

Grubenvermessung heute: Markscheidewesen zwischen Tradition und Industrie 4.0

Autor:

Prof. Dr.-Ing. M.Phil Jörg Benndorf
Professor für Geomonitoring und Markscheidewesen
Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
Institut für Markscheidewesen und Geodäsie
TU Bergakademie Freiberg
Fuchsmühlenweg 9B
09599 Freiberg, Deutschland
Email: Joerg.Benndorf@mabb.tu-freiberg.de

1. Einführung

Als Inhaber der Professur für Geomonitoring und Markscheidewesen der TU Bergakademie Freiberg ist es dem Autor ein besonderes Bedürfnis und eine Freude, am „19. Internationalen Montan-historischen Kongress“, gewidmet dem Thema Bergbau & Markscheidewesen und ausgerichtet in Schwaz, Österreich, teilzunehmen und beizutragen. Mit einer über 800-jährigen Geschichte hat sich das Berufsbild des Markscheiders im Vergleich zu vielen anderen Fachrichtungen im Grundanliegen nur wenig geändert. Über die Jahrhunderte, speziell im 20. Jahrhundert, sind weitere Aufgaben-bereiche hinzugekommen, aber Kernaufgaben, Kernkompetenzen und auch Grundsätze der markscheiderischen Arbeit blieben im Laufe der Zeit nahezu konstant. Grund genug, sich etwas näher mit dem klassischen Berufsbild des Markscheiders zu beschäftigen, historische und heutige markscheiderische Arbeitsweisen und genutzte Methoden und Instrumente gegenüberzustellen sowie aktuelle Herausforderungen herauszuarbeiten. Neben dem im Titel genannten Schwerpunkt der Grubenvermessung werden dabei auch die Aspekte der gegenwärtigen gesellschaftlichen Wahrnehmung der Montanwissenschaften allgemein und der universitären Ausbildung beleuchtet.

2. Markscheidewesen – eine Gegenstandsdefinition

In den gegenwärtig als Stand der Technik bezeichneten markscheiderischen Lehrbüchern (Niemczyk 1951, Neubert 1964, Schulte u.a., 1969, Meixner und Bukrinskij 1985, Knufinke 1999) finden sich verschiedene Definitionen zum Gegenstand des Markscheidewesens. Aus den Veröffentlichungsjahren der Lehrbücher wird schnell deutlich, dass aktuell nur wenig Fachliteratur zum Thema Markscheidewesen existiert. Deshalb möchte der Autor in diesem Artikel auf eine Gegenstandsdefinition zurückgreifen, die aus einer persönlichen Korrespondenz mit einem meiner Vorgänger der Professur, Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Fenk (2016), stammt.

„Das Markscheidewesen (im engeren Sinne) ist eine Disziplin der Bergbauwissenschaften, die unter Nutzung natur- und ingenieurwissenschaftlicher, betriebswissenschaftlicher und

rechtswissenschaftlicher Kenntnisse den Bergbau und im Zusammenhang damit die Lagerstätte und das Gebirge betreffende raumbezogene Daten und Informationen:

- erfasst,
- verwaltet, verdichtet, analysiert,
- speichert, dokumentiert und weitergibt.

Das Anliegen des Markscheidewesens besteht in seinem Beitrag zur Gewährleistung der Umweltverträglichkeit des Bergbaus, zur Gewährleistung der Bergbausicherheit (technische Sicherheit und Arbeitsschutz) einschließlich öffentlicher Sicherheit, zur maximalen Nutzung der Lagerstättenvorräte und zur effizienten Durchführung des Bergbau-Betriebsprozesses im weitesten Sinne, d.h. des Gewinnungs-, Speicher-, Entsorgungs- und Sanierungsprozesses im Montanwesen und in bergbauartigen Bereichen (Tunnel, Höhlen) in allen Stadien (Erkundung, Planung, Projektierung, operative Führung, Stilllegung und Nach- und Altbergbau)“.

Diese Gegenstandsdefinition verdeutlicht drei wesentliche Aspekte des Berufsbildes eines Markscheiders:

- Der Markscheider ist eher ein Bergmann und weniger ein Geodät. Er hat grundlegende Kompetenzen in dem wirtschaftlichen Umfeld, in dem er arbeitet, und zwar der Rohstoff- und Energiewirtschaft. Den elementaren Produktionsfaktor eines jeden Bergbaubetriebes, die Lagerstätte und das Gebirge, versteht er im Detail. Ergebnisse seiner Arbeit, seien es Aufmaß, Dokumentationen oder Sicherheitsmessungen, sind integraler Teil von Planungs- und Genehmigungsprozessen, der betrieblichen Steuerung sowie der Überwachung hinsichtlich der Auswirkung des Bergbaus auf Umwelt und das soziale Umfeld sowie der Wirtschaftlichkeit. Er nutzt die wissenschaftliche Disziplin der Vermessung, der Kartographie und der Geodäsie, insbesondere der Ingenieurgeodäsie, um seine Aufgaben im direkten und regionalen Umfeld eines Gewinnungs- oder Speicherbetriebes bestmöglich zu erledigen. Dabei arbeitet ein Markscheider oft große Teile seine Karriere lokal oder regional an einem Objekt und hat dadurch sowohl eine sehr langfristige und strategisch ausgerichtete Sichtweise als auch eine gute soziale Vernetzung zu Entscheidungsträgern in seinem regionalen beruflichen Umfeld.
- Der Markscheider könnte im aktuellen Sprachgebrauch als der „Geo-Data-Scientist“ oder der Geodatenmanager in der Rohstoff- und Energiewirtschaft bezeichnet werden. Er bündelt alle relevanten raumbezogenen Lagerstätten-, Gebirgs- und Produktionsinformationen und stellt deren Richtigkeit und Widerspruchsfreiheit zuverlässig sicher. Seine Erzeugnisse sind durch Richtigkeit, notwendige Genauigkeit und Zuverlässigkeit geprägt. Im Sinne der heute oft zitierten Daten- und Informationsqualität arbeitet der Markscheider seit jeher nach hohen Ansprüchen.
- Sein Wirken verfolgt den klar definierten Zweck der Gewährleistung und Absicherung der Nachhaltigkeit in der Rohstoff- und Energiegewinnung und –speicherung aus und in der Erdkruste.

3. Das Aufgabenspektrum des Markscheidewesens – historisch und heute

Auch wenn heute die Instrumentarien und Sensoren, die Methoden des Daten- und Informationsmanagements sowie die Analyse- und Modellierungsverfahren heute im Vergleich zu früheren Jahrhunderten wesentlich weiterentwickelt sind, blieben die Kernaufgaben des Markscheidewesens über die Jahrhunderte kaum verändert. Im Folgenden sind die vier grundlegenden Tätigkeiten des Markscheiders kurz erläutert.

