signalreichweite.

Tab. 10: Zusammenfassung der vertikalen Signalreichweiten für Ø 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab 1,5 µT (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).

Vertikale Signalreichweite Ø 5 mm						Vertikale Signalreichweite Ø 8 mm					
Stahldrahtseil [cm]						Stahldrahtseil [cm]					
1 Rohr		2 Rohre		4 Rohre		1 Rohr		2 Rohre		4 Rohre	
OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ	OZ	MZ
38,8	28,0	57,2	36,4	69,5	44,8	41,8	30,0	63,2	40,7	77,7	53,0
(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	(M)
12,7/12,0	10,7/9,4	---	---	---	---	24,9/24,0	18,8/18,1	---	---	---	---
(NM)	(NM)					(NM)	(NM)				

Es ist festzustellen, dass wieder bei allen (magnetisierten und nicht magnetisierten) Szenarien höhere Werte für das Ø 8 mm Stahldrahtseil gegenüber dem Ø 5 mm Stahldrahtseil auftreten. Die Begründung ist dieselbe wie bei der lateralen Messung. Vergleicht man alle 6

magnetisierten Einzelszenarien des \varnothing 5 mm mit den 6 Szenarien des \varnothing 8 mm Stahldrahtseils, so ergibt sich eine durchschnittliche Prozentuelle Zunahme der vertikalen Signalreichweite von 11,2 %, mit einem Minimum von 7,1 % beim 1 Rohr Szenario mit Zylinder, und einem Maximalwert von 18,3 % für das 4 Rohr Szenario mit Zylinder.

Die prozentuelle Zunahme beim nicht magnetisierten 1 Rohr Szenario ohne Zylinder beträgt im Schnitt 98,0 %, und 83,6 % mit Zylinder.

Vergleicht man im nächsten Schritt die magnetisierten Szenarien 1 Rohr, 2 Rohre und 4 Rohre, separat für die \varnothing 5 mm und für die \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen, so ist jeweils eine Zunahme der vertikalen Signalreichweite zu erkennen. Dieser Effekt ergibt sich aus der zunehmenden Anzahl an mit Stahldrahtseilen gespickten Rohren, deren Felder sich überlagern und gegenseitig verstärken (siehe Gl. 5 und Gl. 6). Bei den \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen nimmt die Signalreichweite, ausgehend vom 1 Rohr Szenario, um 47,4 % (ohne Zylinder) bzw. 30,0 % (mit Zylinder) zum 2 Rohr Szenario zu, und 79,1 % (ohne Zylinder) bzw. 60,0 % (mit Zylinder) zum 4 Rohr Szenario zu. Bei den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen beträgt die Zunahme vom 1 zum 2 Rohr Szenario 51,2 % (ohne Zylinder) und 35,7 % (mit Zylinder), und vom 1 zum 4 Rohr Szenario 85,9 % (ohne Zylinder) bzw. 76,7 % (mit Zylinder).

Vergleicht man im letzten Schritt alle Szenarien ohne Zylinder mit den entsprechenden Szenarien mit Zylinder so ist immer eine deutliche Abschwächung der Signalreichweite zu erkennen. Bei den magnetisierten \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen beträgt die Abnahme hervorgerufen durch den Zylinder 27,8 % beim 1 Rohr Szenario, 36,4 % beim 2 Rohr Szenario und 35,5 % beim 4 Rohr Szenario. Bei den magnetisierten \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen sind es 28,2 % beim 1 Rohr, 35,6 % beim 2 Rohr, und 31,8 % beim 4 Rohr Szenario. Die Erklärung hierfür ist dieselbe wie bei den lateralen Messungen, nämlich die Schirmwirkung des Eisenzylinders.

3.3.3.4 Einfluss von Magnetfeldern unterschiedlicher Stärke auf das Messsignal

Die vorherigen Unterkapitel haben gezeigt, dass man mit magnetisierten Stahldrahtseilen ein brauchbares Signal erzeugen kann, um mit einem Flussdichtesensor eine EWS in gewisser Entfernung detektieren zu können.

Eine interessante Frage ist im Folgenden, ob es möglich ist, mittels unterschiedlich starker Magnetisierungen auch unterschiedlich starke Signale bzw. Signalreichweiten zu erreichen. Die Flussdichte des GA, der für alle bisherigen Versuche verwendet wurde, hat einen Betrag von ca. 37,2-39,2 mT (Abb. 22). Dies war auch gleichzeitig die stärkste Magnetisierung, die mit dem Magnetisierungsstand erzeugt werden konnte. Es wurde jedoch noch ein zweiter Aufsatz „KA“ entsprechend Abb. 22 hergestellt, der kleinere Magnete aufnehmen konnte (Kap. 3.2.17.1).

Auf diese Weise konnte eine Flussdichte mit einem Betrag von nur ca. 13,3-14,0 mT zur Magnetisierung erzeugt werden, das nur noch ca. 35,8-35,7 % der maximal möglichen Flussdichte mit den größeren Magneten bzw. „GA“ entspricht.

Es wurden nun mit dem „KA“ Ø 5 mm und 8 mm Stahldrahtseilproben (jeweils A & B Probe) magnetisiert und für jede die laterale Signalreichweite gemessen (Szenario = 1 Rohr in der Mitte), anschließend wurden die Proben dann nochmals mit dem „GA“ magnetisiert und dieselbe Messung nochmal durchgeführt.

In Abb. 85 ist die Messung für das Ø 5 mm Stahldrahtseil dargestellt, auch im Vergleich zum nicht magnetisierten Zustand. Zu erkennen ist, dass die Kurven der beiden unterschiedlichen Magnetisierungsstufen nahezu deckungsgleich sind. Bei Einsetzen des Signifikanzwert von 1,5 µT in die Regressionsgleichungen ergibt sich ein Schwankungsbereich der vier Proben zwischen 32,4 cm und 32,9 cm. Daraus folgt, dass das Signal im Prinzip für alle 4 Proben identisch ist und bereits mit dem KA eine Sättigungsmagnetisierung erreicht wurde.

Lediglich beim Vergleich mit den nicht magnetisierten Proben erkennt man einen deutlichen Einfluss, so liegt hier die Signalreichweite bei nur 12,6 cm (Probe A) und 13,3 cm (Probe B).

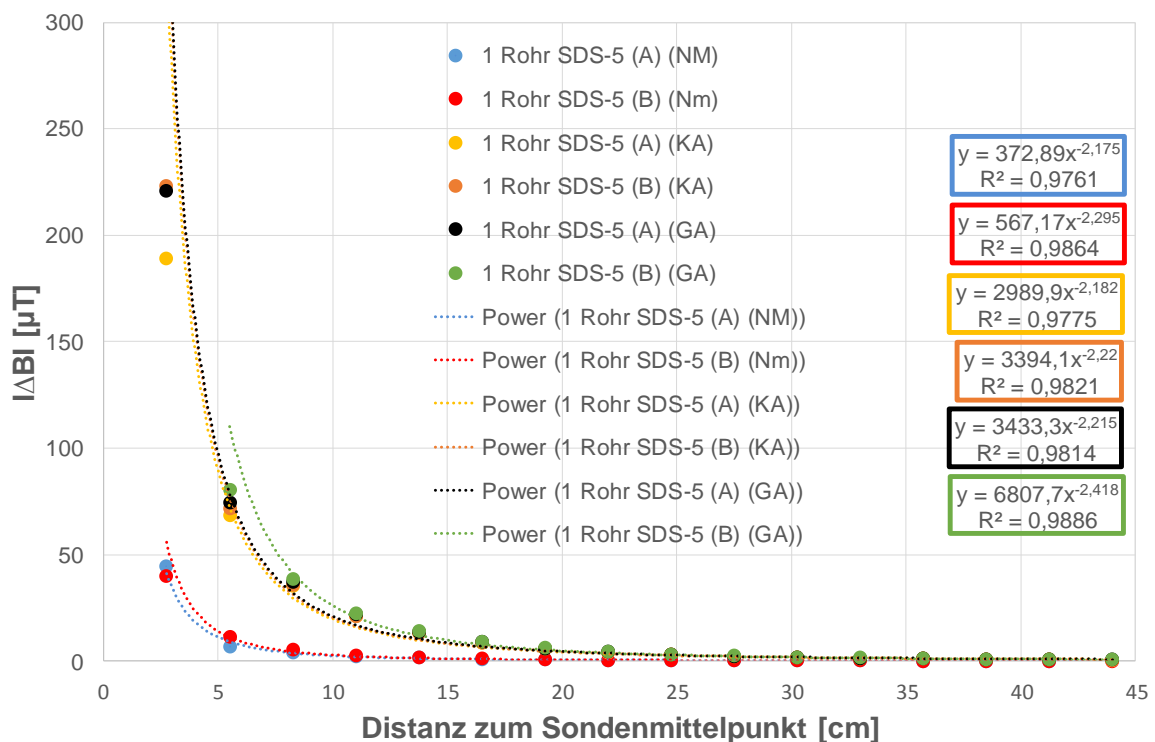


Abb. 85: Vergleich der Messsignalreichweite eines Ø 5 mm Stahldrahtseils im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert (NM) und MIR mit KA und GA.

In Abb. 78 ist die entsprechende Messung für das $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseil dargestellt. Die Ergebnisse stellen sich sehr ähnlich dar wie bei den $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseilen. Die Proben beider Magnetisierungsstufen sind annähernd deckungsgleich. Die Messsignalreichweite liegt für alle vier Proben im Bereich von 35,0 – 35,9 cm. Einzig die nicht magnetisierten Proben heben sich deutlich ab mit Signalreichweiten von 19,9 cm für Probe A und 18,9 cm für Probe B.

Zu erwähnen ist noch, dass sich bei beiden Stahldrahtseildurchmessern scheinbar die Probe B bei der „GA“ Magnetisierung etwas von den anderen 3 magnetisierten Proben abhebt. Das ist dadurch zu erklären, dass der Messwert bei 2,75 cm Distanz zum Sondenmittelpunkt, bei diesen beiden Proben die Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht hat und somit nicht in der Regressionsanalyse berücksichtigt wurde. Dass dies bei beiden Seilen gerade die Probe B ist, ist reiner Zufall.

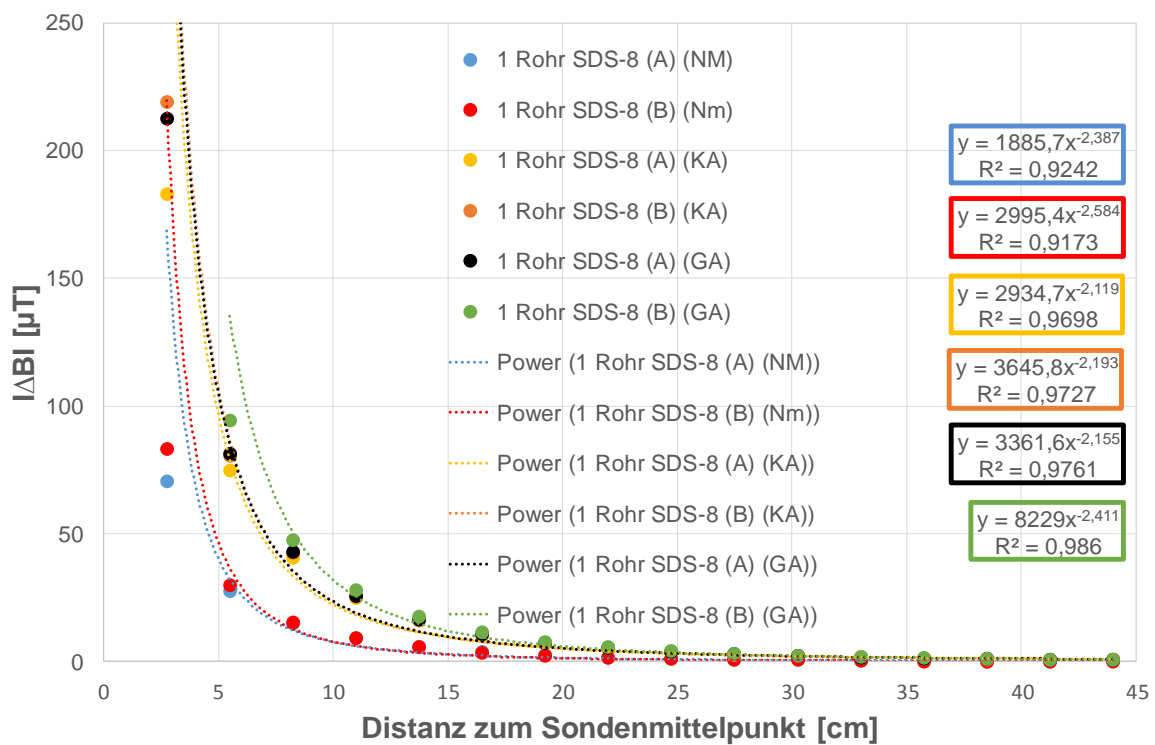


Abb. 86: Vergleich der Messsignalreichweite eines $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseils im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, nicht magnetisiert und MIR mit KA und GA.

Abschließend kann man sagen, dass die Stahldrahtseile auf Grundlage dieser Untersuchungen bereits eine Sättigungsmagnetisierung erreicht haben und zwar bereits bei einer Magnetisierung mit ca. 14,0 mT.

3.3.3.5 Einfluss der geologischen Gegebenheiten auf das Messsignal – Theoretische Betrachtung und Versuchsbeispiele im Labormaßstab

Die bisherigen durchgeführten Untersuchungen zielten in erster Linie darauf ab, das pure Messsignal, das von Stahldrahtseilen ausgeht, in seiner Ausbildung und Stärke zu verstehen. Das Messsignal wurde dabei im luftgefüllten Raum ohne jegliche geologischen Barrieren gemessen. Nur der Einfluss eines Bohrrohrs wurde als Barriere betrachtet, da hier von einer starken Beeinflussung auszugehen war, bedingt durch den hohen Eisengehalt.

Der Einfluss der geologischen Gegebenheiten auf das Messsignal ist stark abhängig von den geologischen Formationen bzw. den gesteinsbildenden Mineralen, die an einem bestimmten Standort anzutreffen sind. Die meisten gesteinsbildenden Mineralien sind nur schwach, und zwar para- und diamagnetisch (Tab. 1) und somit unproblematisch, d.h. es sind bei Gesteinen, die aus solchen Mineralen aufgebaut sind, keine natürlichen Anomalien zu erwarten, die die Kontrastmittelanomalien überlagern und somit Fehlinterpretationen verursachen könnten.

Nur einige wenige Eisenminerale sind stark magnetisch und können ferromagnetische Erscheinungen zeigen. Es sind dies gewisse Fe-Minerale, die in der Spinellstruktur kristallisieren, Magnetit, Maghemit, Franklinit, Chromit, Jakobsit, ferner Magnetkies (Pyrrhotin). Auch Illmenit und Hämatit können beträchtlich ferromagnetisch sein (Niggli 1948). Es sind letztlich auch nur diese ferromagnetischen Minerale, die natürliche Anomalien verursachen können, da sie ohne das Anlegen eines H-Felds bereits ein deutliches B-Feld aufweisen. Wie stark dieses ausgebildet ist hängt von einigen Faktoren ab, wie z.B. der Fe-Einbau in die Minerale, sowie der %-Anteil der Minerale im Gestein. Das führt zu z.T. großen Schwankungen der magnetischen Suszeptibilität der Gesteine (Abb. 87). Entsprechend Gl. 5 und Gl. 6 bedeutet eine hohe magnetische Suszeptibilität, auch gleichzeitig eine hohe Magnetisierung, und somit ein hohes B-Feld.

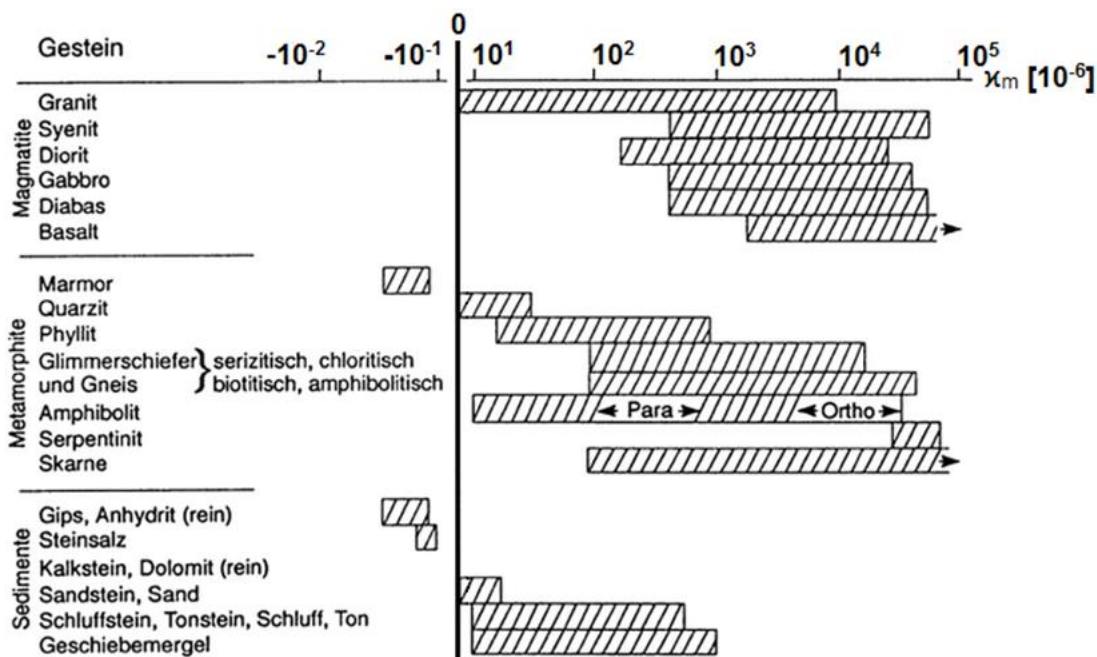


Abb. 87: Wertebereich der magnetischen Suszeptibilitäten verschiedener Gestein (aus Schön 1983).

Abgesehen von dieser theoretischen Betrachtung wurde, basierend auf den bisherigen Erkenntnissen über die Stahldrahtseile, ein Versuch im Labormaßstab durchgeführt, in dem der Einfluss eines trockenen und wassergesättigten Aquifers auf das laterale Messsignal betrachtet wurde.

Hierzu wurde eine Box aufgestellt, in die ein Probenhalter für die Sondenrohre platziert wurde (Abb. 88). Dieser wurde mit etwas Sand bedeckt, um ein Verrutschen in der Box zu verhindern. Auf der gegenüberliegenden Seite der Box wurde ein Ständer für Zentrifugenröhrchen platziert, der gerade der Innenbreite der Box entsprach. In einen der Stellplätze wurde ein leeres Zentrifugenröhrchen gestellt und in diesem die GEO-X Axialsonde fixiert. Nun wurde auf den Probenhalter ein Sondenrohr gesteckt. Rohr und GEO-X Sonde wurden auf einer Linie entlang der Längsachse der Box aufgestellt. In ein paar Vorversuchen mit einem magnetisierten $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseil konnte die Entfernung von Sonde zu Sondenrohr, bei der noch ein signifikantes ΔB gemessen werden kann, ermittelt werden.

Nachdem die Stellung von Rohr und Sonde festgelegt war (Zwischenraum = 27 cm), wurde eine Referenzmessung mit einem leeren Rohr und luftgefülltem Raum zwischen Sondenrohr und Sonde durchgeführt. Im nächsten Schritt wurde das Stahldrahtseil in das Rohr eingegeben und das Signal nochmal abgelesen. Danach anschließend wurde die Box mit trockenem Sand gefüllt, so dass der vorher luftgefüllte Raum zwischen Sondenrohr und Sonde vollständig mit Sand gefüllt war (Abb. 89). Eine Ablesung des Messwerts erfolgte erneut. Schlussendlich wurde die Box dann noch mit Leitungswasser aufgefüllt und der Wert nochmal abgelesen (Abb. 89).

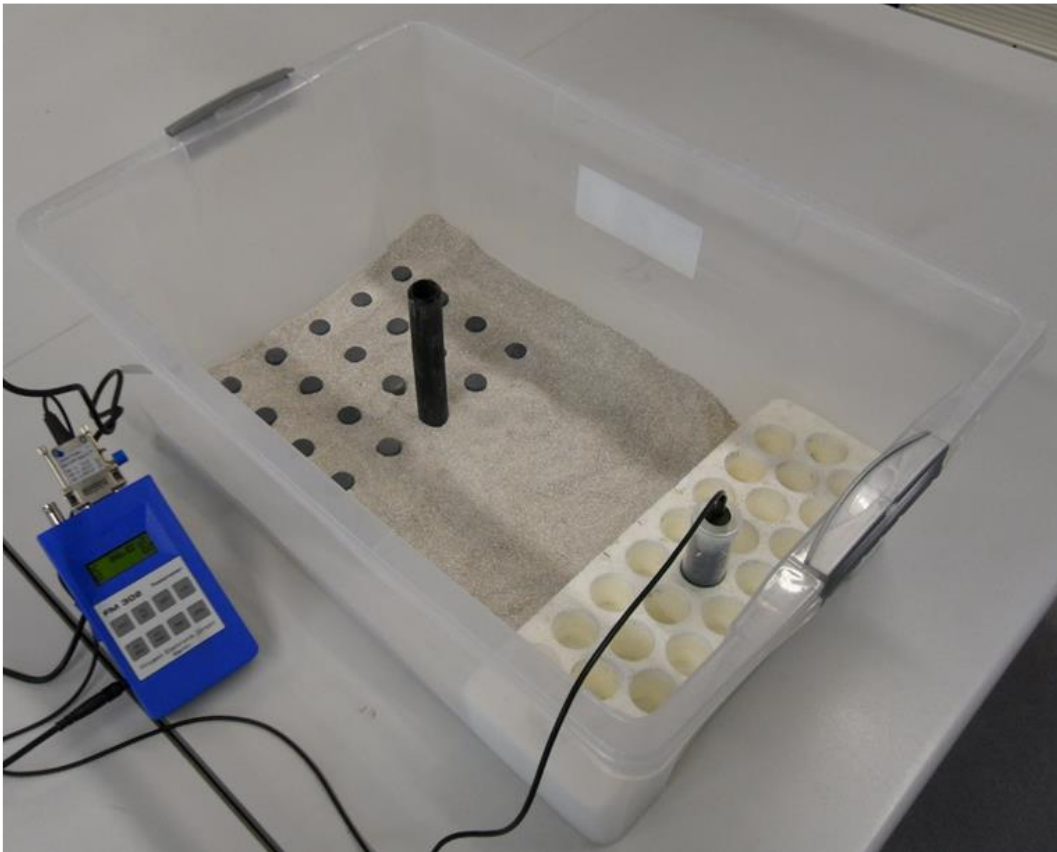


Abb. 88: Versuchsaufbau, Box (H x B x L = 230 x 405 x 565 mm).



Abb. 89: Versuchsaufbau gefüllt mit trockenem Sand (links) und mit wassergesättigtem Sand (rechts).

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tab. 11 zusammengefasst. Das Einführen des $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseils (SDS) führt zu einer Abnahme gegenüber dem Referenzsignal ohne

Stahldrahtseil, um $3,1 \mu\text{T}$ im luftgefüllten Raum. Die Zugabe von trockenem Sand sowie die anschließende Aufsättigung mit Leitungswasser haben keinen weiteren Einfluss auf das Messsignal. Trockener Sand und gesättigter Sand haben den gleichen Wert. Im Vergleich zum Szenario ohne Sand ist der Wert lediglich um $0,1 \mu\text{T}$ gesunken. Diese sehr geringe Änderung ist eher auf eine minimale Lageänderung des Sensors durch das Eingeben des Sands zurückzuführen. Trotz größter Vorsicht bei der Sandeingabe kann es hier zu einer minimalen Lageänderung gekommen sein.

Tab. 11: Zusammenfassung der Messergebnisse (Sand)

Szenario	Laterales Signal [μT]
Luft ohne SDS	49,9
Luft mit SDS	46,8
Trockener Sand mit SDS	46,7
Wassergesättigter Sand mit SDS	46,7

Insgesamt sind die Ergebnisse erwartungsgemäß. Der hier verwendete Dorsolith-Sand, der vorwiegend aus Quarz und Beimengungen von Kaolin besteht, kann als unproblematisch gewertet werden, denn nach Tab. 1 ist Quarz diamagnetisch. Außerdem sind nach Thompson & Oldfield (1986) Wasser und Kaolin ebenfalls diamagnetisch. Da also keine ferromagnetischen Stoffe enthalten sind, ist erwartungsgemäß kein Einfluss auf das Messsignal zu erkennen.

Die gleiche Untersuchung wurde nochmal mit Bentonit durchgeführt (Abb. 90). Die Ergebnisse sind in Tab. 12 zusammengefasst.

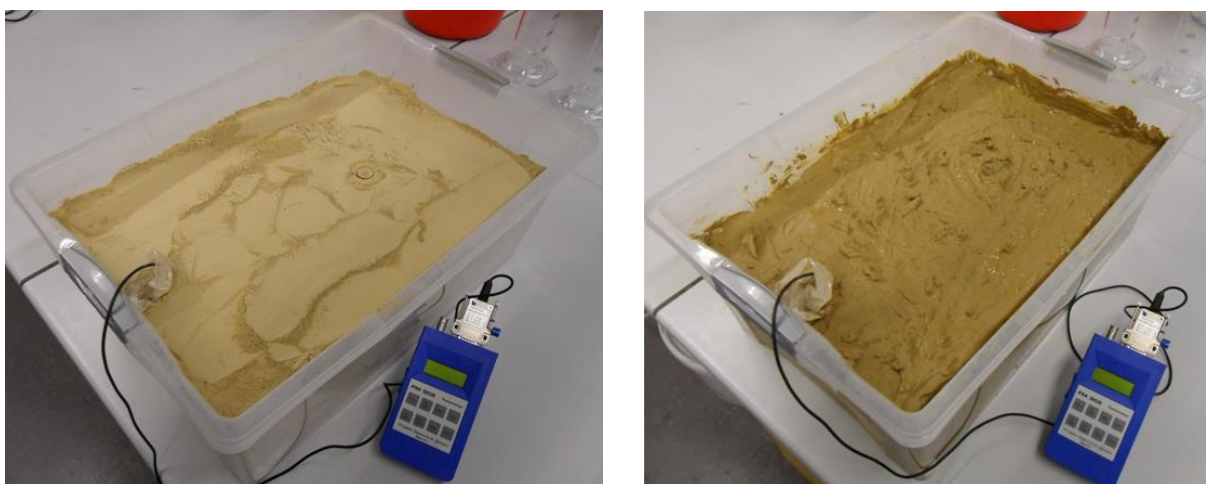


Abb. 90: Versuchsaufbau gefüllt mit trockenem Bentonit (links) und mit wassergesättigtem Bentonit (rechts).

Tab. 12: Zusammenfassung der Messergebnisse (Bentonit)

Szenario	Laterales Signal [μT]
Luft ohne SDS	58,4
Luft mit SDS	55,2
Trockener Bentonit mit SDS	55,1
Wassergesättigter Bentonit mit SDS	55,1

Das Einführen des $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseils (SDS) führt zu einer Abnahme gegenüber dem Referenzsignal ohne Stahldrahtseil um $3,2 \mu\text{T}$ im luftgefüllten Raum. Die Zugabe von trockenem Bentonit sowie die anschließende Aufsättigung mit Leitungswasser haben keinen weiteren Einfluss auf das Messsignal. Trockener Bentonit und gesättigter Bentonit haben den gleichen Wert, im Vergleich zum Szenario ohne Bentonit ist der Wert lediglich um $0,1 \mu\text{T}$ gesunken. Diese sehr geringe Änderung ist wieder eher auf eine minimale Lageänderung des Sensors durch das Eingeben des Bentonits zurückzuführen.

Insgesamt sind die Ergebnisse wieder erwartungsgemäß. Bentonit, der vorwiegend aus Montmorillonit und Kaolinit besteht, kann als unproblematisch gewertet werden, denn nach Thompson & Oldfield (1986) ist Montmorillonit paramagnetisch und Kaolinit diamagnetisch. Da also keine ferromagnetischen Stoffe enthalten sind, ist erwartungsgemäß kein Einfluss auf das Messsignal zu erkennen.

In einem weiteren Versuch wurde der Einfluss eines magmatischen Gesteins, in diesem Fall Granit, betrachtet. Der Versuchsaufbau hierzu ist in Abb. 91 dargestellt. Der Sensor und das Sondenrohr sind jeweils in einem Zentrifugenröhrchenständer fixiert und in einer Linie gegenübergestellt. Der Abstand zwischen Sensor und Verfüllrohr beträgt in Abb. 91 (links) 24 cm. Beide Ständer sind seitlich mit schweren Gesteinsblöcken (purer Kalkstein) gegen Verrutschen gesichert.

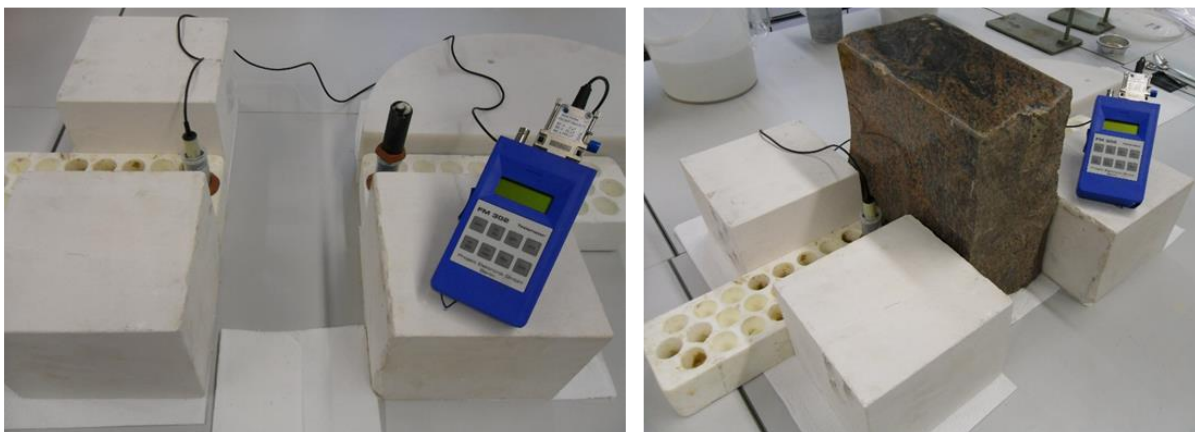


Abb. 91: Versuchsaufbau ohne Gestein (links) und Versuchsaufbau mit Granitblock (rechts).

Der Aufbau ist so dimensioniert, dass ein Granitblock mit 16 cm dicke hindurchgeschoben werden kann. Die Höhe des Blocks beträgt 32 cm, die Länge entlang des Durchgangs ist etwas variabel im Bereich von etwa 30 cm, da hier keine glatten Schnittflächen, sondern Bruchflächen vorhanden sind. Es wurden 4 verschiedenen Szenarien gemessen (Tab. 13):

Tab. 13: Zusammenfassung der Messergebnisse (Granit)

Szenario	Laterales Signal [μT]
Luft ohne SDS	64,2
Gestein ohne SDS	64,0
Gestein mit SDS	58,0
Luft mit SDS	58,2

Das Einbringen des Granitblocks zwischen Sensor und leerem Sondenrohr führt zu einer geringen Abnahme von 0,2 μT . Dies deutet darauf hin, dass ein geringer Einfluss vom Gestein auf das Messsignal vorhanden ist. Das erscheint plausibel, wenn man bedenkt, dass es vorwiegend magmatische Gesteine sind, die die höchsten magnetischen Suszeptibilitäten, bedingt durch ferromagnetische Minerale, aufweisen (Abb. 87). Die dafür verantwortlichen dunklen, mafischen Minerale können bereits mit bloßem Auge auf den Schnitt- und Bruchflächen des Granitblocks identifiziert werden. Das Einbringen des magnetisierten \varnothing 8 mm Stahldrahtseils führt zu einer weiteren Abnahme des Signals um 6 μT . Wird das Gestein nun im letzten Schritt entfernt, steigt der Wert wieder um 0,2 μT . Der Versuch zeigt, dass sich das Messsignal durch den Granit um 0,2 μT verstärkt, dieser also von sich aus ein Magnetfeld erzeugt, das ggf. zu Fehlinterpretationen des Stahldrahtseilsignals führen kann. In diesem Fall ist jedoch der Einfluss sehr gering bzw. die Zunahme der Signalstärke nur 3,3 % ausgehend vom ΔB von 6 μT beim Szenario ohne Granit.

In einem letzten Versuch wurde der gleiche Aufbau verwendet, nur diesmal anstatt Granit ferritisch gebundener Buntsandstein. Abb. 92 zeigt den Versuchsaufbau mit eingesetztem Buntsandstein.

Der Versuchsaufbau wurde hinsichtlich der Dimensionen gegenüber dem Versuch mit Granit nicht verändert. Einzig die Maße des Buntsandsteins sind anderes. Hier wurden 2 Blöcke nebeneinandergestellt, die zusammen eine Dicke von 14 cm haben. Die Höhen sind 25 und 45 cm, die Längen bei beiden 15 cm.

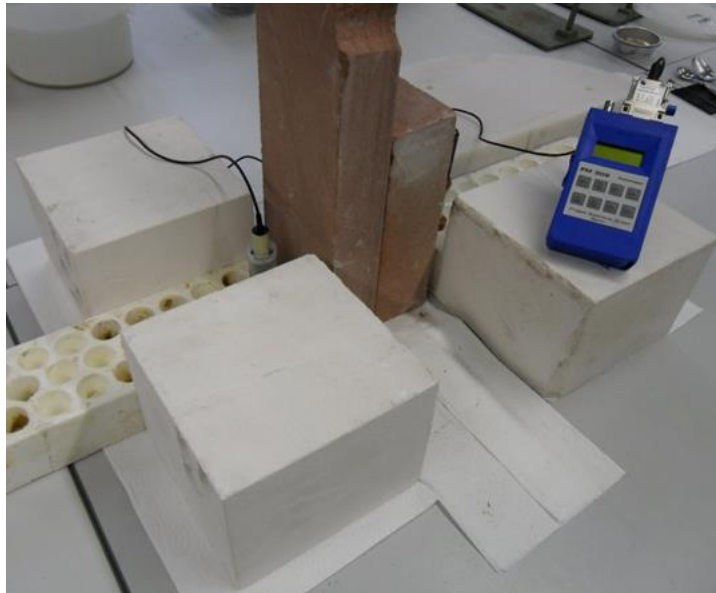


Abb. 92: Versuchsaufbau mit Buntsandstein.

Es wurden analog zu den vorherigen Versuchen wieder 4 Szenarien gemessen (Tab. 14):

Tab. 14: Zusammenfassung der Messergebnisse (Buntsandstein)

Szenario	Laterales Signal [μT]
Luft ohne SDS	63,6
Gestein ohne SDS	63,6
Gestein mit SDS	57,7
Luft mit SDS	57,7

Das Einbringen des Buntsandsteins zwischen Sensor und leerem Sondenrohr führt zu keiner Veränderung des Messsignals. Das Einbringen des magnetisierten \varnothing 8 mm Stahldrahtseils führt zu einer Abnahme des Signals um $5,9 \mu\text{T}$. Wird das Gestein nun im letzten Schritt entfernt, passiert nichts.

Das Fazit aus dieser theoretischen und empirischen Betrachtung ist, dass es relevant ist, für jeden geplanten Rückbaufall einer EWS, vorher die geologischen Gegebenheiten zumindest zu prüfen, um abschätzen zu können, ob natürliche Anomalien bzw. Störungen des Kontrastmittelsignals zu erwarten sind. Entsprechende Daten sollten von der EWS-Bohrung vorhanden sein. Vor allem an Standorten mit magmatischen Gesteinen ist eine solche Prüfung wichtig, da ferromagnetischen Minerale hauptsächlich in diesen Gesteinen zu finden sind (Abb. 87). Generell ist es aber immer empfehlenswert, eine Prüfung durchzuführen, so kann auch ein Sedimentgestein wie z.B. Sandstein ein ferritisches Bindemittel aufweisen, das z.B. ferromagnetische Minerale wie Hämatit und Goethit enthalten kann. Auch wenn der hier gezeigten Laborversuche beim Granit nur sehr gering und beim Buntsandstein keinen Einfluss

auf das Messsignal zeigten, ist zu bedenken, dass im Feld viel größere Volumina an Gestein vorhanden sind, die dann ggf. doch einen Einfluss haben können. Ist an einem Standort tatsächlich eine verdächtige Gesteinsformation, kann es sinnvoll sein, in einer Voruntersuchung einen B-Feld Sensor in die Rückzubauende Sonde abzulassen und mittels Teslameter das B-Feld zu messen. Gerade auf Höhe der verdächtigen Horizonte würde dies zumindest einen Anhaltspunkt geben, ob die Rückbaumethode am Standort funktionsfähig sein kann. Umgekehrt kann dieses Vorab-Logging auch zur Identifikation problematischer Horizonte dienen, falls keine oder unzureichenden Bohrdaten vorhanden sind. Im Übrigen wäre es sinnvoll, ein solches Vorab-Logging standardmäßig in das innovative Rückbaukonzept aufzunehmen.

3.3.3.6 Versuche mit Messmodul in einem Bohrrohr

Die Stahldrahtseilmethode wurde in den vorherigen Kapiteln ausführlich getestet, vor allem im Hinblick auf das Signalmuster, dessen Reichweite und Reproduzierbarkeit. Im nächsten Schritt sollte die Methode in einem etwas realistischeren Maßstab und mit Blick auf die Entwicklung eines Bohrlochmessmoduls getestet werden. Hierzu wurde ein Bohrrohr 168,0 x 7,1 mm mit 1080 mm Baulänge verwendet (Abb. 93).

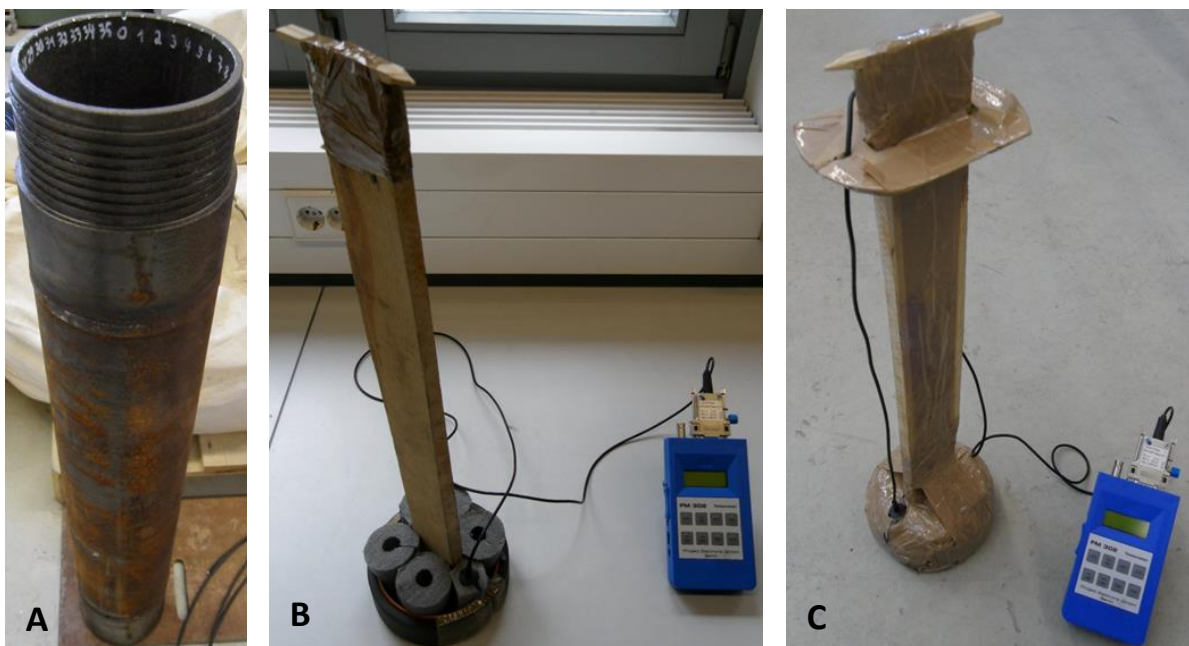


Abb. 93: (A) 1080 mm langes Bohrrohr (168,0 x 7,1 mm) mit 360 ° Skala, (B) Unfertiges drehbares Messmodul (540 mm hoch) mit Gradzeiger und Port für GEO-X Axial Sonde, (C) Fertiges Modul.

An einem Ende des Bohrrohrs wurden an der Innenwandung alle 10 ° Markierungen angebracht, insgesamt 36 entsprechend einem 360 ° Kreis. Das Bohrrohr wurde an einem

festen Platz aufgestellt und ein 536 mm langes Sondenrohr eingebracht (Abb. 94, A). Zusätzlich wurde ein insgesamt 536 mm langer Kunststoffzylinder (zusammengesetzt aus 4 einzelnen Zylindern mit je 134 mm) in das Rohr eingebracht, der als horizontale Lauffläche für das einzubringende Messmodul (Abb. 93, B & C) dienen sollte. Das Bohrrrohr wurde dann bis fast auf diese 536 mm mit Sand gefüllt, damit das Sondenrohr und Kunststoffzylinder gerade noch herauschaute. Das später einzuführende Messmodul mit Flussdichtesensor würde somit ziemlich genau in der Mitte des Bohrrohrs (540 mm) zum Liegen kommen, und somit die Unterseite des Flussdichtesensors ca. 7,5 mm über dem Niveau der Sondenoberkante (im Folgenden als Basisniveau bezeichnet).

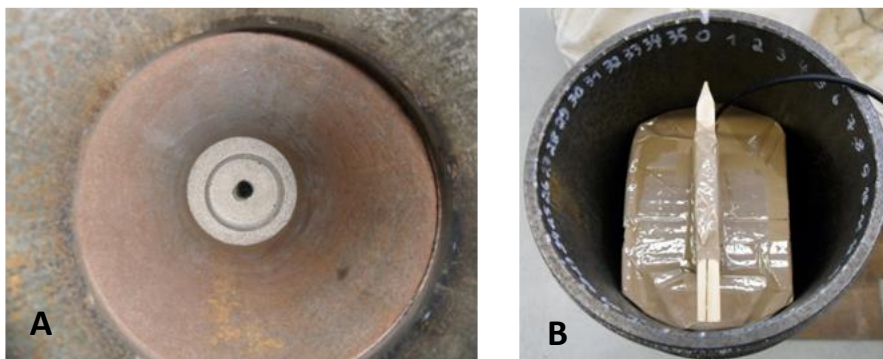


Abb. 94: (A) Innenansicht des Bohrrohrs (\varnothing 168 mm) mit einem Sondenrohr in der Mitte und einem Kunststoffzylinder als Lauffläche für das Messmodul, (B) Messmodul im Bohrrrohr.

Das erwähnte Modul (Abb. 93 B & C) selbst besteht aus einem Muffenstopfen, der den Boden des Moduls bildet. Der Muffenstopfen, auf den Kopf gedreht, entspricht einer zylindrischen Schale, die mit kurzen Stücken aus Rohrisolierungsschläuchen ausgekleidet wurde.- Außerdem wurde ein Holzstil eingesetzt und an der Spitze mit einem Zeiger versehen. Eines der Rohrisolierungsstücke wird als Port für die GEO-X Sonde verwendet, die direkt unter der Zeigerspitze liegt. Das Modul kann nach Einbringen in das Bohrrrohr gedreht werden und der Wert der Flussdichte alle 10° ermittelt werden (Abb. 94, B). Die Messung entspricht dabei einer Messung von oben, also quasi der Kopfplattenmessung aus den vorherigen Untersuchungen.

Die Ergebnisse mit einem magnetisierten \varnothing 5 mm Stahldrahtseil (Probe A & B) der Länge 536 mm sind in Abb. 95 dargestellt, sowie zwei Referenzmessungen A & B. Die Ergebnisse sind für Referenzmessung und Proben gut reproduzierbar, deutlich ist auch der Unterschied des B-Felds von Referenzmessungen und Proben zu erkennen.

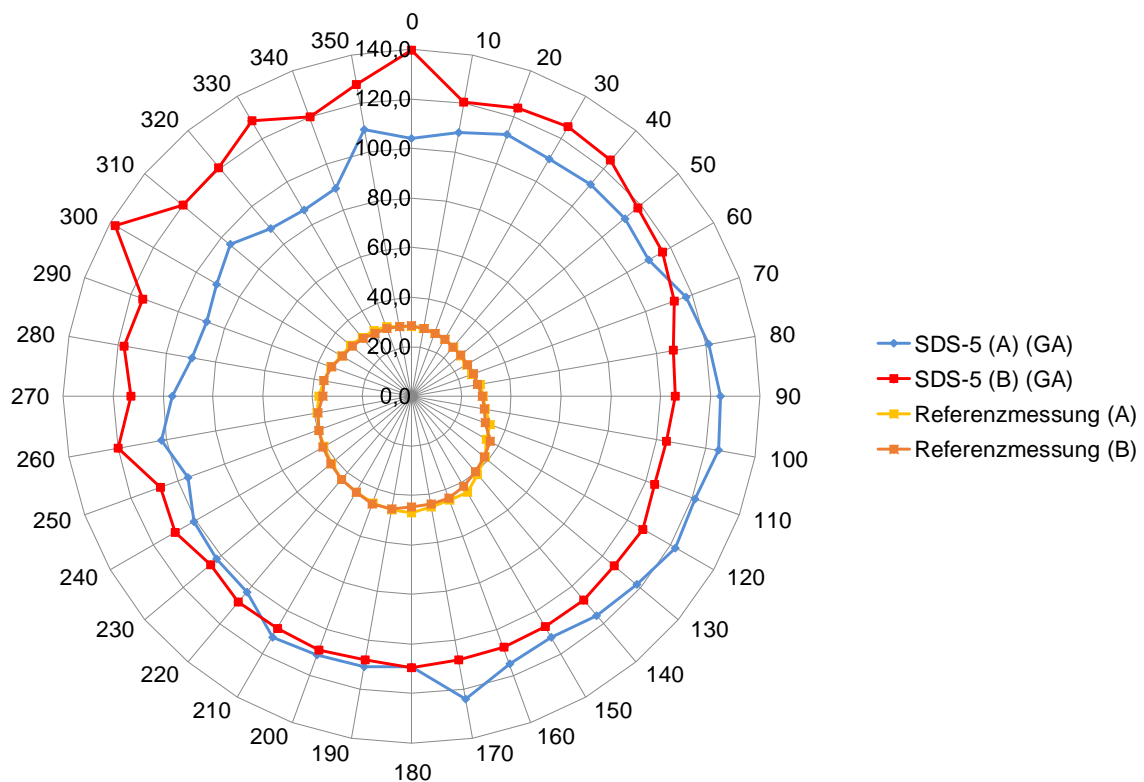


Abb. 95: Messergebnisse mit einem magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) \varnothing 5 mm Stahldrahtseil von 0 – 350 ° in μ T.

In Abb. 96 ist derselbe Versuch mit einem magnetisierten \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen der Länge 536 mm dargestellt. Die Messungen der Proben liegen wieder deutlich über den Referenzmessungen. Entsprechend dem größeren Durchmesser liegen die Werte auch deutlich über den Ergebnissen der \varnothing 5 mm Stahldrahtseile. Bei A & B Probe der beiden Stahldrahtseildurchmessern sind die Ausbildungen der Kreismuster immer etwas unterschiedlich, vor allem was deren Lage angeht. Eine Erklärung dafür ist die Tatsache, dass die einzelnen Stahldrahtseilstücke unterschiedlich gebogen sind und somit im Sondenrohr anders zum Liegen kommen und dadurch Unterschiede im Signal entstehen können. Außerdem hat das Bohrrrohr keinen durchgängigen Durchmesser, sondern hat oben am Gewinde einen etwas kleineren Durchmesser, der nach dem Gewinde in den eigentlichen Bohrrohrdurchmesser von 168 mm übergeht. Entsprechend musste das Modul dem Innendurchmesser des Gewindes angepasst werden. Im tieferen Bereich des Rohrs passt es somit nicht mehr optimal und leichte Ausbuchtungen bzw. Abweichungen vom idealen Kreis sind beim Drehen möglich. Um diese kleinzuhalten, wurde im Bereich des Gewindes eine Führung eingebaut (Abb. 94, B) um das Modul zu stabilisieren. Es muss auch erwähnt werden, dass die bei den Messungen mit den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen erhobenen Daten des Öfteren die obere Messgrenze der GEO-X Sonde (200 μ T) erreicht haben, die Werte in Wirklichkeit also noch höher sein können.

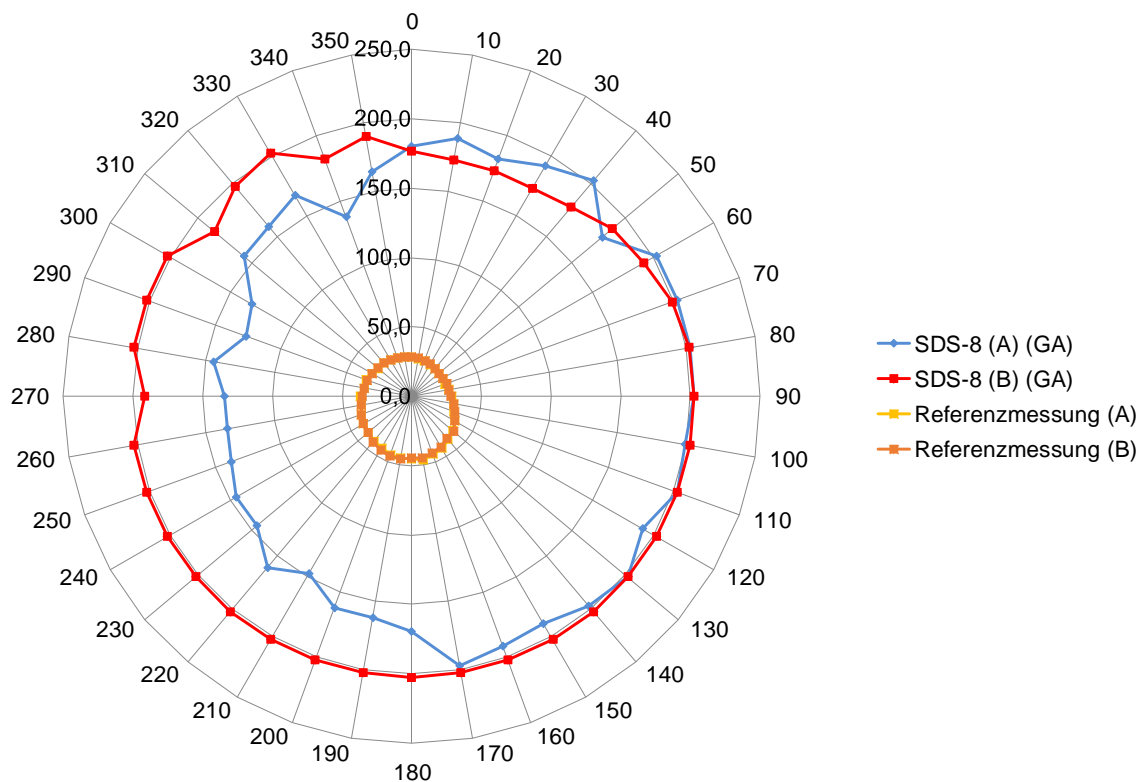


Abb. 96: Messergebnisse mit einem magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) \varnothing 8 mm Stahldrahtseil von 0 – 350 ° in μT .

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stahldrahtseile in einem Bohrloch mittels eines drehbaren Messmoduls detektiert werden können. Ein deutlicher Unterschied des Signals ist bei unterschiedlichen Stahldrahtseil-Durchmessern zu erkennen. Für eine gute Interpretierbarkeit ist eine vorherige Referenzmessung jedoch notwendig.

Neben den Messungen auf dem Basisniveau (7,5 mm über Sondenoberkanten-Niveau) wurden auch Untersuchungen durchgeführt, um herauszufinden bis zu welcher Höhe über der Basis noch ein detektierbares Signal mit dem Modul innerhalb des Bohrrohrs messbar ist (ähnlich zu den vertikalen Messungen im Messstand). Hierzu wurden weitere 134 mm Kunststoffzylinder einzeln in das Bohrrohr eingegeben um somit weitere Laufflächenniveaus für das Messmodul zu erhalten. Insgesamt konnten 3 weitere Niveaus im Bohrrohr bei 134 mm, 268 mm und 402 mm über dem Basisniveau gemessen werden analog Abb. 96. Für die folgende Abb. 97 wurden von den 36 Messwerten jedes Niveaus, jeweils 36 Referenzmesswerte des Niveaus abgezogen um das ΔBI zu erhalten. Aus diesen jeweils 36 ΔBI -Werten für jedes Niveau wurde ein Durchschnittswert für jedes Niveau errechnet als Input für Abb. 97. Es muss erwähnt werden, dass für das Basisniveau des \varnothing 8 mm Stahldrahtseils nicht alle 36 Punkte für die Berechnung des Durchschnittswerts herangezogen wurden, da manche die Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht hatten.

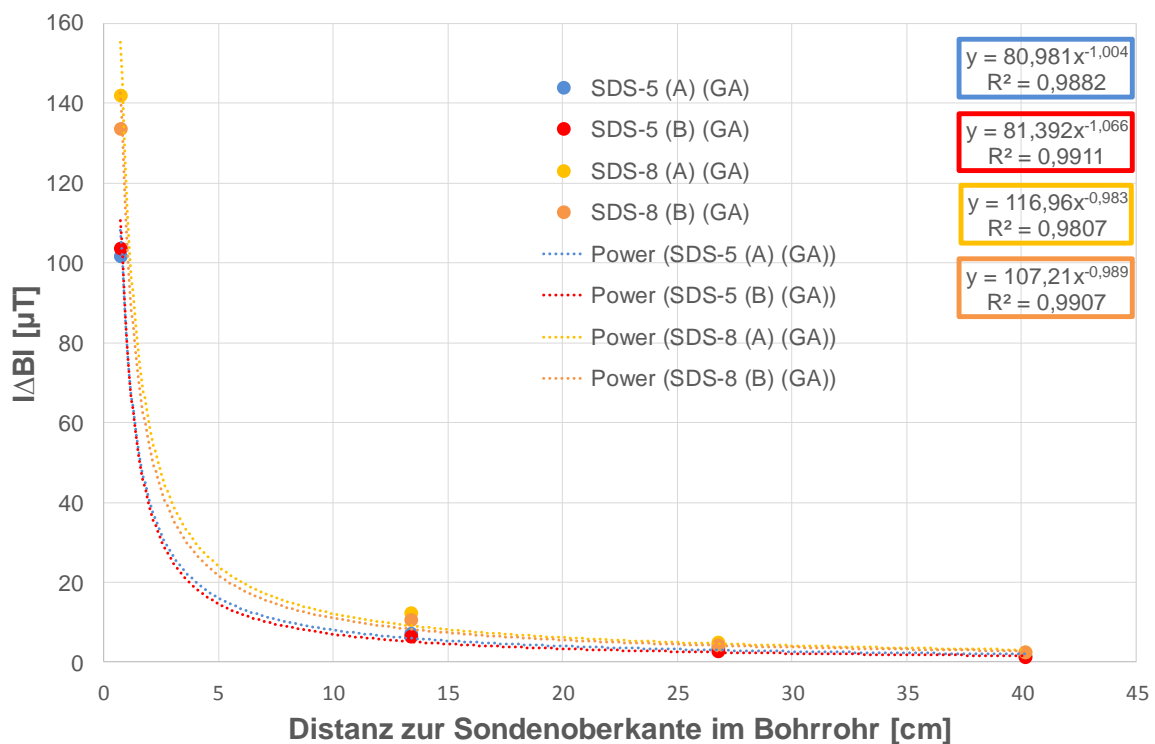


Abb. 97: $|\Delta BI|$ in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrröhr.

Um die Ergebnisse besser bewerten zu können wurde analog zum Messtand eine statistische Fehleranalyse für die Bohrröhrversuche durchgeführt. Dabei wurden 31 Referenzmessungen für das Basisniveau durchgeführt und für jeden Messpunkt von 0 bis 350 ° das 2σ bestimmt. Die Mittelwerte dieser 31 Messungen (blaues Plot), sowie das resultierende 2σ (2 rote Plots) sind in Abb. 98 dargestellt. Es muss erwähnt werden, dass sich für jeden einzelnen Messpunkt ein unterschiedliches 2σ ergeben hat, mit einem Minimum von $\pm 0,3 \mu T$ bei 260 ° und einem Maximum von $\pm 1,8 \mu T$ bei 220 °. Für eine „Worst case“ Betrachtung wurde in Abb. 98 das 2σ von $\pm 1,8 \mu T$ für alle Punkte eingesetzt.

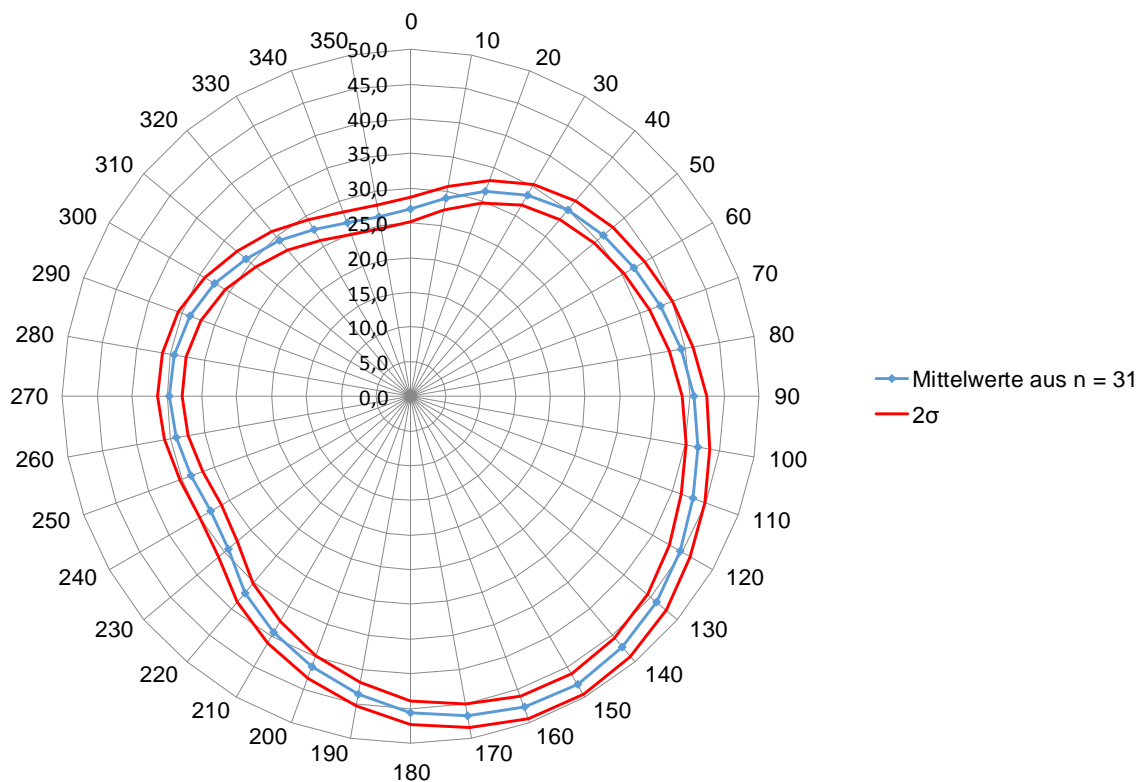


Abb. 98: Mittelwerte und Standardabweichungen (2σ) der Referenzmessung in μT für alle Messpunkte des Basisniveaus von $0 - 350^\circ$ mit einer Stichprobe von $n = 31$.

Auf Basis dieser Untersuchungen, die ein 2σ von $\pm 1,8 \mu\text{T}$ aufweisen, wurde für die Messungen im Bohrrohr ein Signifikanzwert von $2,5 \mu\text{T}$ festgesetzt, d.h. ein Messwert muss mindestens $2,5 \mu\text{T}$ über der Referenzmessung liegen, um als anomal identifiziert werden zu können.

Entsprechend kann man für die Ergebnisse in Abb. 97 für die $\varnothing 5 \text{ mm}$ Stahldrahtseile eine vertikale Distanz von $32,0 \text{ cm}$ für die Probe A und $26,2$ für Probe B errechnen, bei der gerade noch ein anomales Signal messbar wäre. Für die $\varnothing 8 \text{ mm}$ Stahldrahtseile ergeben sich 50 cm für die Probe A und $44,7 \text{ cm}$ für die Probe B.

Die bis hier beschriebenen Messungen zeigen ein Szenario bei dem man davon ausgeht, dass es noch zu keiner gravierenden Abweichung während des Überbohrvorgangs gekommen ist, sondern, dass sich die Bohrung noch direkt über der EWS, bzw. dem Sondenstrang der das Stahldrahtseil enthält, befindet. Im nächsten Schritt ist die Frage, wie man eine EWS detektieren kann, wenn eine gravierende Abweichung auftritt, d.h. dass sich die EWS quasi als lateraler Ast neben der Bohrung befindet. Hierzu wurde die oben beschriebene Messmethode etwas erweitert wie Abb. 99 zeigt.



Abb. 99: Bohrrohr und nebenstehend sandgefüllter Eimer mit Koch Erdwärmerohr 32,0 x 2,9 mm.

Neben das mit Messmodul ausgestattete Bohrrohr wurde ein Eimer gestellt, in den eine Koch Doppel-U Erdwärmerohr 32,0 x 2,9 mm mit Sand fixiert und aufgestellt wurde. In einem ersten Schritt wurde das Messmodul auf dem Basisniveau in einer Position fixiert (hier 180 °), und dann das Erdwärmerohr mit unterschiedlichen Arten und Anzahl an Stahldrahtseilen gefüllt und jeweils, durch Verschieben des Eimers, der Abstand zum Bohrrohr ermittelt bei dem gerade noch ein signifikantes Signal auftritt. Als Signifikanzwert wurde 2,5 μT festgelegt, wie zuvor bestimmt (Abb. 98). Die Stahldrahtseilproben wurden so hergestellt, dass jeweils zwei 0,5 m Stahldrahtseilstücke in einem Schrumpfschlauch fixiert wurden (wie in Abb. 54). Das ergab dann ein 1 m Stahldrahtseil entsprechend der Länge eines Erdwärmerohrstrangs. 4 davon wurden hergestellt, für jeden Sondenstrang eine. Beim Einbringen der Stahldrahtseilstücke in den Schrumpfschlauch wurde vorher jeweils die Polarität der einzelnen 0,5 m Stücke geprüft. Dabei ist es wichtig, dass die einzelnen Stücke immer mit entgegengesetzten Polen zusammengeführt werden, da man sonst entlang des Stahldrahtseils alternierende Signale hätte und somit eine Interpretation erschweren würde. Im Folgenden sind die Ergebnisse unterschiedlicher Szenarien mit magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) Stahldrahtseilen in Tab. 15 dargestellt. Als kurze Info sei hier noch erwähnt, dass eine Messung mit nicht magnetisierten \varnothing 5 mm Stahldrahtseilen, selbst bei einer Belegung aller 4 Rohre gleichzeitig, kein signifikantes Signal zeigte, sogar in nächster Nähe zum Bohrrohr wie in Abb. 99. Bei den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen konnte erst bei Belegung aller 4 Rohre ein Signal verzeichnet werden (2,5 μT in 35 cm Entfernung zum Bohrrohr). Diese Versuche zeigen, dass für den Anwendungsfall die vorherige Magnetisierung essentiell ist. Entsprechend wird im Folgenden der Fokus auf magnetisierte Proben gelegt. Die Ergebnisse in Tab. 15 stellen sich

analog zu den Versuchen im Messstand dar, so ist generell eine größere Reichweite des Signals beim Stahldrahtseil mit größerem Durchmesser zu erkennen. Auch die zunehmende Anzahl an Stahldrahtseilen eines Durchmessers führt zu einer Verstärkung des Signals.

Tab. 15: Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für magnetisierte \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseile, Signifikantes Signal ab $2,5 \mu\text{T}$ (*4 mal gemessen, jeweils mit einem anderen Stahldrahtseil).

Laterale Signalreichweite \varnothing 5 mm			Laterale Signalreichweite \varnothing 8 mm		
Stahldrahtseil [cm]			Stahldrahtseil [cm]		
1 Rohr*	2 Rohre	4 Rohre	1 Rohr*	2 Rohre	4 Rohre
22,0, 21,0, 21,0, 20,0	45,0	69,0	37,0, 37,0, 37,0, 37,0	62,0	90,0

Als letzten, aber wichtigsten Schritt bei der Untersuchung der Stahldrahtseile ist nun auch eine tiefenorientierte Untersuchung des Messsignals notwendig. Die bisherigen Untersuchungen, sowohl mit dem Messstand als auch mit dem Messmodul im Bohrrrohr haben nur einen einzigen Schnitt entlang der Stahldrahtseile gezeigt. Mit der bisherigen Annahme eines Feldes ähnlich dem eines Stabmagneten, müsste das Signal durch die leichte Biegung der Feldlinien entlang des Seils, vor allem zu den Enden hin, abnehmen (siehe auch Abb. 1).

Um diese Hypothese zu untersuchen, wurden die Versuche entsprechend Abb. 99 mit variabler Tiefenposition des Messmoduls im Bohrrrohr untersucht. Hierzu wurden die 134 mm Kunststoffzylinder verwendet, um das Messmodul im Bohrrrohr aufzustocken. Insgesamt konnten 7 dieser Zylinder in das Bohrrrohr eingebracht werden und entsprechend 7 Messpunkten entlang des Bohrrohrs gemessen werden, jeweils auf der Oberseite eines Zylinders (Abb. 100). Der letzte (siebte) Messpunkt, vom Boden ausgehend, liegt knapp unterhalb des Bohrrrohr-Gewindes (Abb. 100).

Es wurden nun jeweils zwei \varnothing 5 mm und \varnothing 8 mm Stahldrahtseile untersucht (Abb. 101). Die Ergebnisse stützen im Prinzip alle bisher durchgeführten Messungen und die daraus abgeleiteten Interpretationen. Die beiden Kurven (jeweils A und B Probe für jeden Seiltyp) zeigen ein sehr ähnliches Muster, dabei nehmen die Abstände zwischen Bohrrohr außenwandung und Erdwärmerohr zu den beiden Enden des Bohrrohrs hin ab. Die Reichweite der \varnothing 8 mm Stahldrahtseile ist größer als die der \varnothing 5 mm Stahldrahtseile.



Abb. 100: Durchsichtige Kunststoffzylinder (7 Stück übereinander, je 134 mm) neben Bohrrohr und Erdwärmerohr.

Zur Mitte des Bohrrohrs, vor allem im Tiefenbereich des Messmoduls zwischen 40-80 cm, kann man einen einigermaßen stabilen Bereich für den Abstand bei beiden Seildurchmessern erkennen. Dieser schwankt im Bereich von 3 - 4 cm. Stellt man sich nun das Feld der Stahldrahtseile wie einen Stabmagneten vor, dessen Längsachse der Längsachse des Stahldrahtseils entspricht, so kann man sich die Kurven in Abb. 101 anhand von Abb. 102 erklären. Diese zeigt das Feld eines Stabmagneten, sowie 3 Positionen des Flussdichtesensors auf einer geraden Linie parallel zum Magneten. Der Flussdichtesensor auf Position 2 liegt am Scheitelpunkt einer Feldlinie. In diesem Bereich läuft die Feldlinie annähernd parallel zur Längsachse des Flussdichtesensors durch diesen hindurch. Dies ist eine Voraussetzung um ein maximales Signal messen zu können. Ein maximales Signal bedeute dann auch eine maximale Entfernung des Flussdichtesensors zum Stabmagneten bzw. Stahldrahtseil. Dieser Bereich entspricht im Prinzip dem Bereich zwischen 40-80 cm Messmodultiefe in Abb. 101 (sehr deutlich vor allem bei SDS-5). Betrachtet man die Sensoren auf Position 1 und 3 so ist klar, dass bei diesen Messpunkten, besagte Feldlinie nicht mehr parallel, sondern eher schräg in den Sensor einfallen. Daraus folgt ein schwächeres Signal. Um diese Abschwächung kompensieren zu können, muss der Sensor näher an den Stabmagneten bzw. das Stahldrahtseil geführt werden. Dies entspricht dann dem abnehmenden Abstand unterhalb von 40 cm, und oberhalb von 80 cm.

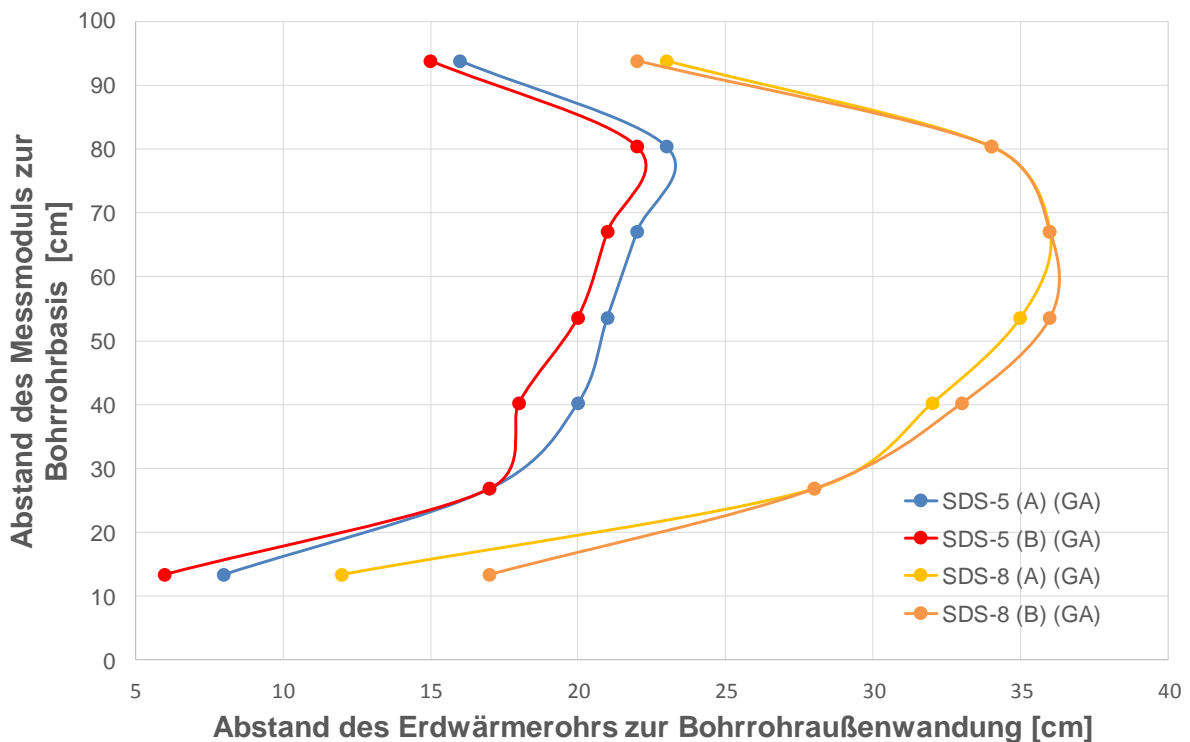


Abb. 101: Abstände des Erdwärmerohrs zur Bohrröhraußenwandung in Abhängigkeit zur Tiefenlage des Messmoduls im Bohrrohr. Abstände abgelesen bei einem $\Delta B I$ von $2,5 \mu T$, Kontrastmittel: \varnothing 5 mm und 8 mm Stahldrahtseil, MIR mit GA „Süd“.

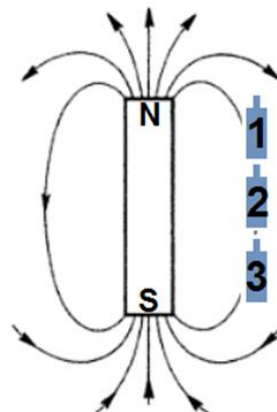


Abb. 102: Feld eines Stabmagneten mit 3 Positionen eines Flussdichtesensors auf einer Linie parallel zur Stabmagnetlängsachse.

Wichtig ist an dieser Stelle auch zu erläutern, welche Konsequenzen diese Ergebnisse für den realen Anwendungsfall im Gelände haben. Klar ist, dass man bei Verwendung eines Stahldrahtseils kein stabiles Signal entlang des gesamten Sondenverlaufs erwarten kann. In Abb. 101 liegen lediglich etwa 40 % (bei SDS-8) bis 50 % (bei SDS-5) des Sondenverlaufs in

einem annähernd stabilen Signalbereich, und zwar ausgehend vom Sondenmittelpunkt etwa 10 - 30 % der Sondenlänge nach oben und unten. Die Bereiche oberhalb und unterhalb dieses Bereichs liegen in einem abnehmenden Signalbereich. Dies sind nur ungefähre Angaben, da ggf. zusätzliche Messpunkte die Auflösung verfeinern würden. Auch sind die einzelnen Stahldrahtseilstücke nicht kerzengerade, sondern sehr gebogen, auch in der Sonde, so dass die Form und Ausbreitung des Signals etwas verfälscht werden können.

Skaliert man die Ergebnisse aus Abb. 101 im Labormaßstab z.B. auf den realen Anwendungsfall einer Standard 100 m EWS, so würde das bedeuten, dass die ersten etwa 20 m von Geländeoberkante in einem instabilen Signalbereich liegen werden. Erst ab 20 m bis in eine Tiefe von 60–70 m könnte man von einem einigermaßen stabilen Signal entlang des Sondenverlaufs ausgehen. Darunter würde das Signal bis 100 m wieder abnehmen.

3.3.3.7 Kosten der Methode

Die Kosten für die Stahldrahtseil Methode betragen für die \varnothing 5 mm Seile 1,35 €/m, zusätzlich 1,95 €/m für den Schrumpfschlauch. Bei den \varnothing 8 mm Seilen 2,55 €/m, zusätzlich 2,65 €/m für den Schrumpfschlauch. Für den Rückbau einer Standard 100 m Sonde und der Eingabe nur eines Stahldrahtseils in einen der Sondenstränge entstehen somit Gesamtkosten von 330 € für das \varnothing 5 mm Seil bzw. 520 € für das \varnothing 8 mm Seil. Dies sind reine Materialausgaben für das Kontrastmittel. Bei einer Einfach-U Sonde mit Eingabe von zwei Seilen in beide Stränge ist es das Doppelte, also 660 € für \varnothing 5 mm und 1040 € für das \varnothing 8 mm Seil. Bei einer Doppel-U Sonde mit Eingabe von insgesamt 4 Seilen in alle 4 Stränge 1320 € für \varnothing 5 mm und 2080 € für das \varnothing 8 mm Seil.

Die Kosten für Schrumpfschläuche können ggf. variieren. So ist nicht abschließend geklärt, ob die hier verwendeten Schrumpfschläuche für den realen Anwendungsfall tatsächlich geeignet sind. Es ist denkbar, dass die Schrumpfschläuche, beim Herablassen in eine EWS, aufgrund des hohen Eigengewichts nach einigen Metern, an einer Stahldrahtseilschnittstelle reißen können. Hier ist ggf. an Schrumpfschläuche mit dickeren Wandungen zu denken. Alternativ ist auch das zusätzliche Einbringen z.B. eines dünnen Hanfseils in den Schrumpfschlauch denkbar, der die Schnittstellen etwas verstärkt, gleichzeitig aber leichter zerbohrt werden kann als ein durchgängiges Stahldrahtseil.

3.3.3.8 Fazit

Die untersuchte Stahldrahtseilmethode erscheint bis hierhin die einzige brauchbare Methode für das geplante Rückbaukonzept. Die Stahldrahtseile haben im Allgemeinen bereits ein schwaches Eigenfeld, das dem eines Stabmagneten gleicht und sich sehr homogen darstellt. Dieser letzte Punkt ist wichtig, da im Kreis um das Seil herum, in allen Himmelsrichtungen, von einem gleichmäßigen Feld bzw. Signal ausgegangen werden kann.

Jedoch ist das Signal nicht über den gesamten Tiefenverlauf der Stahldrahtseilkette konstant. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass mindestens die oberen und unteren 20 % eines Stahldrahtseils in einem instabilen Signalbereich liegen, nur dazwischen ist von einem maximalen und einigermaßen stabilen lateralen Signal auszugehen. Begründet liegt das im Feldlinienverlauf ähnlich eines Stabmagneten.

Das initiale B-Feld der Stahldrahtseile ist zu schwach, um weiträumig im Untergrund detektiert werden zu können und muss deshalb durch Magnetisierung verstärkt werden. Ein positiver Aspekt ist, dass auch nach der Magnetisierung das Feld weiterhin gleichmäßig erscheint (nicht jedoch in die Tiefe wie zuvor). Bei den hier verwendeten Stahldrahtseilen reichte bereits eine Magnetisierung von nur ca. 14,0 mT, um eine annähernde Sättigungsmagnetisierung zu erreichen. Für die finale Signalreichweite ist aber nicht nur die Stärke des Magnetfelds, sondern auch der Durchmesser des Seils relevant. Es gilt, je größer der Durchmesser umso weiter die Signalreichweite, zumindest wie hier beim gleichen Stahltyp. Unterschiedliche Stahltypen wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet, es ist aber generell bei einzelnen Stahltypen von unterschiedlichen initialen B-Feldern und magnetischen Suszeptibilitäten auszugehen. Letztere bestimmen ganz wesentlich die Stärke der Magnetisierung und somit auch das resultierende B-Feld. Für den Anwendungsfall sollte durch weitere Untersuchungen im Realmaßstab der optimale Stahldrahtseildurchmesser incl. passendem Schrumpfschlauch getestet werden.

Ein ganz wesentlich limitierender Faktor im Hinblick auf die Signalreichweite ist das Vorhandensein einer Stahlverrohrung im Bohrloch. Die maximal laterale Signalreichweite lag in dieser Arbeit bei ca. 20 cm (\varnothing 5 mm) und 35 cm (\varnothing 8 mm) bei den Versuchen im Bohrrorhr mit Stahldrahtseilen. Die vertikale Signalreichweite betrug im Schnitt 29,1 cm (\varnothing 5 mm) und 47,4 cm (\varnothing 8 mm). Aus den Versuchen im Messstand konnte bei allen Szenarien eine laterale und auch vertikale Abschwächung im Bereich von etwa 30 – 40 % durch ein Bohrrohr ermittelt werden. Für den Anwendungsfall bedeutet dies, dass man nach Möglichkeit für die magnetische Messung im Bohrloch versuchen sollte, den Sensor in einem unverrohrten Bereich zu positionieren. D.h. auch man sollte beim Auftreten einer fehlgeleiteten Bohrung einen kleinen Bereich oberhalb der Endteufe unverroehrt lassen, damit der B-Feld-Sensor das pure und damit ungestörte Signal empfangen kann. Es ist klar, dass dies ggf. nicht immer möglich sein wird, da die Notwendigkeit einer Verrohrung auch wesentlich von den geologischen Gegebenheiten, welche die Bohrung durchteuft, abhängt.

Wichtig ist auch hervorzuheben, dass für den Anwendungsfall im Gelände immer eine Referenzmessung des natürlichen Magnetfelds notwendig ist, um letztlich das magnetische Signal der Stahldrahtseile herausfiltern zu können. Dies kann z.B. durch ein tiefenorientiertes, magnetisches Vorab-Logging in der rückbaufälligen EWS durchgeführt werden sowie auch später innerhalb der Rückbaubohrung etwas außerhalb der Signalreichweite der in die Sonde eingebrachten Stahldrahtseile.

Im Hinblick auf den Einfluss der geologischen Gegebenheiten auf das Messsignal konnten zumindest in dieser Arbeit keine signifikanten Störeinflüsse entdeckt werden. Generell gilt, dass die meisten gesteinsbildenden Mineralien und somit auch Gesteine, sowie auch Wasser, unproblematisch, also nicht ferromagnetischer Natur sind und somit keine Störeinflüsse zu erwarten sind. Nur wenige Eisenminerale können ferromagnetische Erscheinungen zeigen, am häufigsten sind diese dann in magmatischen Gesteinen zu finden. In klassischen Sedimentgesteinen sind sie am wenigsten zu erwarten, jedoch können auch hier z.B. Buntsandsteinformationen und Oolithe (bekannte Eisenoolithe) ferritisch gebunden sein. In dieser Arbeit zeigte der Buntsandstein keinerlei Schirmwirkung auf das Messsignal, jedoch ist eine solche bei großen Gesteinsvolumina nicht auszuschließen. Einfache, trockene und wassergesättigte Sande und Tone sind völlig unproblematisch. Magmatische Gesteine, wie z.B. Granit, können hingegen bei großen Volumina im Gelände Einflüsse zeigen.

Ein Einfluss sollte im Einzelfall durch eine Durchsicht vorhandener Bohrdaten sowie ggf. durch ein Vorab-Logging mittels Flussdichtesensoren überprüft werden, um ggf. kritische Horizonte lokalisieren zu können.

Was die Kosten der Methode angeht, erscheint diese relativ günstig, so könnte man einen Sondenstrang einer Standard 100 m Sonde für nur 520 € mit dem stärkeren \varnothing 8 mm Stahldrahtseil incl. Schrumpfschlauch bestücken. Das sind reine Materialkosten von nur 5,2 % ausgehend von 10 k€, die für das Gesamtkonzept als Zielwert veranschlagt worden sind. Verdoppelt man das Budget, kann man eine Zunahme des lateralen Signals von 67,6 % erreichen (von 37 auf 62 cm, Tab. 15), z.B. durch Bestücken beider Sondenstränge einer Einfach-U Sonde für insgesamt 10,4 % Materialkosten (ausgehend von 10 k€). Vervierfacht man das Budget und bestückt alle 4 Sondenstränge einer Doppel-U Sonde kann man eine Zunahme des lateralen Signals von 143,3 % gegenüber einem einzelnen Stahldrahtseil erreichen (Zunahme von 37 auf 90 cm, Tab. 15). Die Materialkosten würden hier 20,8 % ausgehend von 10 k€ betragen.

3.3.4 Spannbetonlitze als Kontrastmittel

3.3.4.1 Untersuchung der Methode

3.3.4.1.1 Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Angelehnt an Kap. 3.3.3 war eine weitere Idee für ein Kontrastmittel die Verwendung einer Spannbetonlitze. Dies ist ein \varnothing 15,7 mm Stahlseil, dass aus sieben einzelnen, dünneren Stahlseilen gewunden ist (Abb. 103).



Abb. 103: Links Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte Spannbetonlitze \varnothing 15,6 mm.

Die Spannbetonlitze tendiert beim Zerschneiden dazu, in kleinere Stücke auseinanderzufallen. Deshalb muss ein Stück der Spannbetonlitze vorher immer mit Tesafilm fixiert werden (Abb. 103) bevor es zerschnitten wird.

Die Methode mit der Spannbetonlitze ist der Stahldrahtseilmethode sehr ähnlich, beinhaltet aber im Prinzip zwei Messmethoden in einem. Dabei soll eine durchgehende Spannbetonlitze durch Bohrgestänge und Bohrkopf in eine für den Rückbau vorgesehene EWS abgelassen und einzementiert werden. Sie dient somit quasi als Führung für das Bohrwerkzeug. Gegeben dem Fall, dass die Spannbetonlitze beschädigt oder zerbohrt wird, kann sie trotzdem noch mittels magnetischer Messungen detektiert werden, und somit weiterhin mit ihrem Signal der Ausrichtung des Bohrwerkzeugs dienlich sein. Bei den gestückelten Stahldrahtseilen steht hingegen nur die magnetische Messung zur Verfügung.

Abb. 104 zeigt die Ergebnisse der Messungen eines 1-Rohr Szenarios als Differenzkarten. Im Vergleich zu den Stahldrahtseilen wurde hier auf Szenarien mit 2 und 4 Rohren verzichtet.

Die Ergebnisse stellen sich sehr identisch dar wie bei den Stahldrahtseilen. Auf der Grundplatte ist eine konzentrische Ausbildung des Feldes zu beobachten. Das gleiche gilt für die Kopfplatte nur hier, mit entgegengesetztem Vorzeichen im Vergleich zur Grundplatte. Das, und die Tatsache, dass die beiden Enden des Seils entgegengesetzte Vorzeichen besitzen, führt wieder zu dem Schluss, dass sich auch das Feld der Spannbetonlitze wie bei einem Stabmagneten verhält. Die Ergebnisse sind sehr gut reproduzierbar, wie A und B Probe zeigen.

Es muss erwähnt werden, dass bei beiden Proben die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Kopfplatte, bei der Koordinate X/Y = 5/5 jeweils Werte von 200 μT erreicht haben. Dies entspricht der oberen Messgrenze der GEO-X Sonde. Das heißt, dass diese Werte in Wirklichkeit noch höher sein können, entsprechend können die ΔB Werte in Abb. 104 an der entsprechenden Koordinaten noch höher und die Anomalie somit noch deutlicher sein.

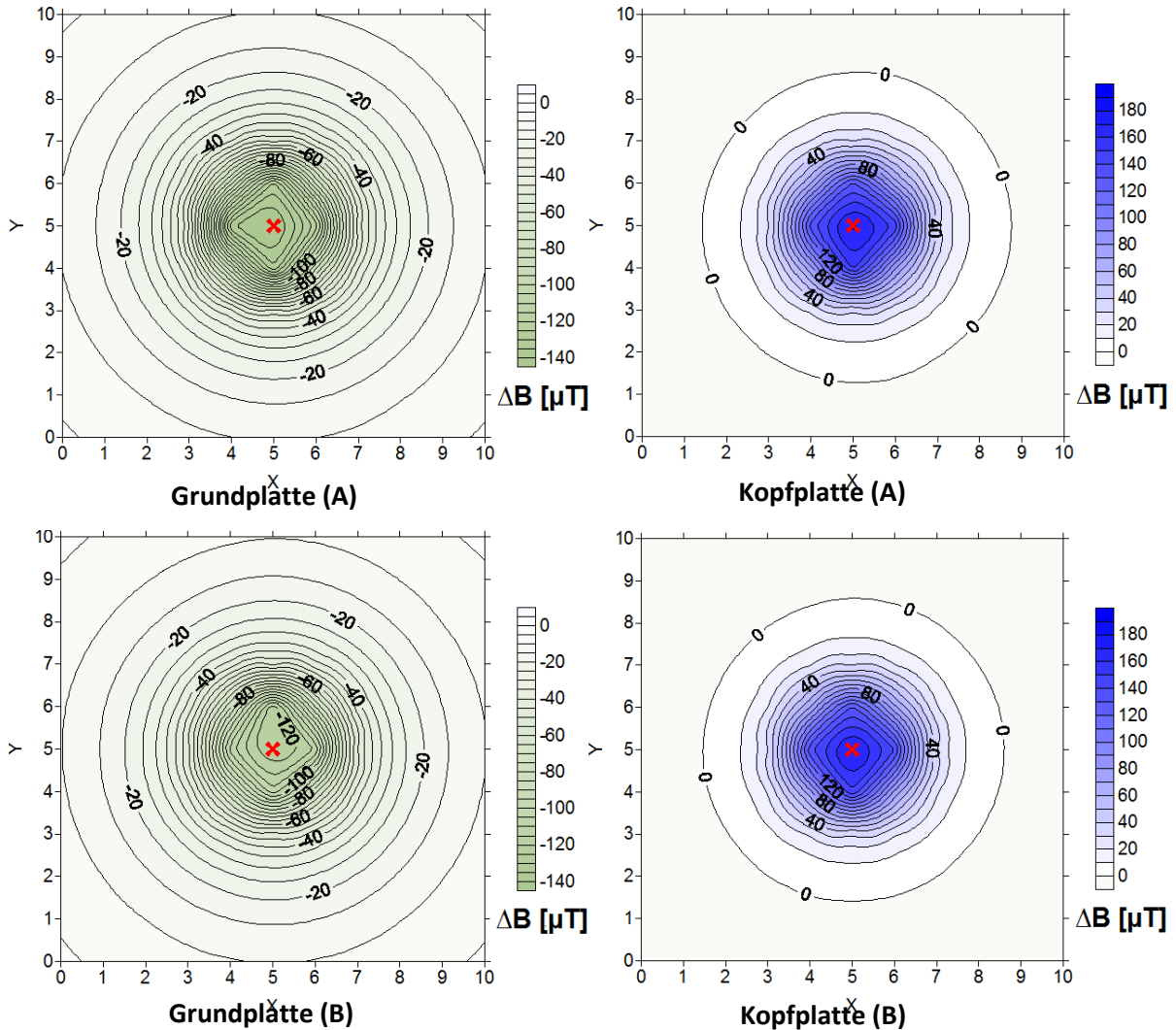


Abb. 104: \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.

Im nächsten Schritt wurden die gleichen Proben magnetisiert, die Ergebnisse dazu sind in Abb. 105 dargestellt.

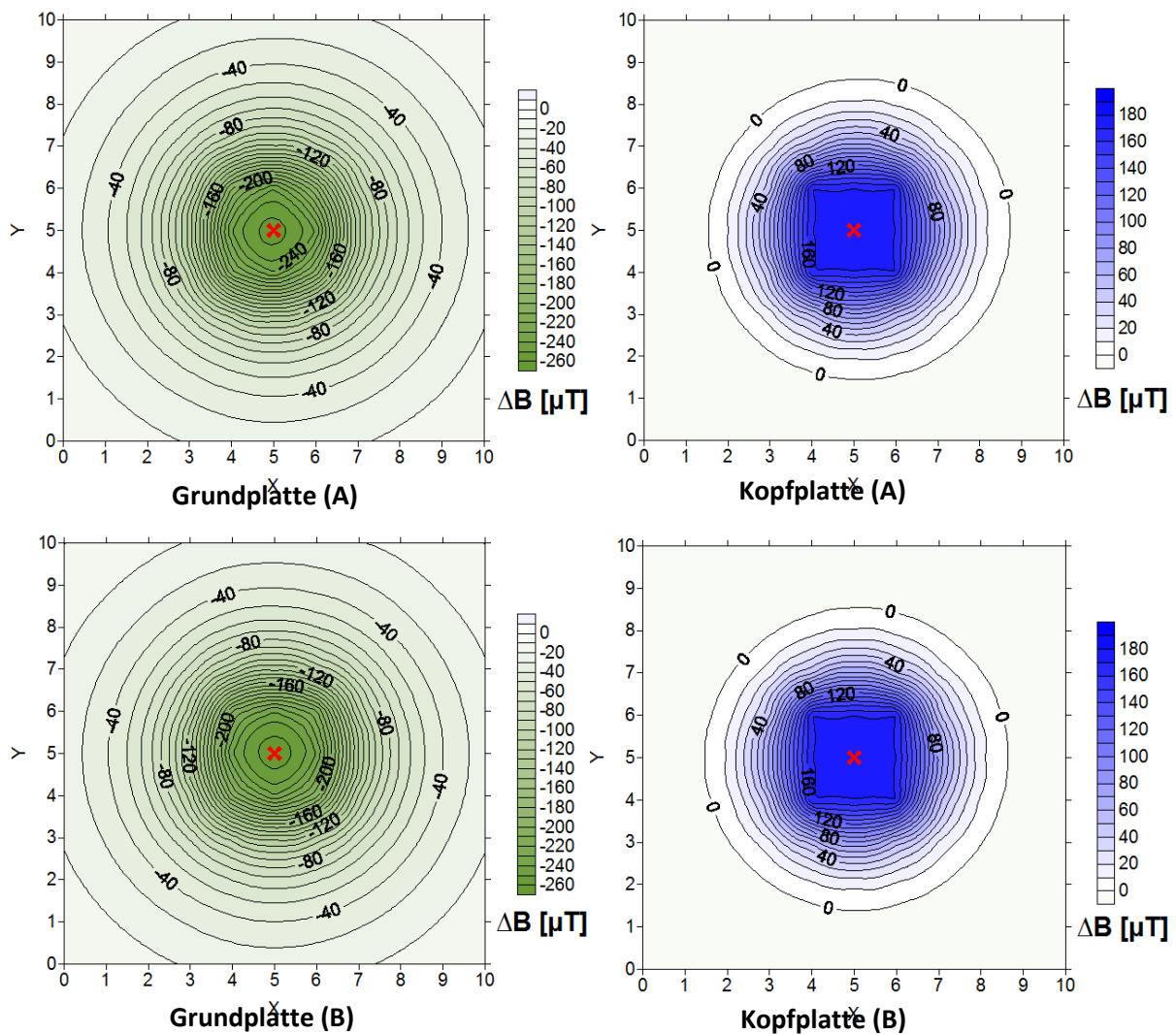


Abb. 105: \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.

Auch hier sind die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar. Die Anomaliebeträge haben sich sowohl auf der Grund- als auch auf der Kopfplatte deutlich, im Vergleich zu den nicht magnetisierten Proben, erhöht. Die Kreismuster bestehen nach wie vor. Auch der Radius des Signals hat sich gegenüber dem nicht magnetisierten Zustand auf Grund und Kopfplatte vergrößert. Es muss erwähnt werden, dass bei beiden Proben in unmittelbarer Nähe zum Stahldrahtseil, die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Grundplatte, bei den Koordinaten $X/Y = 4/5, 5/4, 5/6$ und $6/5$ jeweils Werte von $-200 \mu\text{T}$ erreicht haben, also der unteren Messgrenze der GEO-X Sonde. Ebenso bei beiden Proben auf der Kopfplatte bei den Koordinaten $X/Y = 4/4, 4/5, 4/6, 5/4, 5/5, 5/6, 6/4, 6/5$ und $6/6$ Werte von $200 \mu\text{T}$, was der oberen Messgrenze der GEO-X Sonde entspricht. Das heißt, dass diese Werte in Wirklichkeit noch niedriger bzw. höher sein können, entsprechend können die ΔB Werte in Abb. 105 an den entsprechenden Koordinaten noch niedriger bzw. höher sein, und die Anomalie somit noch deutlicher.

3.3.4.1.2 Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder

In Abb. 106 ist die laterale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 105 und Abb. 104 mit nicht magnetisierten und magnetisierten Spannbetonlitzen gezeigt. Die Abbildung zeigt dabei $|\Delta BI$. ΔB ergibt sich aus der Differenz der Profilmessung mit Probe und einer Referenzmessung ohne Probe. Es wurden hier die gleichen Profile gemessen wie bei den Stahldrahtseilen (Abb. 64, Abb. 67). Unter Beachtung der ermittelten Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu T$) wird im Folgenden wieder festgelegt, dass ein signifikantes Signal bei einem $|\Delta BI| \geq 1,5 \mu T$ vorliegt. Für die folgenden Berechnungen der maximalen lateralen Signalreichweite wird somit ein Wert von $1,5 \mu T$ für y eingesetzt. Angewendet auf die Regressionsgleichungen in Abb. 106 kann somit ein signifikantes Signal bis 32,0 cm vom Sondenmittelpunkt bei der nicht magnetisierten Probe A, bis 31,7 cm vom Sondenmittelpunkt bei der nicht magnetisierten Probe B, bis 43,0 cm vom Sondenmittelpunkt bei der magnetisierten Probe A, und bis 41,8 cm bei der magnetisierten Probe B ermittelt werden.

Es sei erwähnt, dass der Punkt $X/Y = 5/4$ bei beiden magnetisierten Proben nicht aufgenommen wurde, da dieser, wie bereits erwähnt, der unteren Messgrenze der GEO-X Sonde entspricht, und somit nicht für eine korrekte Regressionsanalyse verwendet werden kann.

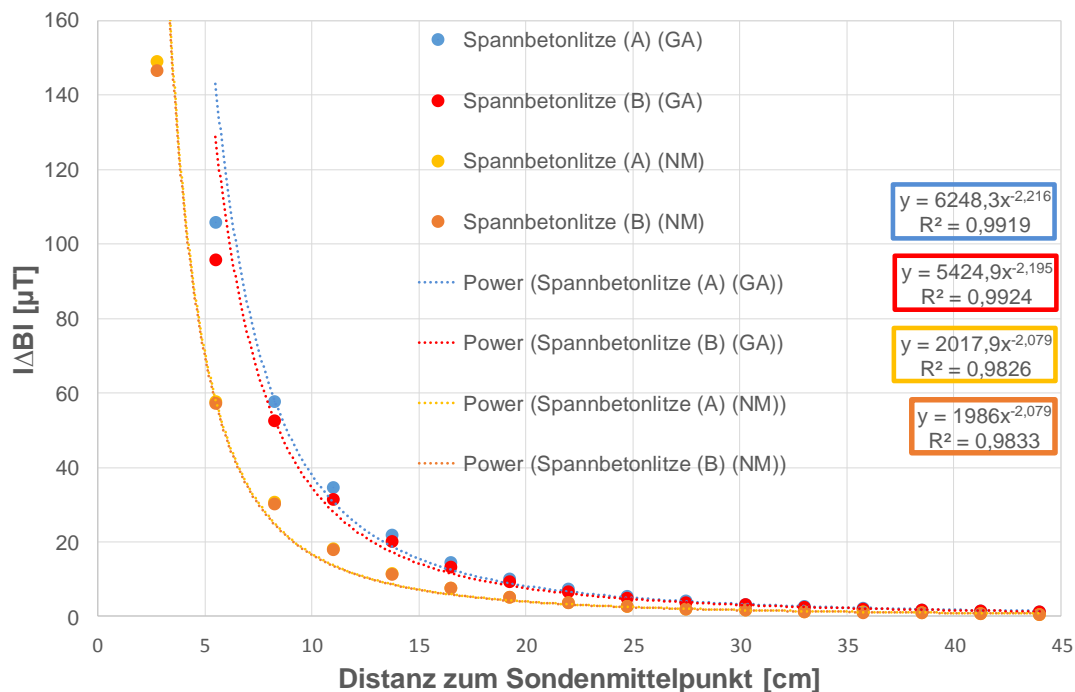


Abb. 106: Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte ‚Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA ‚Süd‘.

In Abb. 107 ist die vertikale Messsignalreichweite dargestellt. Ein signifikantes Signal ($1,5 \mu\text{T}$) kann für das magnetisierte Szenario bis 51,8 cm oberhalb der Sondenoberkante für Probe A, und 49,6 cm für Probe B ermittelt werden. Für das nicht magnetisierte Szenario kann ein signifikantes Signal bis 35,3 cm für Probe A und bis 34,5 cm für Probe B ermittelt werden.

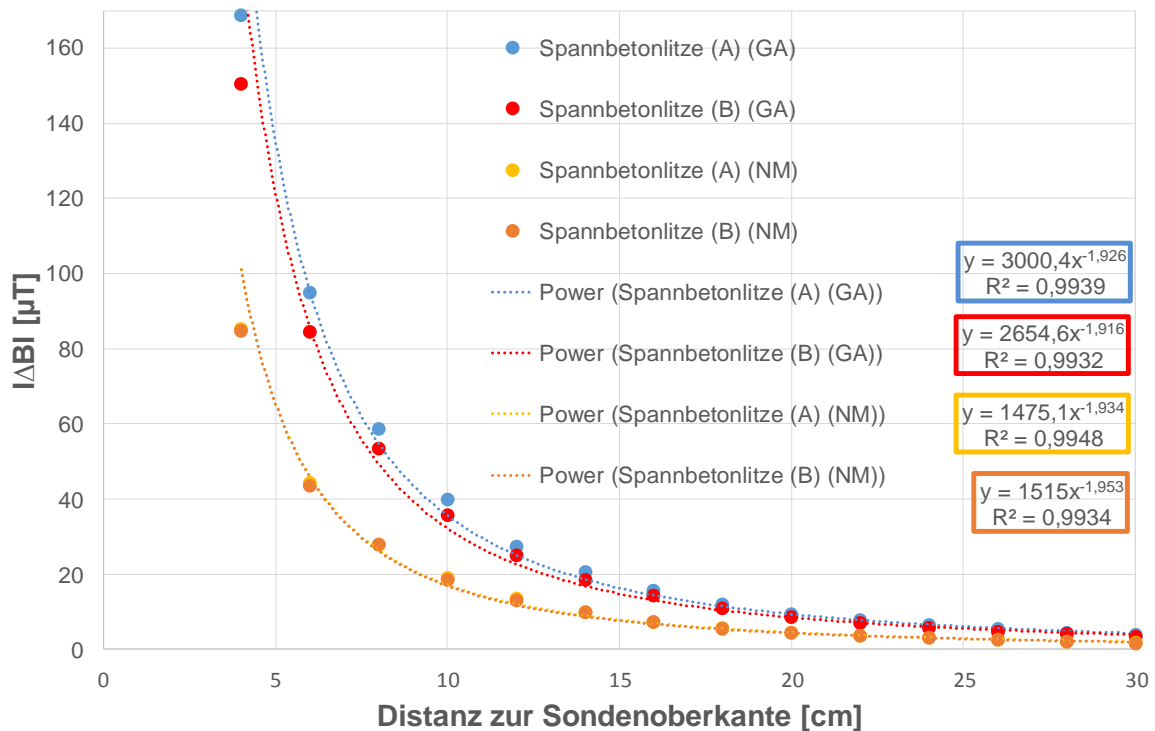


Abb. 107: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte ‚Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA ‚Süd‘.

3.3.4.1.3 Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Im nächsten Schritt wurden die Messungen der nicht magnetisierten und magnetisierten Proben aus Kap. 3.3.4.1.1, unter Einsatz des Eisenzylinders zur Simulation der Hilfsverrohrung im Bohrloch, wiederholt. Abb. 108 zeigt die Ergebnisse der Messungen der nicht magnetisierten Proben als Differenzkarten.

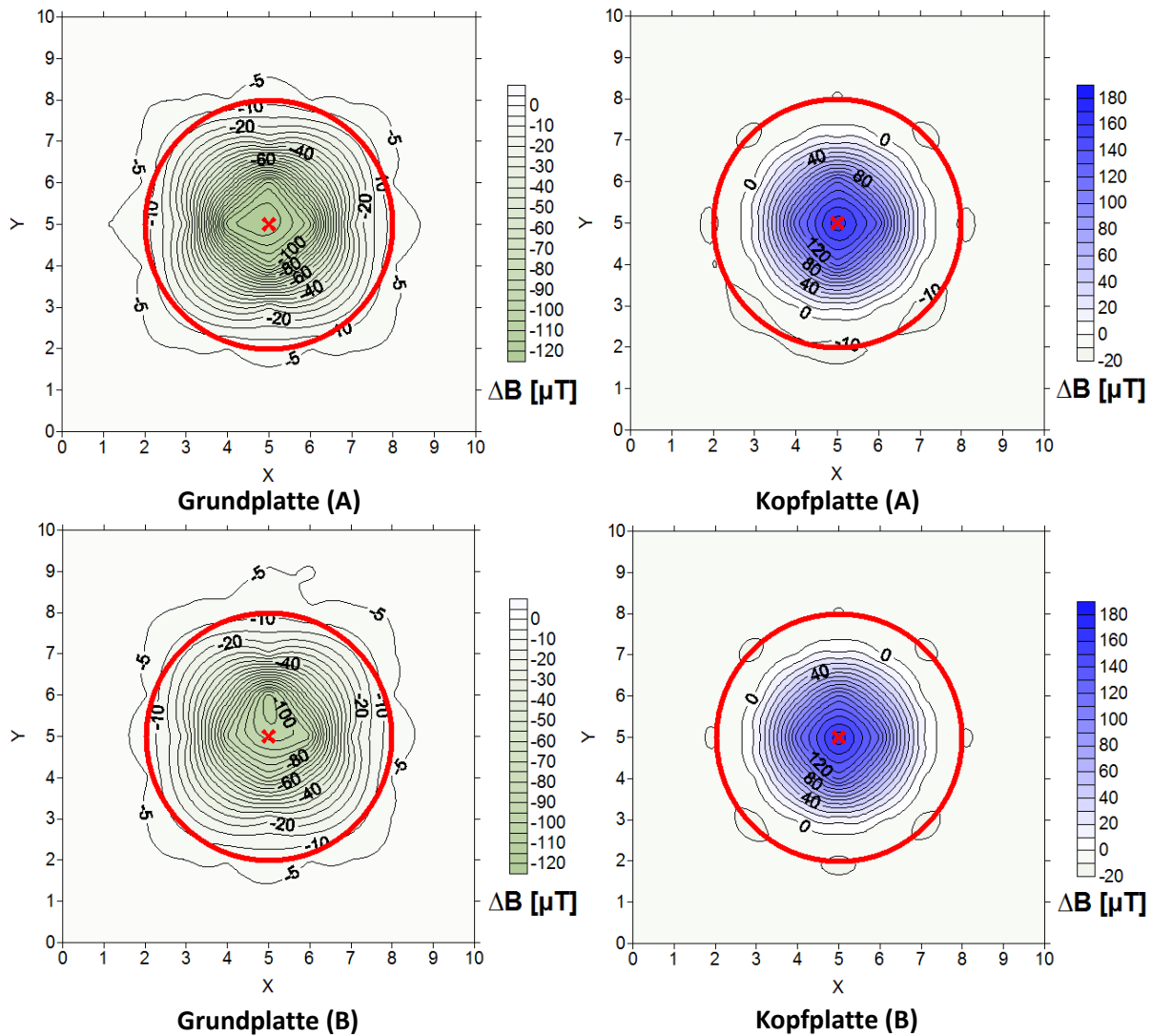


Abb. 108: \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sonde in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.

Die Ergebnisse der Proben A & B können als sehr gut reproduzierbar betrachtet werden, sowohl von den Mustern als auch von den Wertebereichen her. Bei einem grob visuellen Vergleich mit den gleichen Proben ohne Zylinder (Abb. 104) kann man erkennen, dass auf Grund- und Kopfplatte das Flussdichtesignal abgeschwächt wird. Ein genauerer Vergleich bzw. Berechnungen im Hinblick auf die Messsignalreichweite werden im Folgenden Kap. 3.3.4.1.4 noch genauer betrachtet. Das vorliegende Kapitel dient nur einer ersten darstellenden Beschreibung.

Abb. 109 zeigt die Ergebnisse der Messungen der magnetisierten Proben als Differenzkarten.

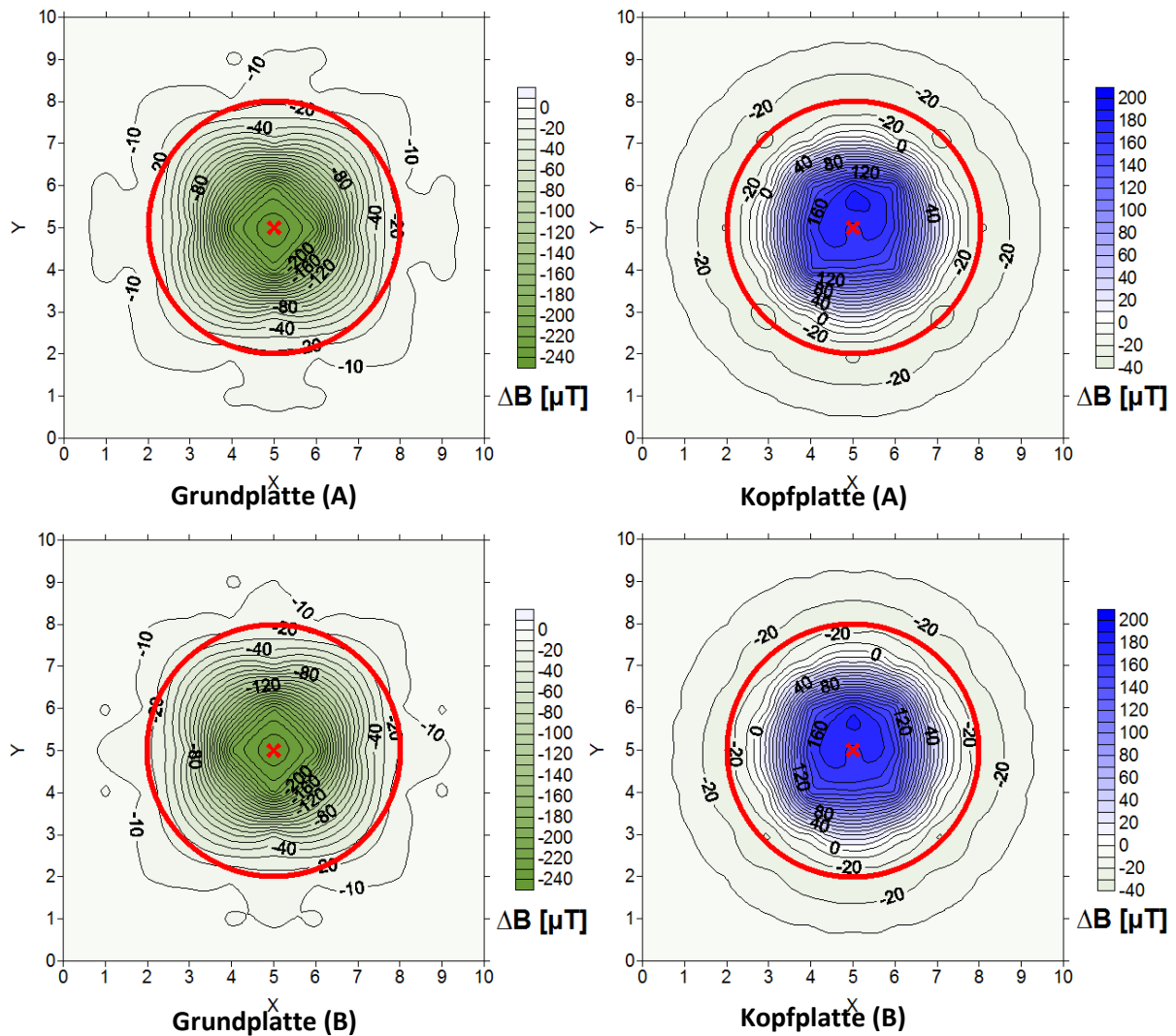


Abb. 109: \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.

Es muss erwähnt werden, dass bei beiden Proben die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Grundplatte, bei den Koordinaten $X/Y = 4/5, 5/4, 5/6$ und $6/5$ jeweils die untere Messgrenze von $-200 \mu\text{T}$ erreicht haben. Ebenso bei beiden Proben auf der Kopfplatte bei den Koordinaten $X/Y = 4/4, 4/5, 5/4, 5/5, 5/6, 6/4$ und $6/5$ die obere Messgrenze von $200 \mu\text{T}$. Das heißt, dass diese Werte in Wirklichkeit noch niedriger bzw. höher sein können, entsprechend können die ΔB Werte in Abb. 109 an den entsprechenden Koordinaten noch deutlichere Anomalien hervorrufen. Die Beobachtungen sind hier im Prinzip die gleichen wie bei den nicht magnetisierten Proben nur mit einer insgesamt größeren Signalreichweite.

3.3.4.1.4 Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder

In Abb. 110 ist die laterale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 108 und Abb. 109 mit magnetisierter und nicht magnetisierter Spannbetonlitze gezeigt. Für die folgenden

Berechnungen der maximalen lateralen Signalreichweite wird wieder ein Wert von $1,5 \mu\text{T}$ für y eingesetzt. Angewendet auf die Regressionsgleichungen in Abb. 110 kann somit für die magnetisierten Proben ein signifikantes Signal bis 28,8 cm vom Sondenmittelpunkt bei Probe A, und 27,1 cm bei Probe B, und für die nicht magnetisierten Proben bis 22 cm bei Probe A und bis 21,3 cm bei Probe B ermittelt werden.

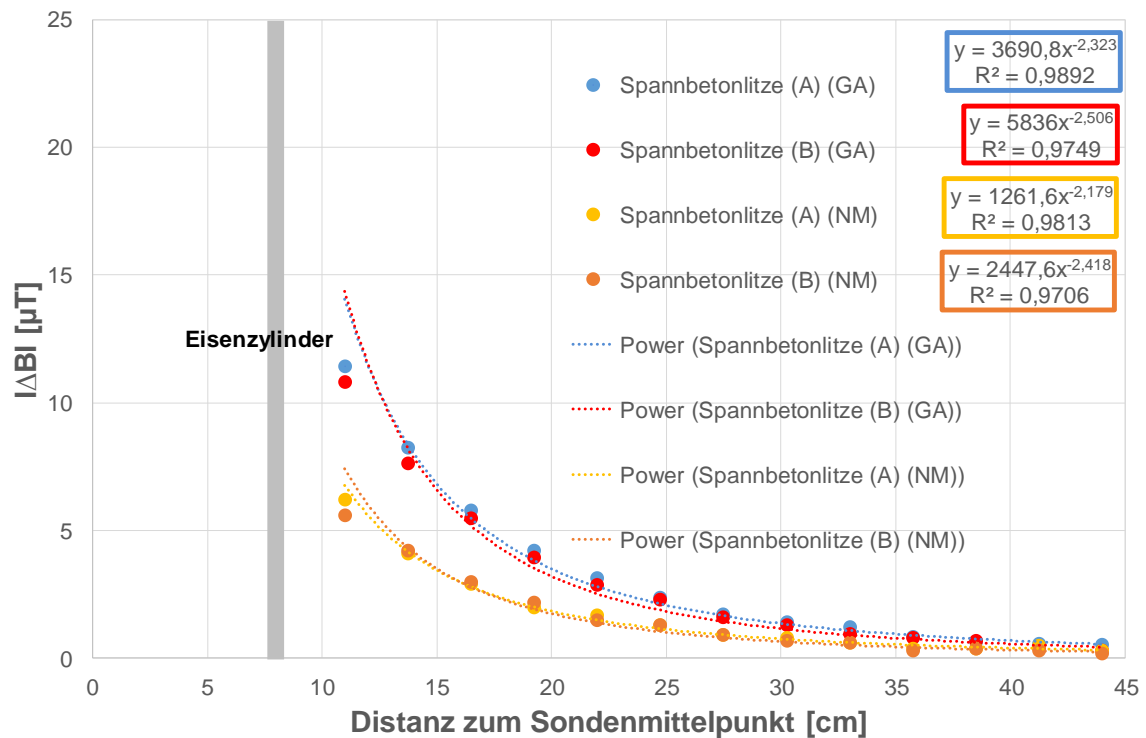


Abb. 110: Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 15,6$ mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Eisenzylinder, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.

In Abb. 111 ist die vertikale Messsignalreichweite dargestellt. Ein signifikantes Signal ($1,5 \mu\text{T}$) kann bei den magnetisierten Proben bis 36,9 cm oberhalb der Sondenoberkante für Probe A und 35,1 cm für Probe B ermittelt werden. Für die nicht magnetisierten Proben ergibt sich eine Distanz bis 26 cm für Probe A und bis 25,3 cm für Probe B.

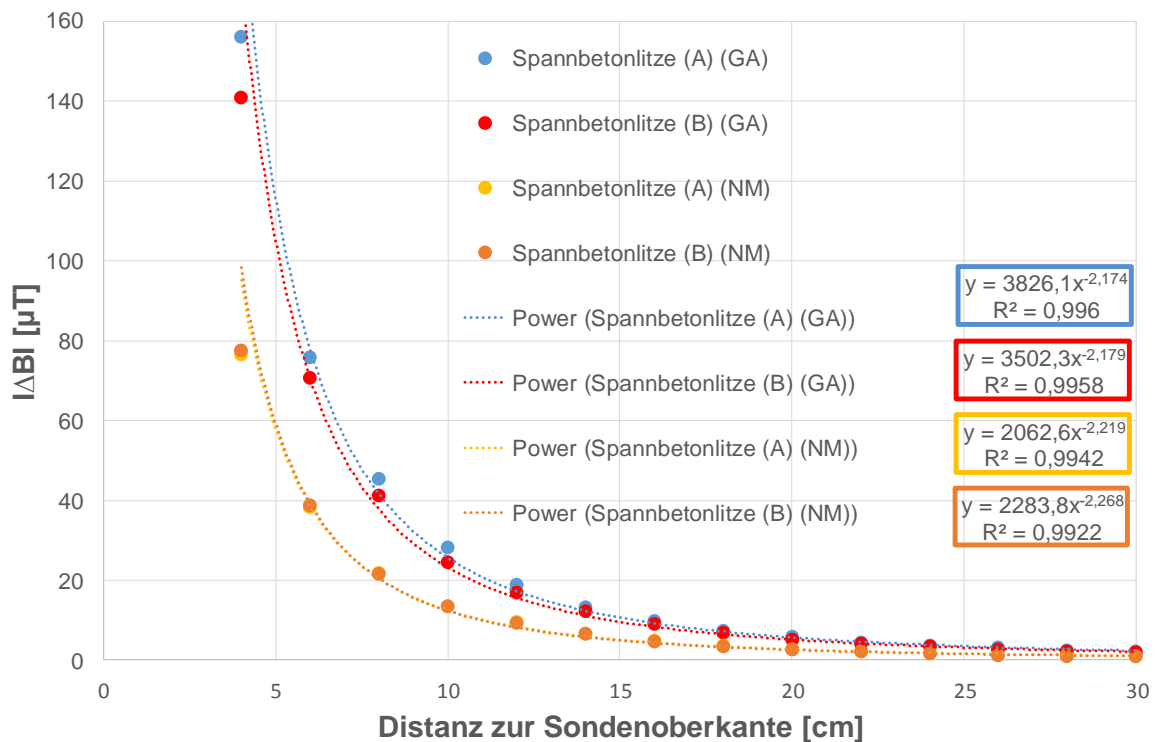


Abb. 111: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitze, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Eisenzylinder, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA „Süd“.