- **Abgrenzung des Grund- und Bergwerkseigentums unter Tage und markscheiderische Vermessung:** Eine zentrale Aufgabe des Markscheiders ist seit jeher die Markierung der Markscheide untertage, d.h. der Grenze des Grubenfeldes (z.B. Kunert 2002). In diesem Zusammenhang führt er Vermessungen zur lage- und richtungsmäßigen Orientierung des

Grubengebäudes, der markscheiderischen-geologischen Kleinaufnahme sowie zur Vortriebssteuerung durch. Eine klassische Aufgabe ist dabei die richtungs- und höhenmäßige Steuerung einer Gegenortauffahrung.

- Eine der historischen Aufgaben ist die **Verwaltung des Vermögens des Bergbautreibenden**. Dieses ist im Wesentlichen durch den elementaren Produktionsfaktor, die Lagerstätte und deren Quantität, Qualität und Bonität, bestimmt. Auf der Grundlage seiner Vermessungen und seines räumlichen Verständnisses über geologische und tektonische Aufschlüsse war und ist er auch heute in der Lage, die Lagerstättegeometrie und somit Lagerstättenvorräte zu ermitteln. Die Lagerstättenvorratsberechnung ist auch heute eine Kernaufgabe des Markscheidewesens, unterstützt durch moderne Methoden der Geostatistik (Benndorf 2015). Neben den Vorräten zählt auch die Erfassung aktuell zugänglicher Bestände von Vorräten zu seiner Aufgabe, um eine Kontinuität der Gewinnung von Rohstoffen planen und garantieren zu können. Das Thema Lagerstätte umfasst neben dem Vorrat auch die Erfassung von tektonischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften als Grundlage für einen sicheren und wirtschaftlich effizienten Lagerstättenzuschnitt.
- Seit jeher ist der Markscheider in **rechtliche Fragestellungen und Entscheidungen** einbezogen. Seine Ausbildung hat in der Regel sowohl einen technischen als auch einen stark juristischen, ins. verwaltungs-, umwelt- und bergrechtlichen Bezug. Heute ist er insbesondere in Genehmigungsverfahren, die Umweltverträglichkeitsprüfung sowie in Verfahren zur Regulierung von Bergschäden an der Tagesoberfläche involviert (u.a. Sroka 2011, Benndorf 2021).
- Ein zentrales Erzeugnis des Markscheiders war und ist das **Bergbaukartenwerk**, heute als Risswerk bezeichnet. Als Dokumentations-, Arbeits- und Beweismittel genießt das Risswerk als Urkunde auch heute öffentlichen Glauben (BBergG §64 in Deutschland). Im Zeitalter der Digitalisierung erfolgt die Führung des Risswerkes heute unter Nutzung moderner Geodatenbanken und GIS-Infrastruktur (Busch u.a. 2004). Die behördliche Fassung des Risswerkes wird wohl auch in Zukunft analog sein. Letzteres hat den Hintergrund der Langspeicherung der Informationen (Michaely, 1995). Von enormer gesellschaftlicher Bedeutung ist die Kompetenz der Interpretation historischen Risswerkes zum Umgang mit Altbergbau. Letzterer beeinflusst beispielsweise etwa 35% der Tagesoberfläche Deutschlands (Meier 2001). Die altbergbaulichen Hohlräume bieten sowohl wirtschaftliche Perspektive im Falle einer Wiederauffahrung strategisch bedeutsamer Lagerstätten aber bürden auch Gefahren für die öffentliche Sicherheit.

Mit der Industrialisierung und der damit verbundenen Bedeutung der Dampfmaschine und Energiegewinnung entwickelten sich Ende des 19. Jh. größere untertägige Bergbaubetriebe zur Gewinnung von Braun- und Steinkohle, z.B. im Ruhrgebiet in Deutschland. Diese hinterließen immer deutlichere und sichtbare, nicht zu vernachlässigende, Auswirkungen auf die Tagesoberfläche. Das Fachgebiet der **Bergschadenlehre**, d.h. der Prognose und des Überwachens bergbauinduzierter Bodenbewegungen, gewann im Markscheidewesen an Bedeutung. Ein zentrales Element ist die Trogtheorie nach Lehmann (Hegemann 2020). Weitere Entwicklungen von Lythwiniszin und Knothe von der AGH Krakow in Polen (u.a. Sroka 2007) führten zu Vorausberechnungsverfahren, die heute in Europa und global Stand der Technik sind. Mit dem zunehmenden Bewusstsein der Bevölkerung hinsichtlich Umwelt und Klima gewinnt auch das **Geomonitoring**, d.h. die raumzeitlich systematische Überwachung der Tagesoberfläche hinsichtlich Auswirkungen der Rohstoff- und Energiegewinnung und Speicherung, seit mehreren Dekaden immer mehr an Bedeutung. Aufgrund der großen betroffenen Fläche umfasst

dieses Monitoring neben klassischen Reviernivellements und Lagefestpunktnetzen vor allem flugzeug- und satellitengestützte Methoden zur Erfassung von Bodenbewegungen und Kontaminationen (Benndorf 2021).

4. Die Grundsätze des markscheiderischen Arbeitens

Die ihm auferlegten Arbeiten erledigt der Markscheider seit jeher unter Einhaltung verschiedener berufsethischer Grundsätze, die ihm Anerkennung und seinen Erzeugnissen eine hohe Reputation verleihen.

Unabhängige Stellung im Unternehmen und Objektivität

Der Markscheider hat eine besondere Stellung im Unternehmen. Nach Bundesgesetzgebung in Deutschland (BbergG §64 (2)) ist er bei Anwendung seiner Fachkunde weisungsfrei. Er untersteht fachlich somit keiner Linienfunktion, sondern stellt das unabhängige Bindeglied zur Aufsichtsbehörde, d.h. zu den Bergämtern der Länder, dar. Diese Unabhängigkeit verleiht ihm nach BbergG§64(3) die Befähigung innerhalb seines Geschäftskreises Tatsachen mit öffentlichem Glauben zu beurkunden. In erster gerichtlicher Instanz werden durch den Markscheider beurkundete Tatsachen ohne Prüfung der Aussagen öffentlich Glauben geschenkt. In einigen Regionen wird der Markscheider daher als „Bergnotar“ bezeichnet (Kunert 2002).

Um diese ihm zugetragene Verantwortung praktisch umzusetzen, richten sich markscheiderische Arbeiten nach folgenden Grundsätzen, z.B. geregelt in den spezifischen Bergverordnungen in Deutschland, insbesondere in der Markscheiderbergverordnung (MarkschBergV).

- **Richtigkeit und Präzision**

Die Metrologie und Kenntnis sämtlicher Unsicherheiten seines Instrumentariums und der eingesetzten Messmethoden sowie deren Auswirkungen auf berechnete Koordinaten sind grundlegende Kompetenzen des Markscheiders. Diese bezieht sich auf das mess- und arbeitsmethodische Eliminieren grober und systematischer Fehler in der Erfassung, Veraltung und Dokumentation der Daten und Informationen sowie die Einhaltung notwendiger Präzession in seinen Arbeiten. Eine wesentliche Grundlage dazu ist das Verstehen physikalischer Wirkprinzipien seiner Mess- und Arbeitsmittel sowie deren Prüfung hinsichtlich systematischer und zufälliger Fehleranteile (u.a. Deumlich und Staiger 2001). In einigen älteren Literaturstellen wird dazu auf die notwendige Persönlichkeit des Markscheiders, speziell auf die notwendige Ordentlichkeit, hingewiesen (z.B. Neubert 1964).