3.3.4.2 Vergleich der Ergebnisse der Spannbetonlitze

Tab. 16 zeigt eine Zusammenfassung der lateralen Signalreichweite für die Spannbetonlitze ohne und mit Eisenzylinder und mit und ohne Magnetisierung.

Tab. 16: Zusammenfassung der lateralen und vertikalen Signalreichweiten für die Spannbetonlitze, Signifikantes Signal ab $1,5 \mu T$ (OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder, (M) = Magnetisiert, (NM) = Nicht magnetisiert).

Laterale Signalreichweite Spannbetonlitze [cm]		Vertikale Signalreichweite Spannbetonlitze [cm]	
1 Rohr		1 Rohr	
OZ	MZ	OZ	MZ
43,0; 41,8 (M)	28,8; 27,1 (M)	51,8; 49,6 (M)	36,9; 35,1 (M)
32,0; 31,7 (NM)	22,0; 21,3 (NM)	35,3; 34,5 (NM)	26,0; 25,3 (NM)

Es ist festzustellen, dass ein deutlich abschwächender Einfluss auf das Messsignal vom Eisenzylinder ausgeht. Die Abschwächung kann bei den magnetisierten Proben sowohl für das laterale, als auch für das vertikale Signal im Schnitt mit 31,6 % angegeben werden, wobei beim lateral Signal 34,1 % und beim vertikalen Signal 29,0 % erreicht werden. Bei den nicht magnetisierten Proben liegt die Abschwächung im Schnitt bei 29,3 %, wobei beim lateralen Signal 32,0 % und beim vertikalen 26,5 % erreicht werden.

Durch die Magnetisierung kann im Schnitt eine Ausdehnung der lateralen Signalreichweite um 33,1 % (OZ) und 29,1 % (MZ) sowie die vertikale Signalreichweite um 45,3 % (OZ) und 40,4 % (MZ) erreicht werden.

3.3.4.3 Versuche mit Messmodul in einem Bohrröhr

Entsprechend Kapitel 3.3.3.6 wurden auch mit der Spannbetonlitze Versuche mit Bohrröhr und Messmodul durchgeführt. Beim Szenario mit der magnetisierten Spannbetonlitze innerhalb des Bohrröhrs wurde an allen Messpunkten von 0 – 350 ° die obere Messgrenze der GEO-X Sonde überschritten, d.h. jeder Wert entlang des Kreises entsprach 200 μT (Abb. 112), d.h. auch, dass das tatsächliche Signal noch größer sein kann als die Abbildung darstellt.

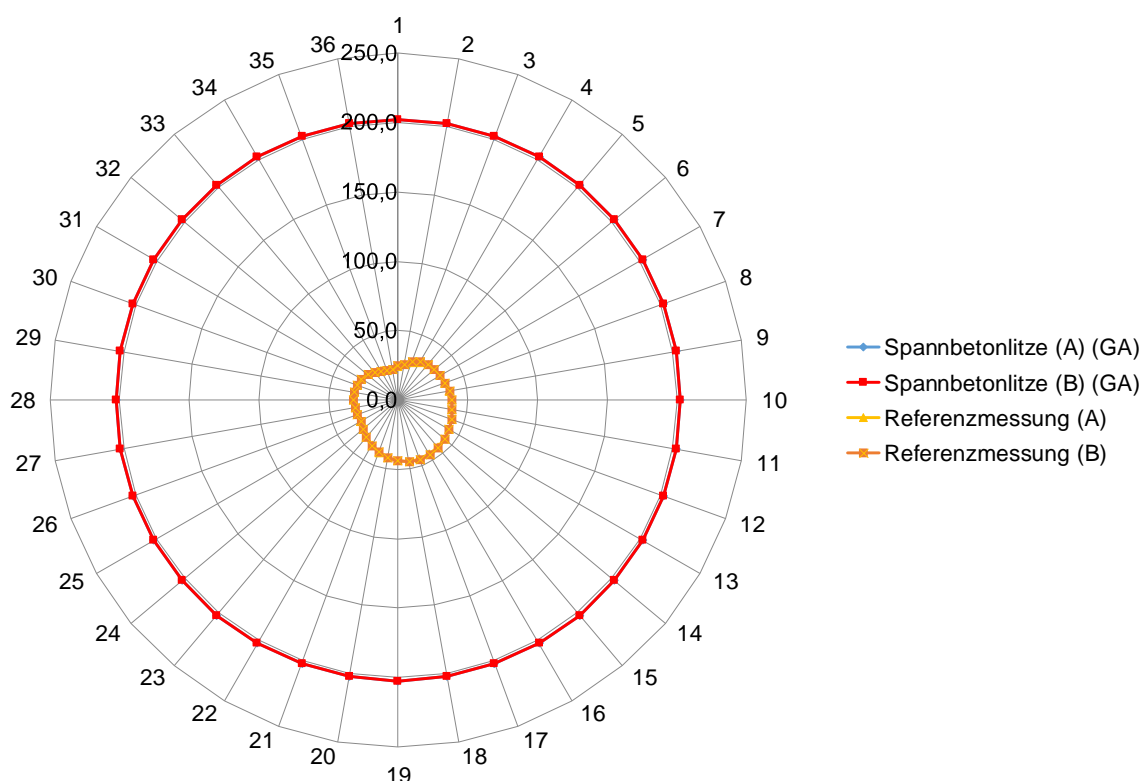


Abb. 112: Messergebnisse mit magnetisierten (MIR mit GA „Süd“) \varnothing 15,6 mm Spannbetonlitzten von 0 – 350 ° in μT .

Entsprechend den Stahldrahtseilen wurde auch für die Ankerlitze die vertikale Reichweite im Bohrröhr ermittelt. Für die folgende Abb. 113 wurden von den 36 Messwerten jedes Niveaus, jeweils 36 Referenzmesswerte des Niveaus abgezogen, um das ΔBI zu erhalten. Aus diesen jeweils 36 ΔBI -Werten für jedes Niveau wurde ein Durchschnittswert für jedes Niveau als Input für Abb. 113 errechnet. Es muss erwähnt werden, dass die Werte des Basisniveaus allesamt die Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht haben, in Wirklichkeit also noch höher sein können. Deshalb wurde das Basisniveau bei der Analyse ausgelassen.

Unter Annahme eines Signifikanzwerts von $2,5 \mu T$ ergibt sich eine vertikale Reichweite von $66,4 \text{ cm}$ für Probe A und $63,9 \text{ cm}$ für Probe B.

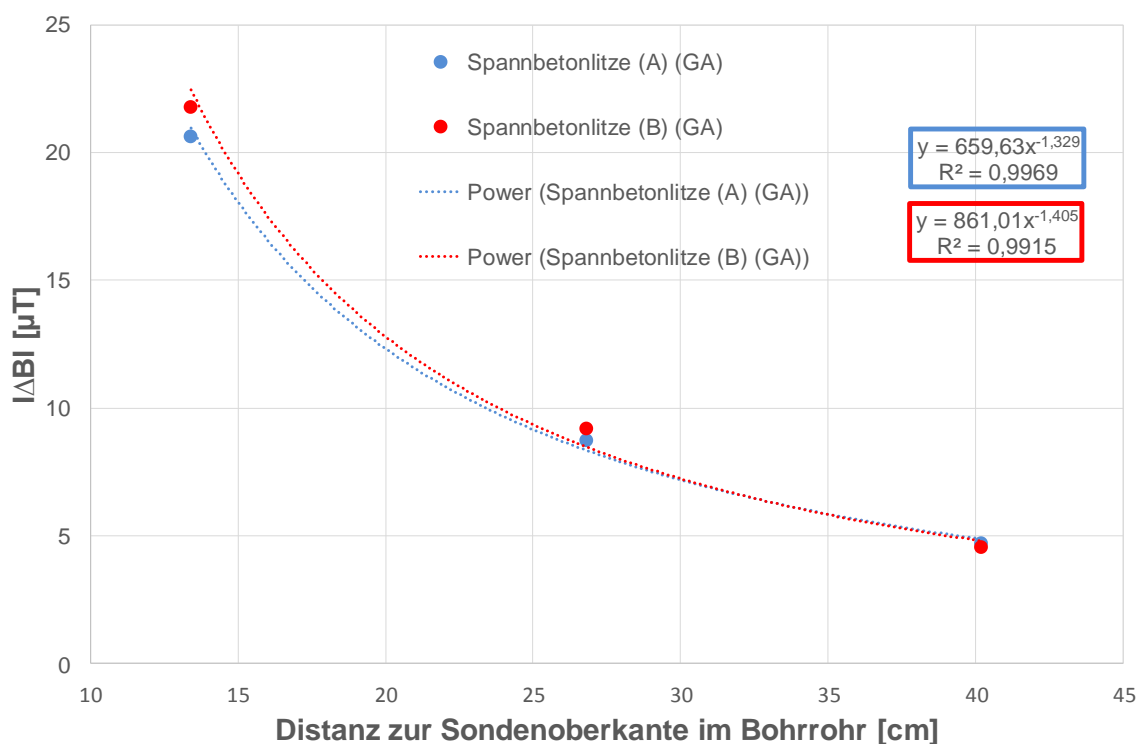


Abb. 113: ΔBI in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrröhr.

Des Weiteren wurde auch hier ein Tiefenprofil des Signals für zwei Spannbetonlitzten (Probe A und B) erstellt (Abb. 114). In erster Linie zeigt die Tiefenprofilmessung ein ähnliches Muster wie es auch bei den Stahldrahtseilen aufgetreten ist. Zu den Enden der Spannbetonlitze nimmt der Abstand zwischen Erdwärmeröhr und Bohrröhr mit Messmodul stark ab. Zur Mitte hin nimmt der Abstand zu. Dies kann wieder, analog zu den Stahldrahtseilen, mit dem Schema in Abb. 102 erklärt werden und unterstreicht auch hier wieder die Schlussfolgerung, dass das Feld der Spannbetonlitze, wie auch das der Stahldrahtseile, einem Stabmagneten ähnelt. A und B Probe sind gut reproduzierbar. Auch hier lässt sich wieder ein einigermaßen stabiler Signalbereich zwischen 20 und 70 cm Messmodultiefe für Probe A und 40 bis 80 cm für Probe

mit einer Exponentialfunktion, die sich besser anpasst, durchgeführt. Der Effekt auf die Reichweite bleibt jedoch letztlich derselbe.

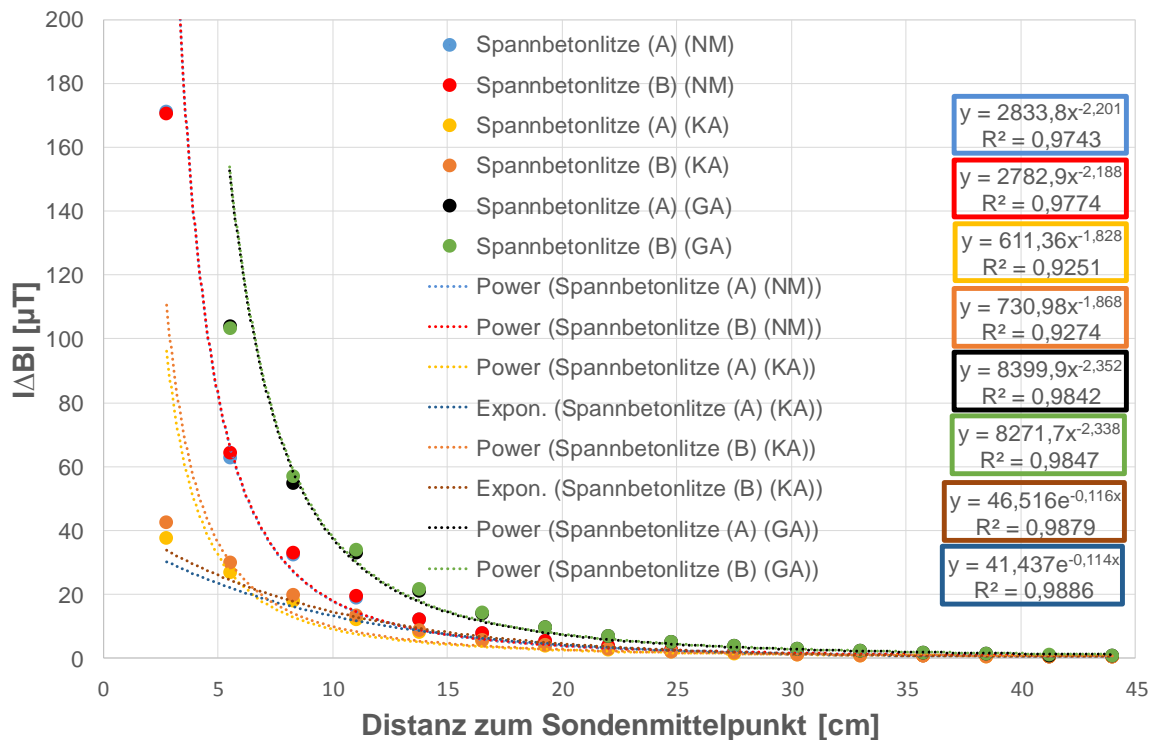


Abb. 115: Vergleich der Messsignalreichweite der Spannbetonlitzen, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA und KA „Süd“.

Die sich ergebenden Werte bei Annahme eines Signifikanzwerts von $1,5 \mu T$ sind in Tab. 17 zusammengefasst. Der sehr geringe Unterschied der nicht magnetisierten Proben (NM) im Vergleich zu Tab. 16 liegt darin begründet, dass für vorliegende Untersuchung nochmal neue Proben verwendet wurden.

Tab. 17: Zusammenfassung der lateralen Signalreichweiten für die Spannbetonlitze, Nicht magnetisiert (NM) und MIR mit GA und KA „Süd“. Signifikantes Signal ab 1,5 μT (OZ = Ohne Zylinder, NM = Nicht magnetisiert, KA = Magnetisiert mit kleinem Aufsatz, GA = Magnetisiert mit großem Aufsatz, Pot = Potenzfunktion, Exp = Exponentialfunktion).

Laterale Signalreichweite Spannbetonlitze [cm]					
1 Rohr					
OZ					
NM		KA		GA	
A	B	A	B	A	B
30,8	31,2	26,8 (Pot)	27,5 (Pot)	39,2	39,8
		29,1 (Exp)	29,6 (Exp)		

Es kann nur vermutet werden, dass der in Abb. 115 beobachtete Effekt auf die Magnetisierung bzw. den speziellen Magnetisierungsvorgang mit den Magnetaufsätzen zurückzuführen ist. Wie schon im Kap. 3.2.17.1 zu Abb. 22 erklärt wurde, erfährt eine Probe drei Stufen der Magnetisierung im Magnetisierungsstand. Mit dem Aufsatz KA wird in der ersten Stufe mit einem Betrag von 14 mT magnetisiert, bei Stufe zwei mit einem Betrag von 57,4 mT (entgegengesetzt gepolt zu Stufe 1) und in der dritten Stufe mit dem Betrag von 13,3 mT (gleiche Polung wie Stufe 1). Bei GA beträgt Stufe 1 39,2 mT, Stufe 2 204,8 mT und Stufe 3 37,2 mT. Es wäre möglich, dass die 13,3 mT der Stufe 3 von KA nicht ausreichend sind, um die Umpolung der Spannbetonlitze, die in Stufe 2 bei 57,4 mT stattgefunden hat, vollständig rückgängig zu machen. So hat jedes ferromagnetische Material eine sogenannte Koerzitivität, die laut DIN EN 10330 die magnetische Feldstärke darstellt, die erforderlich ist, um die magnetische Polarisation einer Magnetprobe auf null zu reduzieren nachdem diese bis zur Sättigung aufmagnetisiert worden war. Einfach ausgedrückt beschreibt sie den Widerstand eines Magneten gegen Umpolungsversuche gegen ein entgegen gerichtetes Magnetfeld. So scheinen die 39,2 mT des GA ausreichend zu sein um die Probe umzupolen und über das initiale B-Feld der nicht magnetisierten Probe zu heben.

Im ersten Moment erscheint dies nicht ganz plausibel, wenn man das Verhältnis der Feldstärken von Stufe 1 zu Stufe 2 sowie von Stufe 3 zu Stufe 2 jeweils bei KA und GA betrachtet. Gerundet ergibt dieses Verhältnis immer 0,2, d.h. man würde bei KA und GA denselben Effekt erwarten. Allerdings ist hier zusätzlich zu beachten, dass jedes Material eine bestimmte Sättigungsmagnetisierung hat. Bezieht man dies mit ein, so wäre z.B. eines von vielen denkbaren Szenarien, dass die Sättigungsmagnetisierung der Spannbetonlitze z.B. bereits bei 57,4 mT erreicht ist (Stufe 2, KA). Somit würde eine gleichgepolte Magnetisierung bei 204,8 mT (GA) gar keinen zusätzlichen Effekt mehr auf das resultierende B-Feld der Probe haben. D.h., dass die Probe sowohl bei KA als auch bei GA, beim Magnetisieren am Übergang

von Stufe 2 zu Stufe 3 die gleiche initiale Magnetisierung, nämlich die Sättigungsmagnetisierung aufweisen würde und somit Stufe 3 bei GA eine stärkere Umpolung hervorrufen könnte als dieselbe Stufe bei KA.

Eine Erklärung dafür, dass dieser Effekt nicht auch bei den beiden Stahldrahtseilen aufgetreten ist, könnte an dieser Stelle nur mit den unterschiedlichen Stählen erklärt werden, die für die Herstellung der Stahldrahtseile bzw. der Spannbetonlitze verwendet werden. Unterschiedliche magnetische Eigenschaften sind hier denkbar, auch der wesentlich größere Durchmesser der Spannbetonlitze im Vergleich zu den Seilen kann hier eine Rolle spielen.

Diese Erklärungen sind wie erwähnt nur rein hypothetisch und können und werden an dieser Stelle nicht vertieft untersucht.

3.3.4.5 Einfluss von magnetisch dotiertem Zement und Mag-Logs auf das Messsignal

Im Kap. 3.3.3.5 wurde bereits der Einfluss der geologischen Gegebenheiten auf magnetische Signale, am Beispiel der Stahldrahtseile, erläutert. Eine weitere Frage im Kontext von EWS-Bohrungen ist jedoch auch der Einfluss der EWS Hinterfüllung, da bei zukünftigen EWS Bohrungen von einem Trend hin zu immer mehr magnetisch dotierten Hinterfüllungen auszugehen ist, aus Gründen der Qualitätssicherung. Da diese neuartigen Zemente ferromagnetische Partikel enthalten und mit Mag-Logs befahren werden, ist die Frage inwieweit diese das magnetische Signal von Kontrastmitteln für den Rückbau beeinflussen können. Um diese Frage zu klären wurden Untersuchungen mit einem ähnlichen Aufbau wie in Kap. 3.3.3.5 durchgeführt, am Beispiel der Spannbetonlitze.

Magnetisch dotierte Zemente dienen der Überprüfung der Verfüllqualität bei einer EWS. Hierzu werden sogenannte Mag-Logs verwendet, die eine aktive magnetische Quelle enthalten. Das Magnetfeld der Quelle verändert sich in der Nähe von magnetischen Partikeln bzw. bleibt unverändert, z.B. im Bereich von Fehlstellen in der Zementierung. Diese Unterschiede können in Form eines Tiefenprofils dargestellt werden und somit Bereiche mit minderwertiger Verfüllung identifiziert werden. Für den folgenden Versuch wurde ein Cem Trakker (Kap. 3.2.13) und Schwenk Füllbinder H-hs plus (Kap. 3.2.11) verwendet, analog zum Feldversuche im Projekt an einer 100 m EWS auf dem Betriebsgelände der Fa. Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 116 gezeigt. Der Unterschied zum Versuch in Kap. 3.3.3.5 ist zum einen die Verwendung der Spannbetonlitze und zum anderen, dass das Verfüllrohr von einem Kunststoffzylinder (\varnothing 10 cm) umschlossen ist, in den im Verlauf des Versuchs eine Füllbinder H-hs Suspension mit $W/F = 0,7$ eingegeben wird. Ansonsten sind der Aufbau und die Dimensionen des Versuchs identisch.

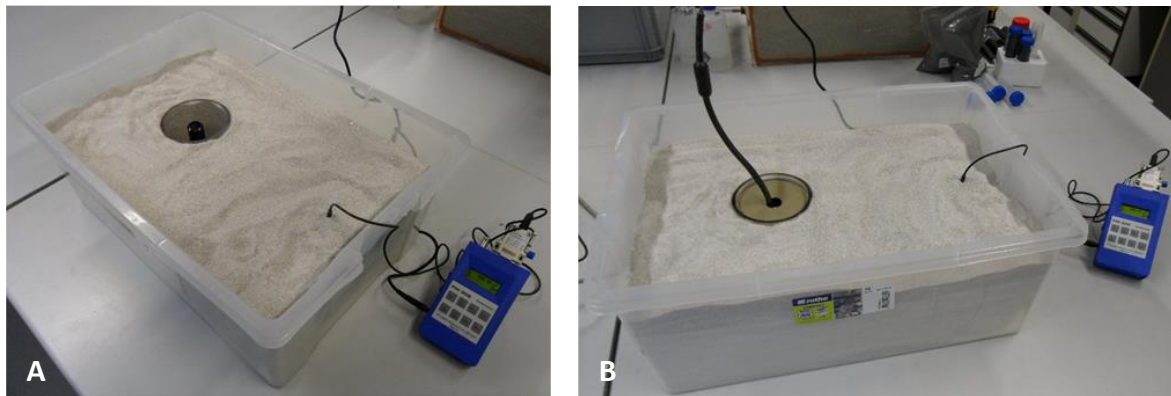


Abb. 116: (A) Versuchsaufbau mit trockenem Sand und Kunststoffzylinder (\varnothing 10 cm) um Sondenrohr vor der Verpressung, (B) Versuchsaufbau nach Eingabe der Füllbinder H-hs Suspension; Cem Trakker Sonde in Sondenrohr eingelassen.

Der Versuch ist in 12 Schritte eingeteilt (Tab. 18) mit denen systematisch der Einfluss des Zements bzw. des Cem Trakkers auf das laterale Messsignal B [μ T] der Spannbetonlitze untersucht werden kann.

Tab. 18: Schritte und Ergebnisse des Einflusses des Zements bzw. des Cem Trakkers auf das laterale Messsignal der Spannbetonlitze (CT = Cem Trakker, SBL = Spannbetonlitze).

Schritt Nr.	Beschreibung	Signal Teslameter B [μ T]	Signal Cem Trakker [-]	Bemerkung
1	Leeres Sondenrohr + kein Zement	40,9	---	Referenz für B
2	CT(aus) in Sondenrohr + kein Zement	40,4	---	$ B_1 - B_2 = \Delta B = 0,5$, Einfluss des Stahlseils des CT
3	CT(an) in Sondenrohr + kein Zement (CT Referenzierung in der Sonde)	40,4 (nach CT Ausbau wieder 40,9)	0 (nicht relevant, da CT in der Sonde referenziert)	$ B_1 - B_3 = \Delta B = 0,5$, Einfluss des Stahlseils des CT, CT Quelle hat kein Einfluss
Weiter auf nächster Seite				

4	CT(an) in Sondenrohr + kein Zement (CT Referenzierung an der Luft)	40,3 (nach CT Ausbau wieder 40,9)	0	Versuchsaufbau mit Sand etc. hat kein Einfluss auf CT Signal, Abweichung von 0,1 gegenüber Schritt Nr.3 hängt mit Aus/Einbau der CT Sonde zusammen.
5	SBL in Sondenrohr + kein Zement	36,3 (nach SBL Ausbau wieder 40,9)	---	$ B_1 - B_5 =$ $ \Delta B = 4,6,$ Laterales Signal SBL
6	Leeres Sondenrohr + Zement	40,9	---	$ B_1 - B_6 =$ $ \Delta B = 0,$ Zement hat kein Einfluss auf B
7	SBL in Sondenrohr + Zement	36,3 (nach SBL Ausbau wieder 40,9)	---	$ B_6 - B_7 =$ $ \Delta B = 4,6,$ Laterales Signal SBL, Zement hat kein Einfluss auf B
8	CT(aus) in Sondenrohr + Zement	40,3	---	$ B_6 - B_8 = \Delta B = 0,6,$ Einfluss des Stahlseils des CT
Weiter auf nächster Seite				

9	CT(an) in Sondenrohr + Zement (CT Referenzierung in der Sonde)	40,3 (nach CT Ausbau wieder 40,9)	0 (nicht relevant, da CT in der Sonde referenziert)	$ B_6 - B_9 = \Delta B = 0,6$, Einfluss des Stahlseils des CT, CT Quelle hat kein Einfluss
10	CT(an) in Sondenrohr + Zement (CT Referenzierung an der Luft)	40,5 (nach CT Ausbau wieder 40,9)	7,52	Hinterfüllung mit CT detektiert Abweichung von 0,2 gegenüber Schritt Nr.9 hängt mit Aus/Einbau der CT Sonde zusammen.
11	Leeres Sondenrohr + Zement (nach CT Befahrung der Sonde)	40,9	---	Dotierter Zement hat auch nach CT Befahrung kein Einfluss auf B
12	SBL in Sondenrohr + Zement (nach CT Befahrung der Sonde)	36,3	---	Laterale Signal der SBL bleibt nach zementieren und Logging unverändert (=Schritt 5)

Das kurze Fazit aus diesen Untersuchungen ist, dass die dotierten Baustoffe sowohl vor, als auch nach der Befahrung mit dem Cem Trakker keinerlei Einfluss auf das laterale Signal der Spannbetonlitze haben. Dies ist dadurch zu erklären, dass das B-Feld der Magnetit-Dotierung zu schwach ist, ebenso wie die Quelle der Cem Trakker Sonde, um Störungen hervorzurufen. Auch in einem einfachen Test beim annähernd der aktiven Cem Trakker Sonde an die Geo-X Sonde zeigt sich keinerlei Veränderung des Flussdichtewerts, wobei eine sehr geringe Veränderung ($< 1 \mu T$) schon zu verzeichnen ist, allerdings ist diese eher auf das metallische Kabel, an dem die Cem Takker Sonde hängt, zurückzuführen.

3.3.4.6 Kosten der Methode

Die hier bestellte Spannbetonlitze kostete 1,3 €/m bzw. 3,25 €/m incl. Transportkosten. Für eine Standard 100 m Sonde kommt man so auf Kosten von 130 € bzw. 325 € incl. Transportkosten.

3.3.4.7 Fazit

Die untersuchte Methode mit der Spannbetonlitze erscheint als brauchbar für das geplante Rückbaukonzept, dabei ist vor allem die Kopplung zweier Submethoden zur richtungsorientierten Bohrung hervorzuheben. Die Methode beinhaltet zum einen die rein mechanische Bohrausrichtung durch das Dirigieren des Bohrkopfs entlang der in die EWS einzementierten Spannbetonlitzen, sowie die Messung des magnetischen Signals der Litzen. Die primäre Submethode kann dabei die Mechanische sein. Gegeben dem Fall, dass die Spannbetonlitzen durch den Bohrvorgang beschädigt bzw. durchtrennt werden, können die in den Sondenrohren verbliebene Litzen mittels magnetischer Messungen detektiert werden und die Bohrausrichtung mit dieser sekundären Methode fortgeführt werden.

Die Spannbetonlitze hat bereits ein gewisses Eigenfeld, das dem eines Stabmagneten gleicht und sich in einzelnen Ebenen waagrecht zur Längsachse der Litze sehr homogen bzw. konzentrisch darstellt. Dieser Punkt ist wichtig, da so rund um die Litze herum, in allen Himmelsrichtungen, von einem gleichmäßigen Feld bzw. Signal ausgegangen werden kann, jedoch nicht im Tiefenprofil. Das initiale B-Feld der Spannbetonlitze kann und sollte durch Magnetisierung verstärkt werden, um eine bessere Signalreichweite zu erhalten. Ein positiver Aspekt ist, dass auch nach der Magnetisierung das Feld weiterhin gleichmäßig erscheint, nicht jedoch in die Tiefe. Eine Sättigungsmagnetisierung konnte in dieser Arbeit nicht erzeugt bzw. nachgewiesen werden, so dass die Möglichkeit besteht, dass das Signal der Litze sich bei stärkerer Magnetisierung noch stärker darstellt. Jedoch ist das Signal nicht über den Tiefenverlauf der Spannbetonlitze konstant, sondern verläuft nahezu parabelförmig zur Mitte hin zu, wo sich der Scheitelpunkt und somit die größte Signalreichweite befindet. Begründet liegt das im Feldlinienverlauf ähnlich dem eines Stabmagneten.

Ein ganz wesentlich limitierender Faktor im Hinblick auf die Signalreichweite ist das Vorhandensein einer Stahlverrohrung im Bohrloch. Die maximal noch detektierbare laterale Signalreichweite lag in dieser Arbeit bei ca. 80 cm bei den Versuchen im Bohrrohr. Die vertikale Signalreichweite betrug ca. 65 cm. Aus den Versuchen im Messstand konnte eine laterale Abschwächung von 34,1 % und eine vertikale Abschwächung von 29,0 % durch ein Bohrrohr ermittelt werden. Für den Anwendungsfall bedeutet dies, dass man nach Möglichkeit versuchen sollte, ein Bohrrohr unmittelbar im Messbereich zu vermeiden, wie schon bei den Stahldrahtseilen ausgeführt wurde (Kap. 3.3.3.8)

Ebenfalls gilt, wie bei den Stahldrahtseilen ausgeführt, die Notwendigkeit einer Referenzmessung.

Auf Untersuchungen des Einflusses der geologischen Gegebenheiten auf das Messsignal der Spannbetonlitze wurde verzichtet, da dies bereits ausführlich für die Stahldrahtseile durchgeführt wurde (Kap. 3.3.3.5) und diese als repräsentativ für alle Kontrastmittel angenommen werden können.

Die Kosten der Spannbetonlitzten-Methode sind überschaubar. Für die Bestückung eines einzelnen Sondenstrangs, einer Standard 100 m EWS sind nur 325 € nötig. Das sind gerade mal 3,25 % Materialkosten für das Kontrastmittel für einen Strang, ausgehend von den geplanten Gesamtkosten für die Rückbaumethode von 10 k€.

3.3.5 Magnetkugeln als Kontrastmittel

3.3.5.1 Untersuchung der Methode

3.3.5.1.1 Versuche ohne Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Angelehnt an Kap. 3.3.2 war eine weitere Idee für ein Kontrastmittel die Verwendung von Magnetkugeln. Der Vorteil gegenüber Stahlkugeln liegt hier beim Einbau und der Orientierung der Kugeln, da sich die Kugeln bedingt durch das Magnetfeld selbst orientieren. Somit ist bei der Installation kein Hilfsmittel wie z. B. die Verwendung eines Schlauchs notwendig. Darüber hinaus ist auch von einem wesentlich stärkeren B-Feld auszugehen. Für die folgenden Versuche wurden \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln verwendet. Abb. 117 zeigt eine solche Neodym-Magnetkette neben einem Sondenrohr.



Abb. 117: Links: Sondenrohr mit grauem Stöpsel am Boden; In der Mitte: Neodym-Magnetkugelnkette bestehend aus 11 x \varnothing 12,7 mm Kugeln

Im Vergleich zu den Stahldrahtseilen wird hier auf Szenarien mit 2 und 4 Rohren verzichtet. Dies liegt daran, dass die Magnetkugeln sehr teuer sind und somit eine Ausstattung mehrerer Sondenstränge im Realfall zu kostenintensiv wäre. Eine Kostenanalyse ist in Kap. 3.3.5.4 aufgeführt. Um die Kosten für die Realanwendung zu minimieren, wurden zusätzlich eine Reihe von Mischkette aus günstigeren Stahlkugeln und Neodymmagnetkugeln untersucht. Es wurden dabei unterschiedliche Szenarien getestet, von einer Kette, die nur aus Magnetkugeln besteht, bis hin zu einem Szenario, in dem nur noch jede 5. Kugel eine Magnetkugel war.

In Abb. 118 sind die Ergebnisse für das 1 Rohr Szenario für eine ausschließlich aus Magnetkugeln bestehende Kette dargestellt. Es muss hier erwähnt werden, dass der Versuchsstand etwas modifiziert werden musste, um diese Messungen durchführen zu können. In kurzen Voruntersuchungen zeigte sich, dass sich, wie schon bei den Stahldrahtseilen und der Spannbetonlitze, das Magnetfeld einer Magnetkugelnkette wie das eines Stabmagneten darstellt. Dabei entspricht die Stabmagnetlängsachse (Abb. 1) der Längsachse der Magnetkugelnkette. Dies erklärt sich aus der Betrachtung des B-Felds einer einzelnen Magnetkugel (Abb. 119), die genau wie ein Stabmagnet über einen positiven und negativen Pol verfügt. Beim Zusammenführen mehrerer solcher Kugeln wird sich entsprechend eine Kette mit einem positiven Pol und einem negativen Pol am anderen Ende der Kette ausbilden. Eine Herausforderung bei der Messung ist jedoch die Form und Größe der Kugeln, auch im Verhältnis zum B-Feld Sensor. So wurde z.B. in einem Vorversuch beim direkten Anlegen der GEO-X Sonde an beide Pole der Magnetkugelnkette das gleiche Vorzeichen gemessen. Dies erschien unlogisch, doch nach weiteren Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass an einem der beiden vermeintlich positiven Pole, beim langsamen Entfernen der GEO-X Sonde zur Magnetkugelnoberfläche, das Vorzeichen plötzlich von + auf – umsprang, um sich dann, wie gewohnt (siehe auch vertikale Signalmessungen bei Stahldrahtseil und Spannbetonlitze), mit zunehmender Entfernung dem Erdmagnetfeld anzupassen. Dieser Effekt kann nur damit erklärt werden, dass das komplexe Magnetkugelfeld in unmittelbarer Nähe zur Magnetkugel nicht mehr richtig von der GEO-X Sonde aufgelöst werden kann. Dies spiegelt sich auch in den Grundplattenergebnissen wieder (Abb. 118). Die Kugelnkette wurde hier so eingesetzt, dass der nun identifizierte positive Pol nach oben zeigt, in Analogie zu allen vorherigen Untersuchungen mit Stahldrahtseilen, Spannbetonlitzten und dotierten Suspensionen. Die Kopfplatte musste hier um ein paar Zentimeter aufgestockt werden, um das tatsächlich positive Feld darstellen zu können (Abb. 120). Auf der Grundplatte ist erwartungsgemäß ein negatives Vorzeichen zu erkennen, allerdings erscheint in einem Radius von etwa 2,75 cm, um die Kugelnkette herum, das Feld der Grundplatte positiv. Dies ist wohl dem gleichen Effekt zuzuschreiben wie bei den beiden Polen, d.h. das Feld in unmittelbarer Nähe kann nicht mehr korrekt aufgelöst werden.

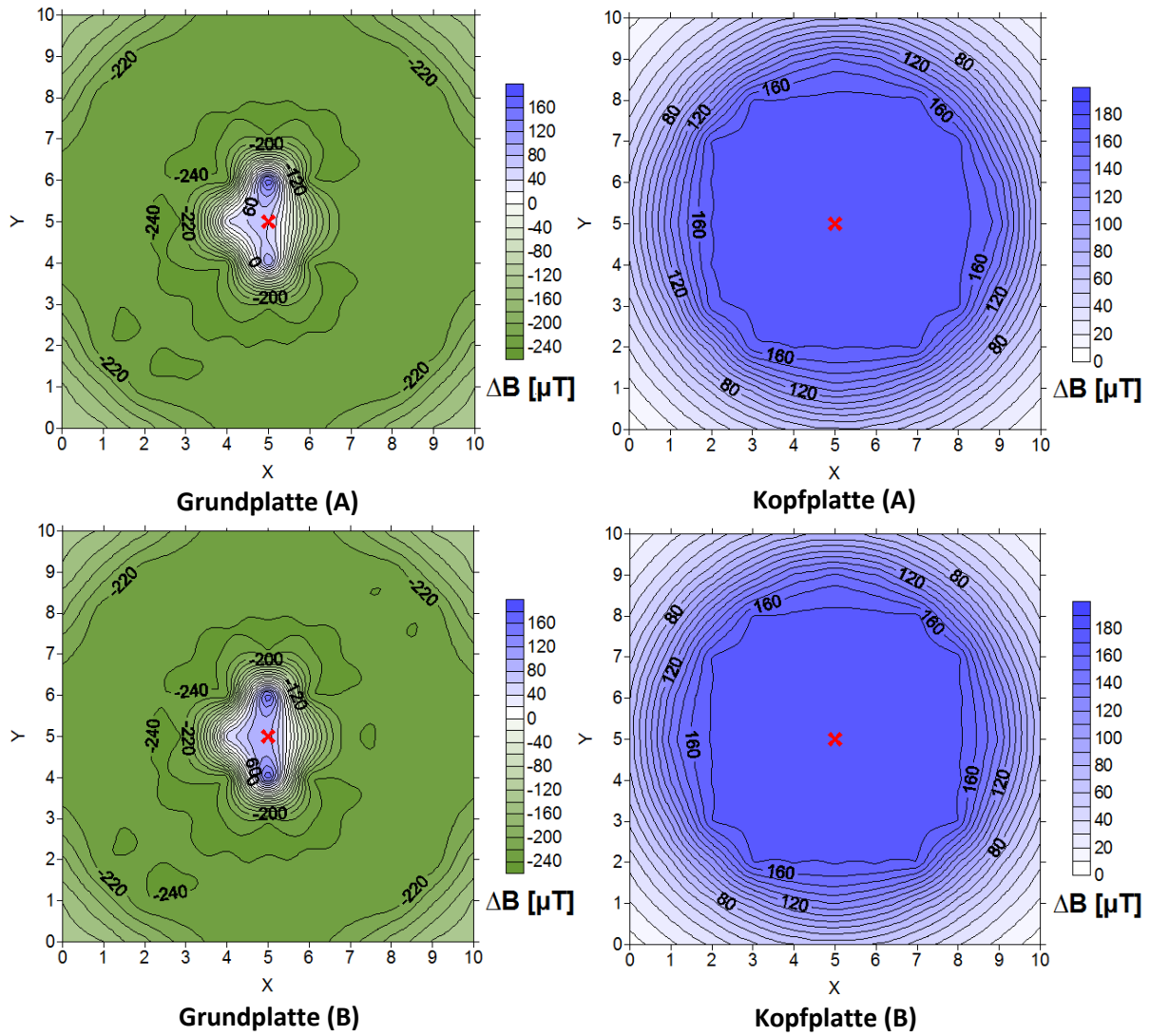


Abb. 118: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte nur mit Magnetkugeln bestückt.

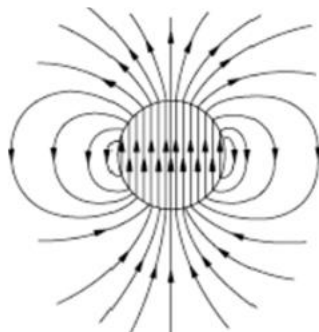


Abb. 119: B-Feld einer Magnetkugel



Abb. 120: Mit Holzklötzen aufgestockte Kopfplatte.

Die Ergebnisse in Abb. 118 zeigen insgesamt eine sehr starke laterale Ausbreitung auf der Grundplatte. Auf die genaue Regressionsanalyse wird im folgenden Unterkapitel eingegangen. Es ist aber zu klären, dass nur ein geringer Teil des aufgezeichneten B-Feldes interpretiert werden kann, da die meisten der Messpunkte die untere Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht haben und, wie schon erwähnt, die Punkte in der Mitte in einem Radius von ca. 2,75 cm um die Kugelkette das Feld nicht richtig auflösen können. Im Prinzip sind nur die Ecken des gemessenen Feldes der Grundplatte als korrekt und interpretierbar einzustufen. Diese deuten ein aus konzentrischen Kreisen ausgebildetes Feld an und sind durch folgende Messpunkte abgedeckt: $X/Y = 0/1, 0/2, 0/3, 0/7, 0/8, 0/9, 1/0, 1/1, 1/9, 1/10, 2/0, 2/10, 3/0, 3/10, 4/0, 4/5, 5/4, 6/0, 6/5, 7/0, 7/10, 8/0, 8/10, 9/0, 9/1, 9/9, 9/10, 10/1, 10/2, 10/3, 10/7, 10/8$ und $10/9$. Auch die Kopfplatte zeigt ein sehr starkes Signal, welches durch die große fast quadratische Fläche um den Punkt $X/Y = 5/5$ angezeigt wird. Hier wurde an jedem Punkt die obere Messgrenze der GEO-X Sonde erreicht. In Wirklichkeit ist ein kegelförmiges Muster mit der Spitze bei $X/Y = 5/5$ zu erwarten. Dies deutet sich außerhalb der quadratischen Fläche in konzentrischen Kreismustern an. Die quadratische Fläche wird von folgenden Messpunkten abgedeckt: $X/Y = 2/4, 2/5, 2/6, 2/7, 3/3, 3/4, 3/5, 3/6, 3/7, 3/8, 4/2, 4/3, 4/4, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8, 5/2, 5/3, 5/4, 5/5, 5/6, 5/7, 5/8, 6/2, 6/3, 6/4, 6/5, 6/6, 6/7, 6/8, 7/3, 7/4, 7/5, 7/6, 7/7, 7/8, 8/3, 8/4, 8/5, 8/6$ und $8/7$. Alle übrigen Punkte sind als korrekt gemessen einzustufen, da sie innerhalb der Messgrenzen liegen. Diese Beschreibungen der Messpunkte auf Grund- und Kopfplatte gelten sowohl für die A, als auch für die B Probe und zeigen somit eine gute Reproduzierbarkeit.

Weitere Szenarien wurden mit einem Mix aus Magnetkugel und Stahlkugel untersucht. Die Ergebnisse zu diesen Versuchen sind einschließlich der dazu durchgeführten Parallelversuche (A & B Probe) im Anhang Q – T zu finden. Die aufgezeichneten Muster ähneln allesamt denen

aus Abb. 118 und werden deshalb hier nicht weiter diskutiert. Die Magnetkugeln (M) und Stahlkugeln (K) wurden dabei in folgenden Szenarien zueinander angeordnet: KMKMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM. Alle untersuchten Szenarien wurden dabei mit der gleichen Kopfplattenstellung entsprechend Abb. 120 gemessen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Feldmuster mit zunehmender Anzahl an Stahlkugel kaum verändern, nur die Signalreichweite wird erwartungsgemäß geringer, sowohl vertikal, als auch lateral (Anhang Q - T). Dies äußert sich u.a. darin, dass auf der Kopfplatte der quadratische Bereich in dem das B-Feld $> 200 \mu\text{T}$ ist, immer kleiner wird, da sich die Werte an einzelnen Messpunkten mit zunehmender Anzahl an Stahl- bzw. abnehmender Anzahl an Magnetkugeln wieder in den messbaren Bereich der GEO-X Sonde verschieben. Bei manchen Grundplattenergebnissen (Anhang R und Anhang S) ist die positive Anomalie im Radius 2,75 cm um das Rohr nicht mehr zu sehen, welches damit zu erklären ist, dass sich die GEO-X Sonde hier in nächster Nähe zu einer Stahlkugel befindet, die kein so starkes B-Feld aufweist wie eine Magnetkugel. Die Auswirkungen auf die laterale und vertikale Messsignalreichweite werden im folgenden Unterkapitel behandelt.

3.3.5.1.2 Messsignalreichweite der Versuche ohne Eisenzylinder

In Abb. 121 ist die laterale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 118 und Anhang Q – T für die unterschiedlichen Stahlkugel (K)/Magnetkugel (M)-Szenarien dargestellt. Die Abbildung zeigt dabei ΔBI . ΔB ergibt sich aus der Differenz der Profilmessung mit Probe und einer Referenzmessung ohne Probe. Es wurden hier die gleichen Profile gemessen wie bei den Stahldrahtseilen (Abb. 64, Abb. 67).

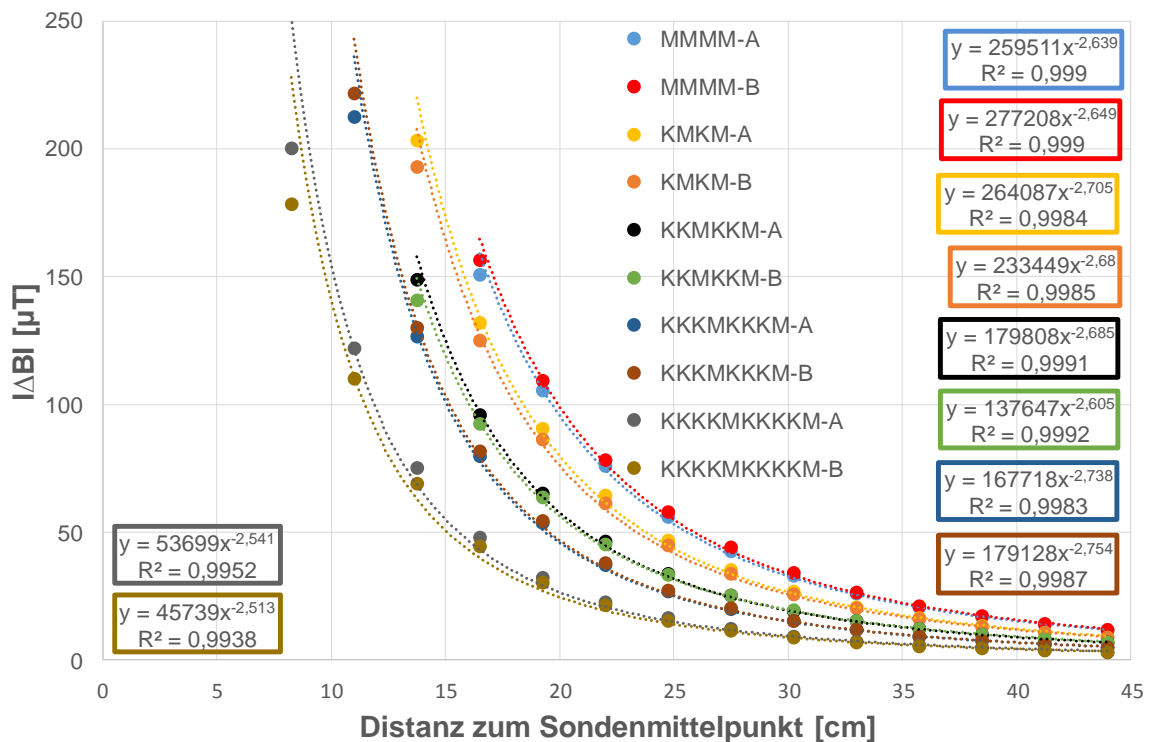


Abb. 121: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Subszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.

Unter Beachtung der ermittelten Hintergrundschwankungen ($\pm 1 \mu T$) wird im Folgenden wieder festgelegt, dass ein signifikantes Signal bei einem $I\Delta BI \geq 1,5 \mu T$ vorliegt. Für die folgenden Berechnungen der maximalen lateralen Signalreichweite wird somit ein Wert von $1,5 \mu T$ für y eingesetzt. Angewendet auf die Regressionsgleichungen in Abb. 121 können somit folgende laterale Signalreichweiten ermittelt werden (Tab. 19):

Tab. 19: Laterale Signalreichweiten der Subszenarien

Subszenario	Distanz zum Sondenmittelpunkt bei 1,5 μ T [cm]
MMMM-A	96,6
MMMM-B	97,3
KMKM-A	87,0
KMKM-B	86,6
KKMKKM-A	77,9
KKMKKM-B	80,4
KKKMKKKM-A	69,8
KKKMKKKM-B	69,8
KKKKMKKKKM-A	62,0
KKKKMKKKKM-B	60,9

Die Subszenarien zeigen eine stetige Abnahme der lateralen Signalreichweite mit zunehmender Zahl an Stahlkugel bzw. Abnehmender Zahl an Magnetkugeln. Die einzelnen Szenarien sind jeweils gut reproduzierbar.

Es mussten beim MMMM Subszenario die X/Y-Koordinaten 5/0-5/4, beim KMKM Subszenario 5/1-5/4, beim KMKKM Subszenario 5/1-5/4, beim KKKMKKKM Subszenario 5/2-5/4, und beim KKKMKKKKM Subszenario 5/3-5/4 ausgelassen werden aufgrund des Erreichens der oberen Messgrenze der GEO-X Sonde.

In Abb. 122 ist die vertikale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 118 und Anhang Q – T für die unterschiedlichen Stahlkugel (K)/Magnetkugel (M)- Szenarien dargestellt.

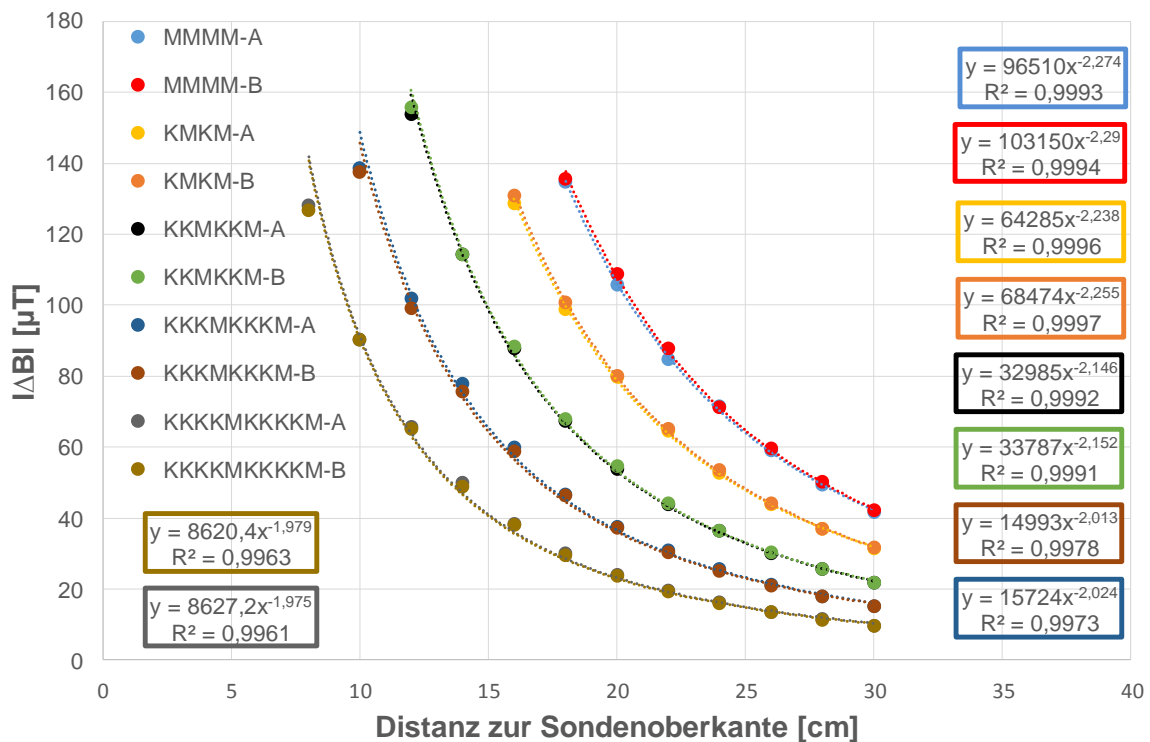


Abb. 122: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Subszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKKMKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.

Folgende vertikale Signalreichweiten können ermittelt werden (Tab. 20):

Tab. 20: Vertikale Signalreichweiten der Subszenarien

Subszenario	Distanz zur Sondenoberkante bei 1,5 μT [cm]
MMMM-A	130,2
MMMM-B	129,5
KMKM-A	117,4
KMKM-B	116,5
KKMKKM-A	105,5
KKMKKM-B	105,3
KKKMKKKM-A	97,1
KKKMKKKM-B	96,9
KKKKMKKKKM-A	79,4
KKKKMKKKKM-B	80,1

Die Subszzenarien zeigen eine stetige Abnahme der vertikalen Signalreichweite mit zunehmender Zahl an Stahlkugel bzw. abnehmender Zahl an Magnetkugeln. Die einzelnen Szenarien sind jeweils gut reproduzierbar.

3.3.5.1.3 Versuche mit Eisenzylinder (Hilfsverrohrung)

Im nächsten Schritt wurden die Messungen der unterschiedlichen Magnetkugel/Stahlkugel-Szenarien aus Kap. 3.3.5.1.1 unter Einsatz des Eisenzylinders zur Simulation der Hilfsverrohrung im Bohrloch wiederholt. Abb. 123 zeigt die Ergebnisse der Messungen einer reinen Magnetkugelnkette mit Zylinder als Differenzkarten.

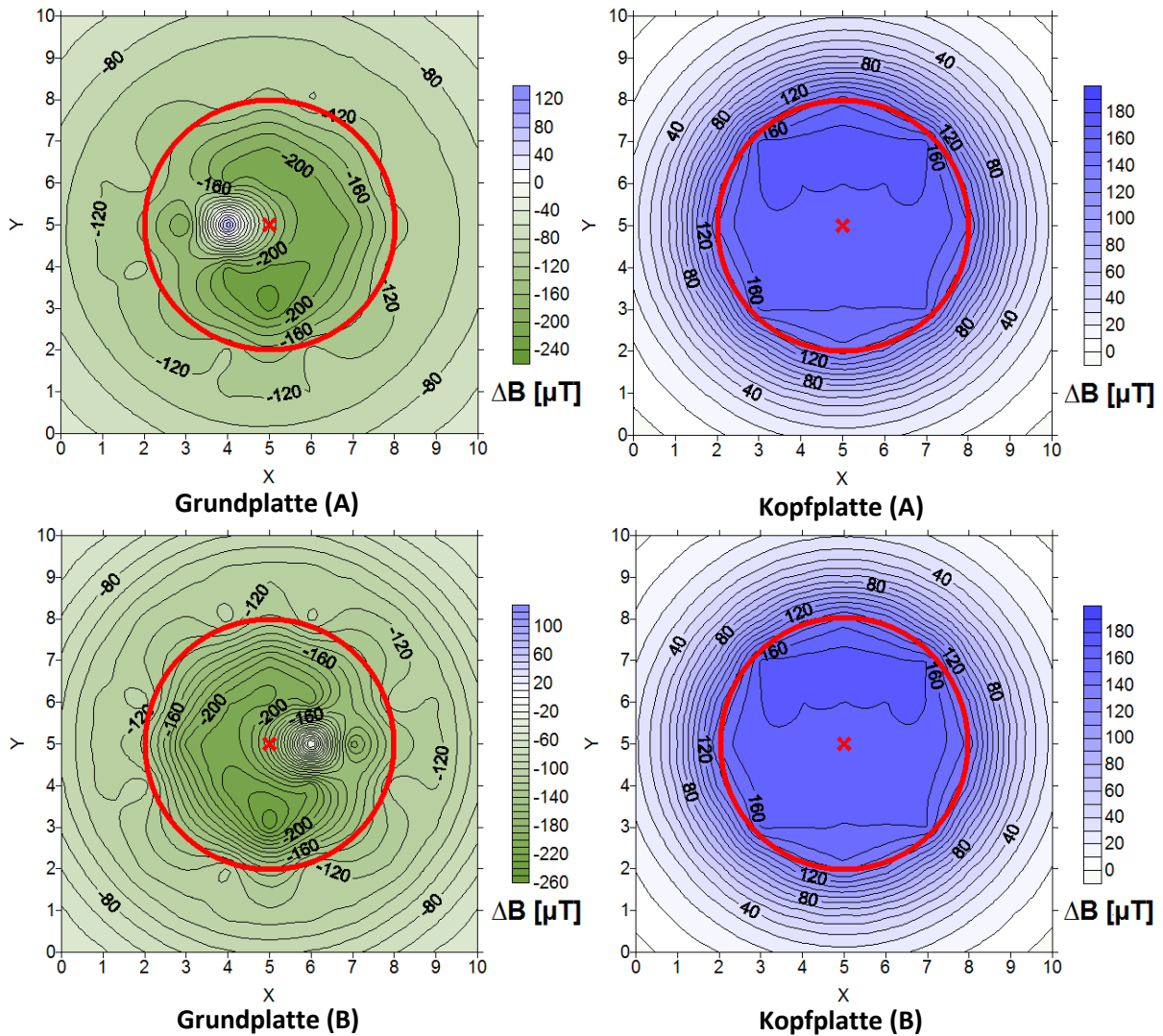


Abb. 123: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte nur mit Magnetkugeln bestückt und mit Zylinder, Probe A & B, ΔB .

Es muss erwähnt werden, dass bei der Probe A die gemessenen B Werte (nicht ΔB !) auf der Grundplatte, bei den Koordinaten $X/Y = 3/5, 4/4, 4/5, 4/6, 5/3, 5/4, 5/6, 5/7, 6/4, 6/6,$ und $7/5$ jeweils einen Wert von $-200 \mu T$ erreicht haben und somit in Wirklichkeit noch niedriger sein können. Diese Punkte befinden sich jedoch im Inneren des Zylinders, relevant für die Interpretation des Signalmusters- und der Reichweite ist nur das Signal außerhalb des Zylinders. Ebenso sind auf der Kopfplatte bei den Koordinaten $X/Y = 4/4, 4/5, 5/4, 5/5, 5/6, 6/4$ und $6/5$ Werte von $200 \mu T$ erreicht worden, in Wirklichkeit können dieses also höher sein. Entsprechend ist wieder eine Kegelform des Feldes im Inneren des Zylinders zu erwarten und nicht wie hier eine Flächenform. Die Ergebnisse aller weiteren Stahlkugel (K)/ Magnetkugel (M)-Szenarien mit Zylinder sind im Anhang U – X zu finden.

3.3.5.1.4 Messsignalreichweite der Versuche mit Eisenzylinder

In Abb. 124 ist die laterale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 123 und Anhang U – X für die unterschiedlichen K/M-Szenarien dargestellt.

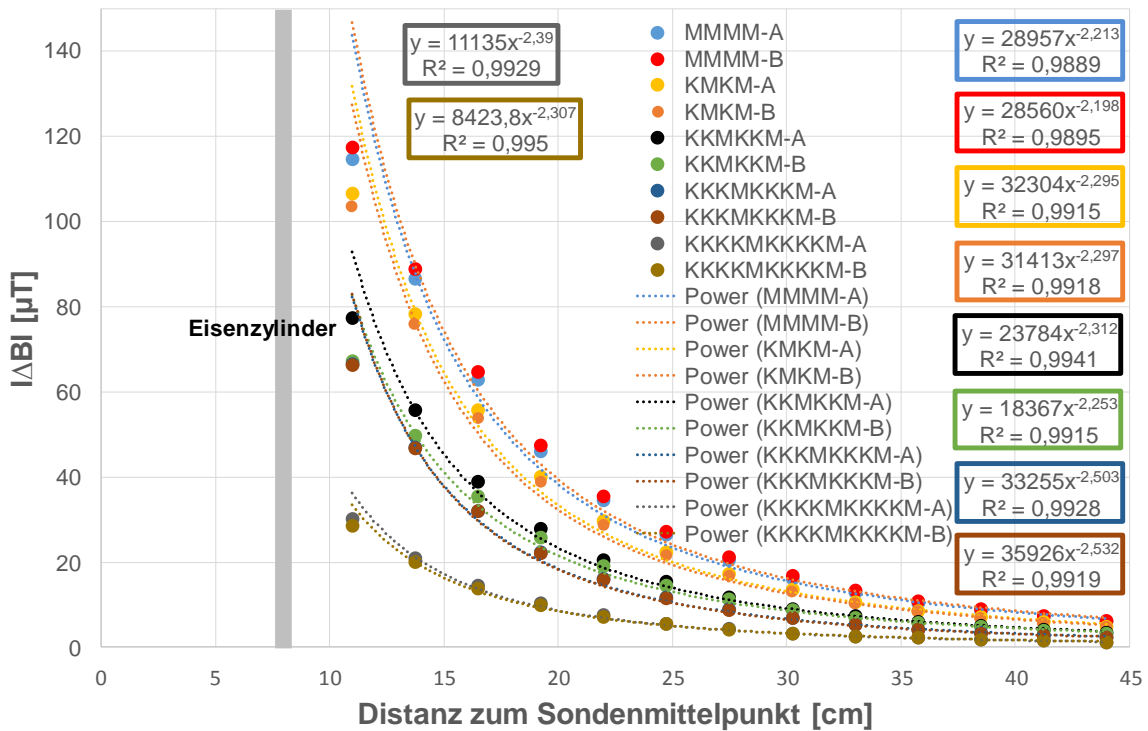


Abb. 124: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder und Subszenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.

Folgende laterale Signalreichweiten können ermittelt werden (Tab. 21):

Tab. 21: Laterale Signalreichweiten der Subszenarien mit Zylinder

Subszenario	Distanz zum Sondenmittelpunkt bei 1,5 μT [cm]
MMMM-A	86,4
MMMM-B	88,5
KMKM-A	77,3
KMKM-B	76,1
KKMKKM-A	65,6
KKMKKM-B	65,2
KKKMKKKM-A	54,5

Weiter auf nächster Seite

KKKMKKKM-B	53,7
KKKKMKKKKM-A	41,6
KKKKMKKKKM-B	42,2

Die Subszzenarien zeigen eine stetige Abnahme der lateralen Signalreichweite mit zunehmender Zahl an Stahlkugel bzw. abnehmender Zahl an Magnetkugeln. Die einzelnen Szenarien sind jeweils gut reproduzierbar.

In Abb. 125 ist die vertikale Messsignalreichweite für die Ergebnisse aus Abb. 123 und Anhang U – X für die unterschiedlichen K/M-Szenarien dargestellt.

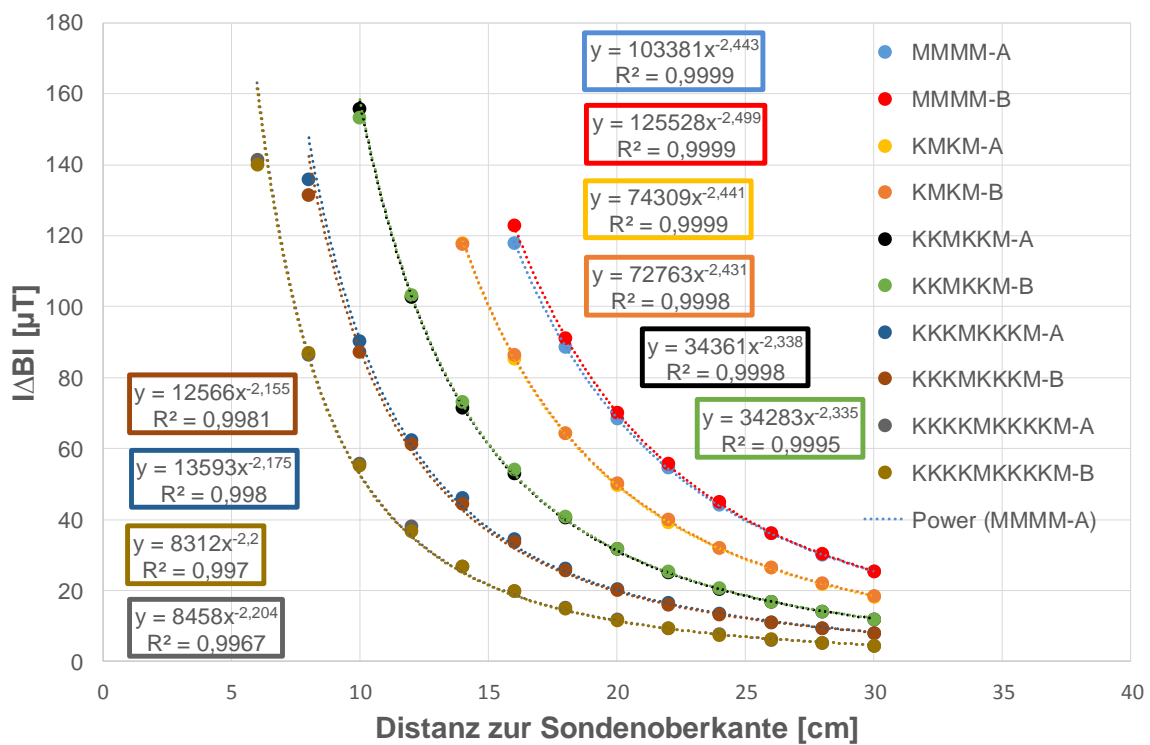


Abb. 125: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder und Subszzenarien: MMMM, KMKM, KKMKKM, KKKMKKKM und KKKKMKKKKM, K = Stahlkugel, M = Magnetkugel.

Folgende vertikale Signalreichweiten können ermittelt werden (Tab. 22):

Tab. 22: Vertikale Signalreichweiten der Subszzenarien mit Zylinder

SubszENARIO	Distanz zur Sondenoberkante bei 1,5 μ T [cm]
MMMM-A	95,6
MMMM-B	93,3
KMKM-A	83,8
KMKM-B	84,6
KKMKKM-A	73,3
KKMKKM-B	73,6
KKKMKKKM-A	66,1
KKKMKKKM-B	66,0
KKKKMKKKKM-A	50,3
KKKKMKKKKM-B	50,3

Die Subszzenarien zeigen eine stetige Abnahme der vertikalen Signalreichweite mit zunehmender Zahl an Stahlkugel bzw. abnehmender Zahl an Magnetkugeln. Die einzelnen Szenarien sind jeweils gut reproduzierbar.

3.3.5.2 Vergleich der Ergebnisse der Magnetkugeln

In Tab. 23 sind die Ergebnisse der Signalreichweiten aus den vorherigen Unterkapiteln zusammengefasst.

Tab. 23: Zusammenfassung der lateralen und vertikalen Signalreichweiten mit und ohne Zylinder für verschiedene Subszzenarien (Szenario = 1 Rohr Mitte) (L = lateral, V = vertikal, OZ = Ohne Zylinder, MZ = Mit Zylinder).

SubszENARIO	L-OZ [cm]	L-MZ [cm]	[%]	V-OZ [cm]	V-MZ [cm]	[%]
MMMM-A	96,6	86,4	10,6	130,2	95,6	26,6
MMMM-B	97,3	88,5	9,0	129,5	93,3	28,0
KMKM-A	87,0	77,3	11,1	117,4	83,8	28,6
KMKM-B	86,6	76,1	12,1	116,5	84,6	27,4
KKMKKM-A	77,9	65,6	15,8	105,5	73,3	30,5
KKMKKM-B	80,4	65,2	18,9	105,3	73,6	30,1
KKKMKKKM-A	69,8	54,5	21,9	97,1	66,1	31,9
KKKMKKKM-B	69,8	53,7	23,1	96,9	66,0	31,9
KKKKMKKKKM-A	62,0	41,6	32,9	79,4	50,3	36,6
KKKKMKKKKM-B	60,9	42,2	30,7	80,1	50,3	37,2

Generell kann man beobachten, dass sowohl bei allen lateralen, als auch bei allen vertikalen Subszzenarien die Signalreichweite immer durch den Eisenzylinder abgeschwächt wird. Bei den lateralen Subszzenarien liegt die prozentuelle Abnahme beim MMMM-Szenario bei ca. 10 %

und nimmt beim KKKKMKKKKM-Szenario Werte um ca. 32 % an (Abb. 126). Bei den vertikalen Subszenarien ist der Einfluss des Eisenzylinders stärker ausgeprägt. Hier liegt die prozentuale Abnahme beim MMMM-Szenario bei ca. 27 % und steigt beim KKKKMKKKKM-Szenario Werte um ca. 37 % an. In Abb. 126 ist die Entwicklung der Signalreichweite bezüglich der einzelnen Szenarien dargestellt. Bezogen auf die Anzahl der Magnetkugeln kann die Signalreichweite mittels einer Potenzfunktion beschrieben werden (Abb. 126). Je höher die Magnetkugeldichte im Versuch ist, umso geringer ist sowohl die laterale, als auch die vertikale Abschwächung des Messsignals.

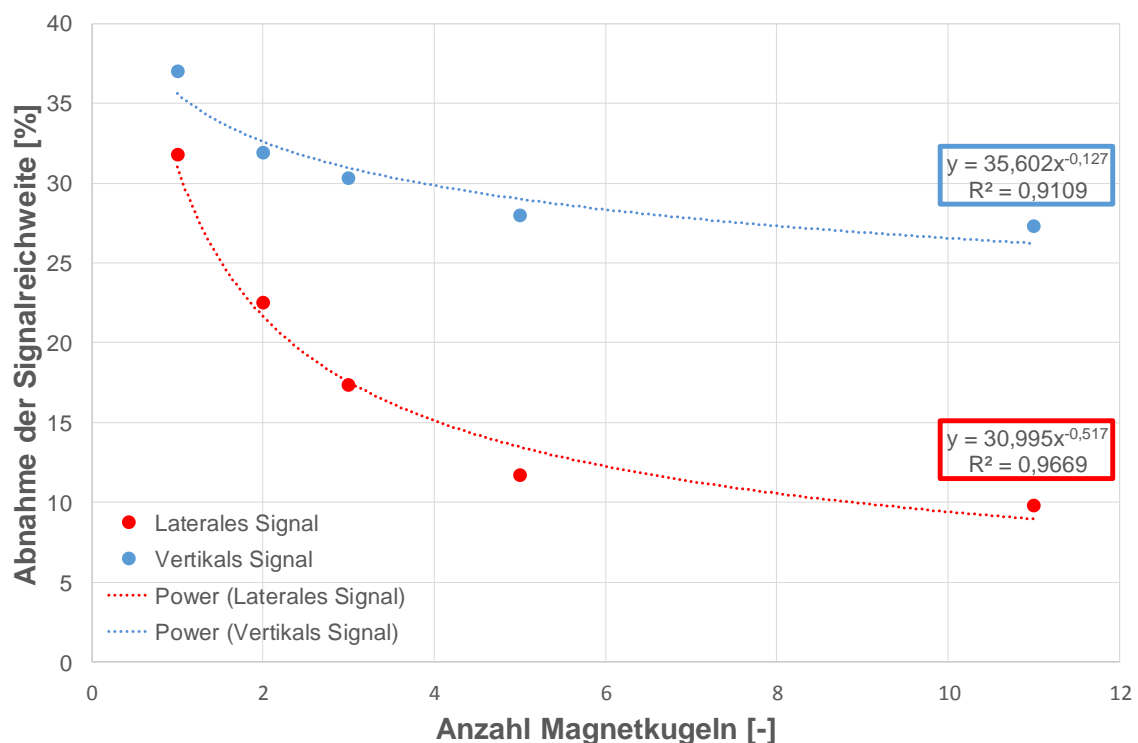


Abb. 126: Potenzfunktionen zur Beschreibung der prozentuellen Abnahme der lateralen und vertikalen Messsignalreichweite.

3.3.5.3 Versuche mit Messmodul in einem Bohrrohr

Entsprechend den Stahldrahtseilen und der Spannbetonlitze wurden auch mit den Magnetkugeln Versuche mit Bohrrohr und Messmodul durchgeführt. Es wurden die 5 Szenarien aus den vorherigen Kapiteln sowohl innerhalb des Bohrrohrs, als auch außerhalb mit Tiefenprofilen untersucht. Bei allen 5 Szenarien wurde an allen Messpunkten des Basisniveaus von 0-350 ° die obere Messgrenze der GEO-X Sonde überschritten, d.h. jeder Wert entlang des Kreises entsprach 200 μ T (entsprechend Ankerlitze, Abb. 112). Aus diesen Gründen wurde an dieser Stelle verzichtet die Ergebnisse nochmal darzustellen.

Die Messungen zur vertikalen Signalreichweite im Bohrrorhr sind in Abb. 127 dargestellt. Analog zur Spannbetonlitze wurde das Basisniveau aus der Analyse ausgenommen, da die Messwerte des Basisniveaus allesamt der GEO-X Obergrenze entsprachen.

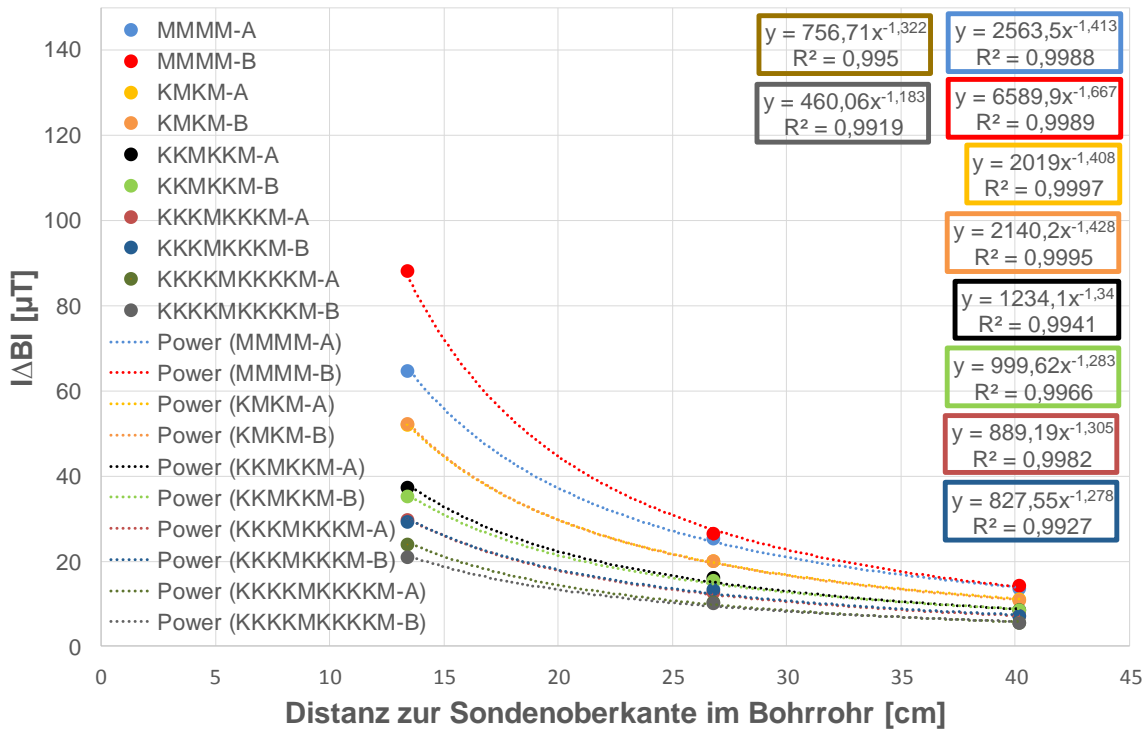


Abb. 127: ΔBI in Abhängigkeit zur Distanz des Messmoduls zur Sondenoberkante im Bohrrorhr.

Tab. 24 zeigt die Zusammenfassung der errechneten Signalreichweiten.

Tab. 24: Zusammenfassung der vertikalen Signalreichweiten im Bohrrorhr (M = Magnetkugel, K = Stahlkugel).

Subszenario	Distanz zur Sondenoberkante bei 2,5 μT [cm]
	Ohne Basis
MMMM-A	135,2
MMMM-B	112,8
KMKM-A	116,1
KMKM-B	113,1
KKMKKM-A	102,3
KKMKKM-B	106,7
KKKMKKKM-A	90,1
KKKMKKKM-B	93,7

Weiter auf nächster Seite

KKKKMKKKKM-A	75,3
KKKKMKKKKM-B	82,1

Des Weiteren wurden auch hier Tiefenprofile des Signals für die unterschiedlichen K/M Szenarien erstellt (Abb. 128). In erster Linie zeigt die Tiefenprofilmessung ein ähnliches Muster wie es bei den Stahldrahtseilen und Spannbetonlitze aufgetreten ist. Zu den Enden der K/M Ketten nimmt der Abstand zwischen Erdwärmerohr und Bohrrohr mit Messmodul stark ab. Zur Mitte hin nimmt der Abstand zu. Dies kann wieder, analog zu den Stahldrahtseilen und Spannbetonlitzten, mit dem Schema in Abb. 102 erklärt werden und unterstreicht auch hier wieder die Schlussfolgerung, dass das Feld der Kugelketten einem Stabmagneten ähnelt.

Besonders auffällig ist die gute Reproduzierbarkeit der Muster sowohl bei den A und B Proben, als auch beim Vergleich unterschiedlicher K/M Szenarien, die nur mit zunehmender Anzahl an Magnetkugeln in positiver x-Richtung verschoben werden bzw. an Signalreichweite zunehmen. Die zunehmende Signalreichweite stellt sich mit einem zunehmenden Abstand zur Bohrrohraußenwandung dar.

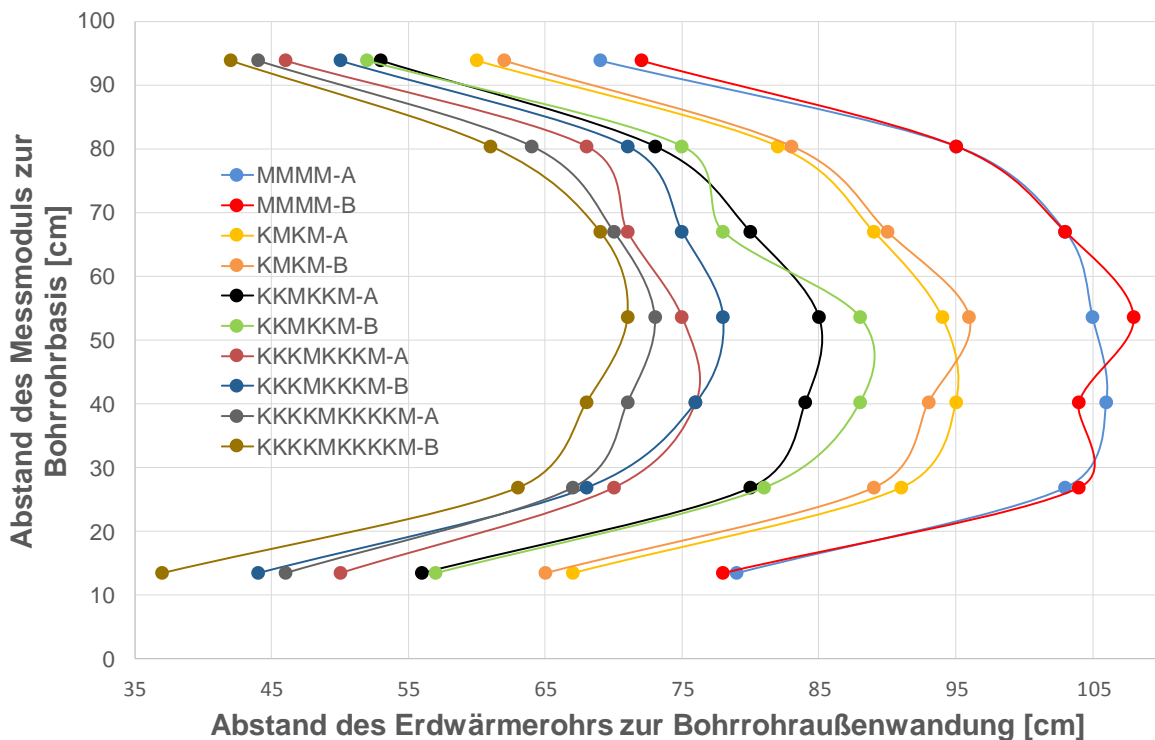


Abb. 128: Abstände des Erdwärmerohrs zur Bohrröhraussenwandung in Abhängigkeit zur Tiefenlage des Messmoduls im Bohrrohr. Abstände abgelesen bei einem ΔBI von $2,5 \mu T$, Kontrastmittel: Verschiedene Magnet (M)- und Stahlkugel (K) Szenarien.

3.3.5.4 Kosten der Methode

Die $\varnothing 12,7$ mm Magnetkugeln kosten $1,28 \text{ €/Kugel}$. Für eine Standard 100 m Sonde würden somit Kosten von ca. 10.079 € entstehen, wenn diese ausschließlich mit Magnetkugeln als Kontrastmittel geföhlt würde. Im Hinblick auf das Projektziel, das ein komplettes Rückbaukonzept zu diesem Preis vorsieht, erscheint diese Magnetkugelmethode bereits als nicht praktikabel, wenn die Kosten als Kriterium herangezogen werden.

Betrachtet man das letzte Szenario in dem nur noch jede 5. Kugel eine Magnetkugel ist, belaufen sich die Kosten auf ca. 2448 € (1761 € für Magnetkugeln und zusätzlich 688 € für Stahlkugeln ($0,125 \text{ €/Kugel}$)), wodurch die Methode wieder eher umsetzbar erscheint.

3.3.5.5 Fazit

Die untersuchte Magnet-/Stahlkugelmethode ist von der Signalreichweite her eine Methode mit großem Potential. Die Magnetkugeln haben bereits ein sehr starkes Eigenfeld, so dass eine Magnetisierung bei dieser Methode wegfällt. Auch ist die Ausbildung des Magnetfelds sehr

homogen, so dass von einem gleichmäßigen Feld bzw. Signal in allen Himmelsrichtungen ausgegangen werden kann.

Ein ganz wesentlich limitierender Faktor im Hinblick auf die Signalreichweite ist das Vorhandensein einer Stahlverrohrung im Bohrloch. Die detektierbare laterale Signalreichweite lag in dieser Arbeit bei max. ca. 105 cm (Subszenario: MMMM) und min. ca. 70 cm (Subszenario: KKKKMKKKKM) bei den Versuchen im Bohrröhr. Aus den Versuchen im Messstand konnte kein stabiler Abnahmewert ermittelt werden. Die Abnahme ist Abhängig von der Richtung (lateral, vertikal) sowie von der Anzahl an Magnet- bzw. Stahlkugeln und kann mit Potenzfunktionen beschrieben werden. Sie reicht von ca. 9 % beim MMMM-B-Szenario bis zu 32,9 % beim KKKKMKKKKM-Szenario für den lateralen Fall. Für den vertikalen Fall liegt die Abnahme zwischen 26,6 % MMMM-A-Szenario und 37,2 % KKKKMKKKKM-B-Szenario. Die maximale vertikale Signalreichweite war mit ca. 130 cm etwas höher als die laterale Signalreichweite mit ca. 97 cm für das MMMM-Szenario. Für den Anwendungsfall bedeutet dies, dass die magnetischen Messungen möglichst außerhalb der Hilfverrohrung stattfinden sollte. Darüber hinaus muss wie bei den Stahldrahtseilen und der Spannbetonlitze zwingend eine Referenzmessung durchgeführt werden. Auf Untersuchungen des Einflusses der geologischen Gegebenheiten, und von dotiertem Zement, auf das Messsignal der Magnetkugeln, wurde verzichtet, da dies bereits ausführlich für die Stahldrahtseile und Spannbetonlitze durchgeführt wurde (Kap. 3.3.3.5 und Kap. 3.3.4.5), und diese als repräsentativ für alle Kontrastmittel angenommen werden können.

Trotz der guten Resultate bei dieser Vorgehensweise sind die Kosten der Methode eher höher als bei den übrigen Methoden.

3.3.6 Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung

Die elektrische Widerstandsmessung erfolgte gemäß der in Kapitel 3.2.18 beschriebenen Methode an unterschiedlichen Kontrastmitteln und Lockersedimenten. In Tab. 25 sind die Versuchsbedingungen der durchgeführten Versuche aufgelistet.

Tab. 25: Versuchsbedingungen bei der elektrischen Widerstandsmessung.

Versuch	Kontrastmittel	Lage EWS	Medium Außen	Medium Innen	Wassergehalt
1	1	0 °/360 °	Sand	Sand	trocken
2	1	0 °/360 °	Sand	Sand	nass
3	1	0 °/360 °	Sand	Sand	gesättigt
4	4	0 °/360 °	Sand	Sand	nass
5	4	0 °/360 °	Sand	Sand	gesättigt
6	4	0 °/360 °	Sand	Schluff	Nass

Weiter auf nächster Seite

7	4	0 °/360 °	Sand	Schluff	gesättigt
8	4	0 °/360 °	Sand	Ton	nass
9	4	0 °/360 °	Sand	Ton	gesättigt

Da für eine eindeutige Positionsbestimmung der Erdwärmesonde innerhalb der Hilfsverrohrung mittels der elektrischen Widerstandsmessung ein deutlicher und scharf abgegrenzter Peak notwendig ist, muss der spezifische Widerstand der verwendeten Kontrastmittel deutlich geringer sein als der der Hinterfüllbaustoffe und des umgebenden Gesteins. Daher wurde für die Bewertung der Messwerte im Vorfeld der eigentlichen Versuche der spezifische Widerstand der Kontrastmittel, der Lockersedimente sowie von zwei Hinterfüllbaustoffen in Abhängigkeit zum Wassergehalt gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 26 dargestellt. Es zeigt sich hierbei, dass die Kontrastmittel einen um 1 bis 2 Zehnerpotenzen geringeren spezifischen Widerstand als die Lockersedimente aufweisen und gegenüber den Hinterfüllbaustoffen ist der spezifische Widerstand sogar um 3 Zehnerpotenzen geringer. Somit waren die Rahmenbedingungen für die weiteren Untersuchungen gegeben.

Tab. 26: Spezifischer Widerstand der verwendeten Lockersedimente und Baustoffe.

Probe	Wassergehalt [Gew. %]	Spez. Widerstand [Ω *m]
Sand (trocken)	0,0	n.n.
Sand (nass)	21,0	86,54
Sand (gesättigt)	30,3	44,88
Schluff (trocken)	0,0	n.n.
Schluff (nass)	14,1	75,90
Schluff (gesättigt)	35,9	22,24
Ton (trocken)	0,0	n.n.
Ton (nass)	54,6	5,76
Ton (gesättigt)	82,0	7,75
Kontrastmittel Rezept 1	n.b.	0,69
Kontrastmittel Rezept 4	n.b.	0,66
ThermoCem [®] Plus, dotiert	68,3	326,10
EWM [®] Plus	22,7	492,10

In den Abb. 129 bis Abb. 131 sind die elektrischen Widerstandsmesswerte der Versuche 1 bis 3 dargestellt. Hier wurde gemäß Tab. 25 das Kontrastmittel Rezept 1 untersucht. Dabei war die Hilfsverrohrung mit Sand befüllt und der Wassergehalt variiert. In Versuch 1 war der Sand trocken, in Versuch 2 nass und in Versuch 3 wassergesättigt. Alle Messwerte der Versuche sind in Anhang Y, Anhang Z und Anhang AA aufgelistet.

Wie aus Tab. 26 hervorgeht, nimmt der spezifische Widerstand des Sandes mit zunehmendem Wassergehalt ab. Die zeigt sich auch in den Versuchen 1 bis 3, in denen der trockene Sand elektrische Widerstände von 20 - 30 k Ω , der nasse Sand ca. 5 k Ω und der gesättigte Sand ca.

0,15 k Ω aufweist. Da der spezifische Widerstand des Kontrastmittels deutlich geringer ist als der des trockenen Sandes in Versuch 1, ist im Bereich der mit Kontrastmittel gefüllten Erdwärmesonden auch der gemessene Widerstand mit Werten um 5 k Ω geringer als im reinen Sand. Es zeigt sich aber auch in Abb. 129, dass die gemessenen Widerstände in Messrichtung hinter der Erdwärmesonde nur allmählich (bei ca. 80 °) auf den ursprünglichen Wert des Sandes ansteigen. Dies wird durch das Anhaften und Verschmieren des Kontrastmittels an der Messelektrode und der Oberfläche des Sandes verursacht.

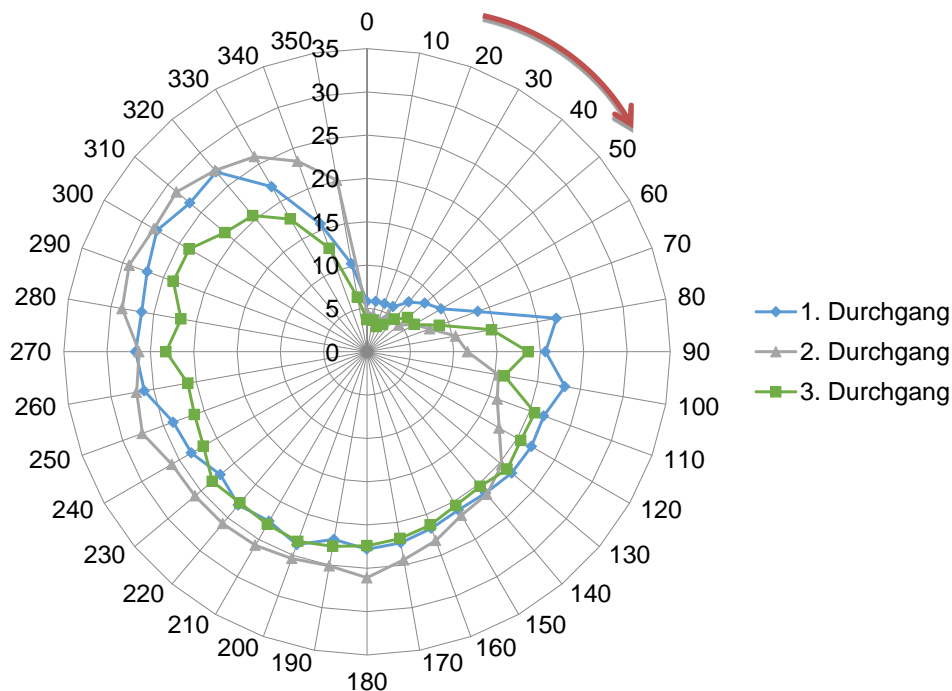


Abb. 129: Elektrischer Widerstand in [M Ω] bei Versuch 1 (Sand/Sand/trocken/Rezept 1), (Genauigkeit $\pm(1,0\%+5)$).

Im Versuch 2 ist die Auswirkung des Kontrastmittels nicht so deutlich ausgeprägt (Abb. 130), wie im Versuch 1 (Abb. 129), da die Widerstandswerte des nassen Sands in der Größenordnung um 5 k Ω liegen und sich somit im gleichen Wertebereich wie das Kontrastmittel (wie im Versuch 1). Während sich im ersten und dritten Durchgang ein kleiner Peak im Bereich der Erdwärmesonde zu erkennen ist, zeigt der zweite Durchgang keinerlei erkennbaren Peak. Auffällig ist darüber hinaus, dass, obwohl der spezifische Widerstand des Kontrastmittels geringer ist als der des nassen Sandes, im Bereich der Erdwärmesonde der gemessene Widerstand höher als der des nassen Sandes ist. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die eigentliche Erdwärmesonde aus HDPE besteht und der gemessene Widerstand im Bereich der Erdwärmesonde eine Summe aus mehreren Teilwiderständen ist und sich damit aus den Widerständen des Kontrastmittels, des Sondenrohrs, des Sands, der die Erdwärmesonde umgibt, diverse Übergangswiderstände usw. zusammensetzt. Eine ähnliche Widerstandsverteilung wurde auch in Versuch 3 gemessen (Abb. 131). Hier sind jedoch

aufgrund des höheren Wassergehalts die gemessenen Widerstände in etwa um den Faktor 50 geringer. Der Bereich, in dem sich die Erdwärmesonde befindet, konnte jedoch deutlicher als im Versuch 2 lokalisiert werden. Um in den weiteren Versuchen deutlichere Messsignale zu erhalten, wurden weitere Rezepturen für die Kontrastmittel entwickelt. Die Rezeptur 4 war dabei die vielversprechendste und wurde im Folgenden näher untersucht.

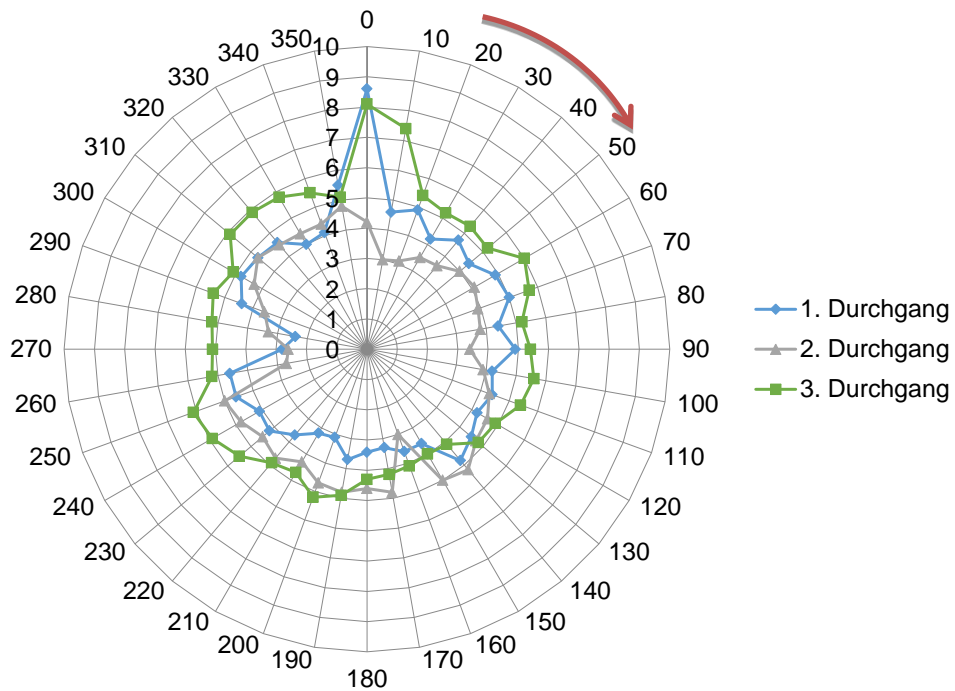


Abb. 130: Elektrischer Widerstand in $[M\Omega]$ bei Versuch 2 (Sand/Sand/nass/Rezept 1), (Genauigkeit $\pm(1,0\%+5)$).

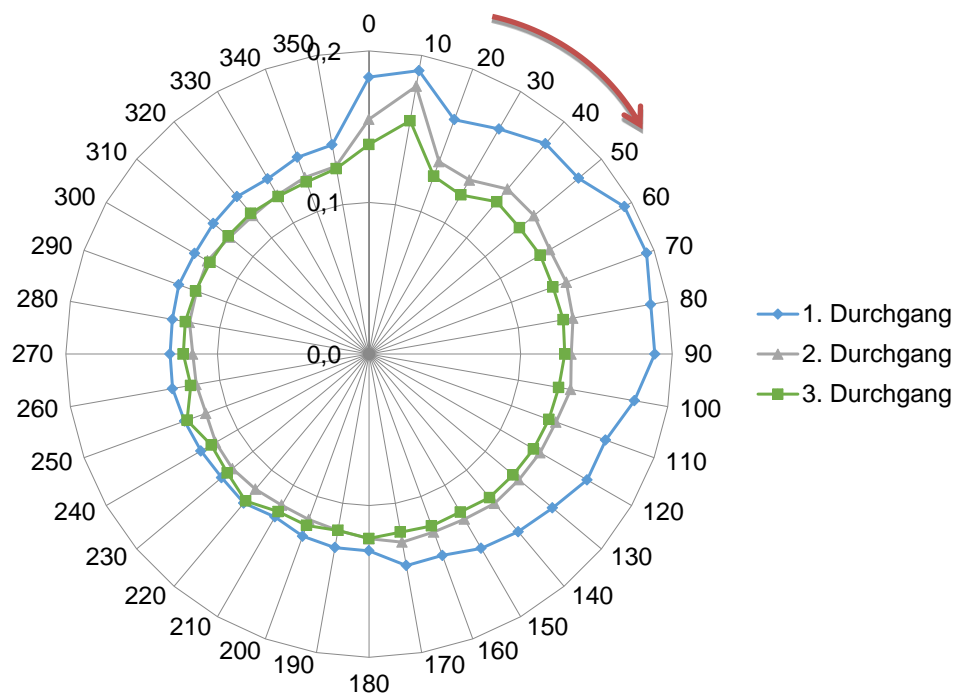


Abb. 131: Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 3 (Sand/Sand/gesättigt/Rezept 1), (Genauigkeit $\pm(0,5\%+3)$).

Da der Untergrund in Deutschland in der Regel immer feucht bzw. wassergesättigt ist, wurden die weiteren Versuche nur unter feuchten und wassergesättigten Bedingungen durchgeführt. Im Versuch 4 und 5 wurden bis auf das verwendete Kontrastmittel die gleichen Versuchsbedingungen wie in den Versuchen 2 und 3 eingehalten, damit ein direkter Vergleich der Ergebnisse erfolgen konnte. Bei den Versuchen wurden jedoch jeweils 10 Umdrehungen im Uhrzeigersinn durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen.

Im Experiment 4 mit nassem Sand liegen die gemessenen Widerstände des Sands bei Werten zwischen 5 und 10 kΩ (Abb. 132). Im Bereich der mit dem Kontrastmittel 4 befüllten Erdwärmesonde ist eine Anomalie zu erkennen. Es zeigt sich hierbei, dass bei den ersten 5 Umdrehungen der Widerstand höher als beim umgebenden Sand ist und erst ab der sechsten Umdrehung der Wert geringer als dieser wird. Wenn die spezifischen Widerstände der Materialien herangezogen werden, sollte eigentlich schon ab der ersten Umdrehung der Widerstand an der Position der Erdwärmesonde geringer als im Sand sein. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich wieder am HDPE der Erdwärmesonde. Beim Versuchsbeginn liegen die Einzelkomponenten noch gut getrennt voneinander vor. Damit entspricht die Messung einer Reihenschaltung klar begrenzter Widerstände. Durch das Drehen des Bohrkopfs kommt es zur Durchmischung der Baustoffe, besonders im Bereich der Erdwärmesonde. Damit werden Kontrastmittelbrücken über die HDPE-Wandung der Erdwärmesonde gelegt, die zu einer

Reduktion des Gesamtwiderstands führt und damit die niedrigeren Widerstandswerte in Abb. 132 bedingen. Unter den wassergesättigten Bedingungen des Versuchs 5 (Abb. 133) sind trotz der deutlichen Unterschiede der spezifischen Widerstände zwischen Kontrastmittel und Sand keine eindeutigen Peaks zu erkennen. Es zeigen sich jedoch tendenziell geringfügig erhöhte Widerstandswerte im Bereich der Erdwärmesonde. Auch hier zeigt sich dieser Trend erst nach einigen Umdrehungen.

Bei den Versuchen 6 und 7 wurde die Hilfsverrohrung mit Schluff befüllt (Tab. 25). Hier zeigt sich der geringere spezifische Widerstand in deutlich geringeren Widerstandswerten, die zwischen 0,2 und 0,35 k Ω liegen und damit etwas geringer als bei den gesättigten Versuchen mit Sand sind. In den Versuchen zeigt sich auch im Bereich der Erdwärmesonde ein deutlicher Anstieg des Widerstands auf Werte um 0,45 k Ω . Im Gegensatz zu den Versuchen mit Sand nimmt der Widerstandswert jedoch nur sehr langsam und kontinuierlich während der 360° Umdrehung ab. Da der Schluff zu den bindigen Böden gehört, klebt dieser deutlich stärker am Bohrkopf und der Messelektrode, so dass es hier zu einer stärkeren Durchmischung über einen längeren Wickelbereich kommt. Zwischen den nassen und gesättigten Bedingungen konnte beim Versuch 6 und 7 kein signifikanter Unterschied festgestellt werden (Abb. 134, Abb. 135).

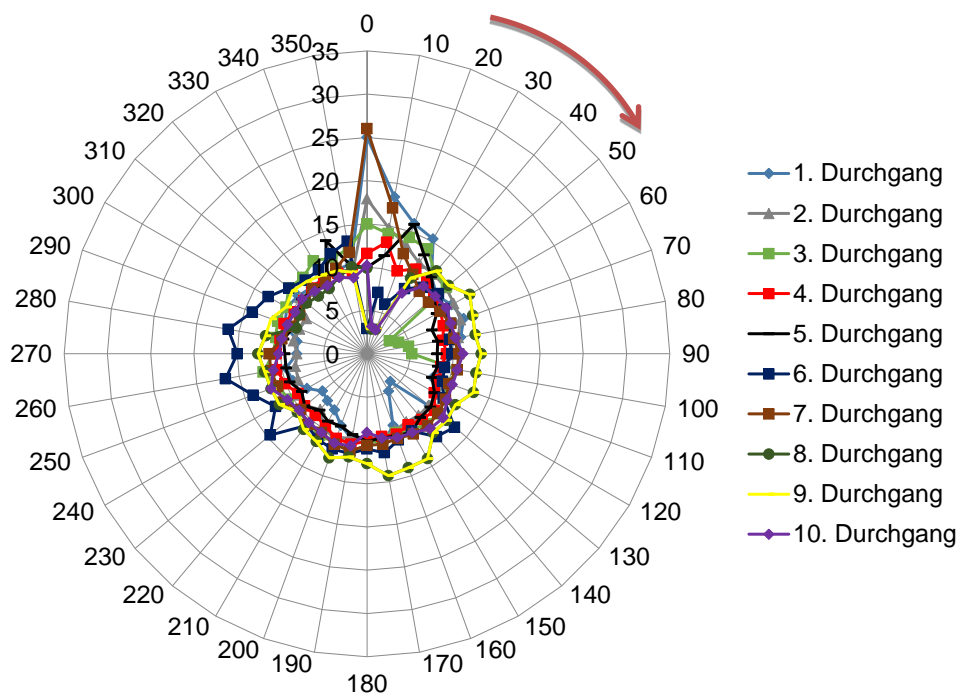


Abb. 132: Elektrischer Widerstand in [M Ω] bei Versuch 4 (Sand/Sand/nass/Rezept 4), (Genauigkeit $\pm(1,0\%+5)$).

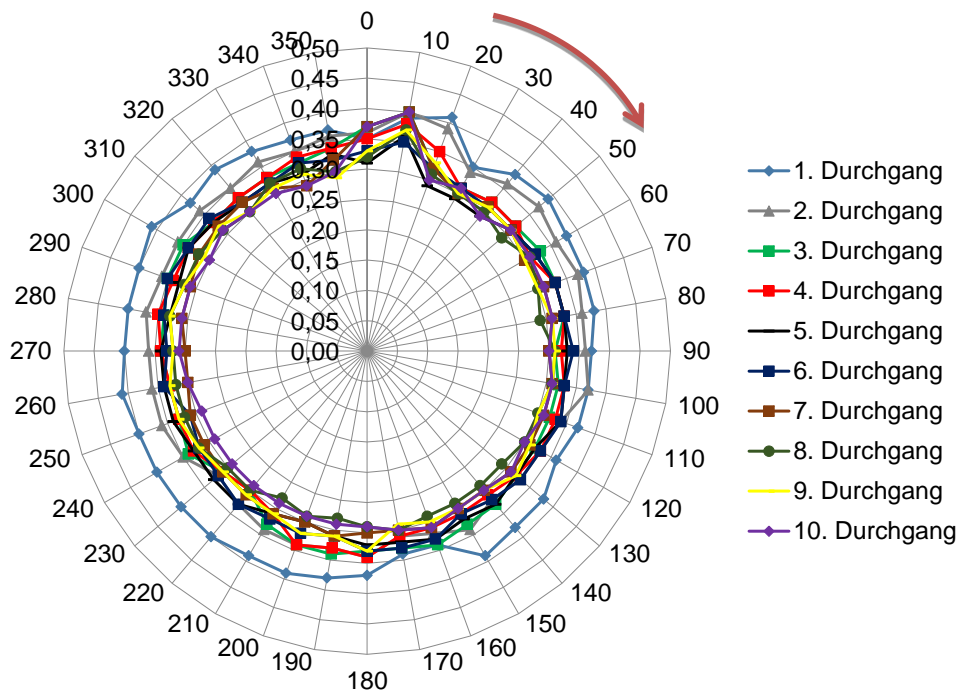


Abb. 133: Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 5 (Sand/Sand/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,5 %+3)).

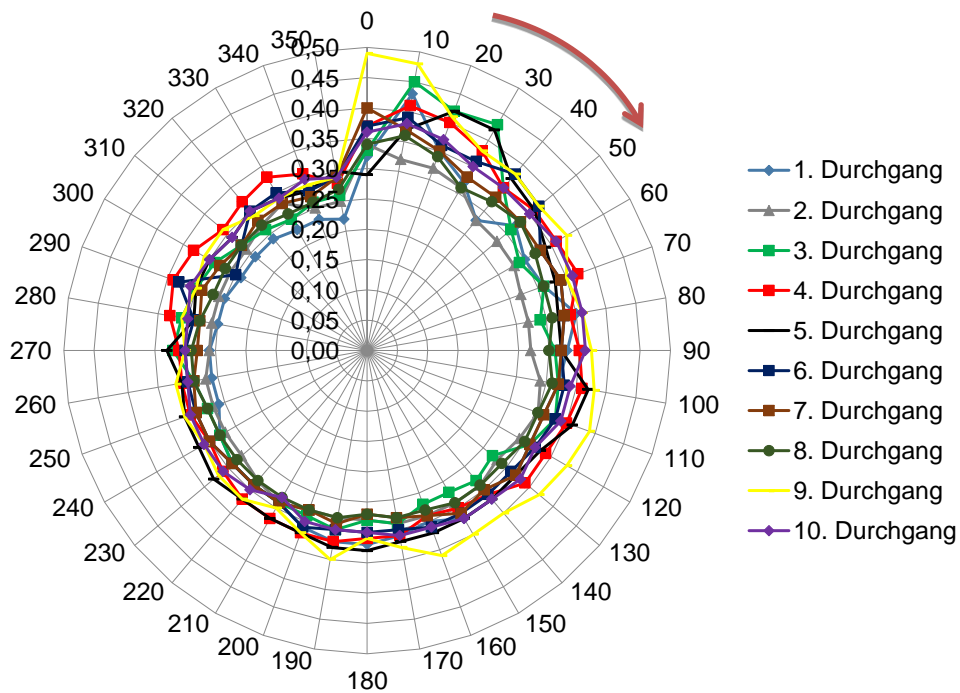


Abb. 134: Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 6 (Sand/Schluff/nass/Rezept 4), (Genauigkeit ±(0,35 %+3)).

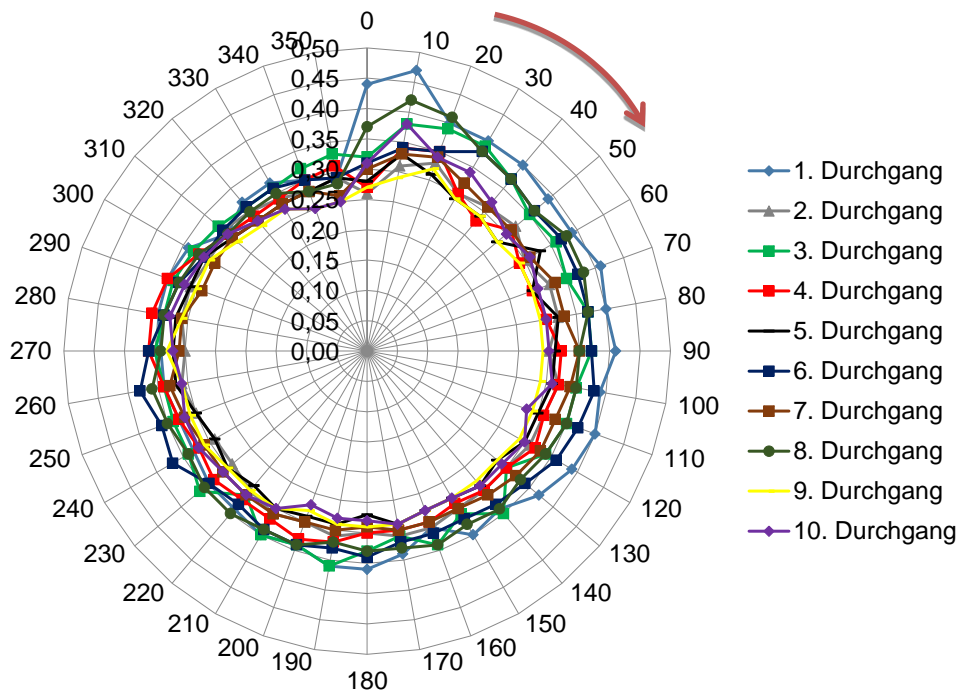


Abb. 135: Elektrischer Widerstand in $[M\Omega]$ bei Versuch 7 (Sand/Schluff/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit $\pm(0,5\%+3)$).

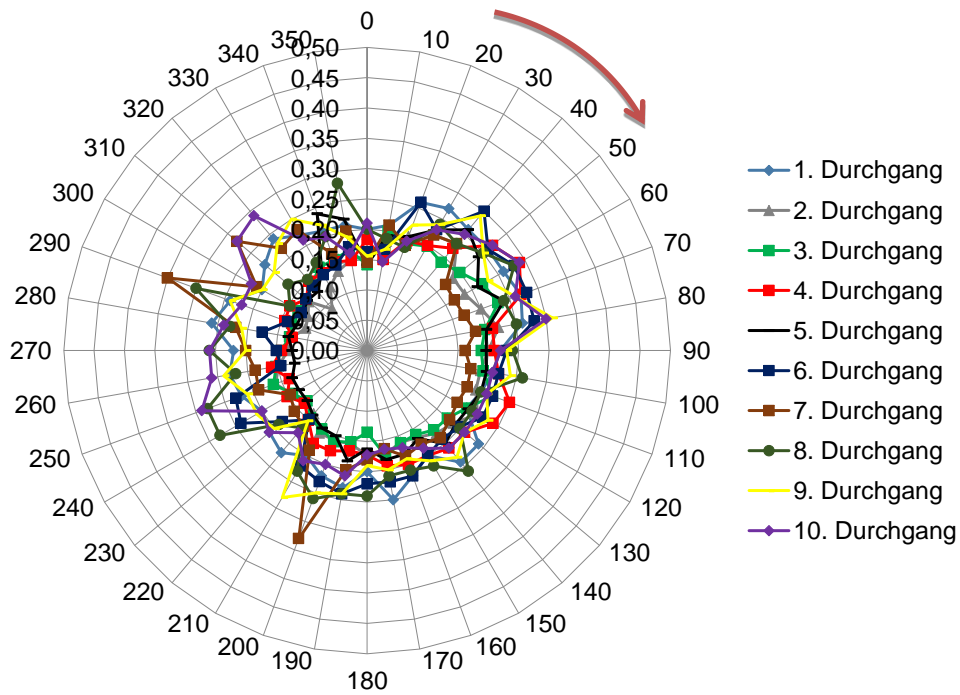


Abb. 136: Elektrischer Widerstand in $[M\Omega]$ bei Versuch 8 (Sand/Ton/nass/Rezept 4), (Genauigkeit $\pm(0,5\%+3)$).

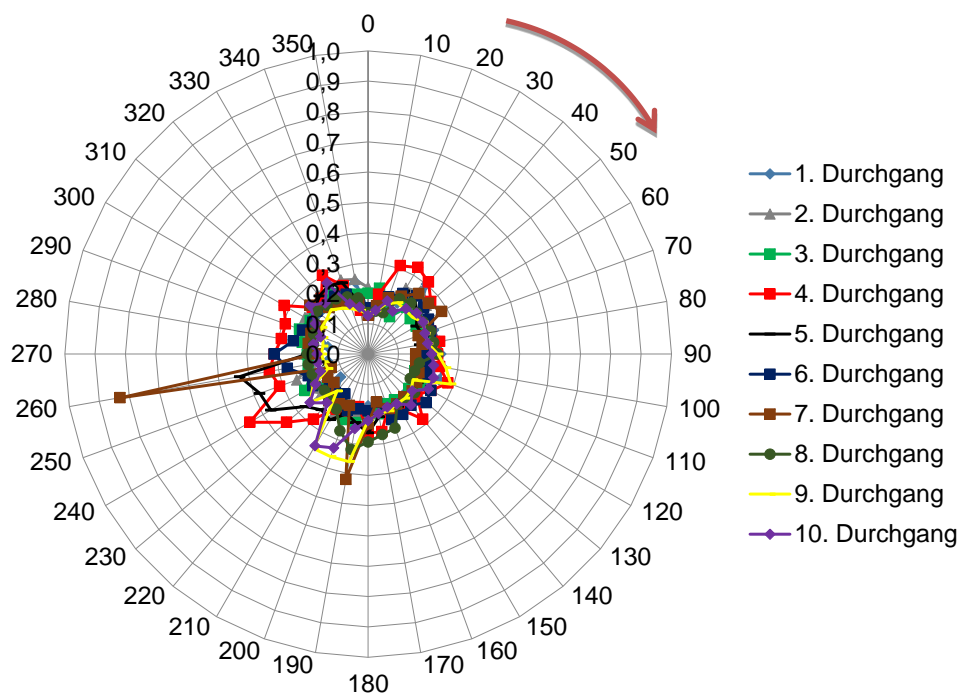


Abb. 137: Elektrischer Widerstand in [MΩ] bei Versuch 9 (Sand/Ton/gesättigt/Rezept 4), (Genauigkeit $\pm(0,5\%+3)$).

Bei den Versuchen 8 und 9 mit Ton als Lockersedimentfüllung der Hilfsverrohrung ist der gemessene Widerstandswert erwartungsgemäß noch etwas geringer (Abb. 136 und Abb. 137) als dies bei den Versuchen mit Schluff der Fall war, was auf den geringeren spezifischen Widerstand des Tons zurückzuführen ist (Tab. 26). In beiden Versuchen zeigt sich jedoch auch, dass keine eindeutigen Peaks erkennbar sind. Dies hängt mit der ausgeprägten Bindigkeit des Tons zusammen, der damit sehr stark am Bohrkopf und der Messelektrode anhaftet und damit den gesamten Messbereich mit einer dünnen Tonschicht überzieht und somit keine deutlichen Grenzen zwischen Erdwärmesonde und umgebenden Gestein übriglässt, die für eine eindeutige Positionsmessung zwingend notwendig ist. Ein weiterer Grund für die fehlenden Peaks liegt darin begründet, dass der spezifische Widerstand des Tons nur etwa eine Zehnerpotenz höher als der des Kontrastmittels ist. Um dem entgegenzuwirken wäre es sinnvoll bei hochleitfähigen Böden und Hinterfüllbaustoffen eher ein Kontrastmittel einzusetzen, dessen spezifischer Widerstand um mehrere Zehnerpotenzen höher ist als der der umgebenden Gesteine wodurch sich wieder Bereiche mit deutliche unterschiedlichen Widerständen ausbilden können und die Erdwärmesonde damit lokalisierbar wäre. Weiterführende Untersuchungen waren jedoch im Rahmen des Projektes nicht mehr möglich. Im Hinblick auf die Fragestellung und unter Berücksichtigung der gewonnenen Versuchsergebnisse, scheint die elektrische Widerstandsmessung eine Möglichkeit zur Positionsbestimmung einer Erdwärmesonde innerhalb eines Bohrloches zu sein. Hierzu

müssten jedoch noch weitere umfangreiche Untersuchungen im Labor-, Technikums- und Feldmaßstab erfolgen, da im Realfall sehr unterschiedliche und komplexe Bedingungen für die Widerstandmessung vorkommen. Dies hängt neben den unterschiedlichen spezifischen Widerständen der vorkommenden Gesteine, Hinterfüllbaustoffe und Erdwärmesonden auch von der Positionierung der Sondenrohre innerhalb der Bohrung, sowie von Bohrspülung und dem vorhandenen Wasser im Bohrloch ab.

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden insgesamt 5 unterschiedliche magnetische Kontrastmittel auf Ihre Anwendbarkeit für den Rückbau ineffizienter EWS mittels Richtbohrtechnik untersucht.

Die magnetisch dotierten Zement/Bentonit Suspensionen können für den Anwendungsfall als weniger geeignet bewertet werden. Der Hauptgrund für diese Beurteilung ist die Tatsache, dass es keine Möglichkeit gibt die Suspensionen nach Injektion in eine rückzubauende Erdwärmesonde zu magnetisieren, jedenfalls nicht ohne einen unverhältnismäßig großen Aufwand. Eine vorherige Magnetisierung ist leicht möglich, allerdings wird diese durch das Injizieren und erneute Durchmischen der Suspension „zerstört“. Unabhängig davon ist die aus der Magnetisierung resultierende Signalreichweite für den Anwendungsfall ebenfalls viel zu gering.