- **Überprüfbarkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse**

Das Anlegen der Messkonzepte ist so zu gestalten, dass Messungen unabhängig überprüfbar sind. Damit wird sichergestellt, dass im Kontext vor allem sicherheits- und umweltrelevanter Tätigkeiten Verlass auf die markscheiderischen Erzeugnisse ist. Diese besitzen einen hohen Grad an Zuverlässigkeit, sowohl im Sinne geodätischer Auswertverfahren (z.B. Niemeier 2008) als auch im bergrechtlichen Verständnis.

- **Nachvollziehbarkeit und Transparenz**

Um eine Gerichtsfestigkeit der durch Markscheider beurkundeten Tatsachen zu gewährleisten, müssen alle Erzeugnisse bis auf die Rohdaten nachvollziehbar sein. Das beinhaltet, u.a. Umweltbedingungen bei der Vermessung, genutztes Instrument, vermessende Person, Softwareversion in der Auswertung, etc. . Der Markscheider muss somit seinen gesamten Daten- und Auswertprozess so organisieren und dokumentieren, dass er diesem Grundsatz gerecht werden kann. Ein beeindruckendes Beispiel ist das Rissarchiv des saarländischen Steinkohlebergbaus, das zentral am Standort Ensdorf alle Risswerksunterlagen bis hin zu den Anfängen im 18. Jh. (bis hin zu den originalen Zugbüchern) verwaltet (Schäfer 2016).

Nach diesen Grundsätzen erfüllt der Markscheider seit jeher die heute als Stand- der Wissenschaft und Technik anerkannten Anforderungen hinsichtlich Daten- und Informationsqualität (z.B. Hildebrandt u.a. 2015). Im Zeitalter von Fake News und „Follower“-abhängiger Interpretation von Daten in den öffentlichen Medien ist der Markscheider als Bergnotar gewissermaßen der Fels in der Brandung und trägt zur sachlichen Kommunikation zwischen den verschiedensten Interessensgruppen eines Rohstoffprojektes bei. Der Ausspruch „ Balastbares Wissen statt Meinung“ fasst die Grundsätze des Markscheidewesens sicherlich sehr gut zusammen.

5. Grubenvermessung heute

Im Folgenden soll speziell auf aktuelle Entwicklungen eines Aufgabenbereiches des Markscheidewesens, auf die Grubenvermessung, eingegangen werden. Dabei wird der Begriff Grubenvermessung etwas aufgeweicht und sowohl untertägige Vermessungstechnik als auch übertägiges Geomonitoring beleuchtet.

5.1 Aufgaben in der Grubenvermessung

Die Grubenvermessung verfolgt folgende Ziele:

- das Grubengebäude gegenüber dem Koordinatensystem der Landesvermessung an der Tagesoberfläche lage- und richtungsmäßig zu orientieren,
- die Geometrie aufgefahrener Grubengebäude sowie geologisch/tektonische Elemente aufzunehmen und zu kartieren,
- Messungen im Kontext der markscheiderischen Sicherheitskontrolle durchzuführen (z.B. Konvergenzmessungen oder Kontrolle der Dimensionierung von Sicherheitspfeilern) sowie
- eine präzise Vortriebssteuerung zur Auffahrung geplanter Grubengebäude zu garantieren.

Die Aufgaben blieben über die Jahrhunderte konstant und werden auch in der Zukunft benötigt. Die Lösung des navigatorischen Grundproblems untertage beinhaltet die Beantwortung der entsprechenden Fragen:

- Wo befinde ich mich? (Positionierung),
- Wohin möchte ich? (Planung) und
- Wie komme ich dahin? (Navigation).

Neben Aktbergbau, aktivem Bergbau und Sanierungsbergbau ist abzusehen, dass für zukünftige Rohstoff- und Energiespeicherungskonzepte die Erdkruste weiter in Anspruch genommen werden wird und damit die Kompetenz der Grubenvermessung weiterhin eine essentielle Voraussetzung für Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit sein wird.

5.2 Das breite Spektrum an Messverfahren

Die heute in der Grubenvermessung zum Einsatz kommenden Instrumente decken ein breites Spektrum an Messtechnik ab, nicht nur physikalisch, sondern auch historisch. Das liegt vor allem an den speziellen Messbedingungen untertage. Im Folgenden ist ausgewählte Messtechnik und Messmethoden kurz beschrieben, die neben den gängigen geodätischen Messmethoden heute Bestandteil der Grundausbildung im Markscheidewesen sind.

Der Vermessungskreis: Der Vermessungskreis dient zur absoluten Orientierung einer Messlinie in Bezug zu geographisch Nord. Seine Bedeutung erlangt er zum einen durch die nicht vorhandene Sicht auf Satelliten oder auf Sterne zur Azimutbestimmung untertage. Zum anderen erreichen moderne Vermessungskreise Genauigkeiten, die durch eine Magnetorientierung, z.B. mit Hängekompass, bei weitem nicht realisiert werden können. Weiterhin kann es besonders bei großem Abstand vom Schacht in Zusammenhang mit der Fehlerfortpflanzung in Polygonzügen zu großen Verschenkungen des untertägigen Polygonzugnetzes kommen. Hier stabilisieren Kreiseiten die Orientierung des Netzes.

Das Messprinzip des Kreisels basiert auf einem schweregeffesselten Kreisel mit zwei Freiheitsgraden, der aufgrund des Zusammenspiels zwischen Drehimpuls des Kreisels, Gravitation und Drehimpuls der Erde Undulationsbewegungen um geografisch Nord ausführt. Diese werden nachverfolgt und daraus die Nordrichtung abgeleitet. Die Messung ist um die Verschwenkung des lokalen Koordinatensystems zu geografisch Nord sowie einer Gerätekonstante zu korrigieren. Seit den 50er Jahren gehört der Vermessungskreisel zum Messrepertoire eines Markscheiders. Das Instrument stellt gewissermaßen ein Sinnbild des Markscheiders dar (z.B. Heger, 2018).



Abb. 1: Aufsatzkreisel GYROMAX AK2M im Einsatz auf einer übertägigen Eichstrecke (Quelle: TU Bergakademie Freiberg).

Markscheiderhängezeug: Auch wenn das Markscheiderhängezeug, das aus kardanisch aufgehängtem Hängekompass, Gradbogen, Schnüre und Zollstock besteht, bereits im 18. Jahrhundert durch die Visiermesskunst nach Weißbach abgelöst wurde, erfährt es heute noch Bedeutung. In der markscheiderischen Aufnahme von Altbergbau verhindern die beengten Verhältnisse in manchen Situationen das Stationieren eines klassischen Vermessungsinstrumentes. Hier ist das Markscheiderhängezeug wesentlich flexibler und hinreichend genau für eine Kleinaufnahme. Ein weiterer Grund, der auch heute noch das Verständnis der Messmethode durch Magnetorientierung

verlangt, ist das Lesen historischen Risswerks. In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass aufgrund des raumzeitlich sich ändernden Magnetfeldes sich auch die Magnetische Nordrichtung ändert. Eine Auswertung historischer Messungsergebnisse, z.B. im Rahmen der Bewertung von Altbergbau, im Kontext der heute genutzten Koordinatensysteme, erfordert die Kenntnis der zeitlich abhängigen Magnetischen Nordrichtung.