Die Stahlkugeln können für den Anwendungsfall ebenfalls als weniger geeignet bewertet werden. Der Hauptgrund für diese Bewertung ist, dass mittels der Stahlkugelmethode kein reproduzierbares Signal generiert werden kann. Das liegt an der Tatsache, dass die Kugeln in einem Schlauch fixiert werden, dort unbeweglich sind und sich somit bei der Magnetisierung nicht im Magnetfeld ausrichten können. Somit hat jede Probe ein eigenes diffuses Feld nach der Magnetisierung. Um dem entgegenwirken zu können, müssten die Kugeln während dem Magnetisierungsvorgang frei beweglich sein, um sich entsprechend im Feld ausrichten zu können. Gleichzeitig müssten die Kugeln, sobald sie sich im Feld ausgerichtet haben, direkt in Ihrer Endstellung fixiert werden. Auf diese Weise müsste es möglich sein, auch reproduzierbare Ergebnisse bei mehreren gleichartigen Proben zu erhalten. Allerdings wäre eine entsprechende technische Umsetzung des Magnetisierungs- und Fixierungsvorgangs für den Realfall im Feld mit einem unverhältnismäßigen Aufwand verbunden.

Die drei übrigen untersuchten Methoden, die Stahldrahtseile, Spannbetonlitzen und Magnet/Stahlkugelketten erscheinen allesamt geeignet für das geplante Rückbaukonzept. Unter diesen drei Methoden scheint vor allem aus Kostengründen die Methode mit der Spannbetonlitze am geeignetsten.

Abb. 138 zeigt einen Vergleich der lateralen Signalreichweite der 3 Methoden bei Belegung eines Sondenstrangs. Diese Ergebnisse entsprechen den Messungen mit Messmodul im

Bohrrohr. Da die A & B Proben der einzelnen Methoden immer gut reproduzierbar waren, sind in der Abbildung nur Durchschnittswerte aus A & B Probe angegeben.

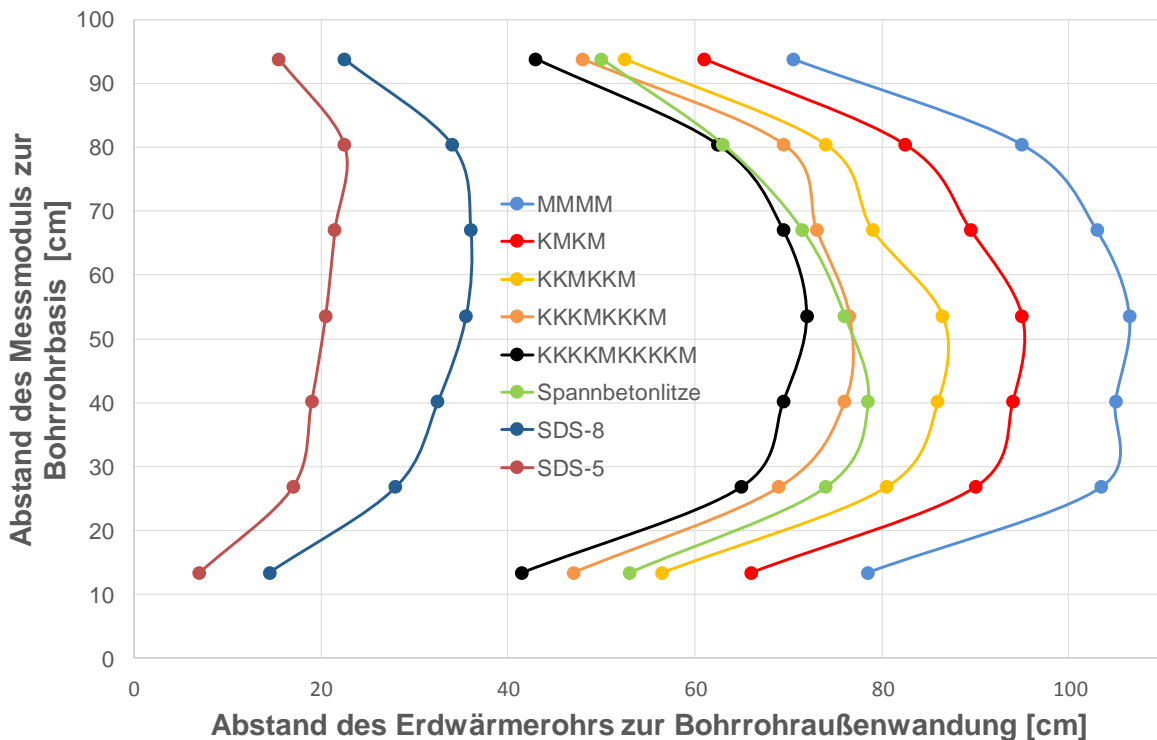


Abb. 138: Vergleich der durchschnittlichen lateralen Signalreichweiten der Stahldrahtseile (GA „Süd“), Spannbetonlitzen (GA „Süd“) und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Szenarien im Bohrrohr, bei Bestückung eines Sondenstrangs.

Zusätzlich sind in Abb. 139 die Kosten für entsprechende Methoden unter Annahme einer Standard 100 m EWS und Belegung eines Sondenstrangs dargestellt. Die stärkste Methode im Hinblick auf die laterale Signalreichweite ist die Magnet/Stahlkugelmethode mit dem SubszENARIO MMMM. Diese Methode ist jedoch auch gleichzeitig die mit Abstand teuerste mit 10.079 €. Aufgrund der sehr hohen Kosten und der Tatsache, dass die Magnetkugeln nicht wiederverwendet werden können, ist dieses SubszENARIO für den Anwendungsfall eher nicht geeignet, da das geplante Gesamtbudgetlimit der Rückbaumethode mit diesem SubszENARIO bereits mit der Anschaffung des Kontrastmittels überschritten würde. Betrachtet man nun die Zugabe von Stahlkugeln, so kann man ein Sinken sowohl der Kosten aber auch der Signalreichweite erkennen. Das SubszENARIO KKKMKKKM hat eine nahezu identische Signalreichweite wie das Verfahren mit der Spannbetonlitze. Vergleicht man jedoch die Kosten, so ist die Spannbetonlitze mit 325 € gegenüber 2868 € klar vorzuziehen. Zudem hat die Methode mit der Spannbetonlitze den starken Vorteil (und zwar gegenüber allen untersuchten Methoden), dass sie quasi zwei Submethoden miteinander koppelt, nämlich die direkte mechanische Bohrausrichtung durch das Dirigieren des Bohrkopfs entlang der

Spannbetonlitze und die indirekte Ausrichtung über das magnetische Signal. Falls die Spannbetonlitze während dem Bohren abreißt und nicht mehr für die direkte mechanische Ausrichtung verwendet werden kann, kann dann die magnetische Methode alleine eingesetzt werden. Dies und der gleichzeitig niedrigste Preis gegenüber aller drei Methoden machen die Spannbetonlitze-Methode zur bevorzugten Variante. Die Stahldrahtseile sind aufgrund der geringen lateralen Signalreichweite weit abgeschlagen, wobei sie aus Kostengründen eine attraktive Alternative darstellen würden.

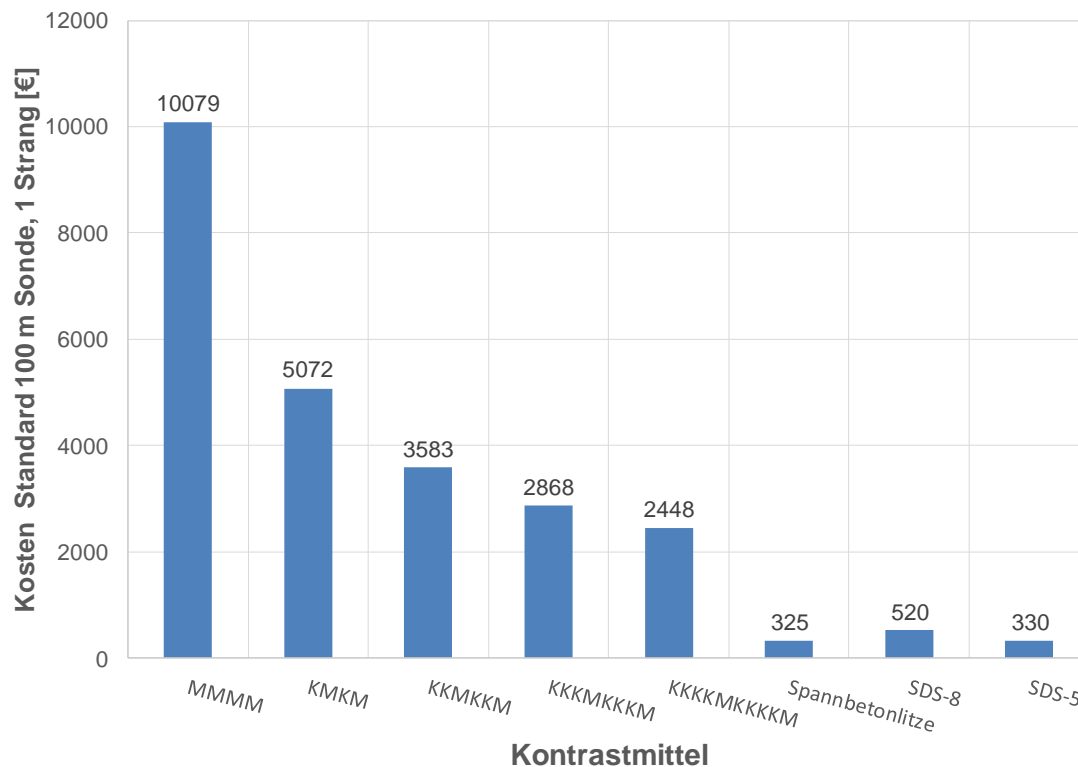


Abb. 139: Vergleich der Materialkosten der Stahldrahtseile, Spannbetonlitzten und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Methode für eine Standard 100 m EWS mit der Bestückung eines Sondenstrangs.

Abb. 140 zeigt ergänzend noch den Vergleich der vertikalen Signalreichweiten im Bohrrohr für die einzelnen Kontrastmittel. Es zeigt sich eine ähnliche Verteilung wie bei den lateralen Signalreichweiten.

Der einzige Unterschied ist, dass sich in diesem Fall die Spannbetonlitze nicht mit einem der M/K Szenarien vergleichen lässt, sondern schwächer ist als sämtliche M/K Szenarien. Dies ändert jedoch letztlich nichts an der Bewertung der Spannbetonlitze als am besten geeignetes Kontrastmittel, da die vertikale Signalreichweite eher eine untergeordnete Rolle spielt. Es müsste lediglich darauf geachtet werden, dass sich im Anwendungsfall, ein Messmodul mit integrierten Sensoren immer innerhalb der vertikalen Signalreichweite von 65,2 cm befindet.

D.h. das Modul muss beim Überbohren quasi in einem Bereich von der aktuellen Endteufe bis 65,2 cm darüber eingebracht werden. Damit geht man sicher, dass man die Sonde detektieren kann, sofern sie denn noch keine zu massive Abweichung erfahren hat, z.B. schon ein lateraler Ast (Worst case), so dass nur noch das laterale Signal erfasst wird. Nochmal hervorzuheben ist, dass diese Messung zusätzlich zur mechanischen Ausrichtung erfolgen kann.

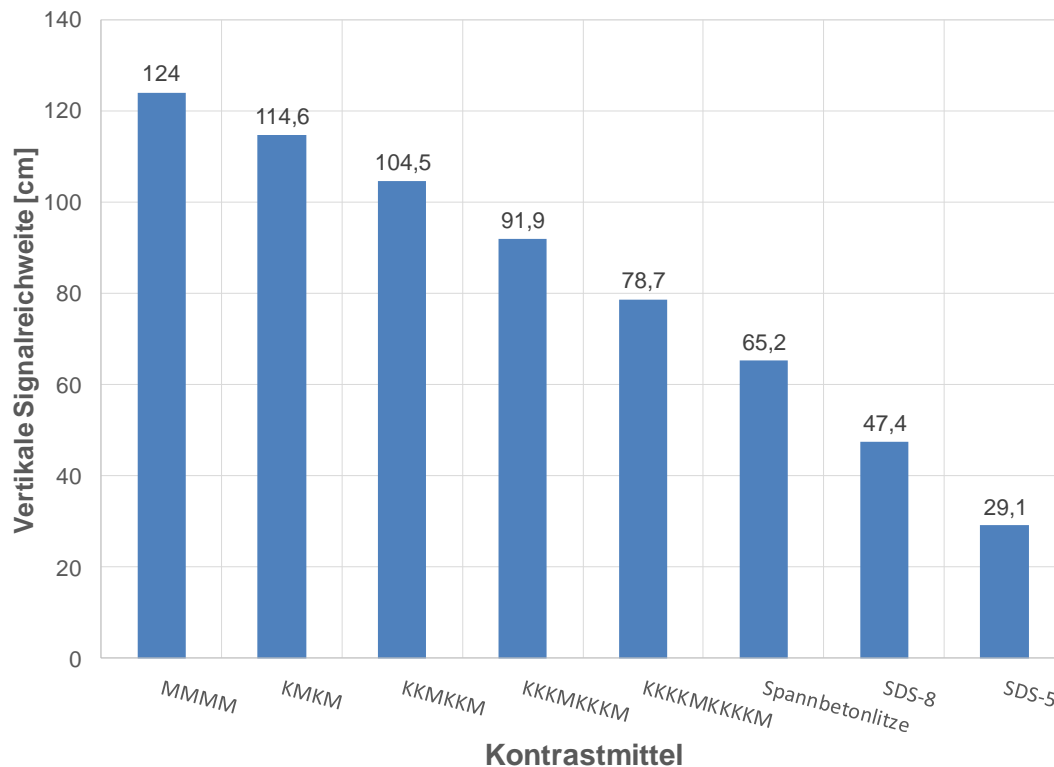


Abb. 140: Vergleich der durchschnittlichen vertikalen Signalreichweiten der Stahldrahtseile (GA „Süd“), Spannbetonlitzen (GA „Süd“) und Magnet(M)-/Stahlkugel(K)-Szenarien im Bohrrohr bei Bestückung eines Sondenstrangs.

Es konnte in dieser Arbeit speziell für die Spannbetonlitze nicht festgestellt werden, ob bereits eine Sättigungsmagnetisierung mit dem GA erreicht wurde. Deshalb besteht die Möglichkeit, dass die Signalreichweite bei stärkerer Magnetisierung als GA (ca. 40 mT) noch erhöht werden kann und somit die Detektierbarkeit potentiell noch verbessert werden könnte. Die Magnetisierung an sich ist als wichtig einzustufen, da man damit die Signalreichweite entsprechend den Untersuchungen mit Spannbetonlitze und Bohrrohr im Messstand um im Schnitt 29,1 % lateral und 40,4 % vertikal verstärken kann.

Die Kosten für eine Anlage zur Magnetisierung können an dieser Stelle schlecht abgeschätzt werden, zumal eine entsprechende Anlage im Feld ggf. andere technische Anforderungen erfordern könnte als eine Anlage für den Labormaßstab. Im Prinzip könnte dies aber sehr einfach aussehen, so müsste man quasi eine Art Magnetaufsatz bzw. Adapter am Eingang

eines Sondenstrangs anbringen, der in der Lage ist, die Spannbetonlitze aufzunehmen. Somit würde die Spannbetonlitze beim Herablassen in die EWS den Adapter passieren und magnetisiert werden. Die Herstellungskosten z.B. des hier angefertigten GA Aufsatzes können mit zwischen 5000 € bis max. 8.000 € angegeben werden. Dies sind grobe Schätzungen auf der Basis unterschiedlicher Stundensätze für Maschinenbelegung (Fräser), Programmierarbeiten (Frässoftware) und Facharbeitereinsatz sowie Materialkosten. Zu erwähnen ist auch, dass die Aufsätze als Einzelanfertigungen berücksichtigt wurden, was sich dementsprechend auf den Preis niederschlägt. Zudem muss angemerkt werden, dass es sich um einmalige Investitionen handeln würde und somit bei mehrmaliger Anwendung von einem schnellen return of invest ausgegangen werden kann.

Möchte man weiterhin eine Verbesserung der lateralen Signalreichweite der Kontrastmittel erreichen kann bei jedem geplanten Rückbauvorhaben die Möglichkeit geprüft werden, ob ein kleiner Bereich der Bohrung oberhalb der Endteufe und im Messbereich des Messmoduls unverrohrt gelassen werden kann. Dies hängt natürlich von der Geologie am Standort und der dementsprechenden Tiefe ab und wird nicht immer möglich sein. Jedoch wäre es so möglich, eine Abschwächung des Signals der Spannbetonlitze durch die Verrohrung zu verhindern, die immerhin im Schnitt 31,6 %, bzw. 34,1 % lateral und 29,0 % vertikal beträgt, wie bei den Versuchen im Messstand festgestellt werden konnte.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der vertikalen und lateralen Signalreichweiten ist die Verwendung größerer Seildurchmesser, da damit die Signalreichweite bis zu einem gewissen Grad erweitert werden kann, wie mit den Versuchen mit den $\varnothing 5$ mm und $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseilen nachgewiesen werden konnte. So hatten die magnetisierten und nicht magnetisierten $\varnothing 8$ mm Stahldrahtseile durchweg bei allen Szenarien immer eine größere Signalreichweite gegenüber den $\varnothing 5$ mm Stahldrahtseilen. Dieser Vergleich funktioniert natürlich nur unter der Bedingung, dass die Seile aus einem identischen Stahl hergestellt worden sind. Sind es unterschiedliche Stähle ist ein Vergleich schwierig, da jeder Stahl über andere magnetische Eigenschaften verfügen kann. Mit $\varnothing 15,7$ mm ist die Spannbetonlitze sicherlich an der Durchmessergerade angelangt, welche noch in eine EWS problemlos eingebracht werden kann, somit besteht hier kein großes Potential mehr für eine Vergrößerung der Signalreichweite. Nur noch über eine Variation des Stahls könnte dies möglich sein. Dieser müssten dann aber sowohl auf die mechanischen Beanspruchungen während des Bohrvorgangs sowie auf bessere Magnetisierbarkeit abgestimmt werden.

Sehr wichtig ist es auch hervorzuheben, dass für den Anwendungsfall im Gelände, (und das gilt für alle in dieser Arbeit untersuchten Kontrastmittel) immer eine Referenzmessung des natürlichen Magnetfelds vorteilhaft wäre, um letztlich das magnetische Signal der eingesetzten Kontrastmittel herausfiltern zu können. Dies kann z.B. durch ein tiefenorientiertes, magnetisches Vorab-Logging in der rückbaufälligen EWS durchgeführt

werden sowie auch innerhalb der Rückbaubohrung etwas außerhalb der Signalreichweite des in die Sonde eingebrachten Kontrastmittels.

Von der geologischen Umgebung scheinen keine signifikanten Störeinflüsse auf die magnetische Messmethode auszugehen. Versuche wurden hierzu nur mit den \varnothing 8 mm Stahldrahtseilen durchgeführt, repräsentativ für alle anderen Kontrastmittel. Generell kann bereits auf theoretischem Weg ein Einfluss bei einer Vielzahl von Szenarien ausgeschlossen werden, da nur ferromagnetische Materialien wirklich das Potential für Störeinflüsse haben und diese sind in der Natur relativ selten. So können klassische Sedimente wie Sand und Ton und entsprechende Gesteine, ob nun trocken oder wassergesättigt, als unproblematisch eingestuft werden. Dies konnte in Rahmen dieses Vorhabens auch experimentell nachgewiesen werden. Es kann trotzdem nur geraten werden bei jedem Rückbaufall die vorhandenen geologischen Untergrunddaten auf potentiell magnetische Einheiten zu prüfen, ggf. in Verbindung mit einer magnetischen Vorabprüfung im Labor, um die Möglichkeit von Störeinflüssen in bestimmten Tiefen abschätzen zu können. Eine direkte Übertragung der hier im Labor durchgeführten Experimente auf die Bedingungen im Feld ist nicht möglich, da im Feld je nach Fall viel größere Volumina an Gestein vorhanden sein könnten und dann aufgrund der großen Massen an ggf. ferritschen Mineralen möglicherweise doch Störeinflüsse auftreten könnten.

Neben dem Einfluss der geologischen Gegebenheiten wurde auch ein möglicher Einfluss von magnetisch dotiertem Zement auf das magnetische Signal exemplarisch an der Spannbetonlitze-Methode untersucht. Die Untersuchungen zeigten keinerlei Einfluss auf das Messsignal. Der Magnetitgehalt im Zement ist wohl zu gering und zudem sendet der Cem Trakker nur ein sehr schwaches magnetisches Signal in die Umgebung ab.

Die elektrische Widerstandsmessung hat gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die Position einer einfachen U-Rohrsonde in einer Hilfsverrohrung zu lokalisieren. Dies war besonders im Sand und Schluff der Fall. Es hat sich aber auch gezeigt, dass das Kontrastmittel an die umgebenden Bedingungen, wie z.B. Geologie und Grundwasserbedingungen sowie die verwendeten Baustoffe (Art des Hinterfüllmaterials) anzupassen ist, da im Ton keine Positionsbestimmung der Erdwärmesonde möglich war. So sollte das Kontrastmittel nicht zwingend einen niedrigen spezifischen Widerstand aufweisen sondern an die jeweiligen Standortbedingungen angepasst werden. Im Bereich von Gesteinen mit einem niedrigen spezifischen Widerstand wären Kontrastmittel mit einem sehr hohen spezifischen Widerstand sinnvoll. In diesen Fällen muss jedoch auch der spezifische Widerstand des Hinterfüllbaustoffs Berücksichtigung finden. Um diese Fragen zu klären, besteht weiterer Forschungsbedarf. Weiterführende Untersuchungen waren jedoch im Rahmen des Forschungsprojektes nicht mehr möglich. Um die relevanten Fragen zu klären, müssten weitere umfangreiche Untersuchungen im Labor-, Technikums- und Feldmaßstab erfolgen, da im Realfall sehr unterschiedliche und komplexe Bedingungen für die Widerstandsmessung vorkommen. Dies

hängt neben den unterschiedlichen spezifischen Widerständen der vorkommenden Gesteine, Hinterfüllbaustoffe und Erdwärmesonden auch von der Positionierung der Sondenrohre innerhalb der Bohrung, sowie von Bohrspülung und dem vorhandenen Wasser im Bohrloch ab.

Im Hinblick auf die Realanwendung wurde basierend auf den Aufbau eines Stufenmeißels, ein möglicher Bohrkopf für die Widerstandsmessung geplant (Abb. 141). Darüber hinaus wurde für die Übertragung der Messwerte eine Schleifringlösung für den Kraftdrehkopf der Bohranlage erarbeitet (Abb. 142). Die Übertragung der Messsignale vom Bohrkopf zum Schleifring muss jedoch noch geklärt werden, da durch die Drehbewegung des Bohrgestänges, dem Zusammensetzen der einzelnen Bohrgestänge während des Bohrbetriebs sowie durch den Druck von ca. 20 bar innerhalb des Bohrgestänges eine einfache Kabellösung nicht umsetzbar wäre.

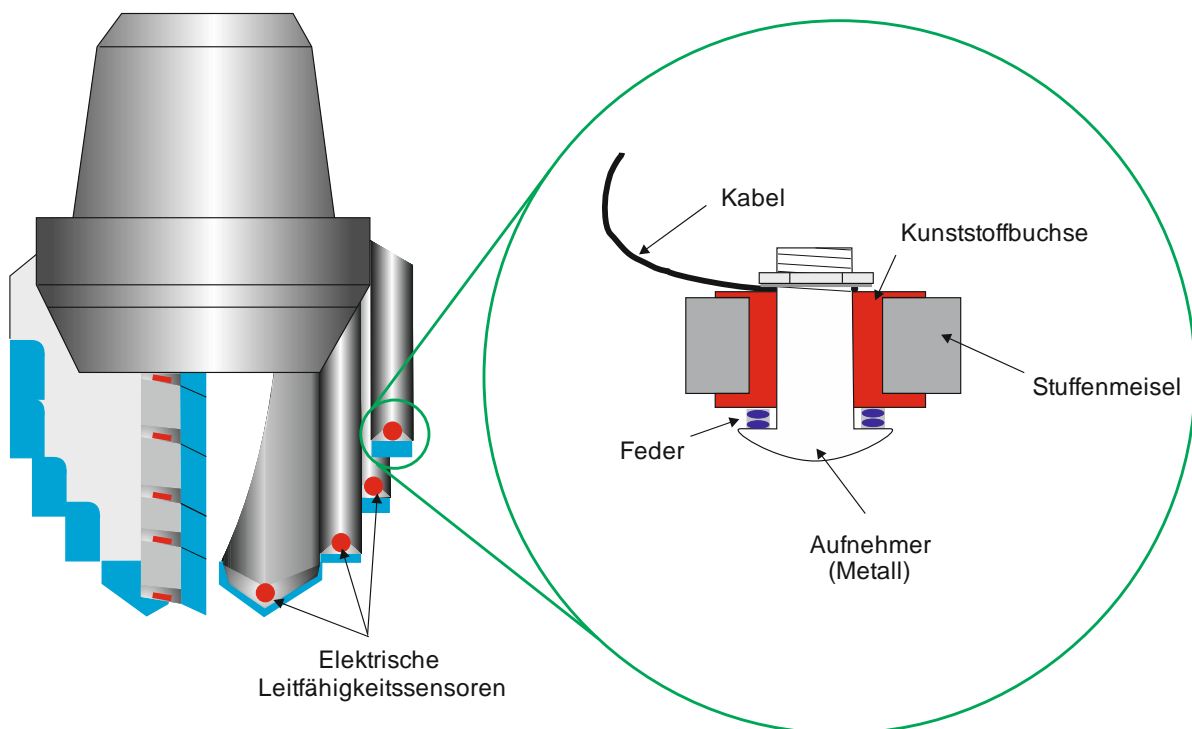


Abb. 141: Bohrkopf (Stufenmeißel) für Realanwendung zur elektrischen Widerstandsmessung.

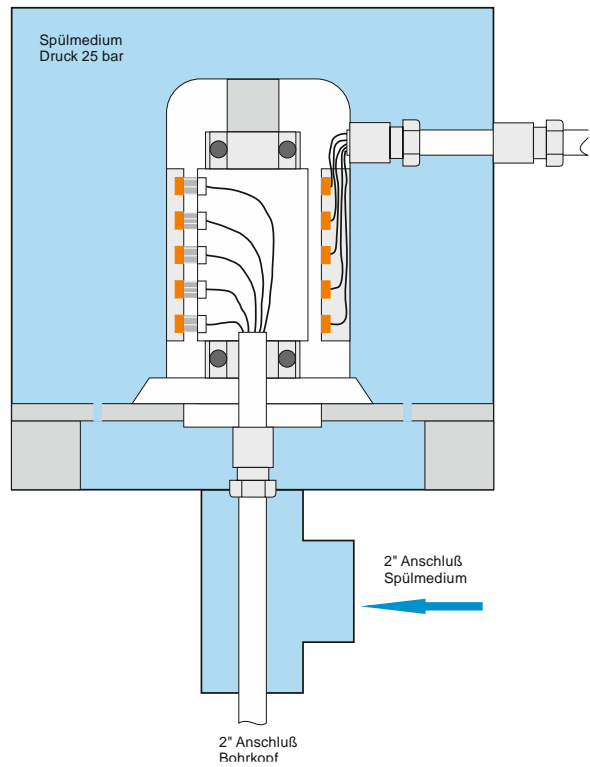


Abb. 142: Kraftdrehkopf mit Schleifring zur Übertragung der Widerstandsmesswerte.

4 Verlaufsmessung (enOware)

4.1.1 Prototypentwicklung

Um die genaue Lage einer Erdwärmesonde bestimmen zu können, wurde ein sensorisches Messsystem entwickelt. Dazu wurde ein 9DOF² Sensor verwendet, der in der Lage ist, neun Freiheitsgrade eines einzigen Systems zu überwachen.

Die Messergebnisse werden im Anschluss mittels Software ausgewertet und dargestellt. Bei der Messung werden die physikalischen Größen, Beschleunigung, Drehrate und Magnetfeld gemessen. Davon ausgehend werden die Messdaten des Gyroskops und des Beschleunigungssensors verwendet, um eine Orientierung des Sensors zu bestimmen. Die Änderung der magnetischen Flussdichte aus dem Magnetometer wird zur Hilfe genommen, um Messungenauigkeiten zu kompensieren. Aus diesen Daten kann unter Betrachtung der Zeitstempel der Messtechnik mittels doppelter Integration der Beschleunigung nach der Zeit, die räumliche Bewegung bestimmt werden. Diese wird anschließend mit der Orientierung des Sensors zu einem Inertialsystem zusammengefasst. Durch Erfassen aller drei physikalischen Größen, an den drei Achsen, der Drehrate, der Beschleunigung und der Orientierung, kann daher auf den Verlauf der vermessenen Sonde im Raum geschlossen werden. Der Verlauf der vermessenen Strecke wird abschließend in eine geeignete Darstellung gebracht.

Eine moderne MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) Hardwarelösung wurde bei der Entwicklung verwendet, die unterschiedliche Messtechniken in einem Chip vereint und damit prinzipiell bestens für den Aufbau miniaturisierter Datenlogger geeignet ist. Mit MEMS Technik kann ein kompaktes System mit geringen Leistungsaufnahmen umgesetzt werden.

Der erste Prototyp ist noch kabelgebunden, da zuerst die Qualität der Lagebestimmung im Vordergrund stehen sollte und zudem mit der kabelgebundenen Lösung auf Speichersysteme sowie kabellose Übertragungstechniken verzichtet werden kann. Das Sensorsystem wurde aber bereits so entwickelt, dass es später weiter miniaturisiert, energieautark und kabellos betrieben werden kann. In Abb. 143 kann der kabelgebundene Prototyp entnommen werden. Die Sensorik wird mittels druckdichtem Gehäuse gegen den um eine Sonde vorherrschenden Wasserdruck geschützt. Das Gehäuse besteht aus einer handelsüblichen, genormten PG-Kabeldurchführung, einem Gehäuseteil mit Gewinde für die PG-Verschraubung und einer Kappe auf diesem Gehäuse, alle mittels O-Ringen abgedichtet. Der Prototyp ist damit auch für den Einsatz unter Wasser geeignet. Für das fertige Produkt wird eine Druckbeständigkeit von bis zu $4,1 \cdot 10^6$ Pa angestrebt. Für die zukünftige Entwicklung ist durch den modularen

² Abk. engl. „nine degrees of freedom“

mechanischen Aufbau eine Erweiterung mit einem Energiespeicher und einem Prozessor zur Datenspeicherung sowie einem geeigneten Speichermodul gut denkbar.

Im Rahmen des Projektes wurde zudem eine Steuerungs- und Auswertesoftware entwickelt, die ermöglicht, wichtige Parameter einzustellen (Messfrequenz) und rohe und korrigierte Daten zu erfassen und zu ermitteln. Ein Auswertungsschema, an dessen Ende eine Positionsbestimmung im Raum mit Hilfe des Messsystems gemacht werden kann, ist in Abb. 144 dargestellt. Auf eine mathematische Erläuterung der Auswertung wird an dieser Stelle verzichtet (siehe in Linder 2015).

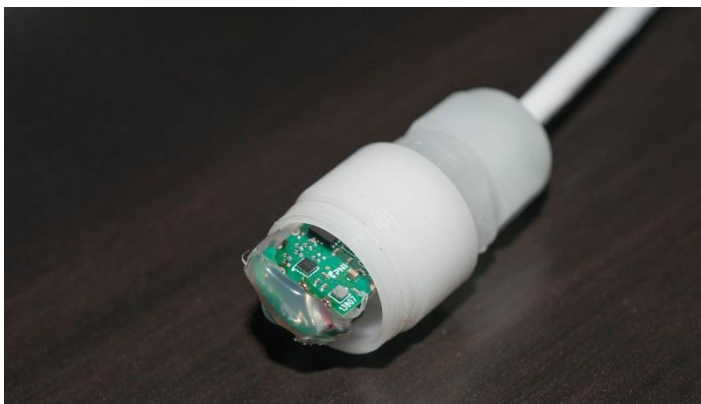


Abb. 143: Kabelgebundener Prototyp zur Lagebestimmung von Erdwärmesonden (geöffnetes Sensorsystem).

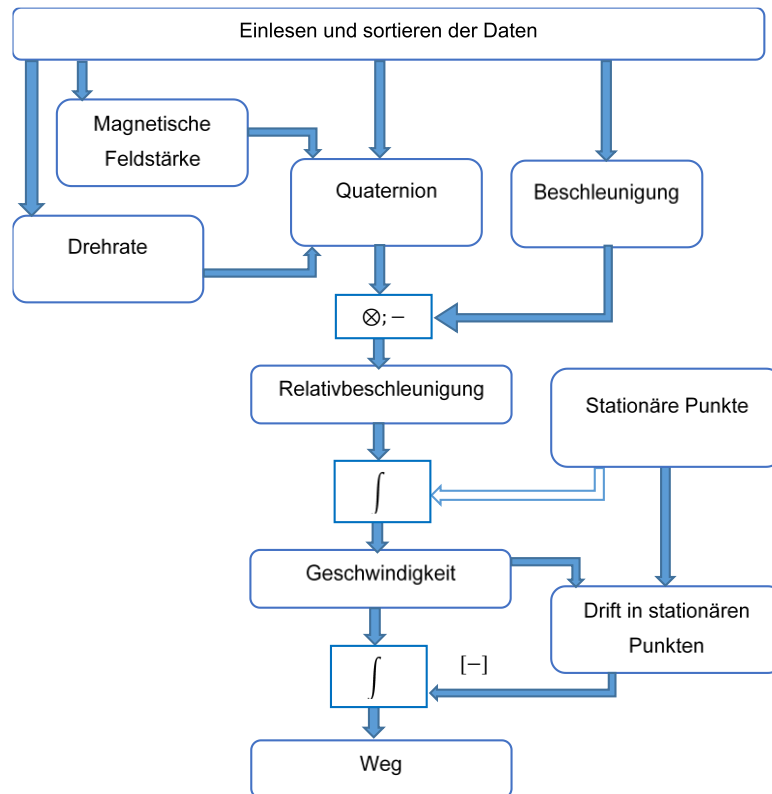


Abb. 144: Blockdiagramm zur Auswertung der Messsignale (Erläuterungen zur Quaternionen siehe in Madgwick 2011).

4.1.2 Versuchsergebnisse

Für die Streckenmessungen wurden verschiedene Strecken aufgebaut und vermessen. Für jede unterschiedliche Messung wurden die Filterparameter zur Detektion der stationären Werte neu angepasst, um ein möglichst genaues Ergebnis zu erzielen und keine Bewegungsinformationen zu vernachlässigen.

Im Folgenden sind Messung der Lage eines in einem Treppenhaus verlegten PE-Rohres mit 25mm Innendurchmesser dargestellt (Abb. 145). Das Rohr ist mit Kabelbinder an dem Geländer der Treppe befestigt und exakt vorher vermessen. Die Messung des Rohres erfolgt durch manuelles Einführen der Messsonde in das Rohr bis zu einem Marker am Sensorkabel, welches bei 8,3 m angebracht ist. Dadurch wird sichergestellt, dass nur der Teil der Sonde vermessen wird, welcher vergleichbare Abweichungen zu einer EWS aufweist.



Abb. 145: Teststrecke im Treppenhaus.

Die Ruhemessungen zeigen, welchen Einfluss die Erhöhung der Messfrequenz auf die Messdaten hat. Das Rauschen der Sensoren wird mit steigender Messfrequenz stärker. Die Schwankungen des Messsignals sind beim Gyroskop in der Größenordnung von $\pm 0,2$ °/s, bei der direkten Verbindung und bei der seriellen Anbindung in der Größenordnung von $\pm 0,5$ °/s. Die genauere Betrachtung der Schwankung der Drehrate ist für die Messung selbst nicht notwendig, da bereits im MCP (motion co-processor) die Umwandlung der Drehrate, der Beschleunigung und des Magnetometers zu Quaternionen zusammengefasst ist. Die Schwankung kann somit indirekt bei der Auswertung der Richtung betrachtet werden. Bei der Messung der Teststrecke kann über den dreidimensionalen Plot der genaue Verlauf der Sonde analysiert werden (Abb. 146 und Abb. 147). An den Stützstellen, an welchen ein Polarkoordinatengitter aufgetragen ist, kann die Abweichungsrichtung sowie der Betrag der Ableitung einfach abgelesen werden. Zusätzlich kann der Verlauf der Messung in jeder Betrachtungsebene separat dargestellt werden, um den gesamten Versatz der Messung von der Bezugsebene abzubilden.

Beispielhaft lassen sich pro gewählter Tiefeneinheit die Abweichungen der jeweiligen Himmelsrichtungen anzeigen (exemplarisch für einige Tiefen in Tab. 27).

Die Lagedaten lassen sich auch um einige Stellen genauer darstellen, wobei eine genauere Auflösung zum Zweck der Lagebestimmung keinen Sinn ergibt, da selbst der Sensor im Rohr bereits einen Spielraum von 1 cm besitzt.

Tab. 27: Tabellarische Daten ausgewählter Tiefenmesspunkte (cm Auflösung).

+Ost/-West	+Nord/-Süd	Tiefe
-0,10	0,05	-2,58
-0,10	0,05	-2,59
-0,10	0,05	-2,60
-0,10	0,05	-2,61

Verlauf des Sensors (Sample 5161 of 5172)

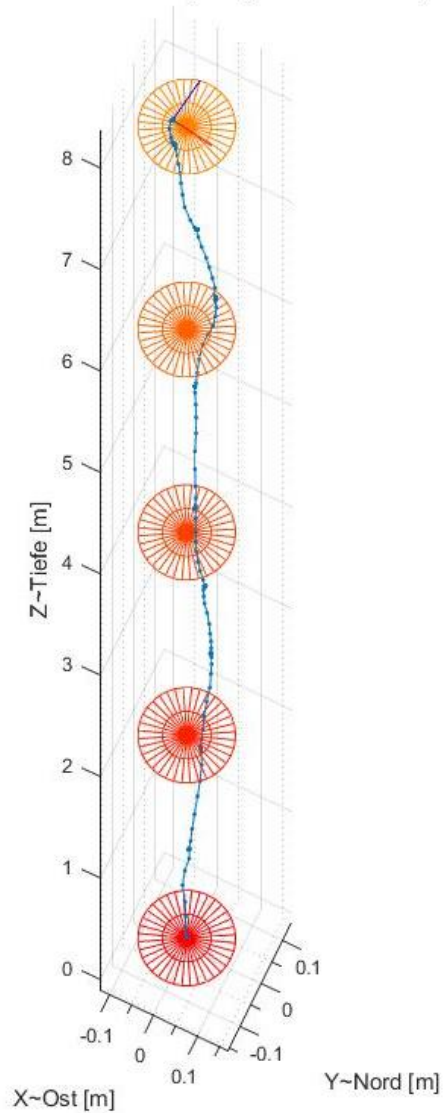


Abb. 146: 3D Darstellung des Messverlaufs im Sondenrohr.

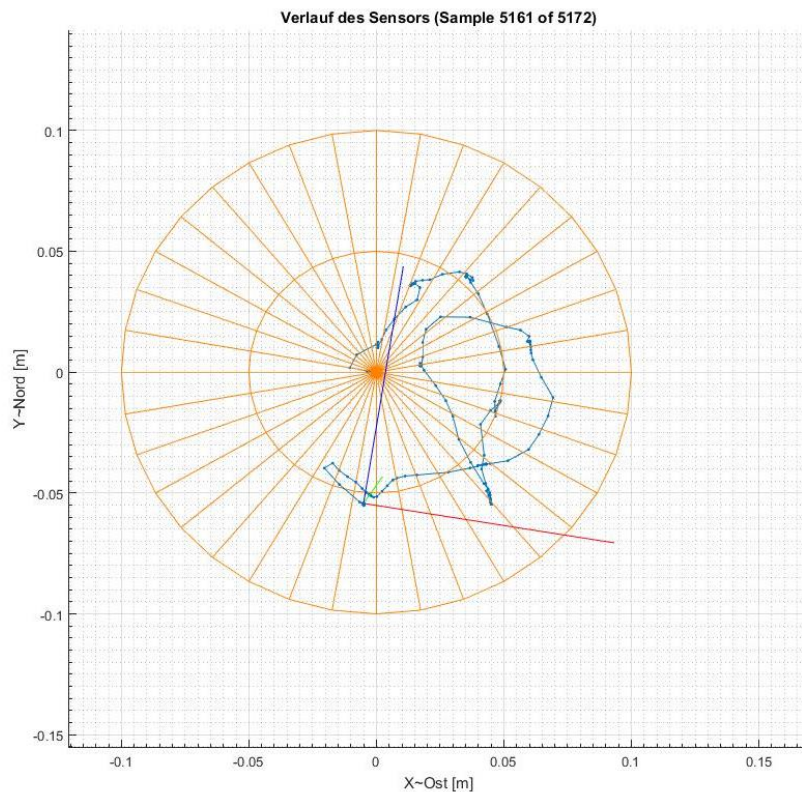


Abb. 147: Draufsicht auf die Messung im Sondenrohr (Auflösung im mm Bereich).

4.1.3 Messung an weiteren Testsonden, HW-Entwicklung und Anpassung des Algorithmus

Zur Durchführung weiterer Verlaufsmessung an Erdwärmesonden der Hochschule Karlsruhe, am KIT wie auch bei Fa. Burkhardt wurde der miniaturisierter Sensor bestehend aus Magnetometer, Gyrometer und Accelerometer durch die Entwicklung weiterer Algorithmen im Labor erprobt. Anschließend wurden umfangreiche Messreihen an den zuvor genannten Erdwärmesonden durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgte hierfür die Definition der Anforderungen und Festlegung der Grundstruktur, der sogenannten Black-Box (Abb. 148). Darauf aufbauend die Entwicklung einer Elektronik mit einer Auslesesoftware auf Basis von LabView, wie auch die Konstruktion eines für die Sensorik und Druckgegebenheiten miniaturisiertes Gehäuse als Grundlage für die kabelgebundene Messung. Hierfür wurden drei Prototypen gefertigt.

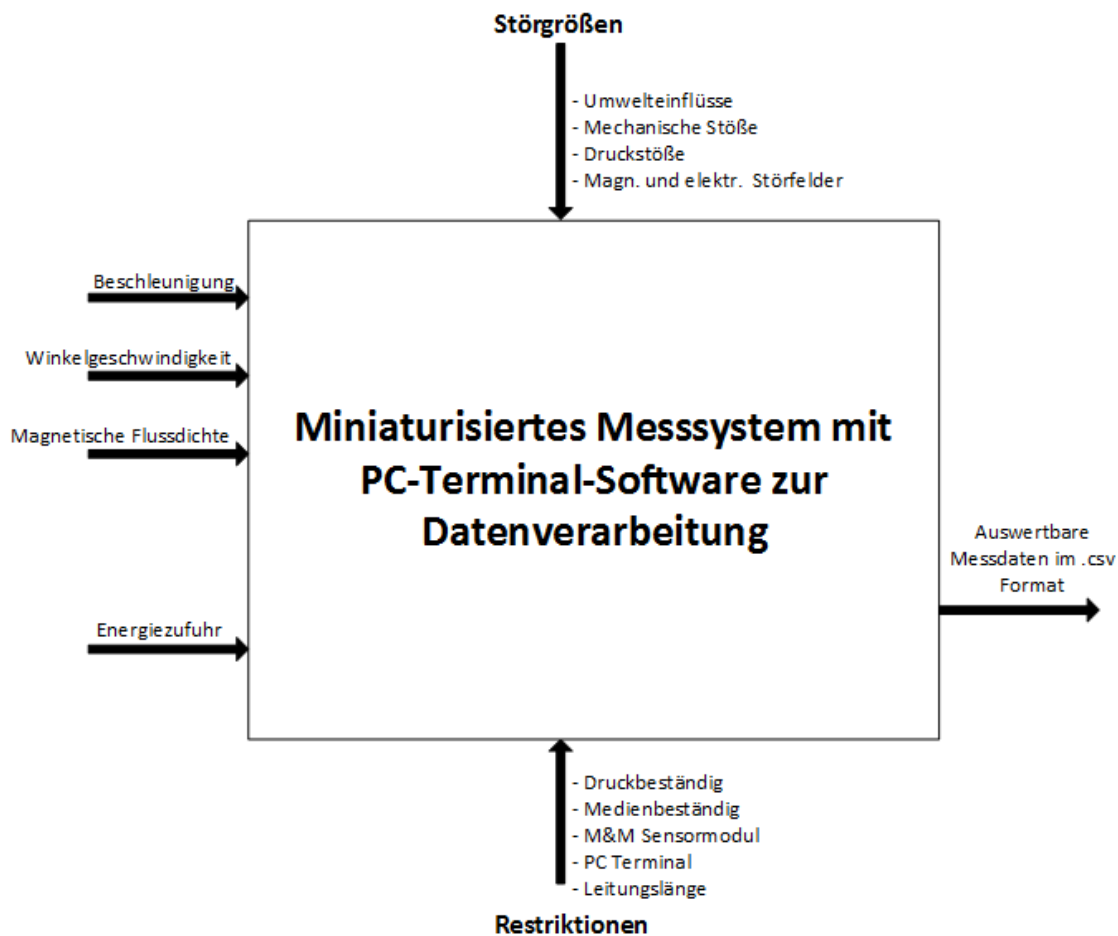


Abb. 148: Black-Box für Verlaufssensor.

Für die Messerprobung der Prototypen im Labor erfolgte zudem die Entwicklung eines Teststandes für die Bewertung der Messtechnik und Datenübertragung wie auch zur Validierung der Algorithmen. Für die Datenübertragung war insbesondere die hohe Datenrate über eine Strecke von mehr als 100m als Anforderung gegeben, die auch in umfangreichen Tests als Zuverlässig nachgewiesen werden konnte. Für die Datenübertragung kommt ein Protokoll auf Basis von RS485 zum Einsatz.

Für die Entwicklung des Gehäuses spielten die Druckfestigkeit wie auch die Störuneempfindlichkeiten durch das Gehäuse eine Rolle. Durch das kabelgebundene Auslesen der Messdaten muss die Verbindung von Kabel zu Gehäuse zudem druckfest und wasserdicht ausgeführt sein. Die Konstruktion als CAD-Modell ergab als ideale Lösung eine Art pillenförmiges Gehäuse (Abb. 149)

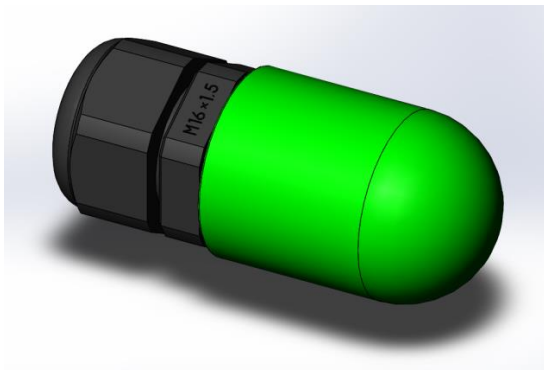


Abb. 149: Sensorgehäuse für Lagesensor konstruiert als CAD-Modell

Zum Nachweis der Druckfestigkeit der Verbindungselemente des Gehäuses wurden Drucktests durchgeführt, die in einer Druckkammer bis 30 Bar auf Wasserdichtigkeit getestet wurden (Abb. 150)



Abb. 150: Druckkammer zum Testen der Druckfestigkeit des Gehäuse und der Kabeldurchführung (rechts)

Die Messdaten vom Verlaufssensor müssen für eine hohe Auflösung und Genauigkeit in einer hinreichend schnellen Geschwindigkeit per RS485 übertragen werden. Hierzu erfolgte die Entwicklung einer auf LabView basierten Windows Software zum Steuern wie auch zur Datenerfassung des Lagesensors (Abb. 151)

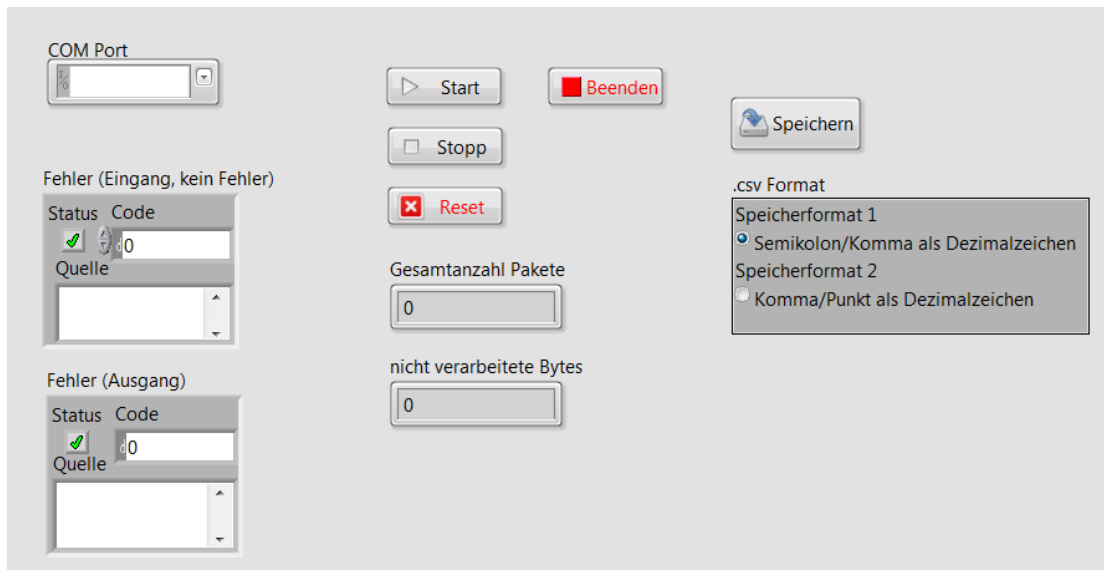


Abb. 151: Oberfläche der LabView Anwendung zum Auslesen der Messdaten

Die Elektronik für die 3x Prototypen wurden manuell bestückt (Abb. 152) und für die Verwendung mit der LabView Software wurde eine Firmware für den Micro Controller zum Erfassen der Sensormessdaten des Magnet-, Gyro- und Accelerometersensors erstellt.

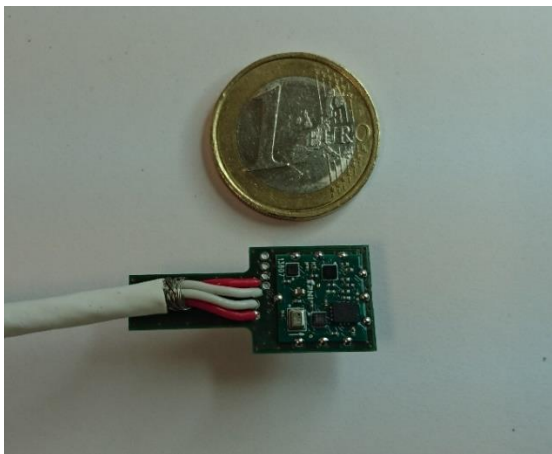


Abb. 152: Prototypelektronik des Verlaufssensor nach der kompletten Bestückung

Die Entwicklung von Algorithmen zum Vermessen des Sondenverlaufs, im ersten Schritt an einer kurzen Strecke an einem Teststand über ca. 2m, erfolgte in umfangreichen Iterationsstufen. Auf kurzen Strecken konnte hierbei der Nachweis der Messung eines Rohrverlaufs über einige Meter mit einer Genauigkeit von ca. 2-3% erreicht werden. Zudem wurden umfangreiche Feldtests an EWS des KIT (30m), der Hochschule Karlsruhe (40m) und der Test-EWS mit einer Tiefe von ca. 100 m bei Fa. Burkhardt durchgeführt (Abb. 153).

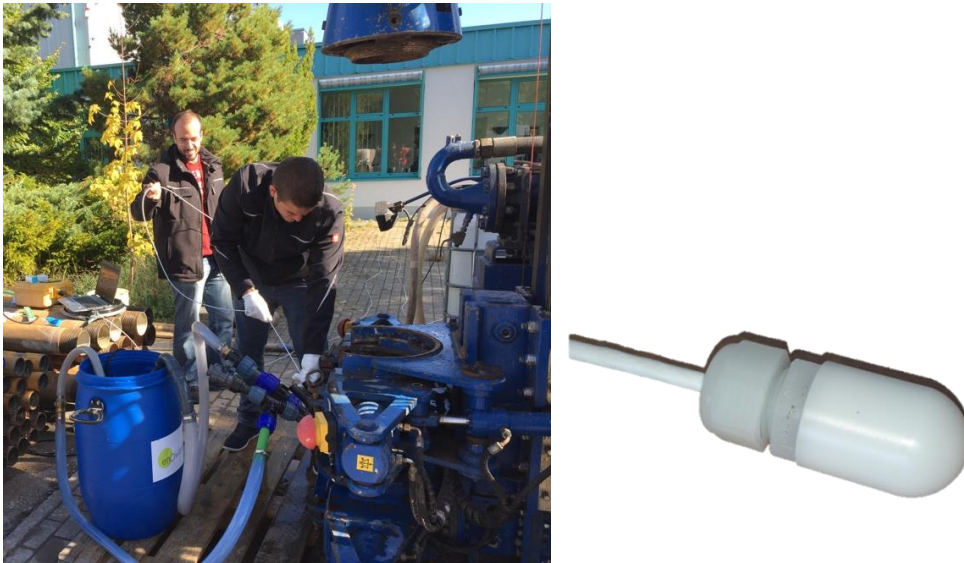


Abb. 153: Messung mit Verlaufssensor (links) und Prototyp Verlaufssensor (rechts)

Bei den Messungen mit dem Algorithmus konnten folgende Ergebnisse für eine 8m wie auch 100m Sonde erreicht werden (Abb. 154 und Abb. 155).

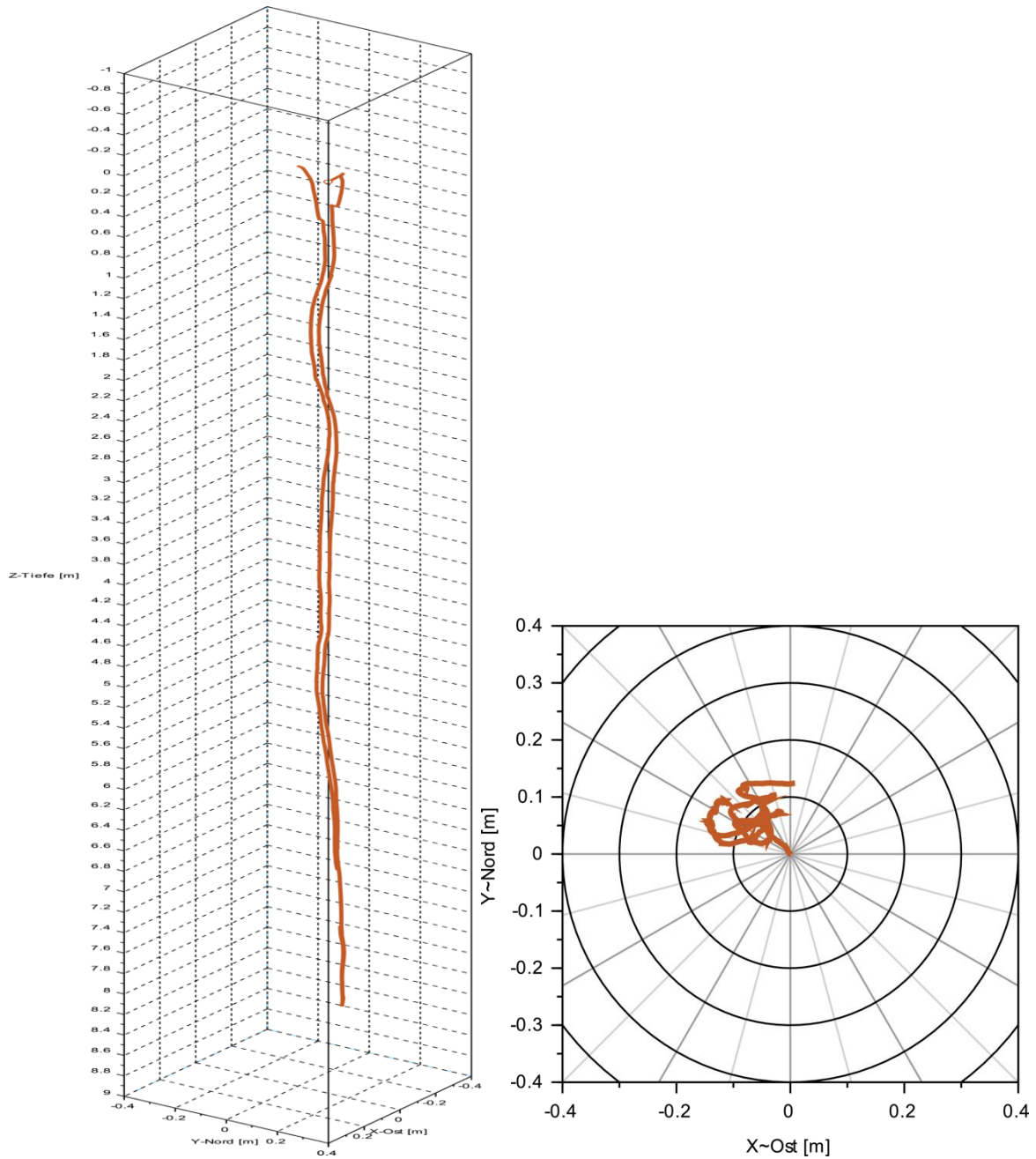


Abb. 154: Messung mit dem Verlaufssensor an einer 8m Teststrecke

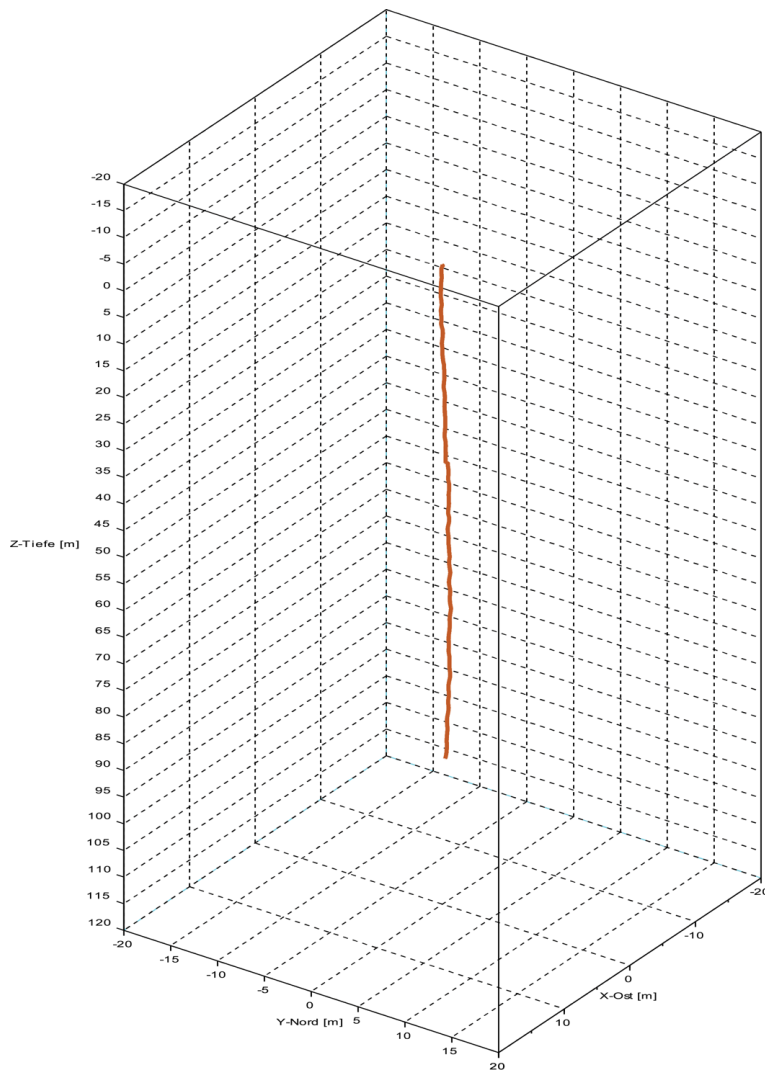


Abb. 155: Messung mit dem Verlaufssensor an einer 100m Erdwärmesonde.

Der Vergleich der 100m Messung erfolgte mit einer Referenzmessung, welche mit einem Inklinometer direkt nach dem Bohren und vor dem Einbringen des Sondenrohrs im offenen Bohrloch durchgeführt wurde. Die Messergebnisse der Referenzmessung sind in der folgenden Abb. 156 aufgeführt.

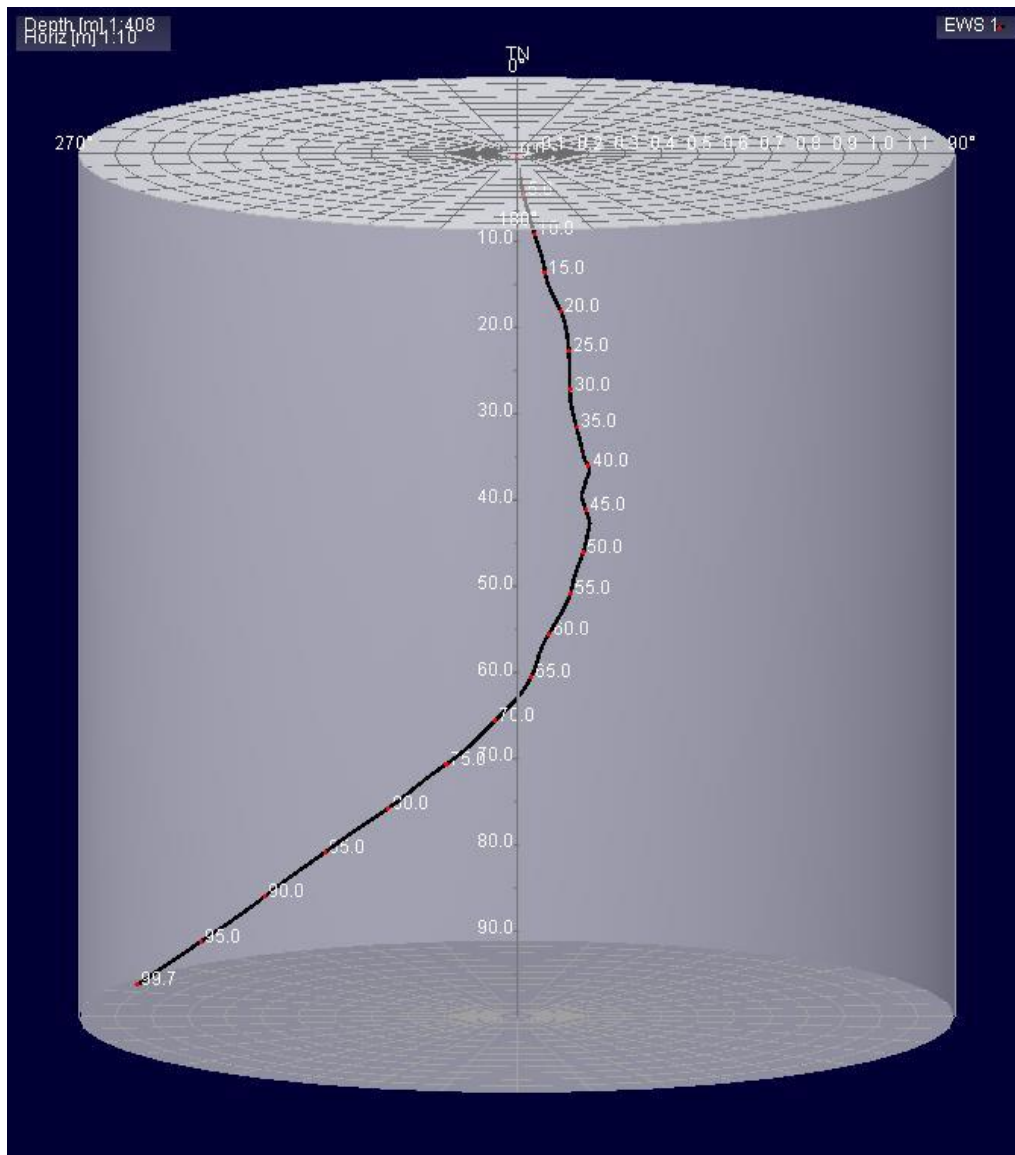


Abb. 156: Referenzmessung des 100m Bohrlochs

4.1.4 Fazit

Die Messung der Lage konnte mit kabelgebundener Messtechnik erfolgreich durchgeführt werden.

- Durch zahlreiche Messungen und Fehlerbetrachtungen belegbar.
- Wiederholungsmessungen stimmen gut überein.

Der Energieverbrauch der bisherigen Lösung ist sehr gering. Damit sind sehr gute Voraussetzungen für eine kabellose Umsetzung geschaffen worden (in Bearbeitung).

- Der Energieverbrauch liegt im Bereich von 2 mW.

Die Genauigkeit des Prototyps über sehr kurze Messstrecken (kleiner 7m) liegt derzeit bei ca. $\pm 0,5\%$.

- Korrekturfaktoren für die lokale Abweichung des Magnetfeldes und weitere Einflüsse sind bereits in Entwicklung und Bearbeitung, wobei angemerkt werden muss, dass eine 0,5 % Abweichung in einer Sonde, die z.B. um 2 m in der Vertikalen aus dem Lot wäre, eine Messgenauigkeit von $\pm 1\text{cm}$ bedeutet. Wenn zudem die Messung mit der bereits vorhandenen hochauflösenden Temperatur- und Druckmesstechnik kombiniert würde (Zorn et al. 2015), könnten jetzt schon Temperaturkompensationen und vertikale Tiefenkorrekturen der Messdaten vorgenommen werden.

Mit der umgesetzten Lösung ist eine punktgenaue Auswertung der Abweichung vom Ansatzpunkt möglich. Dabei kann eine Punktauflösung bis zur typischen Messfrequenz von 220 Hz realisiert werden.

- Es hat sich gezeigt, dass für die Auswertung im mm-Bereich niedrigere Messfrequenzen sinnvoll erscheinen (dadurch sind kabellose Systeme einfacher umsetzbar, da weniger Speicherkapazität gebraucht und weniger Energie benötigt wird).

Bis dato konnte die verfügbare EWS bei Fa. Burkardt noch nicht mit der geplanten Gesamttechnologie zurückgebaut werden. Dies hat folgende Gründe:

- Die Genehmigung der Bohrung erfolgte erst zum September 2016
- Das Verlaufsmesswerkzeug der enOware konnte aufgrund der erst zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Bohrung wie auch weiterer technischer Herausforderungen noch nicht den Status der Fertigstellung erreichen. Vor dem Rückbau sind weitere umfangreiche Messungen im Vergleich zu vorhandener Referenzmessung erforderlich.
- Das Orientierungsmesstool mittels Magnetosensorik konnte noch nicht im Realmaßstabsversuch erprobt werden. Hierfür müssen auch noch mit der enOware Messtechnik weitere Messversuche erfolgen und Anpassungen in Software und Hardware für die Sensorik erfolgen.
- Der Verlaufssensor bedarf hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit von mindestens 0,5% über Strecken länger als 10m weitere umfangreiche Softwareentwicklungen und Felderprobungen, die deutlich mehr Zeit erfordern um die für den Rückbau erforderlichen Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere die Softwareentwicklung mit immer kontinuierlich durchzuführenden Feldtests zeigte sich im Projektverlauf als deutlich zeitintensiver als geplant.
- Bei der Auswertung der Ergebnisse mittels der entwickelten Algorithmen zeigte sich, dass für die erforderliche Genauigkeit voraussichtlich eine weitere Hardwareanpassung durch Kaskadierung oder Mehrfachmessungen erforderlich ist. Hierzu sind weitere umfangreiche Labor- und Feldversuche wie auch Elektronikentwicklungen in Form von Prototypen erforderlich.

- Für den effizienten Rückbau muss der Verlaufssensor drahtlos ausgeführt sein, was mit weiterem Entwicklungsaufwand und weiterer Felderprobung verbunden ist.

4.2 Technikumsversuch

Eine zentrale Aufgabe im Projekt ist die messtechnische Erfassung des Erdwärmesondenverlaufs im Untergrund. Um mit dem neuentwickelten Miniatursensor reproduzierbare Messungen zur Orientierung der EWS zu erhalten, wurde ein Technikumsversuch aufgebaut. Hierzu wurde in ein 6 m langes Plexiglasrohr (\varnothing 180mm) eine 32x2,9 mm Doppel-U-Sonde möglichst stark verwunden installiert (Abb. 157, links) und mit einem nicht dotierten Baustoff hinterfüllt (Abb. 157, Mitte). Das Plexiglasrohr ist in einem schwenkbaren Fuß montiert (Abb. 157, rechts unten), der mittels Ösen an eine Säule fixiert werden kann. Eine zweite Befestigung ist am Kopfende des Plexiglasrohrs angebracht (Abb. 157, rechts oben). Diese bauliche Anordnung dient dazu, dass das Rohr mitsamt der EWS geneigt werden kann und damit unterschiedliche Sondenverläufe simuliert werden können. Um die Neigung der Versuchseinrichtung messen zu können, sind zusätzlich zwei Inklinometerrohre der Firma Glötzl am Plexiglasrohr angebracht. Durch diesen Versuchsaufbau können die Miniatursensoren vor der Feldanwendung überprüft und kalibriert werden.

Erste Messungen mit dem Lagesensor konnten innerhalb des Projektes durchgeführt werden. Aufgrund der Herausforderung zur Entwicklung des grundlegenden Auswertalgorithmus des Sensors mit einer hohen Genauigkeit, ist geplant den Technikumsversuch mit dem Lagesensor bei einem Nachfolgeprojekt zu verwenden und die Genauigkeit damit zu validieren.



Abb. 157: Aufbau des Technikumsversuch zur Positionsmessung.

5 Praxistest

5.1 Bohrtechnik

5.1.1 Stand der Technik auch im Hinblick auf den Rückbau

Durch die Dringlichkeit der Sanierung von Erdwärmesonden bei den vorhandenen Schadensfällen wurde in der Vergangenheit weniger auf die Wirtschaftlichkeit eines Systems sondern vielmehr auf die Durchführbarkeit und den erhofften Erfolg Wert gelegt. Dies hat dazu geführt, dass für jeden Anwendungsfall andere bzw. auf den besonderen Fall ausgelegte Verfahren entwickelt bzw. weiterentwickelt wurden.

Grundsätzlich können die Verfahren in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Zum einen das sogenannte „minimalinvasive Verfahren“ bei dem die Erdwärmesonde selbst als Zugang zu dem zu sanierenden Bereich verwendet wird, zum Anderen das Bohrverfahren bei dem die Erdwärmesonde, wie auch die vorhandene Ringraumhinterfüllung komplett aus der Bohrung entfernt werden.

Für die Schäden in Staufen im Breisgau, wurde von der Fa. Keller Grundbau (Renchen) ein Verfahren entwickelt. Dieses „minimalinvasive Verfahren“ ist durch folgendes Vorgehen gekennzeichnet. In das Sondenrohr wird eine spezielle Düse eingebaut, welche es mit einem Hochdruck-Wasserstrahl ermöglicht Schlitze in das Rohr zu schneiden. Diese Schnitte bilden den Zugang in den Ringraum und ermöglichen diesen nachträglich mit einer Suspension zu verfüllen. Es sind jedoch einige Einschränkungen vorhanden die dieses System zur Verwendung als standardisiertes System ausschließen. So entstehen beim Einsatz sehr hohe Kosten und die bestehende Ringraumhinterfüllung kann nicht entfernt werden. Das bedeutet dass ein eventuell durch Sulfatangriff oder Frost geschädigtes Hinterfüllmaterial nicht entfernt wird und in der Bohrung verbleibt. Dies bedeutet auch, dass nur bestehende Hohlräume verfüllt werden können, und diese auch nur, wenn eventuell vorhandenes Wasser in Klüfte oder Spalten verdrängt werden kann. Da die Injektionsrate durch den Querschnitt des Sondenrohres limitiert ist, besteht bei starken Strömungen bzw. großen Fließraten im Ringraum wenig Aussicht auf Erfolg.

Das eigentliche Ziel des Projektes, der komplette Rückbau und der eventuelle Neuausbau von Erdwärmesondenbohrungen wurde bereits durchgeführt. Auf den Neuausbau wurde aufgrund der jeweils vorhandenen Geologie mit entsprechend hohen Risiken verzichtet. Die Herausforderung hierbei liegt immer darin, die Bohrspur der bestehenden Bohrung nicht zu verlieren und somit immer in der alten Bohrung zu bleiben. Hierbei spielt die Tatsache dass keine Erdwärmesondenbohrung zu 100 % gerade ist die entscheidende Rolle.

In Rudersberg im Rems- Murr- Kreis wurde eine Erdwärmesonde welche eine Längsläufigkeit im Ringraum aufwies durch ein speziell entwickeltes Bohrverfahren entfernt. Die Planung des Bohrverfahrens musste in diesem Fall hauptsächlich auf einen vorhergegangenen und gescheiterten Überbohr- Versuch ausgelegt werden. Für diesen Versuch wurden in jedes der vier Sondenrohre ein Stahlseil einzementiert. Diese sollten als Führung für die Bohrkronen dienen. Da dieses Vorgehen schon nach ca. 3,0 m gescheitert ist, wurde dies Konzept verworfen.

Durch die Fa. Burkhardt GmbH (Neuweiler) wurde dann ein auf die Verhältnisse Vor- Ort abgestimmtes Verfahren entwickelt welches dann auch zum Einsatz kam. Hierdurch konnte die ca. 70 m Tiefe Erdwärmesonde bis in ca. 22 m Tiefe überbohrt werden. Nachdem diese Tiefe erreicht war, konnten die Sondenrohre, aufgrund der komplett fehlenden Hinterfüllung aus der Bohrung gezogen werden. Die Bohrung selbst wurde anschließend, um eine vollständige Entfernung sämtlicher Einbauten und Hinterfüllungen zu gewährleisten, auf einen Durchmesser von ca. 300 mm aufgeweitet und anschließend mit einem Quellton abgedichtet. Hier kann also davon ausgegangen werden dass die ursprünglichen Grundwasserstauer wieder hergestellt sind und dauerhaft kein Wasser mehr an der Bohrung entlang fließen kann. Es ist also von einer endgültigen Maßnahme auszugehen.

Die Erfahrungen aus den Vorhergegangenen Schäden wurden bei der Sanierung von drei Erdwärmesonden in Rottenburg- Wurmlingen verwendet. Hier war der Fall, dass stark gespanntes Grundwasser aus dem Muschelkalk, in der nicht fachgerecht abgedichteten Erdwärmesondenbohrung, nach oben in den Gipskeuper floss. Da von großen Wassermengen auszugehen war, schied ein minimalinvasives Verfahren von vorn herein aus. Da auch hier die Erdwärmesonden nicht weiter verwendet werden sollten, wurde nur bis zu einer Tiefe von ca. 40 m saniert. Um die Bohrspur nicht zu verlieren wurden hier erstmals Spannbetonlitzen anstatt Drahtseile verwendet. Diese wurden aber nicht zur Führung, sondern nur für den Fall dass die Bohrspur verloren wird eingebaut. Es hat sich jedoch gezeigt dass dies bei keiner der drei Bohrungen benötigt wurde. Das Vorgehen lässt sich wie folgt zusammen fassen:

1. Einbau und Zementation der Spannbetonlitzen in die vier Sondenrohre bis 45 m Tiefe.
2. Ziehen von drei Litzen incl. Sondenrohren
3. Einbohren eines Gestänges mit einem Imlochhammer (\varnothing 50 mm) in die bestehend Bohrung
4. Ziehen der verbliebenen Ankerlitze
5. Überbohren des so eingebauten Führungsgestänges mit einem Durchmesser von ca. 130 mm
6. Aufweiten der Bohrung auf ca. \varnothing 300 mm
7. Einbau einer Packers zum stoppen der starken Strömung
8. Verfüllen der Bohrung mit Tonpellets bzw. Zement- Suspension

Diese Beispiele zeigen, dass es grundsätzlich möglich ist dem „krummen“ Verlauf von Erdwärmesonden zu folgen. Allerdings stellt das Verlassen der ehemaligen Bohrspur ein Risiko dar, dass zu erheblichem Mehraufwand bei der Sanierung führen kann. Um dieses Problem zu lösen, soll das Projekt Recover-EWS die Möglichkeiten einer gesteuerten Bohrung auf eine einfache Art und Weise ermöglichen.

5.1.2 Konzept für Rückbau

Als Projektergebnis sollte das kostengünstige Überbohren einer EWS wie folgt erfolgen:

- Initialmessung des Sondenverlaufs mittels des enOware Sensors zum Abschätzen der erforderlichen Bohrgestänge und ggf. kritischer Stellen mit größerem Biegeradius
- Einbau eines Kontrastmittels in ein EWS Rohr mit anschließendem einfüllen einer Zement Suspension.
- Nach dem Abhärten des Zements erfolgt das Zerbohren der Erdwärmesonde mit einem speziellen Bohrkopf. Sollte die alte Bohrung verlassen werden, wird das Bohrgestänge entfernt und mit dem Magnetometer von enOware die Position der Erdwärmesonde gemessen. Dann erfolgt das erneute Einbringen des Bohrgestänges mit anschließender Korrektur der Bohrrichtung.
- Einbringen einer neuen EWS mit perfekter Hinterfüllung oder Verpressung des offenen Bohrlochs.

Da das Kontrastmittel aber nicht wie ursprünglich geplant in die Erdwärmesonde eingefüllt und zerbohrt werden kann, musste dieses Vorgehen verworfen werden. Da sich eine Spannbetonlitze als für die Messung geeignet gezeigt hat, ist der Einbau einer Spannbetonlitze ein gangbarer Weg. Der größte Nachteil ist jedoch, dass die Ankerlitze selbst nicht zerbohrt werden kann. Hierdurch entsteht die Herausforderung die Litze zu Überbohren und gleichzeitig als Führung zu verwenden. Da die Sondenrohre und somit die Litzen nicht gleichmäßig in der Bohrung verteilt sind, sondern innerhalb einer kurzen Strecke von der einen Seite zur anderen in der Bohrung wechseln können, ist dies kein leichtes Unterfangen. So müsste diese Bewegung vom Bohrgestänge mitgemacht werden ohne die Litzen zu beschädigen. Dies wird derzeit als bedingt möglich bewertet.

5.1.3 Erdwärmesonde in Neuweiler

Im Rahmen des Vorhabens wurde eine Erdwärmesonde zum Test des Sanierungsverfahren installiert:

- Für den kosteneffizienten Rückbau einer Erdwärmesonde wurden innerhalb des Projektes unterschiedliche Möglichkeiten des Überbohrens einer Erdwärmesonde bewertet
- Auf Basis bereits vorhandener Erfahrungen mit dem Überbohren einer EWS wurden Verfahren mit magnetischen Kontrastmittel in Zusammenarbeit mit dem EIFER/KIT getestet und evaluiert, welche als Basis für das Richtbohrwerkzeug dienen sollen.
- Als kostengünstige Lösung zum Überbohren einer EWS wurde die Spannbetonlitze anhand der Laboreergebnisse als geeignet bewertet.
- Auf dem Gelände der Fa. Burkhardt wurde ein 100m tiefe EWS gebohrt (siehe Abb. 158). Vor dem Einsetzen der Sonde wurde eine Referenzverlaufsmessung mittels Inklinometertechnologie durchgeführt. Diese soll als Basis für den Verlaufsmessungssensor der enOware dienen.
- Die 32er Doppel-U Test-EWS wurde mit magnetisch dotiertem Zement (Schwenk H-hs plus) hinterfüllt und der Verfüllvorgang vermessen.



Abb. 158: Ausführung der EWS-Testbohrung.

Diese Sonde soll nach weiterer Überprüfung des Richtbohrverfahrens und des Sondenverlaufsmessmodules als Testsonde für die Sanierung und den Wiedereinbau einer EWS dienen. Abb. 159 zeigt das Nachmessprotokoll nach der Verfüllung, Abb. 160 das dazugehörige Bohrprofil. Die Nachmessung erfolgte mit einem Cem Trakker. Die Messung zeigt über die ganze Länge der Erdwärmesonde ein stabiles Signal. Es kann also davon

ausgegangen werden, dass die Erdwärmesonde vollständig verfüllt ist. Der Rückgang des Signals am unteren Ende der Erdwärmesonde kann durch das Vorhandensein von Stahl am Sondenfuß erklärt werden.

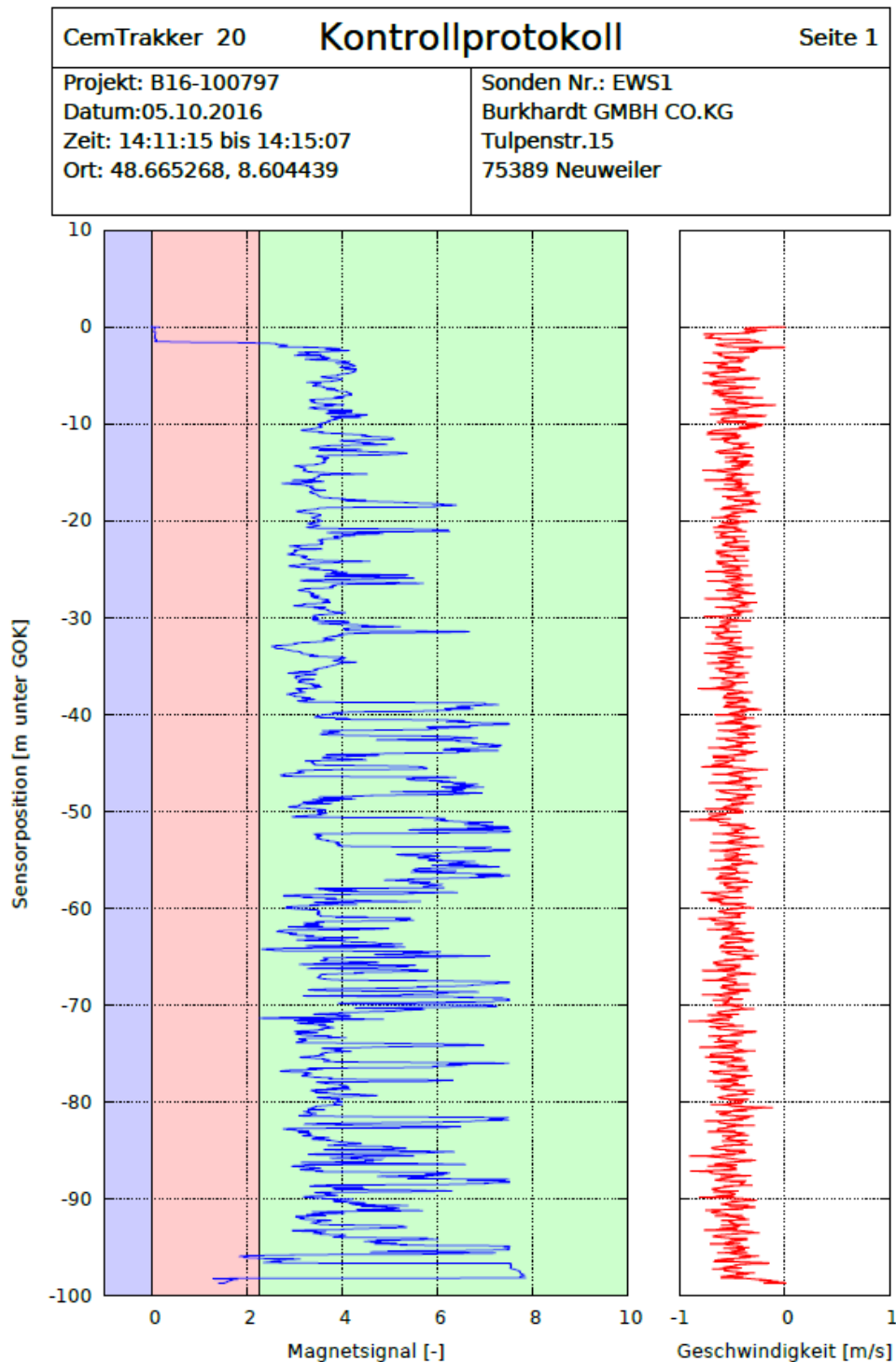


Abb. 159: EWS-Verfüllprotokoll

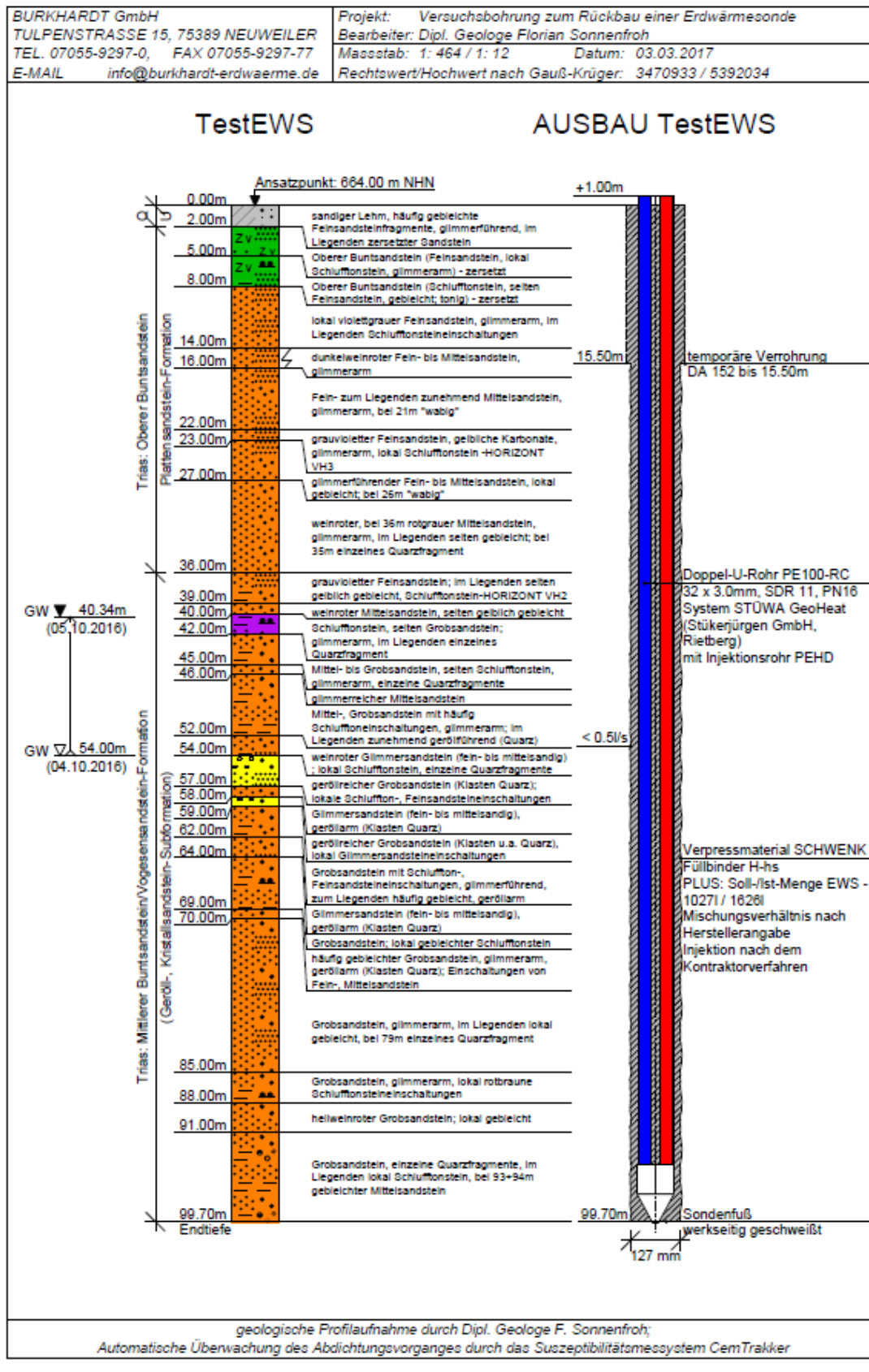


Abb. 160: Bohrprofil der EWS

5.1.4 Abweichungen von Bohrungen und Mögliche Radian der Bohrgestänge

Wie bereits erwähnt, kann bei Erdwärmesondenbohrungen nicht von geraden und lotrechten Bohrungen ausgegangen werden. Vielmehr sind die Bohrungen in dem Bereich in dem ein Hilfsverrohrung gesetzt wurde noch relativ gerade, bauen dann aber mit zunehmender Tiefe eine Abweichung aus der Lotrechten auf. Diese Tatsache ist die größte Herausforderung beim Überbohren von Erdwärmesonden. Abb. 161 zeigt beispielhaft den Verlauf einer tatsächlich vermessenen Erdwärmesonde. Dieser Verlauf stellt mit Sicherheit einen Sonderfall dar, zeigt aber welche Abweichungen bei Bohrungen möglich sind. Es handelt sich um eine 200 m lange Erdwärmesonde welche am Endpunkt ca. 56 m Abweichung vom lotrechten Zielpunkt hat. Die Neigung am Ende der Erdwärmesonde beträgt $30,9^\circ$ in Bezug zur Vertikalen. Dieser Fall zeigt, dass es nahezu aussichtslos ist, die Bohrungen in einem größeren Durchmesser mit einem hohlen Rohr zu Überbohren. Die eingesetzten Rohrtouren können diese Radian nicht mitmachen und brechen an den Gewindeverbindern. Vielmehr ist es wichtig, dass das Bohrgestänge, welches zum Nachbohren der Erdwärmesonde verwendet werden soll, nicht steifer ist als jenes das zum Bohren der Erdwärmesonde verwendet wurde. Wird beim Nachbohren auf ein Gestänge aus der HDD-Bohrtechnik zurückgegriffen, sind bei einem Gestängedurchmesser von 88,9 mm Biegeradien von 60 m möglich. Dies wird bei keiner Erdwärmesonde der Fall sein.

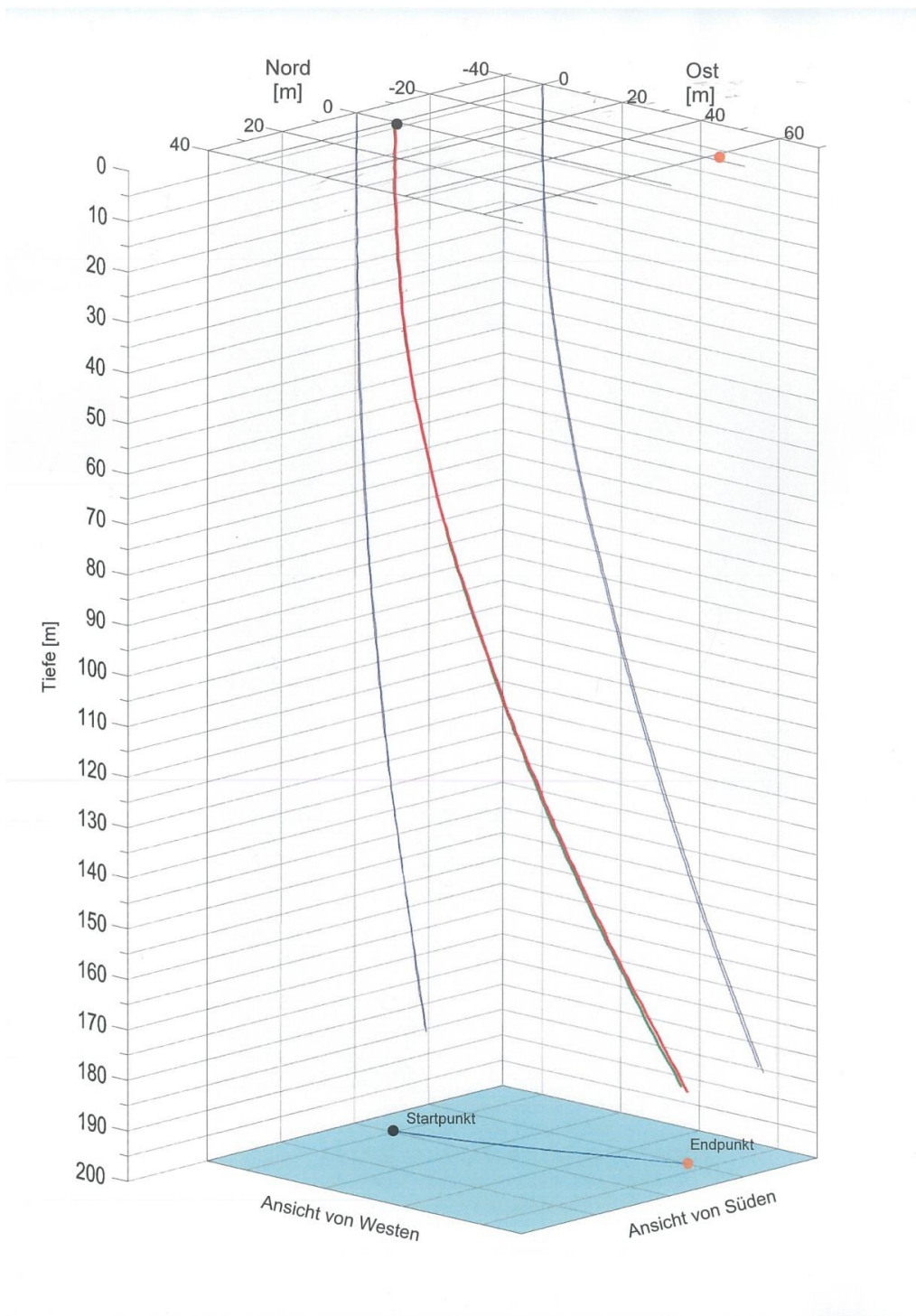


Abb. 161: Verlauf einer Erdwärmesonde

5.1.5 Fazit

Grundsätzlich ist es möglich jede Erdwärmesonde zu überbohren. Der Aufwand der dahinter steckt ist jedoch im Vorfeld nicht absehbar. Daher soll durch den Einsatz eines einfachen Richtbohrverfahrens dem Verlauf der Bohrung gefolgt werden. Hierzu soll aber kein aufwändiges und dementsprechend teures Verfahren, sondern möglichst einfache Technik mit Standard Bohrgeräten eingesetzt werden. Das sollte durch ein möglichst einfach herzustellendes und einzubauendes Kontrastmittel ermöglicht werden.

Bis jetzt ist es leider nicht gelungen ein Kontrastmittel zu finden, welches die Anforderungen erfüllt. Zum einen muss es durch einen kompakten Fels und eine evtl. erforderliche Stahl-Hilfsverrohrung geortet, und zugleich mit einem Bohrwerkzeug zerbohrt werden können.

Eine alternative Entwicklung könnte auf der Verwendung einer Spannbetonlitze aufgebaut werden. Leider gibt es jedoch auch hier noch Herausforderungen die gelöst werden müssen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein kostengünstiges Verfahren entwickelt, das in Erdwärmesonden zur Orientierungsmessung verwendet werden kann. Zudem ist ein Bohrlochtoolprototyp umgesetzt worden, den man in offene Bohrlöcher einführen und damit Orientierungsmessungen durchführen kann. Damit wird prinzipiell ein manuelles gezieltes Nachjustieren einer Bohranlage ermöglicht. Als vielversprechende Variante hat sich die Spannbetonlitzenmethode herausgestellt. Bei dem Verfahren wird die kostengünstige Spannbetonlitze in die offenen Sondenstränge eingeführt und mittels Magnetosensorik in Raum und Richtung detektiert. Das Verfahren scheint prinzipiell für eine spätere Feldanwendung alle Kriterien zu erfüllen. Magnetisch dotierte Verfüllbaustoffe, magnetithaltige Gesteine sowie eine Hilfsverrohrung haben im Labor keine nennenswerten Einschränkungen für eine Praxisanwendung gezeigt.

Mit der entwickelten Generation der Hardware-Lösung zur Verlaufsmessung mittels miniaturisierter Messsysteme kann in Erdwärmesonden eine Lagebestimmung mit einer Genauigkeit von ca. 0,5% durchgeführt werden. Bis zur industriellen Marktreife sind aber noch weitere Entwicklungsschritte notwendig.

Innerhalb des Projektes Recover-EWS konnten wichtige grundlegende Erkenntnisse für den kostengünstigen Rückbau einer EWS erzielt werden. Die als beste Lösung erarbeitete Technologie für den Sondenrückbau kann, sofern die komplette Fertigstellung erfolgt, erprobt und angewendet werden. Bei der Projektbearbeitung zeigte sich jedoch, dass der Aufwand die Gesamtlösung eines Sondenrückbaus erfolgreich zu testen, einer Weiterentwicklung der Messtechnologie, wie auch der weiteren umfangreichen Erprobung bedarf. Innerhalb des verfügbaren Kosten- und Zeitrahmens war dies nicht möglich. Die Projektpartner sind jedoch, nach Bewertung der bisher erreichten Ergebnisse und Abschätzung der noch offenen Arbeitspakete und des Aufwandes, sehr zuversichtlich, eine erfolgreiche kostengünstige Lösung für den Sondenrückbau erzielen zu können.

Das Verfahren bedarf noch weiterer Entwicklungsschritte, die durchgeführt werden müssen, um eine kostengünstige Variante dem Markt zur Verfügung stellen zu können.

- Bis dato konnte die verfügbare EWS bei Fa. Burkhardt noch nicht mit der geplanten Technologie zurückgebaut werden. Dies hat folgende Gründe:
 - Die Genehmigung der Bohrung erfolgte erst zum September 2016
 - Das Verlaufsmesswerkzeug der enOware konnte aufgrund der erst zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Bohrung wie auch weiterer technischer Herausforderungen noch nicht den Status der Fertigstellung erreichen. Vor dem Rückbau sind weitere umfangreiche Messungen im Vergleich zu vorhandener Referenzmessung erforderlich.

- Ein geeigneter Bohrkopf für das Überbohren der EWS muss noch gefertigt werden
- Das Orientierungsmesstool mittels Magnetosensorik konnte noch nicht im Realmaßstabsversuch erprobt werden. Hierfür müssen auch noch mit der enOware Messtechnik weitere Messversuche erfolgen und ggf. Anpassungen in Software und Hardware für die Sensorik erfolgen.
- Der Verlaufssensor bedarf hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit von mindestens 0,5% weitere umfangreiche Softwareentwicklungen und Felderprobungen, die deutlich mehr Zeit erfordern, um die für den Rückbau erforderlichen Anforderungen zu erfüllen. Insbesondere die Softwareentwicklung mit immer kontinuierlich durchzuführenden Feldtests zeigte sich im Projektverlauf als deutlich zeitintensiver als geplant.
- Für den effizienten Rückbau muss der Verlaufssensor drahtlos ausgeführt sein, was mit weiterem Entwicklungsaufwand und weiterer Felderprobung verbunden ist.
- Eine weitere Test EWS soll zur Validierung des gesamten Rückbauverfahrens mit einem extra schrägen Bohrverlauf mit Referenzmessung gebohrt werden. Damit kann das Gesamtergebnis für den effizienten Rückbau als Projektergebnis erreicht werden.

Für die elektrische Widerstandsmethode, die direkt an einer Bohrkronen integriert werden kann, konnte noch kein ausreichender Technologie-Reifegrad im Vorhaben erzielt werden. Die Widerstandsmethode würde ein sehr einfaches Richtbohrwerkzeug darstellen, bei der die Orientierung direkt beim Bohren ermittelt wird. Der große Vorteil gegenüber dem Magnetverfahren bestünde darin, dass kein wechselseitiges Einführen und Ausbauen von Orientierungsmessmodul und Bohrgestänge bzw. Werkzeug notwendig wäre. Aber die Entwicklung der Widerstandsmethode bis zur Marktreife bedarf weiterer grundlegender Schritte und größerer Ressourcen.

7 Wissenstransfer

Neben diversen projektinternen Besprechungen erfolgte ein intensiver Austausch mit betroffenen Behörden und Fachfirmen. Darüber hinaus finden die gewonnenen Erkenntnisse Eingang in die Lehre am AGW.

Präsentationen/Veröffentlichungen

- Jährliche Präsentation beim Statuskolloquium Umweltforschung Baden-Württemberg inklusive Erstellung eines Zwischenberichts (alle Projektpartner)

- 16./17.06.2015: Präsentation „Effizienter Rückbau und Sanierung von Erdwärmesonden“ auf dem 14. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie (OTTI)
- 27.10.2015 (alle Projektpartner): Vorstellung der Zwischenergebnisse des Forschungsvorhabens bei der kleinen Dienstbesprechung Geothermie des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- 18./19.06.2016: Präsentation „Verlaufsmessung und Richtbohrtechnik, Rückbau und Recovering von Erdwärmesonde“ auf dem 15. Internationalen Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie (OTTI)
- 29.11./01.12.2017: Präsentation „Verlaufsmessung und Richtbohrtechnik, Rückbau und Recovering von Erdwärmesonden“ auf dem Geothermiekongress 2016 in Essen
- 15./16.02.2017: Präsentation „Erfolgreiche Sanierung von nicht fachgerecht abgedichteten Erdwärmesonden mit Praxisbeispielen“ Geotherm Expo & Congress.
- 02/2017: Veröffentlichung „Verlaufsmessung und Richtbohrtechnik, Rückbau und Recovering von Erdwärmesonden“ in bbr-Leitungsbau – Brunnenbau – Geothermie 02-2017 ISSN 1611-1478.
- 03/2017: Ukelis, O., Zorn, R.: Friderich, J., Steger, H., Linder, P., Meier, S. & Burkhardt, F. (2017): Verlaufsmessung und Richtbohrtechnik, Rückbau und Recovering von Erdwärmesonden, Zeitschrift der Geothermischen Vereinigung e. V., Nr.86, <http://www.geothermie.de/wissenswelt/literaturdatenbank/zeitschrift-geothermische-energie.html>.
- Koenigsdorff, R., Zorn, R., Riegger, M., Blum, P., Braun, J., Moormann, C. & Gratwohl, P. (2017): Erdwärme nachhaltig nutzen, Einblicke 2016, Journal zur Umweltforschung in Baden-Württemberg, <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>
- 03/2017: Zorn, R.: Mit Messmolch und Kontrastmittel: Ein Konzept zur Sanierung von Erdwärmebohrungen (2017): Einblicke 2016, Journal zur Umweltforschung in Baden-Württemberg, <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de>

Derzeit sind internationale Veröffentlichungen in Vorbereitung und Beiträge auf internationalen Kongressen in Planung (z. B. <http://www.enerstock2018.org>). Die Ergebnisse des Projektes Recover-EWS sollen zudem in den IEA ECES Annex 27 – Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems – berücksichtigt werden.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekanntgewordene Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Keine

9 Beitrag der Ergebnisse zu den Zielen des Förderprogramms des Zuwendungsgebers

Die nachhaltige Entwicklung von Erdwärmesonden wird erhöht und damit ein Beitrag zur Erreichung der Klimaziele der Landesregierung Baden-Württemberg geleistet.

10 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Sehr auffällig ist, dass eine Vielzahl prominenter Schadensfälle im Bereich der oberflächennahen Geothermie in Baden-Württemberg anzutreffen ist. Neben den zum Teil spezifischen Untergrundverhältnissen in Baden-Württemberg stellt sich hierbei die Frage nach der Systemdichtigkeit von Erdwärmesonden im allgemeinen. Deshalb gibt es einen Bedarf an geeigneten und bezahlbaren Rückbau- und Sanierungskonzepten für mangelnde und schadhafte Erdwärmesonden.

Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat bereits auf die sich häufenden schadhafte Ereignisse und deren Problematik reagiert und unmittelbar neue Leitlinien herausgebracht (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS), Stand 09/2015). Mit diesen Leitlinien unterstreicht das Land Baden-Württemberg auch seine bundesweite Vorreiterrolle in Fragestellungen der Qualitätssicherung von Erdwärmesonden. Bei erfolgreichem Einsatz der Recover-EWS Verfahren können die Leitlinien durch eine kostengünstige Rückbau- und Sanierungsvariante erweitert werden. Mit der kostengünstigen Variante bekommt praktisch jeder Eigentümer die Möglichkeit, seine Erdwärmesonden, aus welchen Gründen auch immer, rückzubauen, zu sanieren oder neu zu errichten. Die Recover-EWS Verfahren versprechen zudem, wesentliche Kosten bei den prominenten Schadensfällen (z. B. Böblingen) zu reduzieren, unter der Voraussetzung, dass zumindest einzelne schadhafte Sonden mit dem Verfahren kostengünstig rückgebaut werden können.

11 Literatur

- Benischke, G. (1907): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik, Zweite, erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH: S. 10, 131, 149-150.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. (2013): Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, Eine Einführung, Übersetzungsherausgeber.: Michael Scheffler, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: S. 740-746, 687.
- Cooper, G.A. (1994): Directional drilling, Scientific American, A270: 82–87.
- DIN EN 14117 (2004): Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken-Prüfverfahren-Bestimmung der Ausflusszeit von zementartigen Rissfüllstoffen;
- DIN EN 197-1 (2011): Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
- DIN EN 10330 (2015): Magnetische Werkstoffe – Verfahren zur Messung der Koerzivität magnetischer Werkstoffe in einem offenen Magnetkreis; Deutsche Fassung EN 10330:2015.
- Dohr, G. (1981): Applied Geophysic, Introduction to Geophysical Prospecting, 2., completely revised Edition, Ferdinand Enke Publishers Stuttgart 1981: S.168-177.
- Eckstein, P.P. (2015): Statistik für Wirtschaftswissenschaftler, Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS, 5., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Gabler Wiesbaden 2016: S. 121, 206.
- Eschke, F. & Vorhoff, W. (2004): Moderne Richtbohrtechnik im Fels- und Spezialtiefbau WISSENSPORTAL, baumaschine.de, A3.
- Gerthsen, C. (2015): Gerthsen Physik, 25. Auflage, Hrsg.: Dieter Meschede, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2015: S. 369, 376, 379.
- Guy, A.G. (1976): Essentials of Materials Science, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Hauptmann, P., Adler, S., Doerner, S. (2004): Laborpraktikum Sensorik, Versuch Magnetfeldsensoren: S. 4.
- Heywang, W. (1993): Halbleiter-Elektronik Bd.17, Sensorik, 4., neubearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg GmbH: S. 90-91.

- Jurkov, A. S., Cloutier, J., Pecht, E. & M. P. Mintchev (2011): Experimental Feasibility of the In-Drilling Alignment Method for Inertial Navigation in Measurement-While-Drilling, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, A60(3): 1080-1090.
- Kaltenbach, P., Meldau, H. (1936): Physik und Funktechnik für Seefahrer, 7. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig: S. 238.
- Killeen, G., Bernius, G. R & C. J. Mwenifumbo (1995): Surveying the Path of Boreholes: A Review of Orientation Methods and Experiences; in Proceedings of the 6th International MGLS Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical and Groundwater Applications; Santa Fe, New Mexico, 1995, October 22-25.
- Kertz, W. (1969): Einführung in die Geophysik I.- B.I. Hochschultaschenbücher Band 275, 232 S.; Bibliographisches Institut Mannheim (B.I.-Wissenschaftsverlag).
- Kuchling, H. (1991): Taschenbuch der Physik.- 13. Aufl., 672 S.; Leipzig (Fachbuchverlag Leipzig).
- Krajew, A. P. (1957): Grundlagen der Geoelektrik.- 1. Aufl., 358 S.; Berlin (VEB Verlag Technik).
- Linder, P.M. (2015): Entwicklung und Erprobung eines miniaturisierbaren Sensors zur Lagebestimmung in Erdwärmesonden, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Stuttgart.
- Linder, H. (1992): Physik.- 13. Aufl., 576 S.; Köln (Fachbuchverlag Leipzig).
- Liu, T. Wang, B., Cui, Y. & Jin Zhang (2012): Direction and position measurement in HDD using two magnetic fields, Sensors and Actuators, A185: 168– 172.
- Marchesi, M. (2006): Fluxgate Magnetic Sensor System for Electronic Compass. Doktorarbeit an der Universität Pavia, Fakultät für Ingenieure (Elektrotechnik, Informatik): S.16-17.
- Meunier, A. (2005): Clays. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-21667-7, S. 312.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg (2012): Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS): S.11.
- Moeller, F., Frohne, H., Löcherer, K.H., Müller, H. (2002): Moeller Grundlagen der Elektrotechnik, 19., korrigierte und durchgesehene Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: S.182-185.
- Mueller, N.C., Braun, J., Bruns, J., Cerník, M., Rissing, P., Rickerby, D. & Nowack, B. (2012): Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe, Environmental Science and Pollution Research, A19: S. 550-558.

- Mueller, N. C. & Nowack, B. (2010): Nano zero valent iron – THE solution for water and soil remediation? Report of the ObservatoryNANO. Available at www.observatorynano.eu.
- Nelkenbrecher, M. (2008): Das Fluxgate-Magnetometer SAM: Aufbau und Inbetriebnahme an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Zulassungsarbeit zur staatlichen Prüfung nach LPO1 für das Lehramt an Realschulen: S. 31-32.
- Niggli, P. (1948): Gesteine und Minerallagerstätten, Erster Band, Allgemeine Lehre von den Gesteinen und Minerallagerstätten, Verlag Birkhäuser Basel: S. 464.
- Osebold, R. (2008): Entwicklung und Erprobung mineralischer Injektionssuspensionen zur Sanierung von Grundleitungsnetzen, Abschlussbericht, RWTH Aachen / ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb: S.27.
- Prinz, H., Strauß, R. (2011): Ingenieurgeologie. 5., bearbeitet und erweiterte Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg: S. 21.
- Rohner, E., Rybach & L. & U. Schärli (2004): Neue Methode zur in-situ-Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für die Dimensionierung von Erdwärmesonden-Feldern. In Tagungsband zur GTV Fachtagung "Die neue Rolle der Geothermie - 5. Symposium Erdgekoppelte Wärmepumpen" in Landau in der Pfalz, 10.-12. November 2004, S. 324 - 328.
- Reich, M. (2011): Grundlagen der Richtbohrtechnik: Auf krummen Touren durch den Untergrund ERDÖL ERDGAS KOHLE 127., A(1): 35-40.
- Schreiner, M., Kreysing, K. (1998): Handbuch zur Erkundung des Untergrunds von Deponien und Altlasten Band 4, Geotechnik Hydrogeologie, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: S.235.
- Schön, J. (1983): Petrophysik: Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen, Enke Stuttgart.
- Seibi, A., Karrech, A., Boukadi, F. & T. Pervez (2009): Wellbore Path Estimation Using Measurement While Drilling Techniques: A Comparative Study and Suggestions for Improvements, Energy Sources, Part A, A(31):1205–1216.
- Stark, J., Wicht, B. (2013): Dauerhaftigkeit von Beton. Springer, Berlin Heidelberg: S. 28-29, 83.
- STÜWA Konrad Stückerjürgen GmbH (n.d.): Bohrspülungsmittel, AKTIVBENTONIT IBECO B1.
- Thompson, R., Oldfield, F. (1986): Environmental magnetism. 1.ed.; Allen & Unwin, London: S.1-227.
- Tipler, P.A., Mosca, G. (2015): Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Deutsche Auflage, Hrsg: Jenny Wagner, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015: S. 846-847, 863-865, 895-903.

Vogel, H. (1999): Gerthsen Physik.- 20. Aufl., 1262 S.; Berlin (Springer Verlag).

Zhang W. (2003): Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview, Journal of Nanoparticle Research, A5(3-4): S. 323-332.

Zorn, R., Neuner, F., Friderich, J., Meier, S, und M. Kauffeld (2015): Miniaturisierte in-situ Druck- und Temperaturmessung in Erdwärmesonden, Zeitschrift Geothermische Vereinigung e. V.

Internet:

Madgwick, S. (2011): „[http://www.x-io.co.uk/.](http://www.x-io.co.uk/)“ 24. 09 2011. <http://www.x-io.co.uk/res/doc/quaternions.pdf> (Zugriff am 20. 08 2015). Richter, I. (n.d.): Moderne Magnetfeldmessgeräte: http://www.igep.tu-bs.de/lehre/skripten/mrode/mag_de_over.pdf , Abruf: 10.02.2016: S. 3.

<https://www.kemmler.de/uploads/media/datasheets/t2100000091744.pdf>

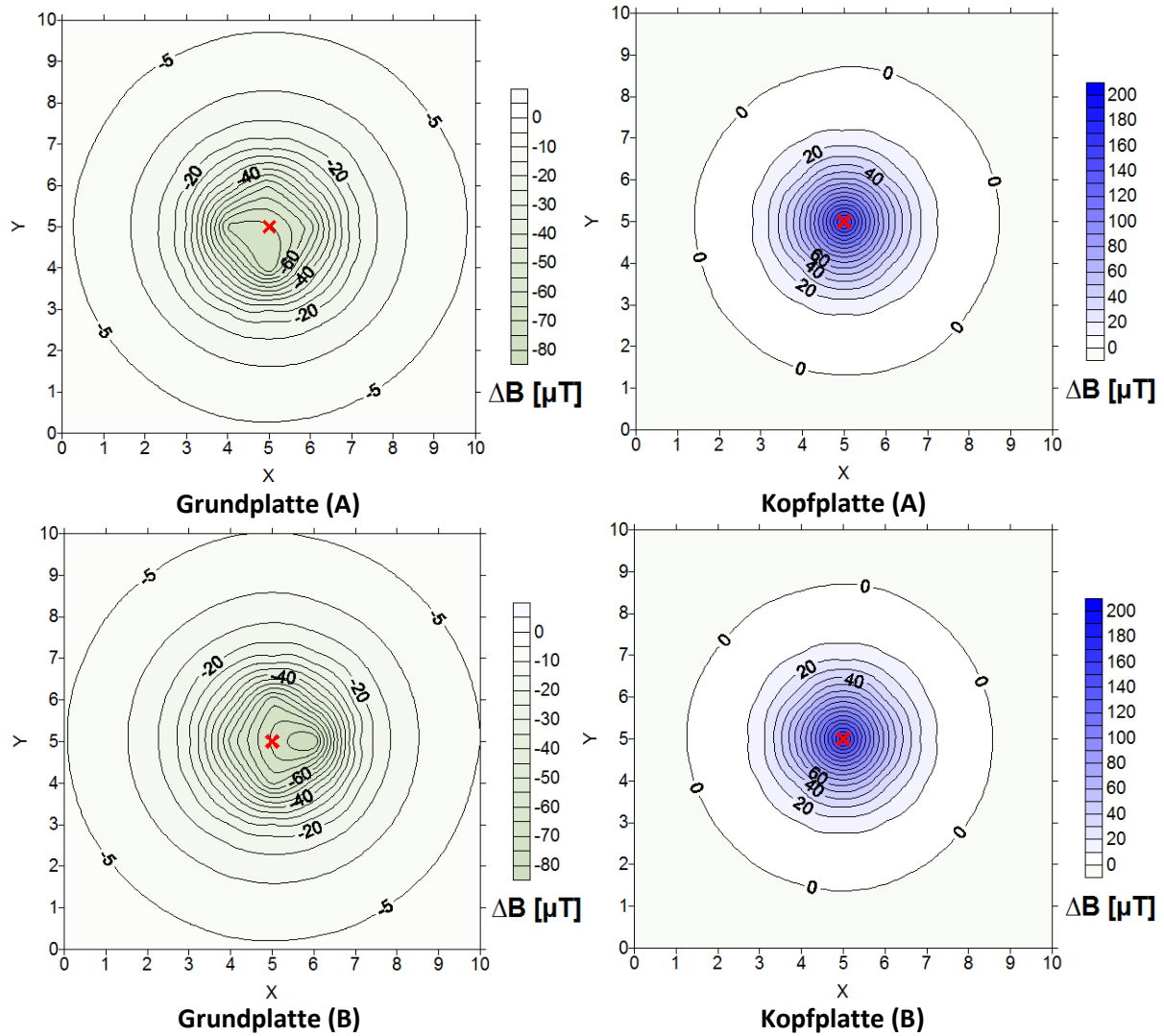
<http://www.schwenk-zement.de/de/Dokumente/Technische-Merkblaetter/Spezialbaustoffe/Spezialbindemittel/TM-Fuellbinder-H-hs-plus-Mergelstetten.pdf?m=1469176509>

http://santherr-geothermietechnik.com/index_htm_files/CemTrakker_V2_neu.pdf (besucht am 11.10.2016)

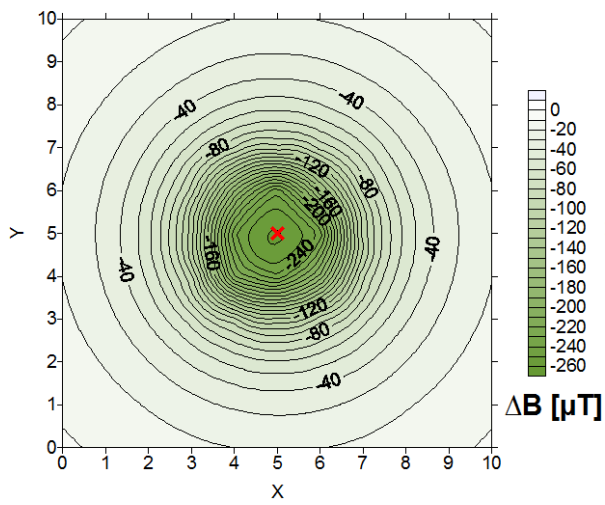
http://www.spektrum.de/lexika/images/physik/fff7308_w.jpg

12 Anhang

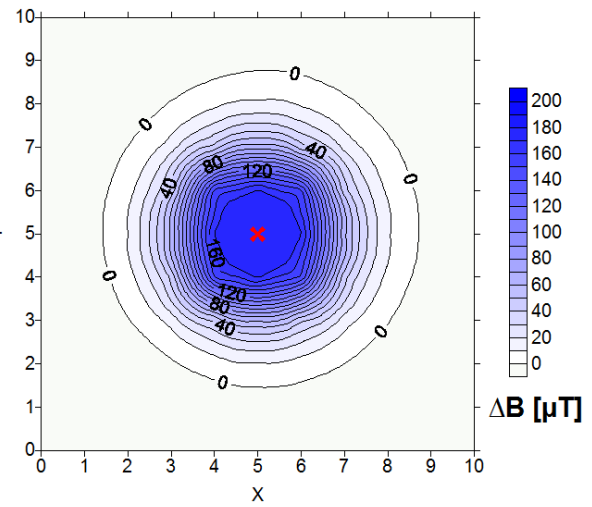
Anhang A: \varnothing 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert.