Abb. 2: Messung mit Markscheiderhängezeug im Lehr- und Forschungsbergwerk Reiche Zeche in Freiberg (links: Messung mit dem Hängekompass, rechts: Messung mit dem Gradbogen) (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Das Schachtlotgerät: Moderne optische Zenit- oder Nadirlote, ob mit aktivem oder passivem Leitstrahl, werden heute standardmäßig im Ingenieurbau eingesetzt. Bei größeren Teufen verhindern, speziell in ein- oder ausziehenden Schächten, Sichtverhältnisse, geprägt durch Wasserdampf und Staub, sowie die Refraktion an der Schachtwand einen hinreichend genauen Einsatz dieser Instrumente. Die einzige Alternative stellt auch heute noch die mechanische Lotung dar. Das mechanische Schachtlotgerät besteht aus einer Lothaspel, einem Lotdraht, einer Abdrängplatte, einem Gewicht sowie einer Glasskala. Es dient zum Transfer von Koordinaten von über- nach untertage. Dabei wird der Lotdraht übertage an der Abdrängplatte fixiert und untertage zum Schwingen angeregt. Die Koordinate des Lotdrahtes wird übertägig bestimmt. Untertägig erfolgt die Ablesung der Umkehrpunkte der gedämpften Schwingung des Lotdrahtes um die Lotruhelage an der Glasskala durch Beobachtung mittels Theodolit. Dieser wird in der Nähe des Schachtes unter oder über einem Festpunkt stationiert. Aus den Umkehrpunkten kann, ähnlich wie beim Kreisel, durch Bildung des „Schulerschen Mittels“ die Lotruhelage bestimmt werden. Um systematische Fehlereinflüsse, z.B. durch Schwingungsschiefe oder Wetterzug, beachten zu können, sind die gesetzte des Foucault-Pendels auf die Messung zu übertragen sowie Mehrgewichtslotungen durchzuführen (Wilski 1929).

Die Anordnung von zwei Loten in einem Schacht erlaubt die Übertragung einer Richtung nach untertage. Dabei wird der Richtungswinkel zwischen den beiden Lotdrähten übertage bestimmt, durch den Schacht auf das Niveau der zu orientierenden Sohle projiziert und dort abgegriffen. Es ist zu erwähnen, dass dieses Verfahren aufgrund des geringen Abstandes zwischen den Loten fehlertheoretisch ungünstig ist. Unter Nutzung eines spitzwinklig exzentrischen Lotanschlussdreiecks kann der Fehlereinfluss auf die Richtungsübertragung reduziert werden. Diese Methode ist international als Weißbach-Methode anerkannt und findet auch heute noch Anwendung (z.B. Ogundare 2015).



Abb. 3: Schachtlotung Messablauf untertage (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Mechanische Theodolite, Nivelliere und Messband: In einigen untertägigen Situationen ergibt sich die Notwendigkeit explosionsgeschützter Instrumente, z.B. in untertägigen Kohlegruben. Grund dafür sind mögliche MethanAusgasungen, welche in gewisser Konzentration in den Wettern explosibel sind. Elektronische Instrumente können aufgrund von Funken eine Explosion auslösen, weshalb in derartigen Gruben oft noch mechanisch vermessen wird. Die Erlangung der Kompetenz, mit klassischen mechanischen Methoden hinreichend genau und zuverlässig zu vermessen, ist auch heute noch ein wesentliches Ziel der Grundausbildung im Markscheidewesen.



Abb. 4: Messung mit Kleintheodolit in einem Abbau (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Moderne Tachymeter, Laserscanner und Multi-Sensorstationen: Natürlich hat die Digitalisierung schon seit mehreren Dekaden Einzug in das Markscheidewesen gehalten. Der Umgang mit heute am Markt verfügbaren elektrooptischen Theodoliten, digitalen Nivellieren, Terrestrischen Laserscannern oder Multi-Sensorsystemen, gehört heute zum täglichen genutzten Repertoire in der untertägigen Grubenvermessung. Die Kombination von Laserscanner, digitaler Fotogrammetrie, liefert die Möglichkeit, das Grubengebäude sehr hochauflösend und zeitlich effizient aufzunehmen. Ein moderner Laserscanner scannt mehrere 100.000 Messpunkte pro Sekunde. Augmentiert mit Informationen aus RGB-Kamera kann die entstehende Punktwolke auch farbecht dargestellt und dokumentiert werden (z.B. Geier 2016, Martienßen 2017).



Abb. 5: Einsatz eines Multi-Sensorsystems (Laserscanner und RGB-Kamera) im übertägigen Geomonitoring (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Mobiles Lasercanning: Die Kombination von terrestrischem Laserscanning und inertialer Messeinheit resultierte etwa vor 10 Jahren in mobilen handgehaltenen Laserscannern, der unter Nutzung eines Visual-Inertial SLAM Algorithmus simultan vermisst und dabei kontinuierlich seine Position im übergeordneten Koordinatensystem berechnet. Diese Messtechnik erlaubt eine sehr schnelle Aufnahme von Grubengebäuden und ist speziell in beengten Verhältnissen und in Verhältnissen mit begrenzter Aufenthaltszeit von enormem Vorteil. Diesem Vorteil steht eine systematische Drift in der Positionierung gegenüber, die durch Einbeziehung von Kontrollpunkten in einem vertretbaren Maß gehalten werden kann (Martienßen 2019).



Abb. 6: Vermessung von Altbergbau mittels handgeführten Laserscanner (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

Robotergestützte Plattformen: Ganz aktuelle Entwicklungen stellen robotergestützte Plattformen zur Ausführung von Routinearbeiten im untertägigen Geomonitoring dar. Diese nahezu autonom operierenden Systeme fahren oder laufen vorher geplante Pfade ab (Wegpunktplanung) oder planen ihren Pfad unter Nutzung von Algorithmen von Hinderniserkennung selbst. Erste markscheiderische Anwendungen sind in Nensel (2021) dokumentiert. Aktuelle Forschungsarbeit wird in die Nutzung des Roboterhundes „Spot“ von Boston Dynamics gesteckt. Neben der Ausrüstung mit Laserscannern verfügen robotergestützte Plattformen potentiell über Multispektral-Kameras zur teilautomatisierten Kartierung des Erzes (Donner u.a. 2019).