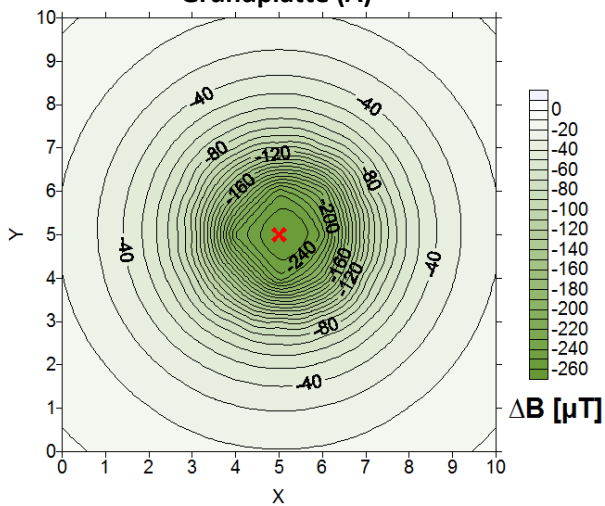
Anhang B : \varnothing 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, MIR mit GA „Süd“.



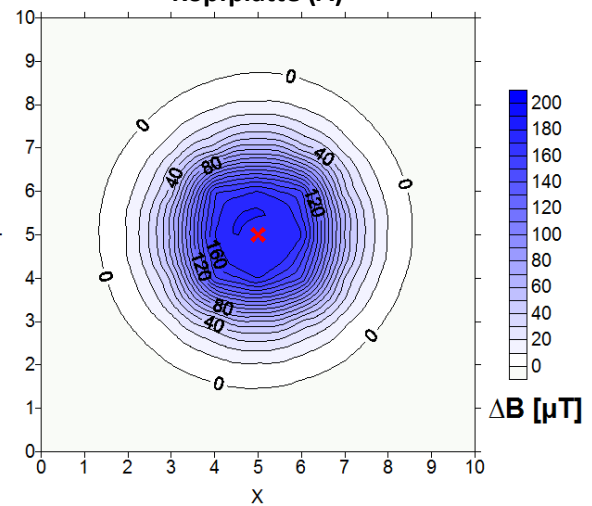
Grundplatte (A)



Kopfplatte (A)

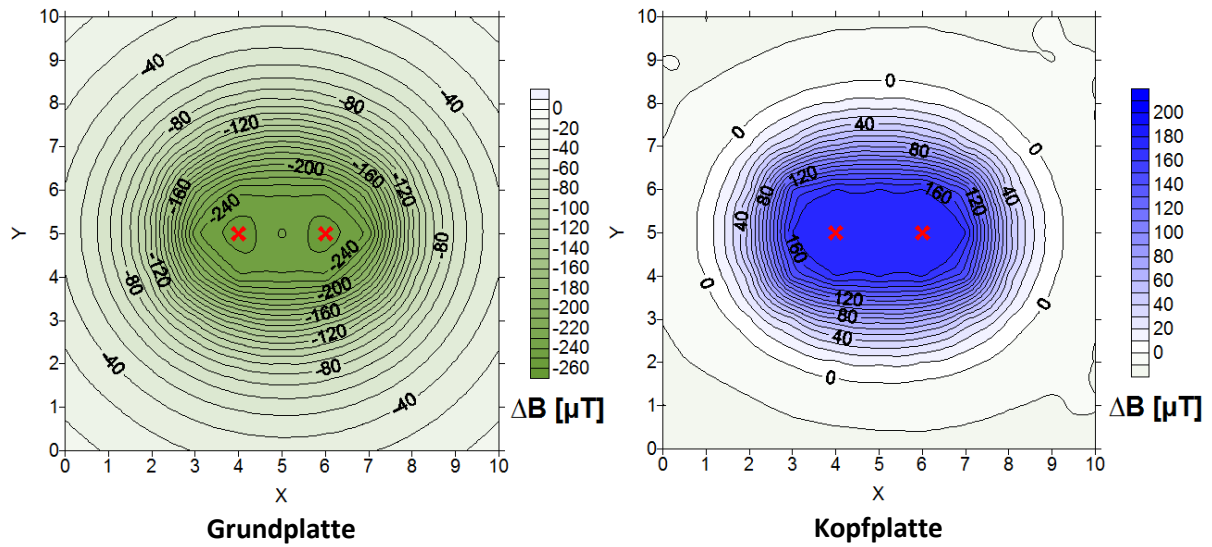


Grundplatte (B)

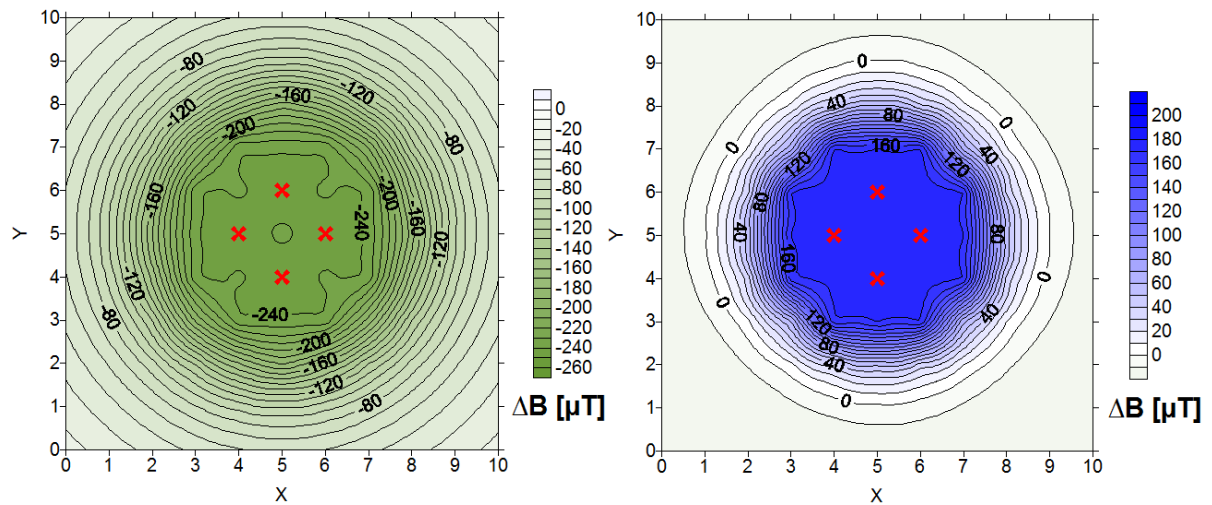


Kopfplatte (B)

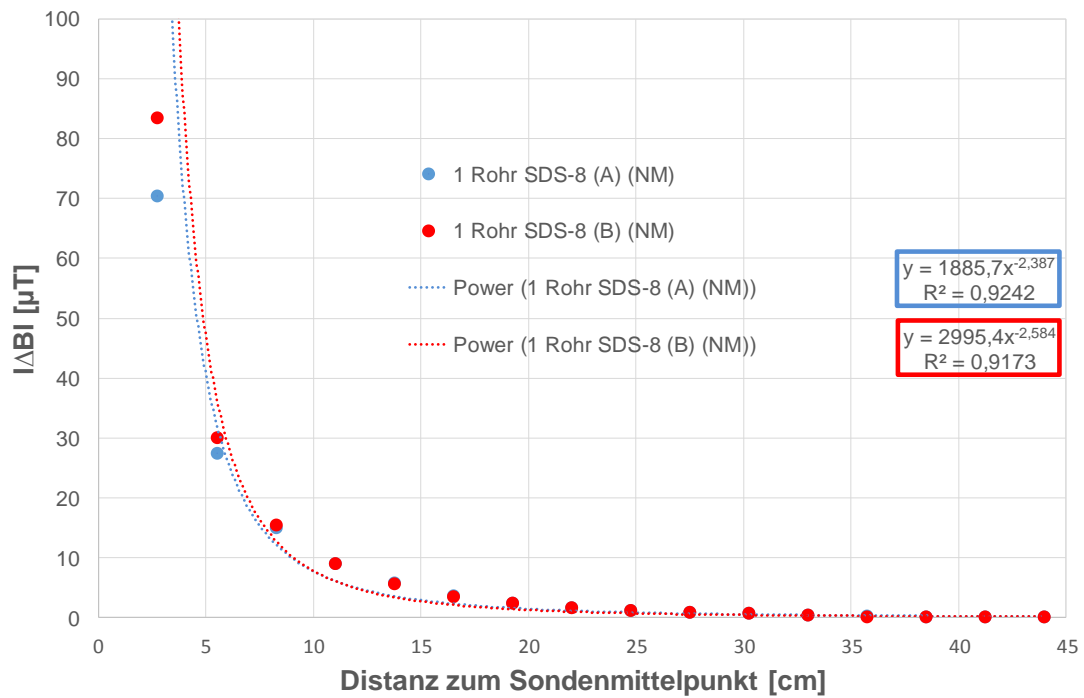
Anhang C: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U), MIR mit GA „Süd“.



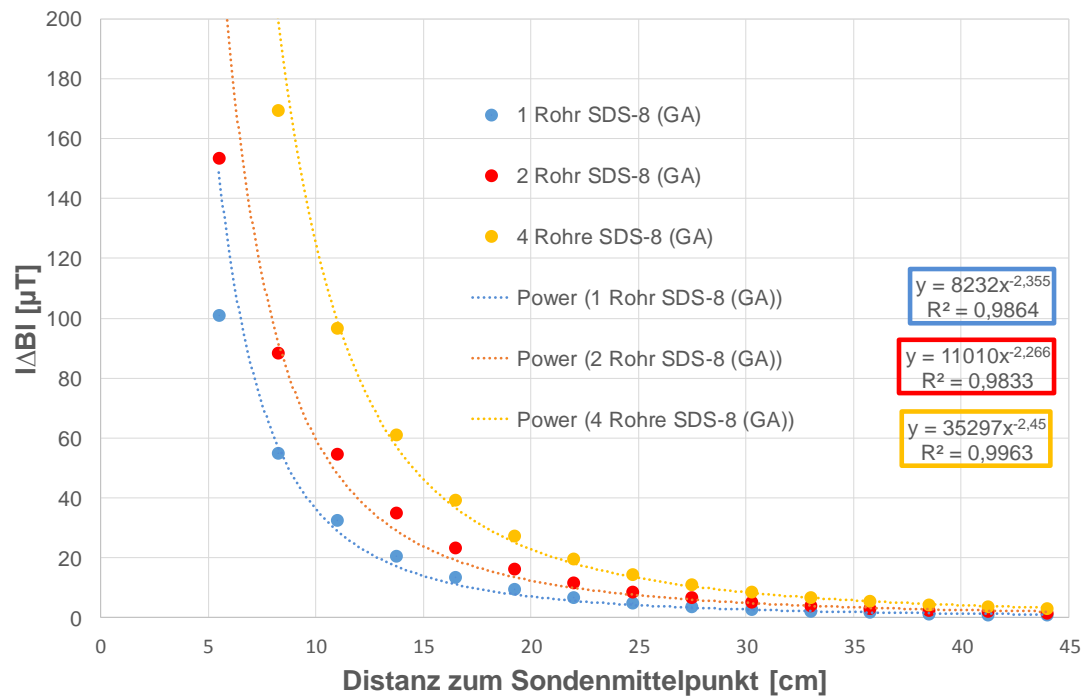
Anhang D: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.



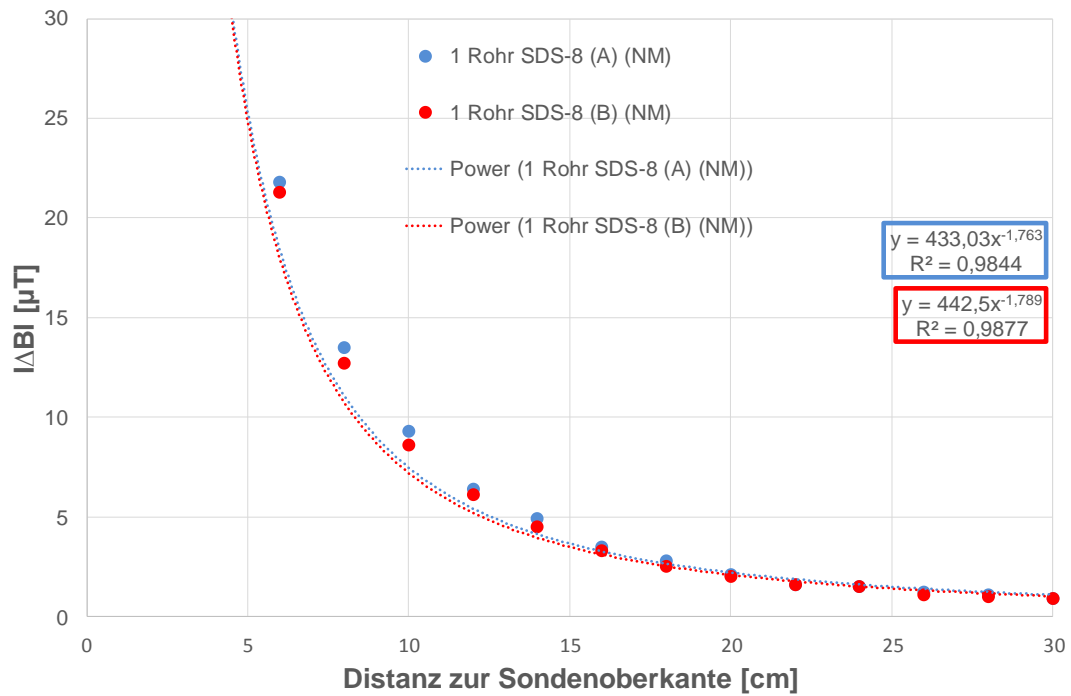
Anhang E: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).



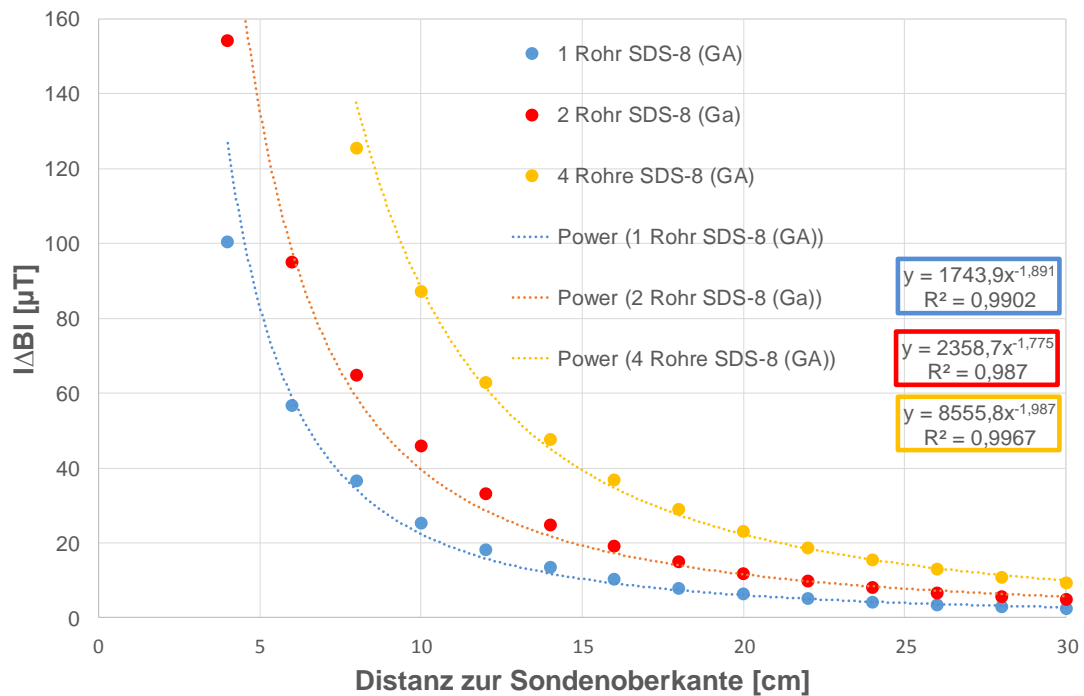
Anhang F: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.



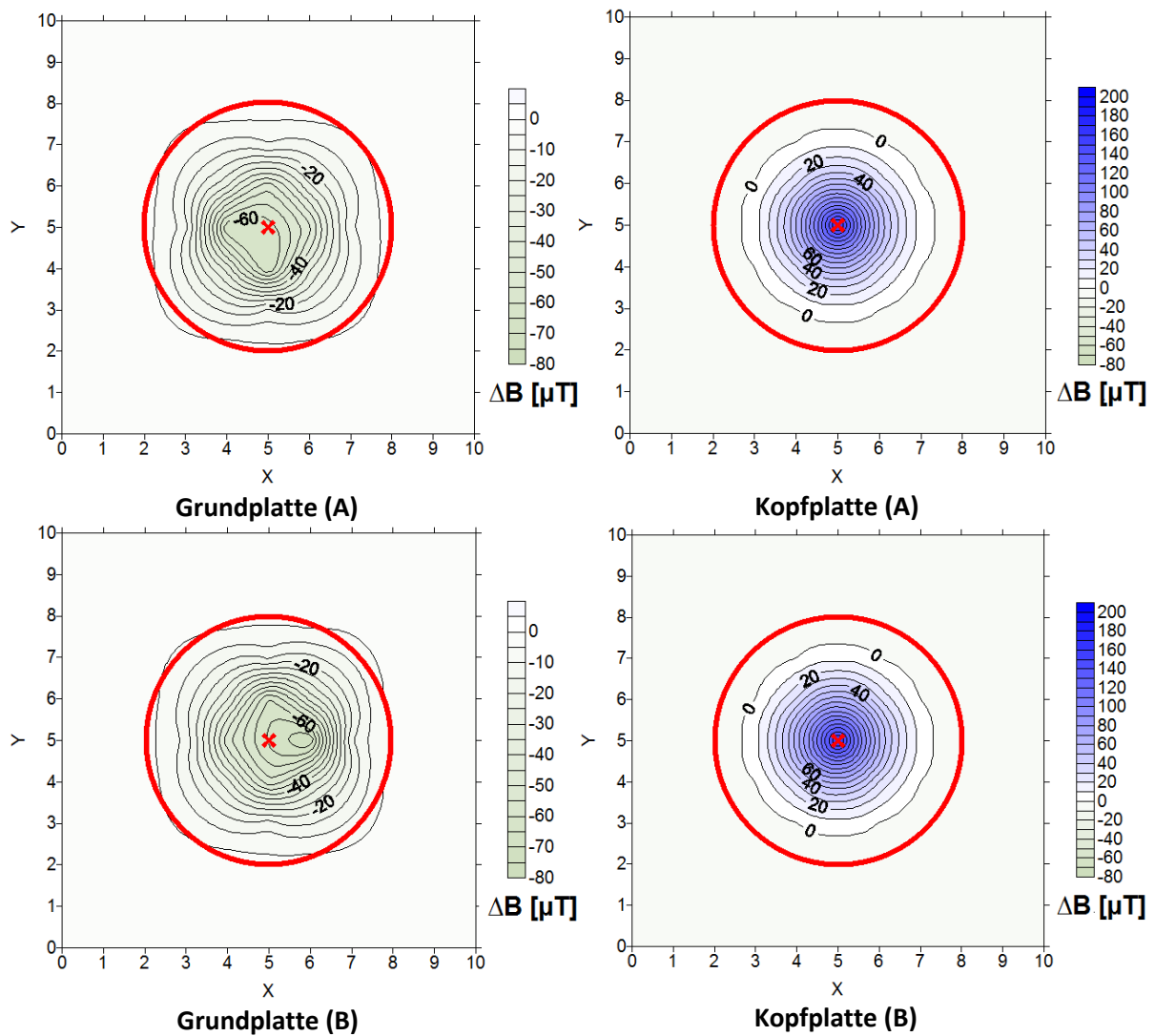
Anhang G: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).



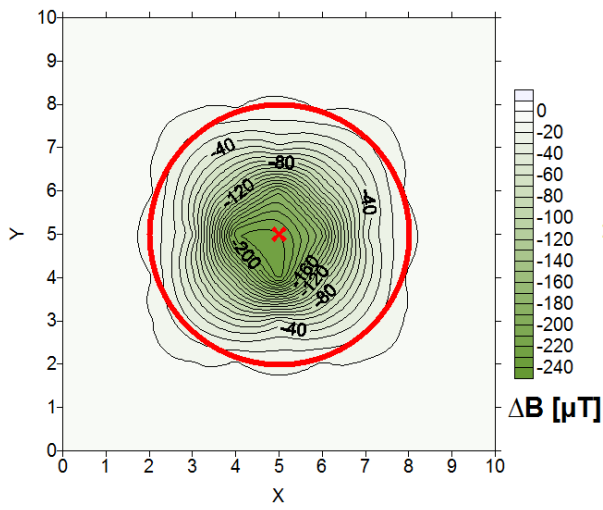
Anhang H: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.



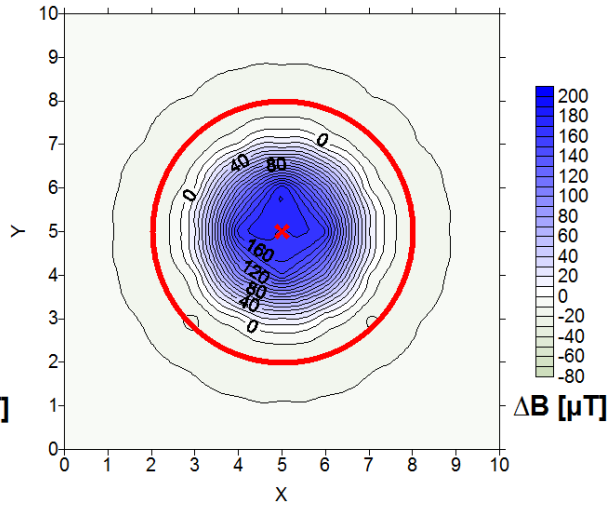
Anhang I: \varnothing 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert.



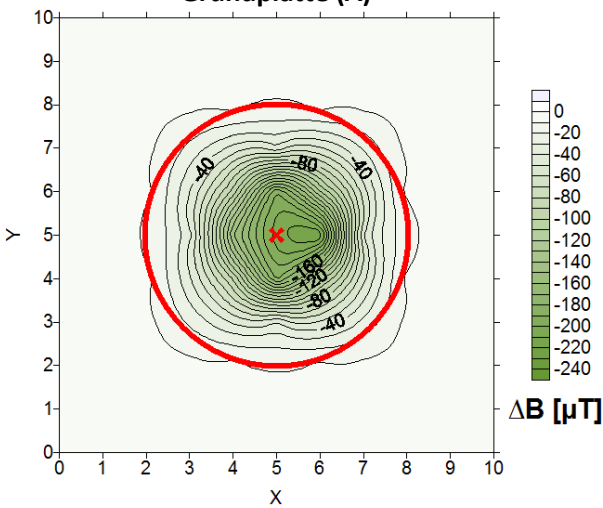
Anhang J: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.



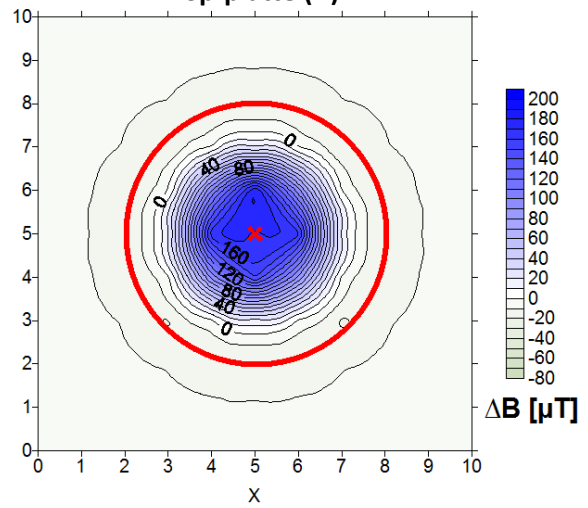
Grundplatte (A)



Kopfplatte (A)

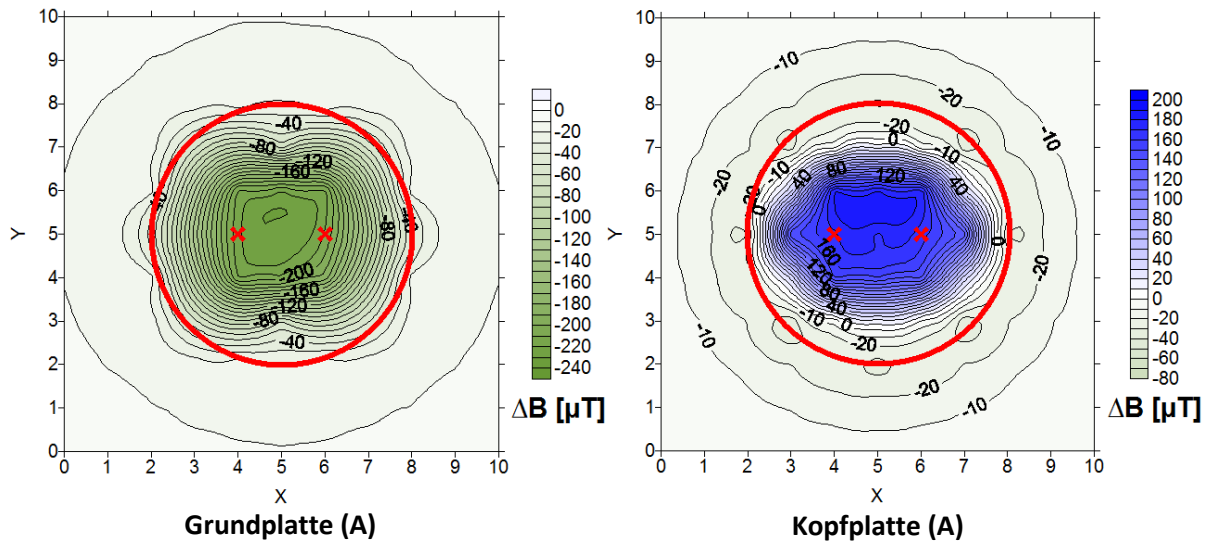


Grundplatte (B)

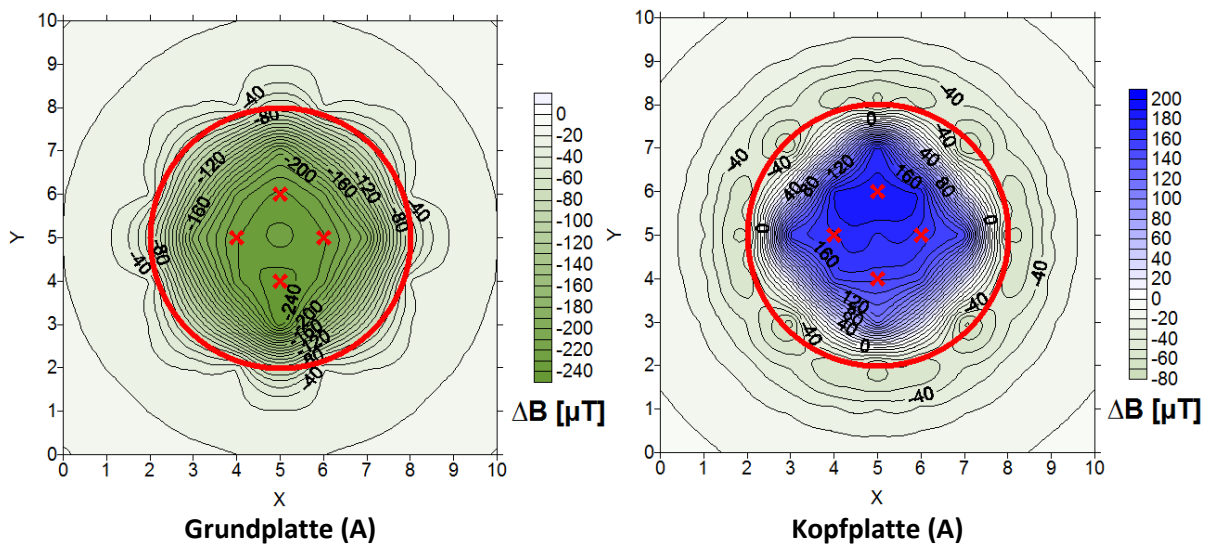


Kopfplatte (B)

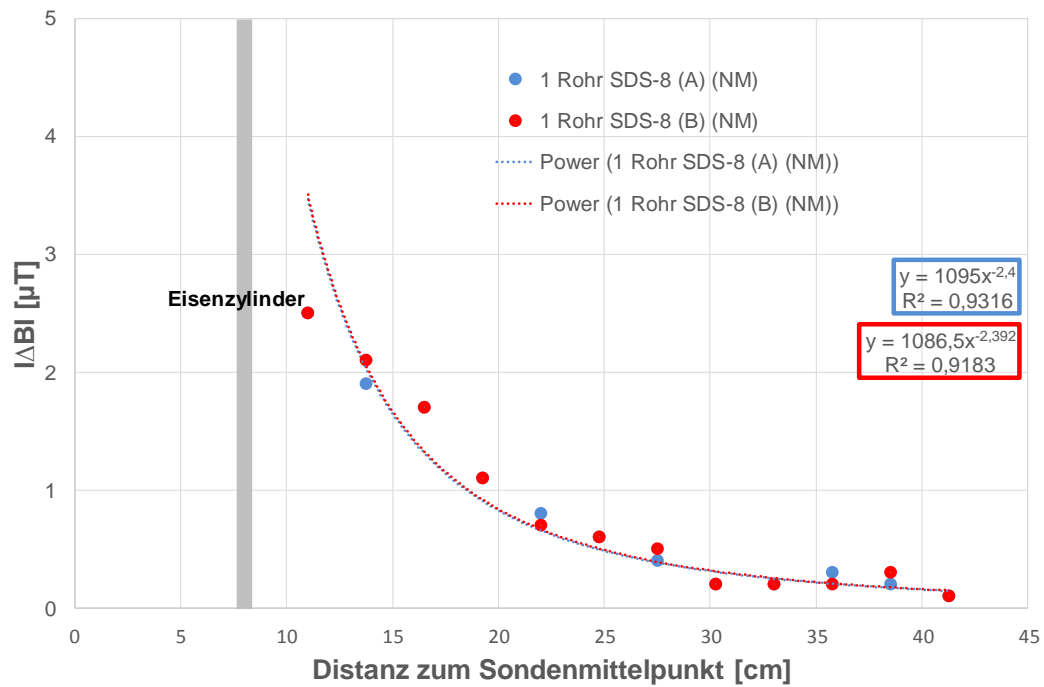
Anhang K: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 2 Sondenrohre (Einfach-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.



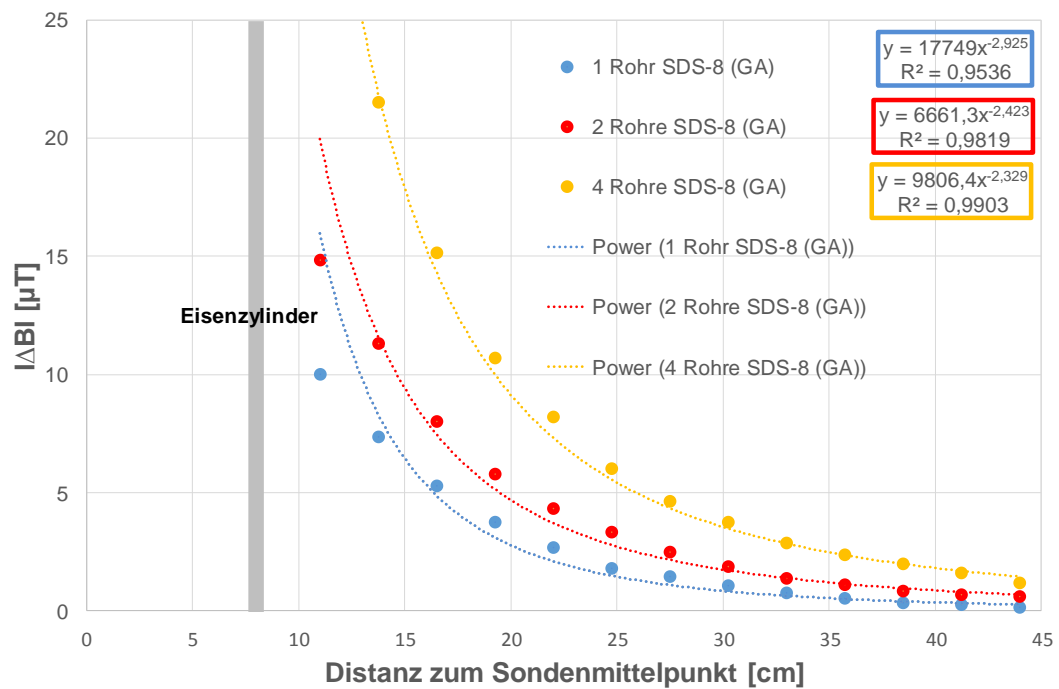
Anhang L: Ø 8 mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch, Szenario = 4 Sondenrohre (Doppel-U) mit Zylinder, MIR mit GA „Süd“.



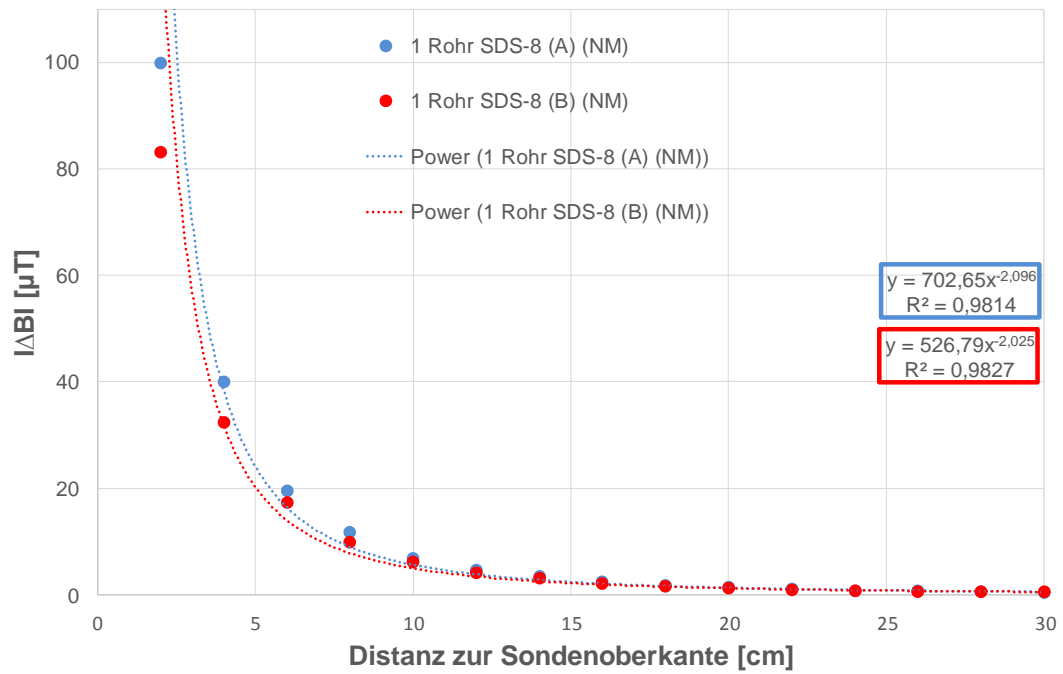
Anhang M: Laterale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Nicht magnetisiert (NM).



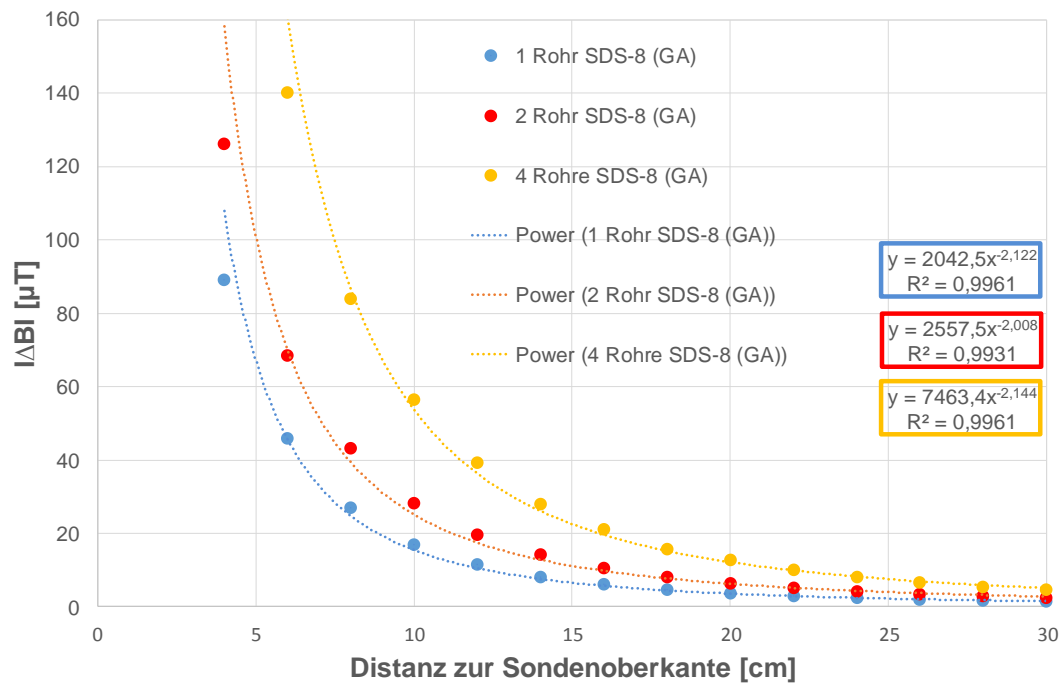
Anhang N: Laterale Messsignalreichweite $\varnothing 8,0$ mm Stahldrahtseil im Schrumpfschlauch mit Eisenzylinder, Szenario = 1 Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR mit GA „Süd“.



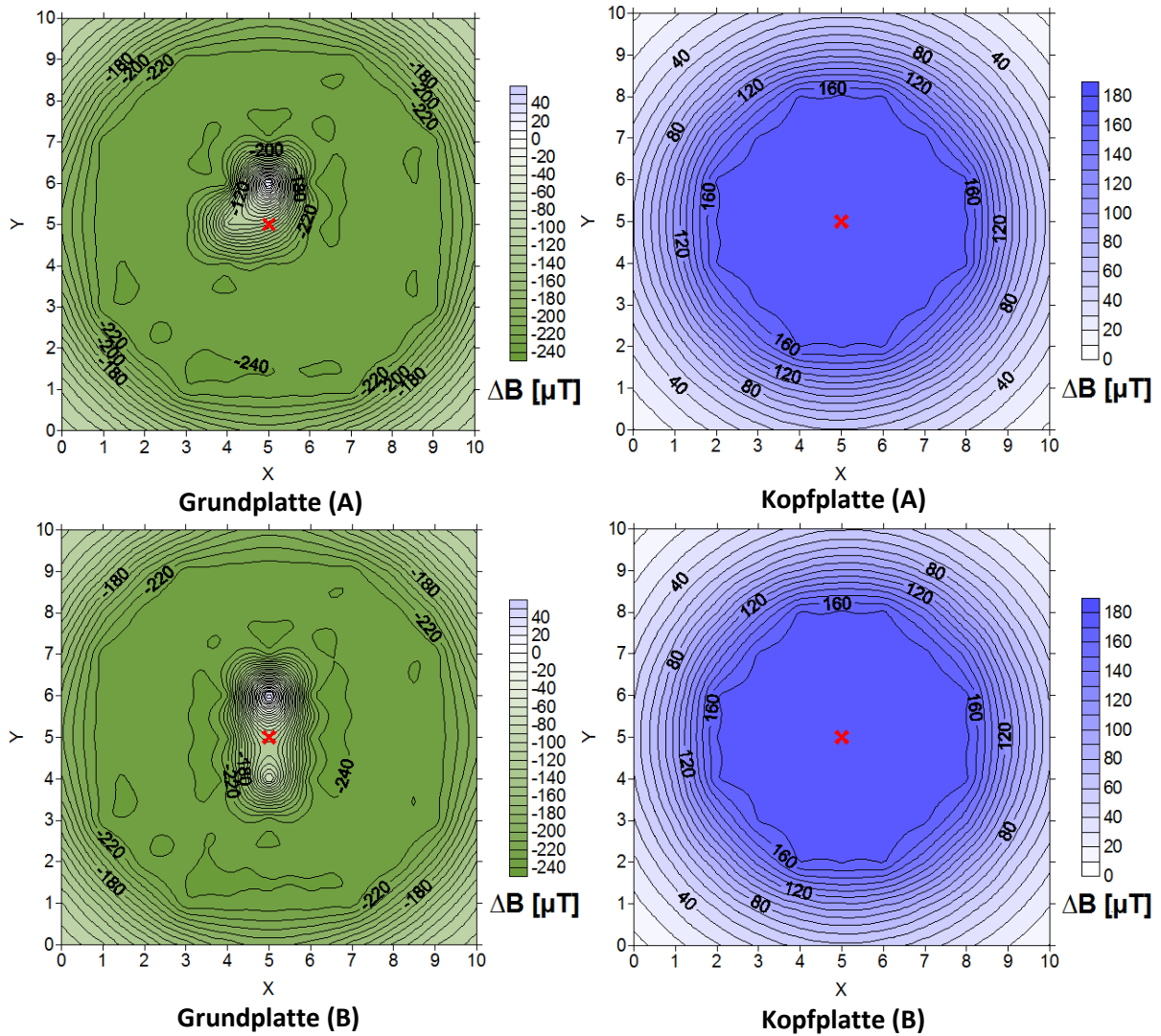
Anhang O: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, Nicht magnetisiert (NM).



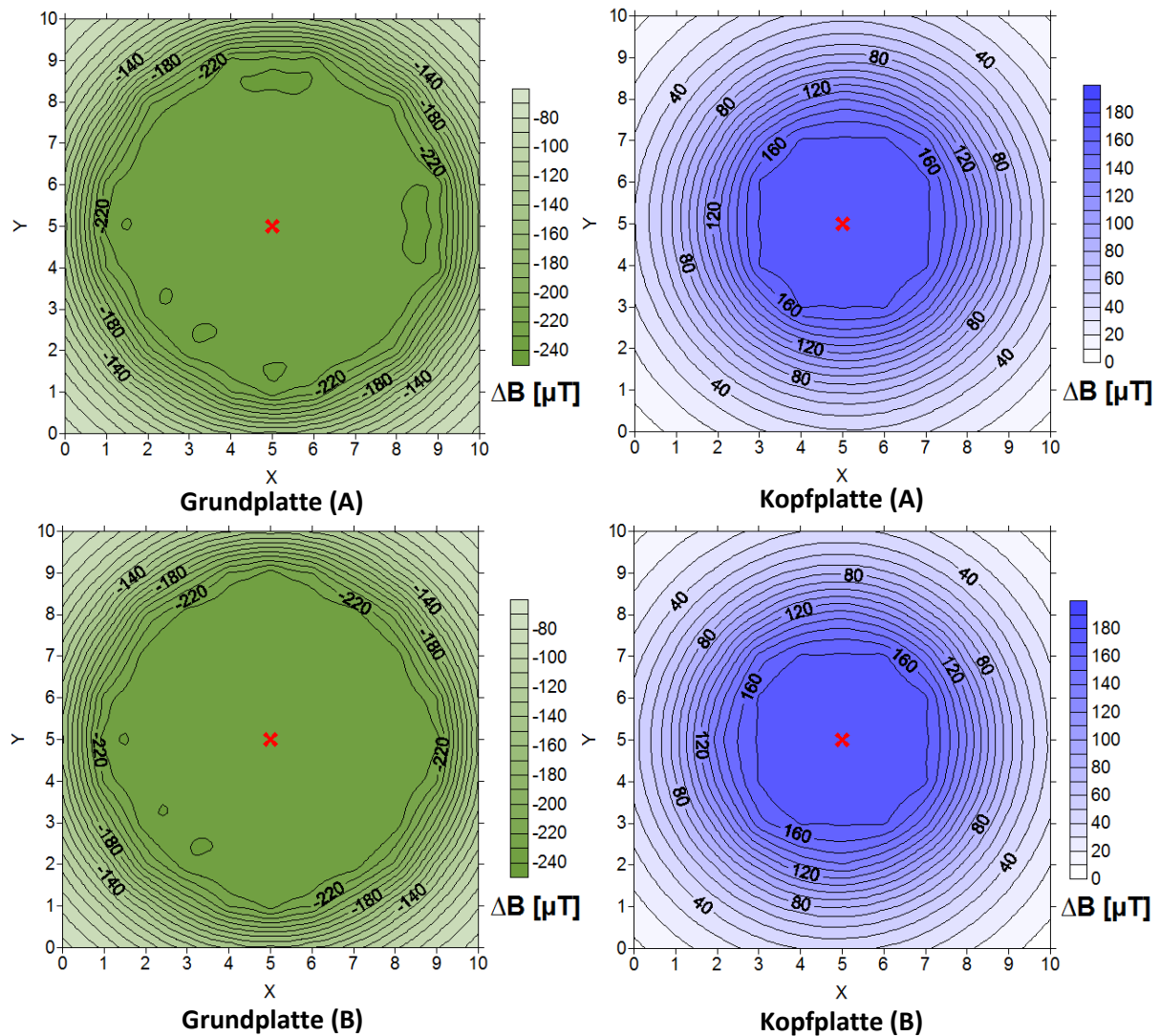
Anhang P: Vertikale Messsignalreichweite \varnothing 8 mm Stahldrahtseil mit Eisenzylinder, Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, 2 Sondenrohre (Einfach-U), und 4 Sondenrohre (Doppel-U), MIR
mit GA „Süd“.



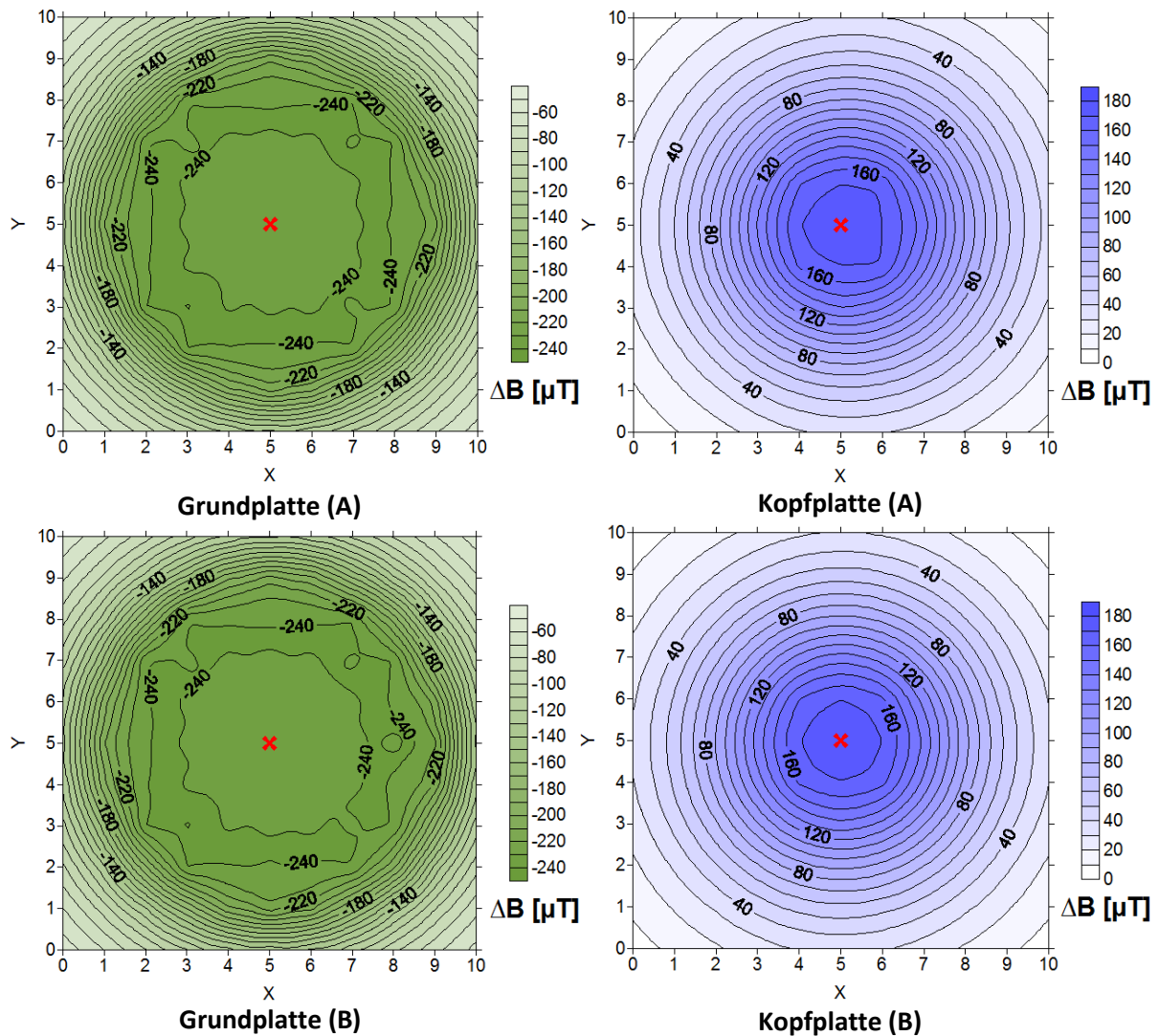
Anhang Q: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, Mix: KMKM.



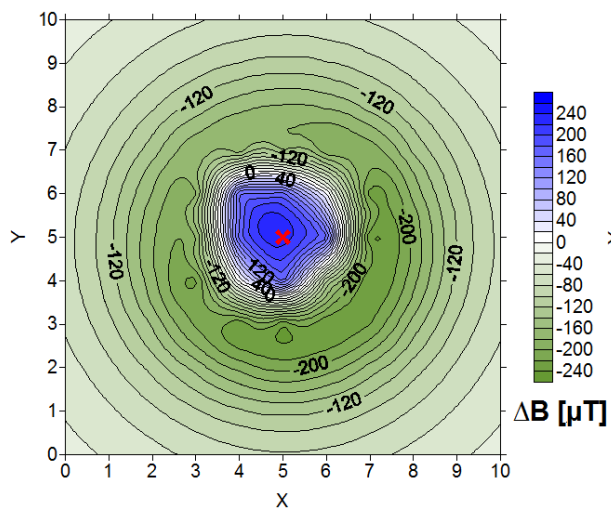
Anhang R: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKMKKM.



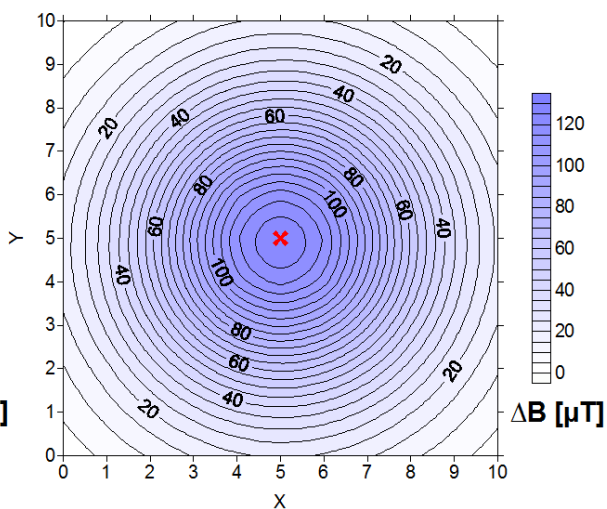
Anhang S: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKMKKKM.



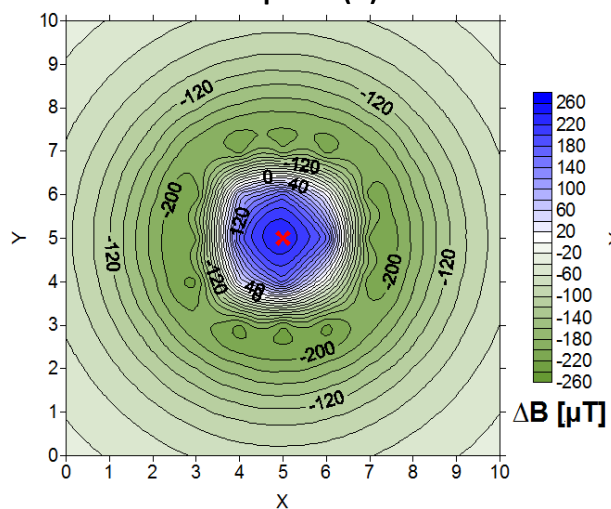
Anhang T: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
 Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKKMKKKKM.