Abb. 7: Autonom messendes robotergestütztes Multi-Sensorsystem, entwickelt im BMBF-Verbundprojekt UPNS4D+ (Quelle: TU Bergakademie Freiberg)

5.3 Herausforderung Big Data

Die seit etwa zwei Dekaden verfügbaren Messmittel führen zu einem Paradigmenwechsel. Wurden früher relevante Messpunkte durch den Markscheider oder den Vermessungssteiger sorgfältig ausgewählt und eingemessen, so nehmen die Multi-Sensorsysteme heute (teil-)automatisch 100.000 Messpunkte pro Sekunde auf, ob relevant oder nicht relevant. Die so erzeugten 3D-Punktwolken haben einen Informationsgehalt, der den in der Aufgabenstellung geforderten bei weitem übersteigt. Dazu ist oftmals nur 0,001% der Daten notwendig, um so relevante Merkmale, z.B. Stoßbegrenzungslinien, First- oder Sohlehöhen oder ein Profil zu extrahieren. Die Mühe der Merkmalsextraktion aus den 3D- Punktwolken erfolgt in der Auswertung: „...weg von der intelligenten Aufnahme, hin zur intelligenten Auswertung und Reduktion der Datenmengen im Büro“. Das Verhältnis Messaufwand zu Auswerteaufwand wird bei den Multi-Sensorsystemen, z.B. dem terrestrischen Laserscanning, aktuell mit etwa 1:5 geschätzt. Aktuelle Forschungsaktivitäten untersuchen die automatisierte Merkmalsextraktion aus 3D-Punktwolken, die zu einer Verbesserung dieses Verhältnisses führen sollen.

Die Messung an sich erfolgt heute nahezu mit „Black Box“ – Systemen. Ein manuelles Anvisieren unter Nutzung eines Okulars ist heute kaum noch erforderlich. Ziele werden unter Nutzung von Bildverarbeitungsalgorithmen automatisch erkannt und angezielt. Gerade deshalb sind Mechanismen zur Prüfung der Instrumente dringend erforderlich. Systematische Fehlereinflüsse, wie Temperatur oder Achsfehler, werden nach Herstellerangaben oftmals automatisch korrigiert. Als Markscheider kann dies jedoch nicht ohne Prüfung hingenommen werden. Typischerweise erfolgt der Einsatz von hochpräzise eingemessenen Kontrollpunkten, um die Richtigkeit und Genauigkeit von 3D-Punktwolken abschätzen zu können.

Die enormen Datenmengen erfordern moderne Auswertelgorithmen. Das Maschinelle Lernen oder die Künstliche Intelligenz hat längst Einzug in das Markscheidewesen gehalten. Methoden des Deep Learnings finden mehr und mehr Anwendung in wissenschaftlichen Fallstudien. Aber auch hier stößt das Markscheidewesen aufgrund der Anforderung der Nachvollziehbarkeit und Überprüfbarkeit an Grenzen. Speziell die Nachvollziehbarkeit der Auswertung, z.B. im Fall von Klassifizierungsaufgaben unter Nutzung Neuronaler Netze, ist nicht gegeben. Zur Erfüllung der Überprüfbarkeit der Ergebnisse haben sich Methoden, wie Kreuzvalidierung oder Bootstrapping, etabliert. Bei all den effizienten Entwicklungen in diesem Feld steht der Berufsstand der Markscheider, speziell behördlicher Kollegen, diesen Anwendungen noch sehr kritisch gegenüber. Eine Übernahme der Ergebnisse des Maschinellen Lernens in das Risswerk ist, speziell aufgrund der Gerichtsfestigkeit, nicht gängige Praxis.

Eine letzte Herausforderung, auf die hier eingegangen werden soll, ist die der Langzeitsicherung der Rohdaten im Sinne der Nachverfügbarkeit. Konnten früher Zugsbücher ohne weiteres in Archiven aufbewahrt werden, gestaltet sich heute die Archivierung der digitalen Rohdaten wesentlich schwieriger. Bei einer Messung können mehrere GByte an Daten anfallen. Diese für regelmäßige Anwendungen zu speichern, erfordert hohe Speicherkapazitäten, die aktuell nicht verfügbar sind. Weiterhin unterliegen aktuell Speichermedien und Formate im Vergleich zum klassischen analogen, auf Zeichenkarton angefertigtem Risswerk, dem schnellen technischen Fortschritt. Der Zugang zu den heute erfassten digitalen Daten in 200 Jahren ist ungewiss. In diesem Sinne scheint ein kartonierter Zeichenträger immer noch die geeignetste Option zur Langzeitdokumentation der Vermessungsergebnisse im Risswerk.

5.4 Das Zukunftsfeld Geomonitoring

Die Akzeptanz verschiedener Interessensgruppen ist ein wesentliches Kriterium einer erfolgreichen Umsetzung von öffentlichen Projekten. Dass mit der fehlenden Akzeptanz verbundene Risiko, das Risiko des Entzugs der "Social License to Operate", stellt seit mehr als einer Dekade eine der größten Herausforderungen, u. a. auch für Betreiberunternehmen im Rohstoff- und Energiesektor, dar (pwc 2020). Speziell die bevorstehende Energiewende erfordert das Errichten großer Energiespeicherkapazitäten, um dem volatilen Charakter erneuerbarer Energiequellen gerecht zu werden. Beispiele sind die geplante Speicherung von Wasserstoff oder Erdgas in Kavernen oder in porösen unterirdischen Medien (Bruhns u.a. 2015). Der Haupteinfluss dieser untertägigen Infrastrukturen auf die Umwelt sind Bodenbewegungen und -verformungen aufgrund der Konvergenz der geschaffenen Hohlräume. Diese beeinträchtigen die Nutzung von Landflächen, z. B. durch Vernässungen und Hochwasser oder durch Versagen von Wasser- und Abwassersystemen. Ebenfalls können Schäden an Objekten, wie Häusern, Straßen und Leitungen für Öl, Gas und Sole, eintreten. Generell schränken diese Umweltauswirkungen die Lebensqualität der Anwohner in der betroffenen Region ein und beeinflussen zu schützende Objekte auf der Tagesoberfläche. Um die von gesellschaftlich enormer Wichtigkeit vor uns liegende Energiewende gemeinsam mit allen Interessensgruppen erfolgreich umsetzen zu können, gilt es, die Umweltauswirkungen, wenn möglich, zu vermeiden oder zumindest zu minimieren, indem kritische Szenarien frühzeitig erkannt werden, um rechtzeitig gegensteuern zu können. Dieses Steuern oder Regeln erfordert eine kontinuierliche Überwachung der Tagesoberfläche gekoppelt mit Mechanismen, die unter dem aktuellen Kenntnisstand zu optimalen Entscheidungen

führen. Den Fachdisziplinen Geomonitoring und Markscheidewesen kommen dabei zentrale Rollen zu. Zwei Entwicklungen beeinflussen dabei die zukünftigen Anforderungen an das Geomonitoring:

- Aufgrund der hohen raumzeitlichen Auflösung heute verfügbarer Daten werden Diskrepanzen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Umweltauswirkungen in Form von anthropogenen Bodenbewegungen immer öfter deutlich. Diese Abweichungen können als jahreszeitliche Schwankungen, hervorgerufen durch geogene Prozesse, wahrgenommen werden (z.B. Restrepo 2020). Aber auch Abweichungen von der prognostizierten Form des Senkungstropes wurden bereits großflächig dokumentiert (z.B. Busch 2019).
- Die Hoheit über die Daten liegt heutzutage nicht mehr ausschließlich beim Betreiber. Während beim traditionellen Monitoring durch regelmäßige Reviernivellements die Daten i.d.R. durch den Betreiber oder Inhaber der Bergbauberechtigung erfasst und verwaltet wurden, stehen heute raumzeitlich hoch aufgelöste Daten der breiten Öffentlichkeit, z.T. bereits ausgewertet, zur Verfügung. Eine Interpretation öffentlicher Daten hinsichtlich eines daraus resultierenden möglichen Gefährdungspotentials bleibt oftmals offen. Kenntnis über uninterpretierte Diskrepanzen zwischen Prognosemodellen und der Realität, ob signifikant oder nicht, können in einzelnen Fällen zu Unsicherheiten in der Bevölkerung führen, Ängste schüren und somit zum Versagen der "Social License to Operate" führen.

Eine sich aus beiden Aspekten ableitende Fragestellung für das Geomonitoring und Markscheidewesen ist die einer komplexen und schnellen Nutzung aller verfügbaren relevanten Daten zur Ableitung von aktuellen Informationen als Entscheidungsgrundlage zur Steuerung von Prozessen im Zusammenhang mit der Gewinnung und Speicherung von Energie und Rohstoffen. Können sowohl geomechanische aber auch kinematische Modelle zur Prognose von Bodenbewegungen differenzierter gestaltet werden? Lassen sich anthropogene Bodenbewegungen von Bewegungen mit geogenem Hintergrund besser trennen? Können Parameter für Vorhersagemodelle präziser und aktuell geschätzt werden? Das übergeordnete Ziel ist eine effiziente Unterstützung des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche durch präzise und Echt-Zeit-aktuelle Prognosen von Bodenbewegungen kombiniert mit einem leistungsoptimierten Gewinnungs- und Speicherbetrieb.

6. Zur universitären Ausbildung im Markscheidewesen

6.1 Kurzer Abriss der markscheiderischen Ausbildung in Deutschland und Österreich

Der Berufsstand des Markscheiders ist regional seit dem 13. Jahrhundert, z.T. auch früher, nachweisbar. Erste maßstabsgetreue rissliche Darstellungen von untertägigen und übertägigen Bergwerken, welche auf der Grundlage von Vermessungen angefertigt wurden, sind aus dem 16. Jahrhundert bekannt (Kunert 2002). Als erste wissenschaftliche Werke über das Montanwesen, inkl. Markscheidewesen, im deutschsprachigen Raum sind „Ein nützlich Bergbüchlin“ von Ulrich Rülein von Kalbe aus dem Jahr 1500 und „De re metallica“: 5. Buch „Markscheidekunst“ von Gregorius Agricola zu nennen.

Der technische Fortschritt allgemein, aber speziell im Montanwesen im 18. Jh., forderte konzentriertere Lehrinhalte und führte zur Gründung von Bergakademien in Europa. So wurde 1765 die Bergakademie in Freiberg gegründet, deren Modell und Lehrinhalte an viele Montanschulen Europas übertragen wurde. Mit dem Beginn des Lehrbetriebes in Freiberg 1766 wird auch das Fach „Praktische Markscheidekunst“, durch Markscheider Carl Ernst Richter vertreten. Markscheidewesen ist eines der Gründungsfächer in Freiberg (Löbel 2015). Mit der Gründung der „Steiermärkisch-Ständische Montanlehranstalt“ in Vordernberg im Jahre 1840 wurde der Grundstein der heutigen Montanuniversität Leoben gelegt. Auch hier wurde von Beginn an eine Ausbildung im Fach

Markscheidkunde und der „praktischen Geometrie“ (heute Geodäsie) durch Peter Tunner angeboten. Zu den Disziplinen im Markscheidwesen gehörten (Pilgram und Randjbar 2004):

- Geodäsie und Markscheidkunde (Vermessung über und unter Tage)
- Praktische Vermessungskunde
- Elemente der höheren Geodäsie und sphärischen Astronomie
- Elemente der Methode der kleinsten Quadrate (Ausgleichsrechnung)
- Situationszeichnen (Kartographie)
- Markscheiderisch-geodätische Instrumententechnik (speziell für unter Tage)
- Bergbauartenkunde (Rissttechnik)

Mit dem wachsenden technischen Fortschritt und sich neu entwickelnden gesellschaftlichen Herausforderungen kamen neue Disziplinen hinzu, so beispielsweise die Fotogrammetrie, die Bergschadenkunde und die Lagerstättenbearbeitung. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Hochschullehrer und Absolventen des Markscheidwesens, getrieben durch neue Herausforderungen, einschlägige Forschungsergebnisse und Innovationen herausbrachten. Beispielhaft zu nennen sind der in Bezug auf Feinmechanik und Optik zur damaligen Zeit auf höchstem Niveau gefertigte Theodolit Nummer 1 von Johann Gotthelf Studer aus Freiberg (1801), welcher heute ein Exponat im technischen Museum in München ist, oder der Fototheodolit von Dolezal und Rost, welcher richtungsweisend auf dem Gebiet der terrestrischen Fotogrammetrie war. Prof. Eduard Dolezal hatte 1904 bis 1905 die Lehrkanzel für Geodäsie und Markscheidkunde an der damaligen Montanistischen Hochschule in Leoben inne, und wechselte danach an TH Wien. Er gilt als einer der Begründer der modernen Geodäsie in Österreich. Neben diesen technischen Entwicklungen trugen Hochschullehrer auch zu methodischen Innovationen bei. Hierzu sei beispielhaft Professor Julius Weißbach zu nennen, ab 1836 Professor für angewandte Mathematik, Mechanik, Bergmaschinenlehre und allgemeine Markscheidkunst an der Bergakademie Freiberg. Das Verfahren der orthogonalen linearen Regression wurde erstmals 1840 von Weißbach dokumentiert und ist bis heute eines der zentralen Methoden im Maschinellen Lernen (Stoyan und Morel 2018). Weiterhin beschrieb er den Zusammenhang zwischen der Lage eines Koordinatensystems und seines zweidimensionalen Bildes bei der orthogonalen Parallelprojektion (Wegert u.a. 2006). Die orthogonale Axionometrie findet heute weite Anwendungen u.a. in der Computergrafik.

Weitere klassische Forschungsfelder im Markscheidwesen, welche sowohl in Österreich und Deutschland verfolgt wurden, sind die Bergschadenkunde und der Altbergbau (Professoren Perz, Spickernagel, Czubik in Leoben und Neubert, Kratzsch, Fenk, Sroka in Freiberg), Forschungen zu rezenten Krustenbewegung und Geokinematik (Professor Wittenburg in Freiberg). Aktuelle Forschungsfelder beschäftigen sich u.a. mit markscheiderisch-hydrographischem Monitoring (Mayer u.a. 2012), Einsatz von Dronen und Multi-Sensorsystemen zur automatisierten Erfassung von Geometrien, Deformationen sowie Eigenschaften des anstehenden Gebirges und des Fördergutes übertage (Tscharf u.a. 2015) und untertage (Donner u.a. 2019).