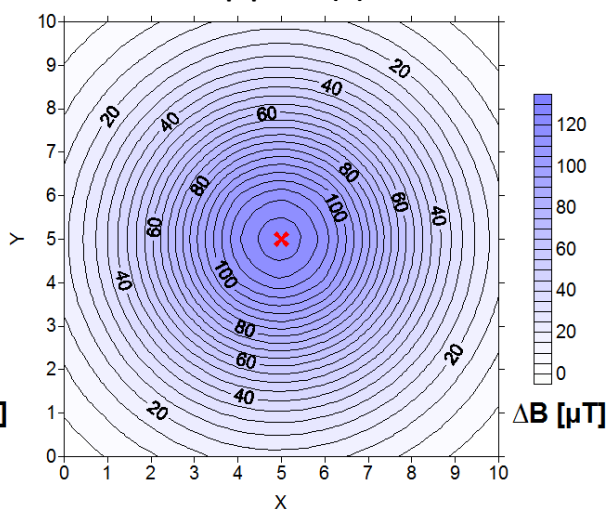
Grundplatte (A)



Kopfplatte (A)

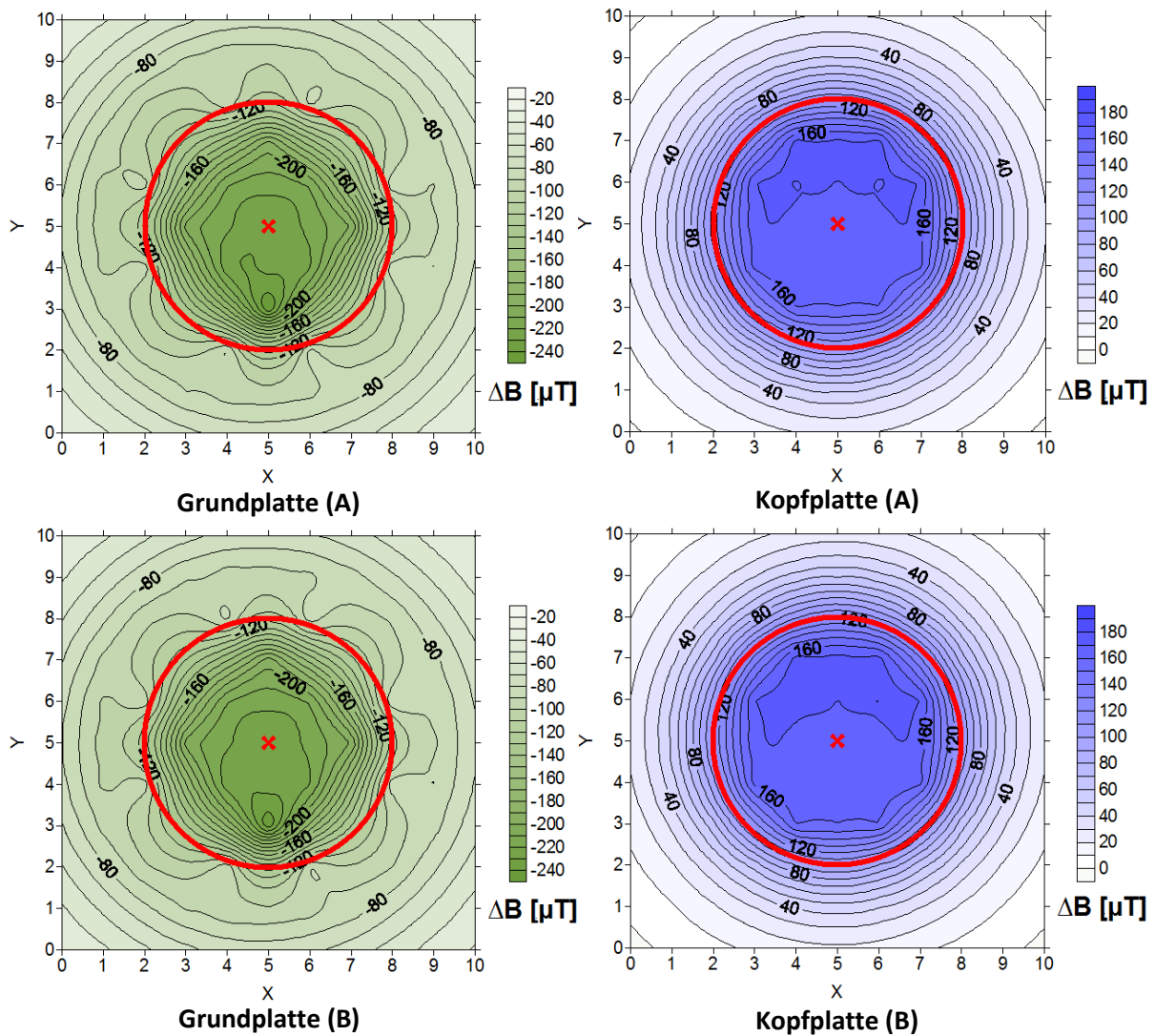


Grundplatte (B)

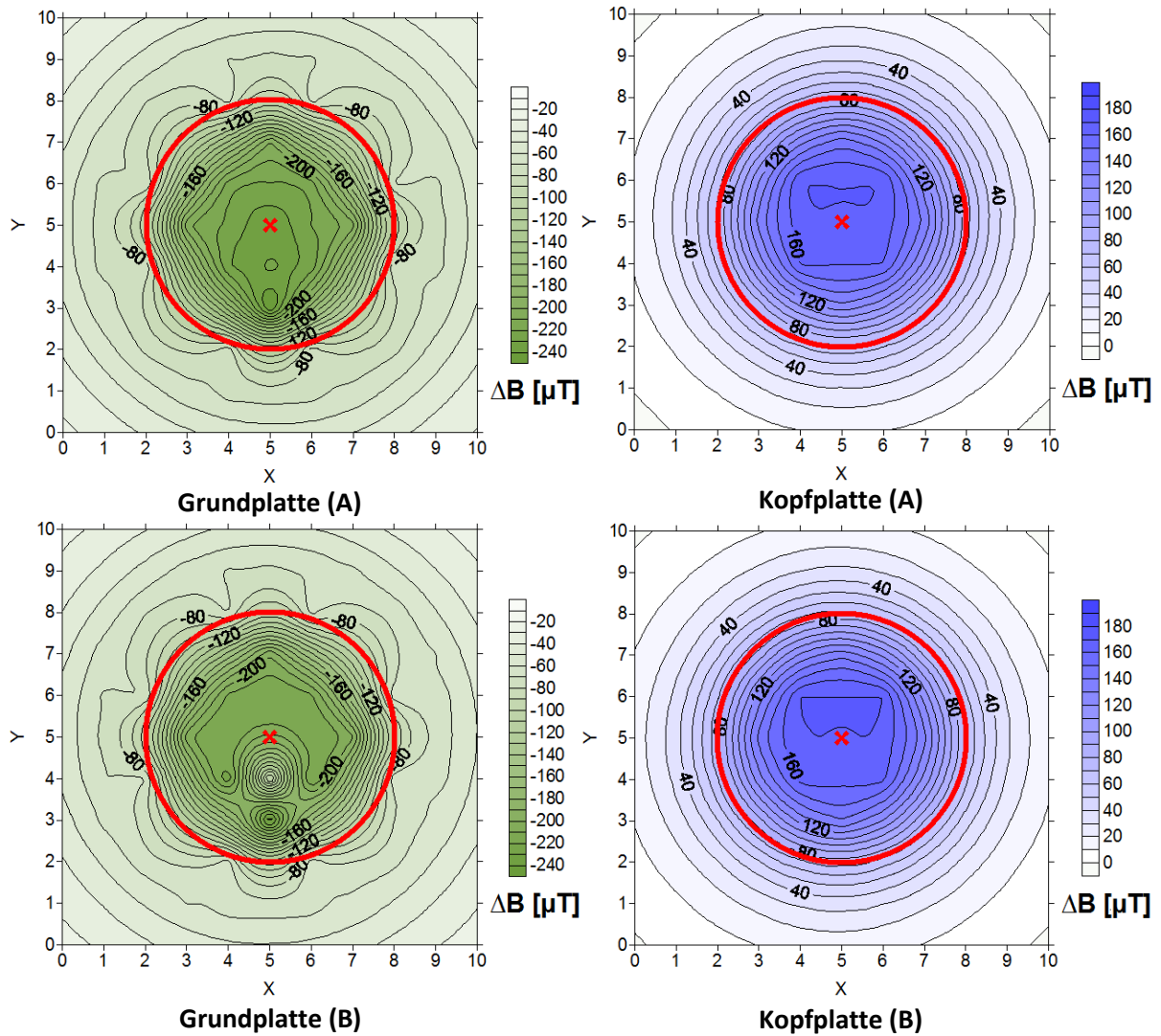


Kopfplatte (B)

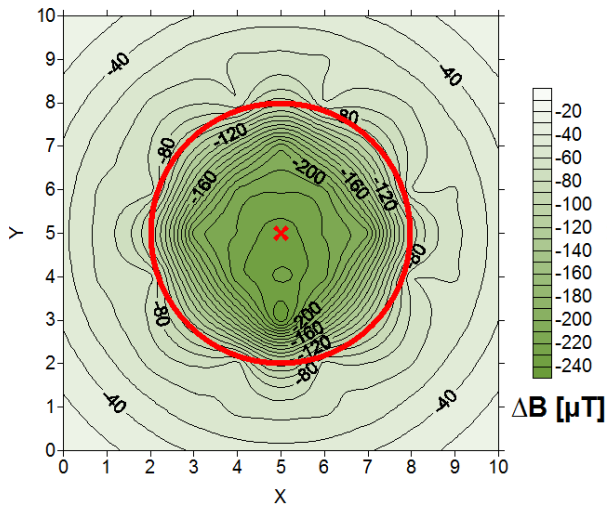
Anhang U: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KMKM.



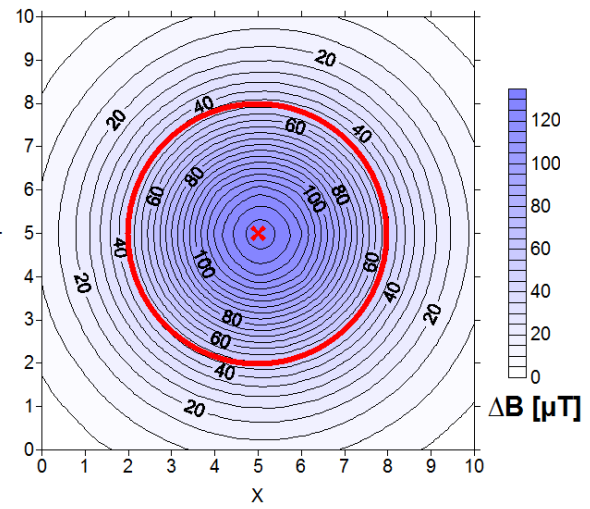
Anhang V: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KKMKKM.



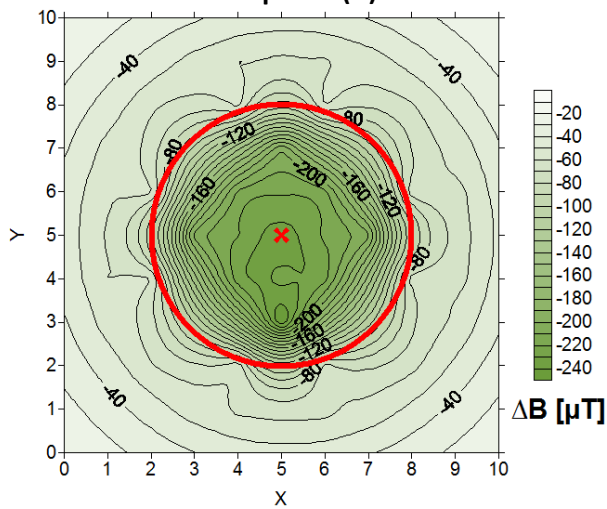
Anhang W: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
 Sondenrohr in der Mitte mit Zylinder, Mix: KKKMKKKM.



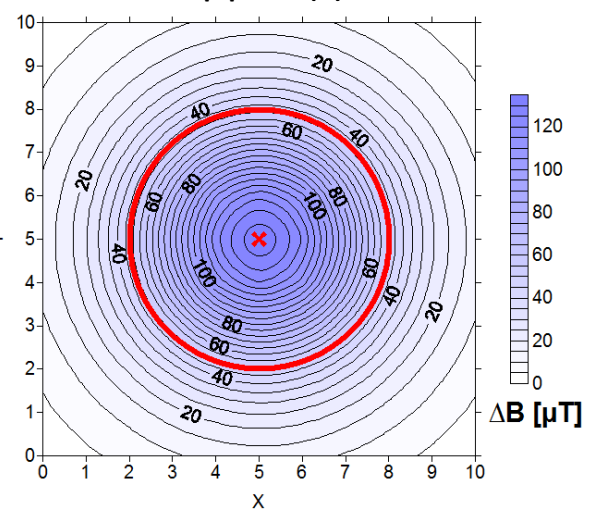
Grundplatte (A)



Kopfplatte (A)

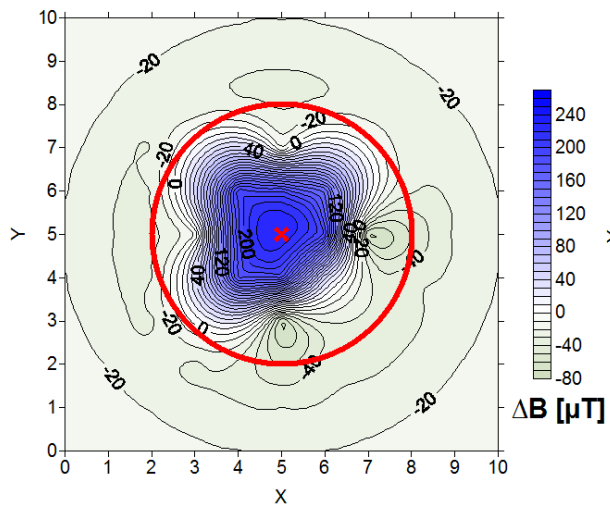


Grundplatte (B)

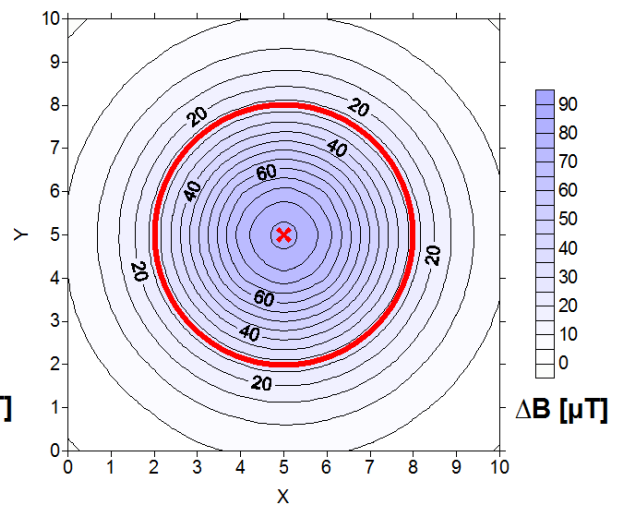


Kopfplatte (B)

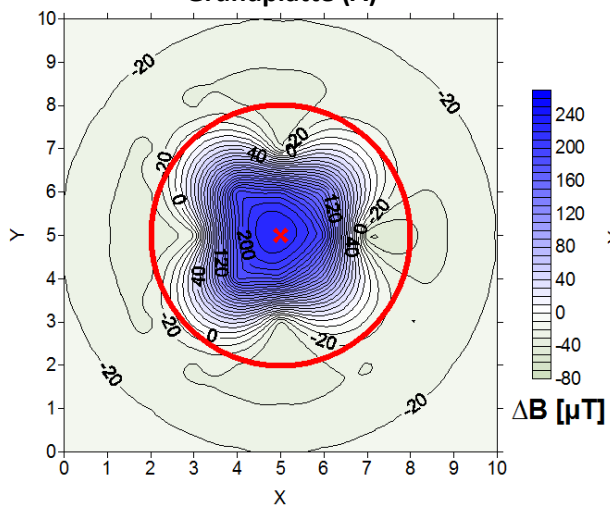
Anhang X: \varnothing 12,7 mm Neodym-Magnetkugeln (M) + \varnothing 15,0 mm Stahlkugeln (K), Szenario = 1
Sondenrohr in der Mitte, Mix: KKKKMKKKKM.



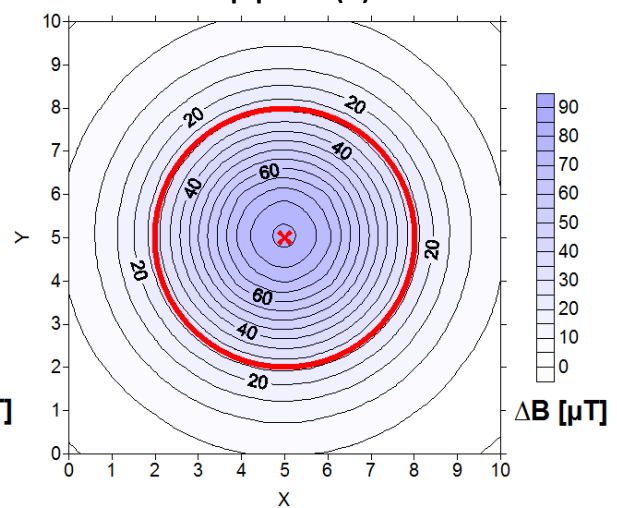
Grundplatte (A)



Kopfplatte (A)



Grundplatte (B)



Kopfplatte (B)

Anhang Y: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 1.

	Hinterfüllmaterial	Sand (trocken)				
	Material außen	Sand (trocken)				
	1. Durchgang		2. Durchgang		3. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	5,8	10	4,6	10	3,7	10
10	5,9	10	4,3	10	3,7	10
20	5,9	10	3,9	10	3,1	10
30	6,0	10	5,0	10	3,6	10
40	7,5	10	4,9	10	4,9	10
50	8,7	10	4,8	10	6,1	10
60	9,9	10	6,3	10	6,3	10
70	13,6	10	7,7	10	8,9	10
80	22,2	10	10,4	10	14,6	70
90	20,6	10	11,6	10	18,6	90
100	23,2	10	15,4	10	16,1	80
110	21,7	10	16,0	10	20,6	10
120	21,9	10	17,6	10	20,5	10
130	21,8	10	20,3	10	21,1	10
140	21,3	10	21,5	10	20,3	10
150	21,1	10	21,8	10	20,5	10
160	21,7	10	23,2	10	21,3	10
170	22,4	10	24,4	10	21,9	10
180	22,8	10	26,1	10	22,4	10
190	22,0	10	25,1	10	22,8	10
200	23,7	10	25,4	10	23,3	10
210	22,6	10	25,8	10	23,0	10
220	23,1	10	25,9	10	22,8	10
230	22,1	10	25,9	10	23,3	10
240	23,4	10	26,0	10	21,8	10
250	23,8	10	27,6	10	21,2	10
260	26,1	10	27,0	10	21,0	10
270	26,7	10	26,3	10	23,2	10
280	26,4	10	28,7	10	21,8	10
290	27,0	10	29,2	10	23,8	10
300	28,0	10	28,4	10	23,7	10
310	26,7	10	28,7	10	21,4	10
320	27,1	10	27,3	10	20,5	10
330	22,0	10	26,0	10	17,7	90
340	15,7	10	23,4	10	12,7	60
350	10,3	10	20,1	10	6,4	30
360	9,3	10	7,2	40	3,3	20

Anhang Z: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 2.

	Hinterfüllmaterial	Sand (nass)				
	Material außen	Sand (nass)				
	1. Durchgang		2. Durchgang		3. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	8,6	40	4,2	20	8,1	40
10	4,6	20	3,0	20	7,4	40
20	4,9	20	3,1	20	5,4	30
30	4,2	20	3,5	20	5,2	30
40	4,7	20	3,6	20	5,3	30
50	4,4	20	4,0	20	5,2	30
60	4,9	20	4,1	20	6,0	30
70	5,0	20	3,9	20	5,7	30
80	4,4	20	3,8	20	5,2	30
90	4,9	20	3,4	20	5,4	30
100	4,2	20	3,9	20	5,6	30
110	4,4	20	4,3	20	5,4	20
120	4,2	20	4,6	20	4,9	20
130	4,5	20	4,7	20	4,8	20
140	4,8	20	5,2	20	4,1	20
150	3,6	20	5,0	20	4,0	20
160	3,6	20	3,0	20	4,1	20
170	3,3	20	4,8	20	4,2	20
180	3,4	20	4,6	20	4,3	20
190	3,7	20	4,8	20	4,9	30
200	3,1	20	4,7	20	5,2	30
210	3,2	20	4,3	20	4,7	20
220	3,7	20	4,7	20	4,9	30
230	4,2	20	4,5	20	5,5	30
240	4,1	20	4,8	20	5,9	30
250	4,6	20	5,0	20	6,1	30
260	4,6	20	2,7	15	5,2	30
270	2,8	20	2,6	15	5,1	30
280	2,4	20	3,3	20	5,2	30
290	4,4	20	3,6	20	5,4	30
300	4,8	20	4,3	20	5,1	30
310	4,7	20	4,7	20	5,9	30
320	4,6	20	4,5	20	5,9	30
330	4,0	20	4,4	20	5,8	30
340	4,1	20	4,4	20	5,5	30
350	5,5	20	4,8	20	5,1	30
360	3,2	20	4,0	20	4,7	20

Anhang AA: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 3.

Versuch: Recover						
	Hinterfüllmaterial	Sand (gesättigt)				
	Material außen	Sand (gesättigt)				
	1. Durchgang		2. Durchgang		3. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,18	90	0,15	80	0,14	70
10	0,19	90	0,18	90	0,16	80
20	0,16	90	0,14	60	0,12	60
30	0,17	90	0,13	60	0,12	60
40	0,18	90	0,14	60	0,13	60
50	0,18	90	0,14	60	0,13	60
60	0,19	90	0,14	60	0,13	60
70	0,19	90	0,14	60	0,13	60
80	0,19	90	0,14	60	0,13	60
90	0,19	90	0,13	60	0,13	60
100	0,18	90	0,14	60	0,13	60
110	0,17	80	0,13	60	0,13	60
120	0,17	80	0,13	60	0,13	60
130	0,16	80	0,13	60	0,12	60
140	0,15	70	0,13	60	0,12	60
150	0,15	70	0,13	60	0,12	60
160	0,14	70	0,12	60	0,12	60
170	0,14	70	0,13	60	0,12	60
180	0,13	60	0,12	60	0,12	60
190	0,13	60	0,12	60	0,12	60
200	0,13	60	0,12	60	0,12	60
210	0,12	60	0,12	60	0,12	60
220	0,13	60	0,12	60	0,13	60
230	0,13	60	0,12	60	0,12	60
240	0,13	60	0,12	60	0,12	60
250	0,13	60	0,11	60	0,13	60
260	0,13	60	0,12	60	0,12	60
270	0,13	60	0,12	60	0,12	60
280	0,13	60	0,12	60	0,12	60
290	0,13	60	0,12	60	0,12	60
300	0,13	60	0,12	60	0,12	60
310	0,13	60	0,12	60	0,12	60
320	0,14	60	0,12	60	0,12	60
330	0,13	60	0,12	60	0,12	60
340	0,14	60	0,12	60	0,12	60
350	0,14	60	0,13	60	0,12	60
360	0,15	80	0,15	80	0,15	70

Anhang BB: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 4.

Hinterfüllmater	Sand (nass)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (nass)			
	1. Durchgang		2. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	25,0	15	17,9	90
10	18,4	95	14,7	75
20	16,0	80	13,3	65
30	15,3	80	12,1	60
40	11,6	60	12,0	60
50	10,5	60	11,9	60
60	11,3	60	11,6	60
70	11,9	60	11,5	60
80	11,0	55	10,7	55
90	10,4	45	9,1	45
100	8,7	40	8,7	40
110	8,1	50	9,6	50
120	9,2	45	9,4	45
130	9,4	45	9,3	45
140	4,2	45	9,3	45
150	5,0	45	9,1	45
160	8,8	45	9,4	45
170	10,6	50	9,9	50
180	9,8	50	9,7	50
190	10,0	50	9,7	50
200	8,8	55	10,6	55
210	7,5	50	9,9	50
220	7,1	40	8,4	40
230	6,7	45	9,3	45
240	8,0	45	9,5	45
250	9,1	40	8,5	40
260	9,5	40	8,4	40
270	8,1	40	8,1	40
280	8,2	40	8,6	40
290	10,1	50	8,3	40
300	10,7	55	8,1	40
310	10,4	55	10,1	50
320	10,0	50	9,4	45
330	10,1	50	10,1	50
340	10,3	50	10,5	55
350	10,6	50	9,6	50
360	10,2	50	4,5	20

Hinterfüllmater	Sand (nass)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (nass)			
	3. Durchgang		4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	15,0	75	11,6	55
10	14,1	70	13,1	65
20	14,3	70	10,2	50
30	14,0	70	11,3	55
40	12,2	60	10,8	55
50	12,0	60	10,1	50
60	3,0	15	9,8	50
70	3,9	20	9,4	45
80	4,9	25	8,9	45
90	5,2	30	9,2	45
100	10,6	55	8,7	40
110	10,0	50	8,8	45
120	10,3	50	9,0	45
130	10,8	55	10,2	50
140	10,6	55	9,9	50
150	10,2	50	9,5	45
160	9,7	50	9,9	50
170	9,8	50	9,7	50
180	10,6	55	10,1	50
190	11,4	55	10,6	50
200	10,9	55	10,4	55
210	10,9	55	9,6	50
220	10,5	55	9,3	45
230	10,3	50	9,4	45
240	10,5	55	9,2	45
250	10,9	55	10,1	50
260	12,2	60	10,6	55
270	10,8	55	10,5	55
280	10,7	55	10,2	50
290	11,0	55	10,2	50
300	10,8	55	9,7	50
310	11,8	55	9,5	45
320	11,5	55	9,9	50
330	12,4	60	10,0	50
340	11,8	55	9,9	50
350	12,3	60	9,7	50
360	11,2	55	9,6	50

Hinterfüllmater	Sand (nass)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (nass)			
	5. Durchgang		6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	10,0	50	2,9	15
10	11,5	60	7,2	35
20	15,9	80	6,1	30
30	13,2	65	8,7	40
40	11,6	60	10,0	50
50	10,1	50	10,8	55
60	9,3	45	10,3	50
70	8,0	40	10,3	50
80	8,3	40	9,7	50
90	8,1	40	9,8	50
100	8,3	40	9,1	45
110	8,0	40	9,3	45
120	9,0	45	10,2	50
130	9,6	45	13,2	65
140	9,6	50	12,5	60
150	10,4	55	10,3	50
160	10,1	50	10,6	55
170	9,9	50	11,6	55
180	10,1	50	11,0	55
190	9,5	45	11,7	55
200	8,9	45	11,7	55
210	9,0	45	11,4	55
220	8,5	40	10,8	55
230	9,4	45	14,6	75
240	8,7	40	12,2	60
250	9,5	45	14,0	70
260	9,5	45	16,6	80
270	9,5	45	15,0	70
280	9,8	50	16,3	80
290	9,0	45	14,1	70
300	9,0	45	13,2	65
310	9,8	50	11,8	60
320	9,7	50	11,1	55
330	9,4	50	11,2	60
340	13,9	70	12,3	60
350	10,3	50	13,2	65
360	10,1	50	10,1	50

Hinterfüllmater	Sand (nass)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (nass)			
	7. Durchgang		8. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	26,0	10	9,9	50
10	17,1	85	2,9	40
20	12,3	60	3,0	30
30	10,6	55	10,1	50
40	9,4	45	12,5	45
50	9,3	45	12,3	45
60	9,8	50	13,7	45
70	10,3	50	13,0	45
80	10,2	50	12,7	45
90	10,6	55	13,2	45
100	10,6	55	12,8	45
110	10,1	50	13,1	45
120	10,5	55	11,8	45
130	10,7	55	12,0	50
140	10,9	55	11,9	50
150	10,7	55	14,0	50
160	10,4	55	14,0	50
170	10,6	55	14,3	50
180	10,6	55	12,7	50
190	11,4	55	12,1	55
200	11,1	55	12,8	50
210	10,5	55	11,7	60
220	10,7	55	11,4	55
230	10,0	50	10,5	55
240	11,2	55	11,7	55
250	11,0	55	11,8	55
260	11,3	55	12,0	50
270	11,3	55	12,6	50
280	10,0	50	11,9	45
290	9,3	45	8,7	40
300	9,0	45	9,0	45
310	9,3	45	9,1	45
320	9,8	50	8,7	40
330	9,6	50	8,7	40
340	10,5	55	9,5	45
350	11,9	55	10,2	50
360	10,0	50	3,0	10

Hinterfüllmater	Sand (nass)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (nass)			
	9. Durchgang		10. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	2,9	10	10,2	50
10	2,9	10	3,2	15
20	3,0	10	2,9	10
30	10,1	50	8,1	40
40	12,5	60	10,2	50
50	12,3	60	10,3	50
60	13,7	70	10,6	55
70	13,0	65	10,3	50
80	12,7	60	10,4	50
90	13,2	65	11,1	55
100	12,8	65	10,6	50
110	13,1	65	10,5	50
120	11,8	55	10,7	55
130	12,0	60	11,5	55
140	11,9	55	11,3	55
150	14,0	70	10,5	50
160	14,0	70	10,3	50
170	14,3	70	9,9	50
180	12,7	60	9,1	45
190	12,1	60	10,8	55
200	12,8	65	11,0	50
210	11,7	55	10,5	50
220	11,4	55	10,4	50
230	10,5	55	10,2	50
240	11,7	55	10,6	50
250	11,8	55	11,8	55
260	12,0	60	11,0	50
270	12,6	60	10,2	50
280	11,9	55	10,0	50
290	11,8	55	9,8	50
300	10,8	55	9,6	50
310	11,3	55	9,8	50
320	10,9	55	9,4	45
330	10,5	50	9,1	45
340	10,2	50	9,4	45
350	9,6	45	8,9	45
360	9,0	45	2,9	10

Anhang CC: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 5.

Hinterfüllmater	Sand (gesättigt)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (gesättigt)			
	1. Durchgang		2. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,35	20	0,36	20
10	0,39	20	0,40	20
20	0,41	20	0,39	20
30	0,35	20	0,34	20
40	0,38	20	0,36	20
50	0,39	20	0,37	20
60	0,38	20	0,36	20
70	0,38	20	0,37	20
80	0,38	20	0,36	20
90	0,37	20	0,36	20
100	0,37	20	0,37	20
110	0,37	20	0,34	20
120	0,36	20	0,33	20
130	0,38	20	0,33	20
140	0,38	20	0,32	20
150	0,39	20	0,34	20
160	0,34	20	0,32	20
170	0,34	20	0,31	15
180	0,37	20	0,34	20
190	0,38	20	0,33	20
200	0,39	20	0,34	20
210	0,39	20	0,34	20
220	0,40	20	0,33	20
230	0,40	20	0,32	20
240	0,40	20	0,35	20
250	0,40	20	0,36	20
260	0,41	20	0,36	20
270	0,40	20	0,36	20
280	0,40	20	0,37	20
290	0,40	20	0,36	20
300	0,41	20	0,36	20
310	0,38	20	0,36	20
320	0,39	20	0,35	20
330	0,38	20	0,36	20
340	0,37	20	0,35	20
350	0,37	20	0,36	20
360	0,39	20	0,39	20

Hinterfüllmater	Sand (gesättigt)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (gesättigt)			
	3. Durchgang		4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,37	20	0,35	20
10	0,40	20	0,38	20
20	0,32	20	0,35	20
30	0,31	20	0,31	15
40	0,32	20	0,32	20
50	0,32	20	0,32	20
60	0,33	20	0,31	15
70	0,33	20	0,33	20
80	0,33	20	0,33	20
90	0,31	20	0,32	20
100	0,32	20	0,33	20
110	0,32	20	0,33	20
120	0,32	20	0,33	20
130	0,32	20	0,32	20
140	0,33	20	0,31	15
150	0,33	20	0,31	15
160	0,34	20	0,31	15
170	0,33	20	0,31	15
180	0,33	20	0,34	20
190	0,34	20	0,33	20
200	0,34	20	0,34	20
210	0,33	20	0,31	15
220	0,30	15	0,30	15
230	0,31	15	0,31	15
240	0,34	20	0,33	20
250	0,33	20	0,33	20
260	0,33	20	0,33	20
270	0,34	20	0,34	20
280	0,34	20	0,35	20
290	0,35	20	0,34	20
300	0,35	20	0,34	20
310	0,33	20	0,33	20
320	0,33	20	0,33	20
330	0,33	20	0,33	20
340	0,33	20	0,34	20
350	0,34	20	0,34	20
360	0,35	20	0,36	20

Hinterfüllmater	Sand (gesättigt)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (gesättigt)			
	5. Durchgang		6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,31	15	0,33	20
10	0,36	20	0,35	20
20	0,29	15	0,32	20
30	0,29	15	0,31	15
40	0,29	15	0,31	15
50	0,31	15	0,31	15
60	0,32	15	0,32	20
70	0,33	20	0,33	20
80	0,33	20	0,33	20
90	0,33	20	0,34	20
100	0,33	20	0,33	20
110	0,34	20	0,34	20
120	0,32	20	0,33	20
130	0,32	20	0,33	20
140	0,33	20	0,32	20
150	0,32	20	0,31	15
160	0,33	20	0,33	20
170	0,32	20	0,33	20
180	0,32	20	0,33	20
190	0,31	15	0,31	15
200	0,30	15	0,32	20
210	0,31	15	0,32	20
220	0,33	20	0,33	20
230	0,33	20	0,32	20
240	0,33	20	0,32	20
250	0,34	20	0,31	15
260	0,34	20	0,34	20
270	0,34	20	0,33	20
280	0,33	20	0,34	20
290	0,33	20	0,35	20
300	0,34	20	0,34	20
310	0,33	20	0,34	20
320	0,32	20	0,32	20
330	0,32	20	0,32	20
340	0,31	15	0,33	20
350	0,33	20	0,32	20
360	0,35	20	0,34	20

Hinterfüllmater	Sand (gesättigt)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (gesättigt)			
	7. Durchgang		8. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,37	20	0,32	20
10	0,40	20	0,37	15
20	0,32	20	0,31	15
30	0,30	15	0,30	15
40	0,31	15	0,30	15
50	0,31	15	0,29	15
60	0,30	15	0,31	15
70	0,31	15	0,30	15
80	0,31	15	0,29	15
90	0,30	15	0,31	15
100	0,31	15	0,31	15
110	0,31	15	0,30	15
120	0,31	15	0,30	15
130	0,31	15	0,29	15
140	0,30	15	0,29	15
150	0,30	15	0,29	15
160	0,31	15	0,29	15
170	0,30	15	0,30	15
180	0,30	15	0,29	15
190	0,31	15	0,28	15
200	0,30	15	0,29	15
210	0,31	15	0,28	15
220	0,31	15	0,30	15
230	0,31	15	0,30	15
240	0,31	15	0,32	20
250	0,31	15	0,32	20
260	0,30	15	0,32	20
270	0,30	15	0,32	20
280	0,31	15	0,33	20
290	0,31	15	0,32	20
300	0,32	20	0,32	20
310	0,32	20	0,31	15
320	0,32	20	0,30	15
330	0,31	15	0,32	20
340	0,29	15	0,32	20
350	0,32	20	0,30	15
360	0,33	20	0,34	20

Hinterfüllmater	Sand (gesättigt)		Rezept Nr.4	
Material außen	Sand (gesättigt)			
	9. Durchgang		10. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,33	20	0,37	20
10	0,37	20	0,40	20
20	0,33	20	0,30	15
30	0,30	15	0,31	15
40	0,31	15	0,29	15
50	0,31	15	0,31	15
60	0,30	15	0,31	15
70	0,30	15	0,31	15
80	0,31	15	0,31	15
90	0,31	15	0,30	15
100	0,31	15	0,31	15
110	0,30	15	0,31	15
120	0,31	15	0,30	15
130	0,32	15	0,31	15
140	0,30	15	0,30	15
150	0,30	15	0,30	15
160	0,30	15	0,31	15
170	0,29	15	0,30	15
180	0,33	20	0,29	15
190	0,31	15	0,29	15
200	0,32	20	0,29	15
210	0,31	15	0,29	15
220	0,31	15	0,29	15
230	0,31	15	0,29	15
240	0,32	20	0,29	15
250	0,33	20	0,29	15
260	0,33	20	0,30	15
270	0,32	20	0,31	15
280	0,33	20	0,31	15
290	0,32	20	0,31	15
300	0,31	15	0,30	15
310	0,32	20	0,31	15
320	0,30	15	0,30	15
330	0,31	15	0,30	15
340	0,31	15	0,29	15
350	0,29	15	0,30	15
360	0,36	20	0,36	20

Anhang DD: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 6.

Hinterfüllmaterial: Schluff (nass)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (nass)				
1. Durchgang			2. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,32	20	0,34	20
10	0,43	20	0,32	20
20	0,35	20	0,32	20
30	0,32	20	0,31	15
40	0,28	15	0,28	20
50	0,32	15	0,28	20
60	0,30	15	0,28	20
70	0,31	15	0,27	20
80	0,35	20	0,27	20
90	0,33	20	0,27	20
100	0,32	20	0,29	20
110	0,31	15	0,30	20
120	0,31	15	0,29	20
130	0,32	15	0,28	20
140	0,32	15	0,29	20
150	0,32	15	0,29	20
160	0,30	15	0,29	20
170	0,31	15	0,29	20
180	0,32	20	0,28	20
190	0,32	20	0,28	20
200	0,31	15	0,28	20
210	0,29	15	0,29	20
220	0,29	15	0,28	20
230	0,29	15	0,27	20
240	0,28	15	0,27	20
250	0,26	15	0,27	20
260	0,26	15	0,27	20
270	0,26	15	0,26	20
280	0,25	15	0,26	20
290	0,25	15	0,26	20
300	0,24	15	0,26	20
310	0,24	15	0,26	20
320	0,24	15	0,27	20
330	0,23	15	0,28	20
340	0,23	15	0,25	20
350	0,22	15	0,25	20
360	0,22	15	0,26	20

Hinterfüllmaterial: Schluff (nass)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (nass)				
3. Durchgang			4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,33	20	0,37	20
10	0,45	20	0,41	20
20	0,42	20	0,40	20
30	0,43	20	0,38	20
40	0,35	20	0,35	20
50	0,31	15	0,36	20
60	0,29	15	0,36	20
70	0,31	15	0,37	20
80	0,29	15	0,34	20
90	0,31	15	0,35	20
100	0,32	20	0,36	20
110	0,33	20	0,35	20
120	0,31	20	0,34	20
130	0,27	15	0,34	20
140	0,28	15	0,31	15
150	0,27	15	0,30	15
160	0,27	15	0,29	15
170	0,29	15	0,31	15
180	0,28	15	0,31	15
190	0,30	15	0,32	15
200	0,29	15	0,32	15
210	0,29	15	0,32	15
220	0,29	15	0,32	15
230	0,29	15	0,31	15
240	0,28	15	0,30	15
250	0,28	15	0,31	15
260	0,29	15	0,31	15
270	0,32	20	0,31	15
280	0,31	20	0,33	20
290	0,30	20	0,34	20
300	0,29	20	0,33	20
310	0,27	20	0,31	15
320	0,26	20	0,32	20
330	0,25	20	0,33	20
340	0,26	20	0,31	15
350	0,26	20	0,28	15
360	0,30	20	0,37	20

Hinterfüllmaterial: Schluff (nass)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (nass)				
5. Durchgang			6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,29	15	0,37	20
10	0,37	20	0,39	20
20	0,42	20	0,36	20
30	0,42	20	0,36	20
40	0,37	20	0,38	20
50	0,36	20	0,37	20
60	0,34	20	0,33	20
70	0,33	15	0,34	20
80	0,32	15	0,33	20
90	0,32	20	0,32	20
100	0,37	20	0,33	20
110	0,36	20	0,33	20
120	0,33	20	0,32	20
130	0,32	20	0,31	15
140	0,32	20	0,31	15
150	0,32	20	0,31	15
160	0,32	20	0,31	15
170	0,32	20	0,30	15
180	0,33	20	0,30	15
190	0,33	20	0,30	15
200	0,32	20	0,31	15
210	0,32	20	0,29	15
220	0,32	20	0,29	15
230	0,33	20	0,29	15
240	0,32	20	0,30	15
250	0,32	20	0,30	15
260	0,31	15	0,30	15
270	0,33	15	0,30	15
280	0,29	15	0,29	15
290	0,30	15	0,33	15
300	0,30	15	0,25	15
310	0,29	15	0,27	15
320	0,30	15	0,30	15
330	0,29	15	0,30	15
340	0,28	15	0,28	15
350	0,30	15	0,29	15
360	0,38	20	0,37	20

Hinterfüllmaterial: Schluff (nass)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (nass)				
7. Durchgang			8. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,40	20	0,34	20
10	0,37	20	0,36	20
20	0,35	20	0,34	20
30	0,33	20	0,31	20
40	0,33	20	0,32	20
50	0,33	20	0,33	20
60	0,33	20	0,32	20
70	0,34	20	0,31	15
80	0,33	20	0,31	15
90	0,32	20	0,30	15
100	0,32	20	0,31	15
110	0,31	15	0,30	15
120	0,31	15	0,30	15
130	0,32	15	0,29	15
140	0,30	15	0,29	15
150	0,31	15	0,29	15
160	0,29	15	0,28	15
170	0,28	15	0,28	15
180	0,27	15	0,27	15
190	0,29	15	0,28	15
200	0,28	15	0,28	15
210	0,29	15	0,28	15
220	0,29	15	0,28	15
230	0,29	15	0,28	15
240	0,30	15	0,28	15
250	0,30	15	0,28	15
260	0,29	15	0,29	15
270	0,28	15	0,29	15
280	0,28	15	0,28	15
290	0,29	15	0,27	15
300	0,28	15	0,27	15
310	0,27	15	0,27	15
320	0,28	15	0,27	15
330	0,28	15	0,26	15
340	0,27	15	0,26	15
350	0,29	15	0,27	15
360	0,30	15	0,28	15

Hinterfüllmaterial: Schluff (nass)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (nass)				
9. Durchgang			10. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,49	20	0,36	20
10	0,48	20	0,38	20
20	0,41	20	0,37	20
30	0,38	20	0,35	20
40	0,38	20	0,35	20
50	0,37	20	0,35	20
60	0,38	20	0,36	20
70	0,35	20	0,36	20
80	0,36	20	0,36	20
90	0,37	20	0,36	20
100	0,38	20	0,34	20
110	0,39	20	0,34	20
120	0,38	20	0,32	20
130	0,37	20	0,33	20
140	0,35	20	0,32	20
150	0,35	20	0,32	20
160	0,36	20	0,31	15
170	0,33	20	0,31	15
180	0,31	15	0,30	15
190	0,35	20	0,30	15
200	0,32	15	0,30	15
210	0,30	15	0,28	15
220	0,32	20	0,30	15
230	0,32	20	0,31	15
240	0,31	15	0,31	15
250	0,32	20	0,31	15
260	0,32	20	0,30	15
270	0,30	15	0,30	15
280	0,31	15	0,30	15
290	0,30	15	0,31	15
300	0,31	15	0,30	15
310	0,31	15	0,29	15
320	0,29	15	0,30	15
330	0,29	15	0,29	15
340	0,29	15	0,30	15
350	0,29	15	0,29	15
360	0,30	15	0,29	15

Anhang EE: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 7.

Hinterfüllmaterial: Schluff (gesättigt)		Rezept Nr.4		
Material außen: Sand (gesättigt)				
Winkel	1. Durchgang		2. Durchgang	
	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,44	20	0,26	15
10	0,47	20	0,31	15
20	0,40	20	0,33	20
30	0,40	20	0,30	15
40	0,40	20	0,31	15
50	0,39	20	0,32	20
60	0,39	20	0,30	15
70	0,41	20	0,32	20
80	0,40	20	0,32	20
90	0,41	20	0,30	15
100	0,39	20	0,32	20
110	0,40	20	0,31	15
120	0,39	20	0,31	15
130	0,37	20	0,30	15
140	0,34	20	0,30	15
150	0,35	20	0,30	15
160	0,31	15	0,31	15
170	0,34	20	0,31	15
180	0,36	20	0,30	15
190	0,36	20	0,31	15
200	0,34	20	0,30	15
210	0,35	20	0,31	15
220	0,34	20	0,30	15
230	0,34	20	0,29	15
240	0,33	20	0,29	15
250	0,33	20	0,30	15
260	0,34	20	0,31	15
270	0,34	20	0,30	15
280	0,35	20	0,31	15
290	0,35	20	0,31	15
300	0,34	20	0,30	15
310	0,30	15	0,31	15
320	0,32	20	0,30	15
330	0,32	20	0,29	15
340	0,30	15	0,28	15
350	0,29	15	0,29	15
360	0,30	15	0,27	15

Hinterfüllmaterial: Schluff (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
	3. Durchgang		4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,32	20	0,27	15
10	0,38	20	0,34	20
20	0,39	20	0,35	20
30	0,39	20	0,30	15
40	0,37	20	0,28	15
50	0,35	20	0,31	15
60	0,36	20	0,29	15
70	0,35	20	0,29	15
80	0,37	20	0,30	15
90	0,37	20	0,32	20
100	0,35	20	0,32	20
110	0,35	20	0,31	15
120	0,34	20	0,32	20
130	0,30	15	0,30	15
140	0,35	20	0,30	15
150	0,31	15	0,29	15
160	0,34	20	0,30	15
170	0,31	15	0,30	15
180	0,33	20	0,30	15
190	0,36	20	0,32	20
200	0,34	20	0,33	20
210	0,35	20	0,32	20
220	0,31	15	0,32	20
230	0,36	20	0,33	20
240	0,34	20	0,32	20
250	0,34	20	0,33	20
260	0,34	20	0,34	20
270	0,35	20	0,36	20
280	0,34	20	0,36	20
290	0,34	20	0,35	20
300	0,33	20	0,32	20
310	0,32	20	0,30	15
320	0,31	15	0,29	15
330	0,31	15	0,29	15
340	0,32	15	0,30	15
350	0,33	15	0,31	15
360	0,33	15	0,28	15

Hinterfüllmaterial: Schluff (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
5. Durchgang			6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,28	15	0,31	15
10	0,33	20	0,34	15
20	0,31	20	0,35	15
30	0,29	15	0,38	15
40	0,29	15	0,37	15
50	0,28	15	0,36	15
60	0,33	20	0,37	15
70	0,29	15	0,37	15
80	0,32	20	0,37	15
90	0,31	15	0,37	15
100	0,31	15	0,38	15
110	0,30	15	0,37	15
120	0,30	15	0,36	15
130	0,28	15	0,34	15
140	0,29	15	0,33	15
150	0,28	15	0,32	15
160	0,28	15	0,32	15
170	0,29	15	0,32	15
180	0,27	15	0,34	15
190	0,29	15	0,33	15
200	0,29	15	0,34	15
210	0,30	15	0,34	15
220	0,29	15	0,33	15
230	0,30	15	0,34	15
240	0,29	15	0,37	15
250	0,30	15	0,36	15
260	0,32	20	0,38	15
270	0,32	20	0,36	15
280	0,32	20	0,34	15
290	0,31	15	0,33	15
300	0,31	15	0,31	10
310	0,29	15	0,31	10
320	0,28	15	0,31	10
330	0,28	15	0,31	10
340	0,28	15	0,30	10
350	0,29	15	0,29	10
360	0,30	15	0,32	15

Hinterfüllmaterial: Schluff (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
	7. Durchgang		8. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,30	10	0,37	15
10	0,33	15	0,42	20
20	0,34	15	0,41	20
30	0,32	15	0,38	15
40	0,31	10	0,37	15
50	0,31	10	0,36	15
60	0,31	10	0,38	15
70	0,33	15	0,38	15
80	0,33	15	0,37	15
90	0,35	15	0,35	15
100	0,34	15	0,35	15
110	0,33	15	0,35	15
120	0,33	15	0,34	15
130	0,32	15	0,33	15
140	0,31	15	0,34	15
150	0,30	10	0,33	15
160	0,30	10	0,34	15
170	0,30	10	0,33	15
180	0,29	10	0,33	15
190	0,30	10	0,32	15
200	0,30	10	0,34	15
210	0,31	10	0,34	15
220	0,31	10	0,35	15
230	0,31	10	0,35	15
240	0,31	10	0,34	15
250	0,32	15	0,35	15
260	0,33	15	0,36	15
270	0,31	10	0,34	15
280	0,31	10	0,34	15
290	0,29	10	0,33	15
300	0,29	10	0,32	15
310	0,29	10	0,30	10
320	0,28	10	0,30	10
330	0,28	10	0,30	10
340	0,28	10	0,28	10
350	0,26	10	0,28	10
360	0,26	10	0,29	10

Anhang FF: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 8.

Hinterfüllmaterial: Ton (nass)		Rezept Nr.4			
Material außen: Sand (nass)					
		1. Durchgang		2. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	
0	0,20	10	0,16	80	
10	0,21	10	0,18	90	
20	0,26	10	0,20	10	
30	0,27	10	0,22	10	
40	0,26	10	0,23	10	
50	0,26	10	0,19	90	
60	0,26	10	0,19	90	
70	0,27	10	0,20	10	
80	0,26	10	0,22	10	
90	0,22	10	0,20	10	
100	0,21	10	0,19	10	
110	0,20	10	0,19	90	
120	0,19	10	0,21	10	
130	0,24	10	0,19	90	
140	0,2	10	0,18	90	
150	0,20	10	0,17	80	
160	0,22	10	0,16	80	
170	0,25	10	0,17	85	
180	0,20	10	0,17	90	
190	0,23	10	0,16	80	
200	0,22	10	0,16	80	
210	0,20	10	0,16	80	
220	0,22	10	0,14	70	
230	0,21	10	0,13	65	
240	0,20	10	0,14	70	
250	0,22	10	0,16	80	
260	0,23	10	0,15	70	
270	0,22	10	0,13	70	
280	0,26	10	0,13	60	
290	0,24	10	0,11	50	
300	0,20	10	0,11	60	
310	0,22	10	0,13	60	
320	0,24	10	0,09	45	
330	0,22	10	0,12	60	
340	0,21	10	0,14	70	
350	0,21	10	0,15	75	
360	0,21	10	0,15	70	

Hinterfüllmaterial: Ton (nass)		Rezept Nr.4		
Material außen: Sand (nass)				
	3. Durchgang		4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,14	70	0,18	90
10	0,20	10	0,15	75
20	0,19	90	0,19	95
30	0,20	95	0,20	10
40	0,19	10	0,22	10
50	0,20	10	0,27	10
60	0,22	10	0,29	10
70	0,23	10	0,27	10
80	0,20	95	0,21	10
90	0,19	90	0,21	10
100	0,19	90	0,22	10
110	0,22	10	0,25	10
120	0,19	10	0,24	10
130	0,17	85	0,21	10
140	0,17	85	0,21	10
150	0,16	80	0,20	10
160	0,16	80	0,20	10
170	0,18	90	0,19	95
180	0,14	65	0,17	85
190	0,15	75	0,17	85
200	0,16	80	0,18	90
210	0,15	70	0,18	90
220	0,15	70	0,15	70
230	0,13	65	0,14	65
240	0,14	70	0,15	75
250	0,16	80	0,14	70
260	0,15	80	0,16	75
270	0,14	70	0,14	70
280	0,13	65	0,13	60
290	0,13	65	0,14	70
300	0,13	65	0,15	75
310	0,13	65	0,13	65
320	0,14	70	0,15	70
330	0,16	75	0,15	70
340	0,16	75	0,16	75
350	0,17	85	0,15	70
360	0,16	75	0,16	80

Hinterfüllmaterial: Ton (nass)		Rezept Nr.4		
Material außen: Sand (nass)				
	5. Durchgang		6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,14	70	0,16	80
10	0,19	90	0,17	85
20	0,20	10	0,26	10
30	0,23	10	0,23	10
40	0,26	10	0,30	10
50	0,24	10	0,26	10
60	0,21	10	0,28	10
70	0,24	10	0,28	10
80	0,20	10	0,28	10
90	0,20	95	0,23	10
100	0,20	10	0,22	10
110	0,20	10	0,22	10
120	0,19	95	0,22	10
130	0,19	10	0,20	95
140	0,20	10	0,19	90
150	0,17	80	0,20	10
160	0,18	90	0,22	10
170	0,18	90	0,22	10
180	0,16	80	0,22	10
190	0,18	90	0,24	10
200	0,15	70	0,23	10
210	0,15	70	0,22	10
220	0,14	70	0,15	70
230	0,13	65	0,18	90
240	0,13	65	0,24	10
250	0,13	65	0,23	10
260	0,12	60	0,14	70
270	0,12	60	0,15	70
280	0,13	65	0,18	80
290	0,12	60	0,14	70
300	0,12	60	0,12	60
310	0,13	65	0,13	65
320	0,13	60	0,14	70
330	0,15	70	0,14	70
340	0,24	10	0,15	70
350	0,22	10	0,17	85
360	0,21	10	0,16	75

Hinterfüllmaterial: Ton (nass)		Rezept Nr.4		
Material außen: Sand (nass)				
		7. Durchgang		8. Durchgang
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,15	70	0,20	10
10	0,21	10	0,19	90
20	0,18	90	0,18	90
30	0,22	10	0,24	10
40	0,23	10	0,23	10
50	0,17	85	0,25	10
60	0,17	80	0,28	10
70	0,17	90	0,24	10
80	0,18	90	0,25	10
90	0,16	80	0,24	10
100	0,17	85	0,26	10
110	0,18	85	0,20	10
120	0,17	85	0,20	10
130	0,18	90	0,20	10
140	0,19	90	0,26	10
150	0,18	90	0,22	10
160	0,19	90	0,21	10
170	0,16	80	0,21	10
180	0,18	90	0,24	10
190	0,20	10	0,24	10
200	0,33	20	0,26	10
210	0,19	10	0,23	10
220	0,16	80	0,17	80
230	0,16	75	0,19	10
240	0,15	70	0,28	10
250	0,19	10	0,28	10
260	0,19	90	0,22	10
270	0,20	10	0,26	10
280	0,22	10	0,23	10
290	0,35	20	0,30	10
300	0,21	10	0,15	70
310	0,28	15	0,17	85
320	0,22	10	0,15	75
330	0,23	10	0,17	80
340	0,17	85	0,20	10
350	0,20	10	0,28	10
360	0,20	10	0,15	80

Hinterfüllmaterial: Ton (nass)		Rezept Nr.4		
Material außen: Sand (nass)				
	9. Durchgang		10. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,16	80	0,21	10
10	0,17	85	0,15	80
20	0,22	10	0,19	95
30	0,24	10	0,23	10
40	0,29	10	0,25	10
50	0,25	10	0,27	10
60	0,23	10	0,29	10
70	0,26	10	0,26	10
80	0,31	10	0,30	10
90	0,23	10	0,22	10
100	0,24	10	0,21	10
110	0,21	10	0,21	10
120	0,23	10	0,21	10
130	0,21	10	0,21	10
140	0,23	10	0,21	10
150	0,21	10	0,19	90
160	0,19	10	0,17	85
170	0,20	10	0,17	80
180	0,19	10	0,17	85
190	0,24	10	0,21	10
200	0,25	10	0,20	10
210	0,28	10	0,21	10
220	0,15	70	0,18	90
230	0,20	10	0,21	10
240	0,21	10	0,20	10
250	0,21	10	0,29	10
260	0,24	10	0,26	10
270	0,20	10	0,26	10
280	0,21	10	0,24	10
290	0,24	10	0,22	10
300	0,20	10	0,22	10
310	0,20	10	0,28	10
320	0,23	10	0,29	10
330	0,25	10	0,21	10
340	0,22	10	0,20	10
350	0,19	10	0,16	80
360	0,16	80	0,17	85

Anhang GG: Messwerte des elektrischen Widerstands des Versuchs 9.

Hinterfüllmaterial: Ton (gesättigt)		Rezept Nr.4			
Material außen: Sand (gesättigt)					
		1. Durchgang		2. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	
0	0,15	70	0,22	10	
10	0,19	95	0,18	90	
20	0,18	90	0,20	10	
30	0,19	95	0,25	10	
40	0,30	10	0,27	10	
50	0,22	10	0,25	10	
60	0,22	10	0,23	10	
70	0,23	10	0,20	10	
80	0,24	10	0,20	10	
90	0,24	10	0,21	10	
100	0,25	10	0,21	10	
110	0,25	10	0,20	10	
120	0,20	10	0,20	10	
130	0,21	10	0,23	10	
140	0,18	90	0,22	10	
150	0,20	10	0,21	10	
160	0,20	10	0,21	10	
170	0,19	90	0,20	10	
180	0,17	85	0,21	10	
190	0,20	95	0,20	10	
200	0,19	10	0,21	10	
210	0,18	90	0,23	10	
220	0,16	80	0,18	90	
230	0,12	60	0,20	10	
240	0,21	10	0,24	10	
250	0,14	70	0,25	10	
260	0,14	65	0,19	10	
270	0,20	10	0,21	10	
280	0,13	65	0,20	10	
290	0,17	80	0,22	10	
300	0,21	10	0,24	10	
310	0,21	10	0,24	10	
320	0,23	10	0,25	10	
330	0,22	10	0,26	10	
340	0,24	10	0,26	10	
350	0,24	10	0,25	10	
360	0,22	10	0,20	10	

Hinterfüllmaterial: Ton (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
3. Durchgang			4. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,20	10	0,14	70
10	0,22	10	0,20	10
20	0,18	90	0,31	10
30	0,14	70	0,33	15
40	0,20	10	0,31	15
50	0,18	90	0,27	10
60	0,18	90	0,21	10
70	0,21	10	0,22	10
80	0,23	10	0,24	10
90	0,16	80	0,23	10
100	0,17	85	0,24	10
110	0,16	80	0,28	10
120	0,20	10	0,24	10
130	0,18	90	0,21	10
140	0,20	10	0,28	10
150	0,17	85	0,21	10
160	0,18	85	0,19	95
170	0,20	10	0,26	10
180	0,19	10	0,26	10
190	0,23	10	0,18	90
200	0,23	10	0,20	10
210	0,17	85	0,21	10
220	0,17	85	0,28	10
230	0,18	90	0,35	15
240	0,24	10	0,45	20
250	0,20	10	0,31	15
260	0,20	10	0,33	15
270	0,20	10	0,31	15
280	0,22	10	0,29	15
290	0,24	10	0,29	15
300	0,22	10	0,32	15
310	0,23	10	0,24	10
320	0,24	10	0,24	10
330	0,23	10	0,30	10
340	0,21	10	0,24	10
350	0,20	10	0,15	70
360	0,17	85	0,14	70

Hinterfüllmaterial: Ton (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
5. Durchgang			6. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,14	70	0,15	75
10	0,14	65	0,15	75
20	0,18	90	0,20	10
30	0,24	10	0,23	10
40	0,24	10	0,25	10
50	0,21	10	0,24	10
60	0,18	90	0,23	10
70	0,19	90	0,22	10
80	0,17	85	0,18	90
90	0,17	85	0,19	90
100	0,16	80	0,20	10
110	0,18	90	0,21	10
120	0,19	90	0,24	10
130	0,20	10	0,25	10
140	0,19	90	0,22	10
150	0,20	10	0,23	10
160	0,18	90	0,23	10
170	0,21	10	0,16	80
180	0,26	10	0,19	90
190	0,23	10	0,18	90
200	0,21	10	0,20	95
210	0,25	10	0,15	75
220	0,24	10	0,17	80
230	0,27	10	0,17	80
240	0,37	20	0,21	10
250	0,38	20	0,21	10
260	0,43	20	0,27	10
270	0,20	10	0,31	10
280	0,19	90	0,25	10
290	0,21	10	0,23	10
300	0,21	10	0,21	10
310	0,23	10	0,22	10
320	0,25	10	0,20	10
330	0,26	10	0,22	10
340	0,25	10	0,21	10
350	0,17	85	0,17	80
360	0,14	70	0,15	75

Hinterfüllmaterial: Ton (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
7. Durchgang			8. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,13	60	0,14	70
10	0,16	80	0,14	70
20	0,20	95	0,15	70
30	0,22	10	0,21	10
40	0,26	10	0,22	10
50	0,26	10	0,21	10
60	0,28	10	0,21	10
70	0,18	90	0,22	10
80	0,18	90	0,22	10
90	0,16	75	0,23	10
100	0,16	75	0,17	85
110	0,18	90	0,16	80
120	0,19	90	0,16	80
130	0,19	10	0,20	10
140	0,19	90	0,20	10
150	0,19	10	0,19	10
160	0,19	95	0,26	10
170	0,16	80	0,27	10
180	0,23	10	0,29	10
190	0,42	20	0,32	15
200	0,18	90	0,27	10
210	0,19	10	0,21	10
220	0,20	10	0,20	10
230	0,15	70	0,19	90
240	0,15	75	0,20	10
250	0,13	65	0,20	95
260	0,83	40	0,20	10
270	0,17	80	0,20	10
280	0,20	10	0,18	90
290	0,20	10	0,19	10
300	0,18	90	0,20	10
310	0,25	10	0,22	10
320	0,20	10	0,21	10
330	0,19	10	0,21	10
340	0,18	80	0,20	10
350	0,17	80	0,19	90
360	0,14	60	0,13	60

Hinterfüllmaterial: Ton (gesättigt)			Rezept Nr.4	
Material außen: Sand (gesättigt)				
9. Durchgang			10. Durchgang	
Winkel	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]	Widerstand [Mohm]	Frequenz [% von 1 KHz]
0	0,13	60	0,13	60
10	0,15	75	0,15	70
20	0,18	90	0,19	90
30	0,20	95	0,16	80
40	0,19	90	0,20	95
50	0,19	10	0,21	10
60	0,21	10	0,21	10
70	0,20	10	0,20	10
80	0,20	10	0,20	10
90	0,23	10	0,21	10
100	0,26	10	0,22	10
110	0,29	10	0,23	10
120	0,17	85	0,23	10
130	0,19	90	0,19	10
140	0,19	10	0,22	10
150	0,19	10	0,19	10
160	0,20	10	0,19	90
170	0,20	10	0,20	10
180	0,22	10	0,22	10
190	0,36	15	0,25	10
200	0,36	15	0,33	15
210	0,36	15	0,35	15
220	0,16	80	0,21	10
230	0,25	10	0,25	10
240	0,21	10	0,20	10
250	0,14	70	0,17	80
260	0,15	70	0,17	85
270	0,15	75	0,17	80
280	0,15	70	0,18	90
290	0,16	75	0,17	80
300	0,18	90	0,20	10
310	0,18	90	0,25	10
320	0,19	90	0,22	10
330	0,17	85	0,27	10
340	0,16	75	0,18	85
350	0,15	70	0,16	75
360	0,13	65	0,13	65