In kleinen wissenschaftlichen Gemeinschaften, wie im Markscheidwesen, ist ein grenzüberschreitender Austausch in Lehre und Forschung nahezu überlebensnotwendig. Für eine solche internationale Ausrichtung steht die Gründung der Internationalen Gesellschaft für Markscheidwesen (ISM) während des III. Internationalen Symposiums für Markscheidwesen 1976 in Leoben. Kontinuierlicher grenzüberschreitender Austausch wird weiterhin durch die Mitgliedschaft

der Bezirksgruppe Österreich im Deutschen Markscheiderverein sowie durch die gemeinsame Ausrichtung der Konferenzen „Bergbau, Energie und Rohstoffe“ und „Altbergbaukolloquium“ dokumentiert.

6.2 Aktuelle Entwicklungen in der Ausbildung im Markscheidewesen

Das Markscheidewesen als kleine Fachdisziplin an Universitäten steht unter permanentem Fokus hinsichtlich Einschreibezahlen und Lehreffizienz. In den vergangenen beiden Dekaden kam es so zur substantiellen Reduzierung der personellen Ausstattung der Markscheidewesen-Institute. Sowohl an der RWTH Aachen als auch an der TU Clausthal wurden Markscheidewesen als Studiengang oder Vertiefung eingestellt. Es existieren dort lediglich Profilierungsmöglichkeiten in diesem Bereich.

Als einziger eigenständiger Abschluss im deutschsprachigen Raum heute bietet die TU Bergakademie Freiberg den Diplomstudiengang „Markscheidewesen und Angewandte Geodäsie“ an. Aktuell deckt die Anzahl der Absolventen nicht annähernd den Bedarf an Fachkräften der Industrie, der Behörden und Akademia. Die gesellschaftlichen Herausforderungen bleiben jedoch. Anregungen aus Gesprächen mit Industriepartnern führten zum Gedanken und der Idee der Internationalisierung der Ausbildung und der Bündelung der Kompetenzen an den verschiedenen Universitäten in Europa. Unter der Federführung des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiberg schlossen sich fünf Europäische Universitäten zusammen, um ein Europäisches MSc - Programm „Geomatics for Mineral Resource Management“ zu etablieren.

Ziel dieses neuen internationalen MSc-Studienganges „Geomatics for Mineral Resource Management“ ist es, den Studierenden notwendige Kompetenzen zu vermitteln, um innovative Geomonitoring-Konzepte zur fallspezifischen Lösung entlang der Prozesskette der Rohstofferkundung und -gewinnung sowie Rekultivierung zu entwickeln. In der Ausbildung wird dabei auf aktuelle Forschungsergebnisse aus mehreren großen europäischen Forschungsprojekten, z.B. Real-Time Mining (Benndorf 2017) eingegangen. Die im Studienablauf implementierte Interaktion mit mehreren lokalen Industriepartnern ermöglicht den Studenten, an realen Projekten mitzuwirken, die Bedürfnisse der Industrie zu verstehen und sich auch in unternehmerischen Fähigkeiten zu schulen.

Abbildung 8 stellt die im MSc-Studiengang vermittelten Kernkompetenzen dar. Dabei stehen im technischen Bereich die drei Säulen

- Geodatenerfassung,
- Geodatenverwaltung und -visualisierung und
- Geodatenanalyse und Geomodellierung (Lagerstätte und bergbauinduzierte Bodenbewegungen)

im Vordergrund. Zusätzlich werden betriebswirtschaftliche, rechtliche und unternehmerische Kompetenzen im Kontext der Rohstoffwirtschaft vermittelt.



Abb. 8: Kernkompetenzen im Europäischen MSc-Studienprogramm „Geomatics for Mineral Resource Management“

Die teilnehmenden Partneruniversitäten sind:

- Técnico Lisboa in Portugal
- TU Bergakademie Freiberg in Deutschland
- Montanuniversität Leoben in Österreich sowie
- Wroclaw University of Science and Technology in Polen.

Jede dieser Universitäten nimmt in ihrem Land und in Europa eine der führenden Positionen in der universitären Ausbildung in der angewandten Geomatik ein. In ihren Spezialisierungen decken die einzelnen Universitäten jeweils bestimmte Expertisen ab. Das ermöglicht Studierenden, sich entsprechend ihrer Interessen zu qualifizieren. Zusätzlich bietet der Austausch natürlich die Möglichkeit, sich auf kultureller Ebene weiterzubilden und dabei nicht nur sprachliche Kompetenzen zu erwerben.

Das internationale MSc-Programm baut auf gemeinsamen oder Doppelabschlüssen im Bereich auf. Die Regelstudienzeit des MSc-Studiums beträgt 4 Semester und enthält 120 ECTS. Studierende können das Programm flexibel an einer Universität beginnen und das zweite Jahr an einer Partneruniversität abschließen (Benndorf 2019).

Verbindendes Element zwischen den einzelnen Möglichkeiten sind nicht nur ähnliche Studieninhalte, sondern auch die Einbindung sogenannter MOOCS als moderne Lehrform. Diese sogenannten MOOCS sind **M**assive **O**pen **O**nline **C**ourses und sollen unterstützend zu den entsprechenden Lehrveranstaltungen im Vorlesungssaal eingebunden werden. MOOCS sind geplant für das Fachgebiet Geomonitoring, Geostatistik sowie zur Vermittlung der Forschungsergebnisse des Europäischen H2020 Projektes Real-Time Mining.

Umsetzung an der TU Bergakademie Freiberg und der MU Leoben

Mit dem Wintersemester 2019/2020 wird an der TU Bergakademie Freiberg der englischsprachige MSc-Studiengang „Geomatics for Mineral Resource Management“ neu eingeführt.

Vertiefung 1 kann vollständig in Freiberg studiert werden. Alternativ kann das zweite Jahr der Vertiefung 1 in Lissabon oder Wroclaw studiert werden, was zu einem Doppelabschluss führt. Die entsprechenden Vereinbarungen zwischen den Universitäten sind in der Finalisierung.

Vertiefung 2, Internationales Markscheidewesen, ist Teil eines gemeinsamen MSc-Abschlusses mit der Montanuniversität Leoben. Nach Absolvierung des ersten Jahres in Freiberg wechseln die Studierenden nach Leoben. Der Fächerkanon (Abbildung 3) ist so angelegt, dass Absolventen dieses Studienganges der weiterführende Werdegang zum Ingenieurkonsulent für Markscheidewesen nach Mineralrohstoffgesetz MinroG in Österreich offensteht.

Der gemeinsame Abschluss zwischen Leoben und Freiberg ist ebenfalls möglich, in dem Studierende den MSc-Studiengang Rohstoffgewinnung und Tunnelbau mit der Vertiefung Studienschwerpunkt Geomatics for Mineral Resources Management an der MU Leoben beginnen und im zweiten Jahr nach Freiberg wechseln.

Specialisation: Mine Surveying				
1. Semester (Freiberg)	2. Semester (Freiberg)	3. Semester (Leoben)		4. Semester (Leoben)
Applied Remote Sensing in Geosciences 6 CP	Geomatics for Resource and Reserve Management 6 CP	Mines Surveying Project Study 4.5 CP	Automatic Surface Inspection 3 CP	MSc Thesis 30 CP
Geomonitoring 5 CP	Applied Spatial Data Analysis and Modelling (Case Study) 5 CP	Spatial Planning 1.25 CP	Environmental AspCP of Mineral Extraction 3 CP	
Underground Mine Surveying 5 CP	Mine Mapping, CAD and Geodatabases 5 CP	Geotechnical Monitoring and Instrumentation 1.5 CP	Computer Applications in Mining 2.5 CP	
Photogrammetric Surveying (every second year) 4 CP	Geodetic Adjustment Theory 5 CP	Mining Subsidence Engineering 3 CP	Instrumentation, Monitoring, Data Evaluation and Interpretation 6.75 CP	
Umweltingenieurgeologie* 8 CP		Surpac Introduction 2 CP	Risk Management in Mines 3 CP	
Applied Soil- and Hard Rock Mechanics 6 CP	Reclamation 6 CP	Untertagebergbau* 4.5 CP	Machine Vision 3 CP	
		Precalculation of Ground Movements 1.5 CP	Measurements of 3D-Objects 2 CP	
Project Management 3 CP	Bodenordnung* (every second year) 4 CP	Compulsary Internship 5 CP	Measurement Data Processing 3 CP	
			Geoinformatics 2.5 CP	
Free elective courses - 6 CP				

CP = Credit Points

* = these courses are only offered in German

Core courses
Path specific courses
Pre-defined electives courses Freiberg (3 CP total)
Pre-defined electives courses Leoben (2.75 CP total)
Free elective courses (6 CP totals)

Abb. 9: Studienablaufplan MSc „Geomatics for Mineral Resource Management“ – Vertiefung 2 an der TU Bergakademie Freiberg und der Montanuniversität Leoben

7. Ausblick

Mit der aktuellen eher negativ besetzten öffentlichen Wahrnehmung zum Thema Bergbau in Mitteleuropa, mit den absehbaren Schließungen weitere Bergbauzweige aber auch aufgrund der Schwierigkeit der Gewinnung zukünftiger Markscheider steht das Markscheidewesen vor einer schwierigen Phase. Dass diese Situation nur eine Momentaufnahme ist, Rahmenbedingungen sich ändern können und auch wieder besserer Zeiten kommen mögen, hat die Historie mehrfach bewiesen. Als modernes kleines Fach im Zeitalter der Digitalisierung ergeben sich aber auch Möglichkeiten, für eine sichere Versorgung der Gesellschaft mit Rohstoffen und Energie auch in der Zukunft beizutragen. Die Grubenvermessung speziell aber auch die Fachrichtung Markscheidewesen allgemein werden auch dabei eine wichtige Rolle spielen.

Referenzen

- Agricola, G. (1556). De re metallica libri XII. Basel: Verlag Froben. Online verfügbar: Digitale Texte im Seminar für Wirtschafts- und Unternehmensgeschichte, URL: http://www.digitalis.uni-koeln.de/Agricola/agricola_index.html; Zugriff am 01.11.2019.
- Benndorf, J. (2015) Vorratsklassifikation nach internationalen Standards - Anforderungen und Modellansätze in der Lagerstättenbearbeitung. Markscheidewesen 122 (2015) Nr. 2 -3, S. 6-14.
- Benndorf J. (2017). Das europäische Horizon 2020 - Projekt Real-Time-Mining. Tagungsband zum 18. Geokinematischen Tag am 11. und 12. Mai in Freiberg, S. 23-33.
- Benndorf, J. (2019) Neuer internationaler MSc-Studiengang „Geomatics for Mineral Resource Management“. Tagungsband zum 20. Geokinematischen Tag, Mai 16–17, Freiberg, S 196–201.
- Benndorf, J. (2021) Geomonitoring und Markscheidewesen als integrativer Teil des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche – zukünftige Aufgaben. avn | 128 (2021), S. 227-237.
- Busch, W., Roosmann, R., Fischer, C., Vosen, P. (2004). Systemkonzept zur integrierten Nutzung von klassischen, GIS- und Fernerkundungsmethoden für ein Monitoring bergbaulicher Umwelteinwirkungen. In: Deutscher Markscheider-Verein (Hrsg.): Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft. Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen, Heft 21, S. 326 - 342, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld 2004.
- Busch, W. (2019): Großräumige, radarinterferometrische Erfassung von Höhenänderungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches von aktiven und stillgelegten Steinkohlebergwerken. In: Alkhatib, H.; Paffenholz, J.-A. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2019, 14. bis 15. März 2019 in Hannover, S. 11 – 23. DOI: <https://doi.org/10.15488/4509>.
- Bruns, E.; Kraetzschmer, D.; Sicard, J. C; Garske, S. (2015): Auswirkungen zukünftiger Netzinfrastrukturen und Energiespeicher in Deutschland und Europa. Teilbericht 7: Handlungsempfehlungen. F+E- Vorhaben FKZ 512 83 0100 im Auftrag des BfN (Bundesamt für Naturschutz).
- Chaulant (1900)
- Deumlich, F. und Staiger, R. (2001). Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, Neunte Auflage. Herbert Wichmann Verlag.

- Donner, R., Rabel, M., Scholl, I., Ferrein, A., Donner, M., Geier, A., John, A., Köhler, C., Varga, S. (2019). Die Extraktion bergbaulich relevanter Merkmale aus 3D-Punktwolken eines untertagetauglichen mobilen Multisensorsystems. In Alkhatib, H. und Paffenholz, J.A. (eds.) Tagungsband Geomonitoring 2019, S.: 91-110.
- Fenk, J. (2016) persönliche Korrespondenz zur Gegenstandsdefinition Markscheidewesen. Unveröffentlicht, TU Bergakademie Freiberg.
- Geier, A. (2016) Time-of-Flight Kameras für die 3D Geometrieerfassung im Kontext markscheiderischer Aufgabenstellungen 17. Geokinematischer Tag, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2016(1), Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen, S. 238-249, ISBN 978-3-938390-17-7.
- Hegemann, M. (2020): Die Trogtheorie von Karl Lehmann – ein Rück- und Ausblick nach 100 Jahren. Markscheidewesen 127 (2020) Nr. 2, S. 28-34. Heger (2018)
- Heger, W. (2018) Nordsucher - gestern und heute. In Tagungsband 20. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 16. und 17. Mai 2019 in Freiberg, S. 65-77.
- Hildebrand K., Gebauer M., Hinrichs H., Mielke M. (2015) Daten- und Informationsqualität. Springer Vieweg, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007>
- Knufinke, P. (1999) Allgemeine Vermessungs- und Markscheidkunde. 1. Aufl., ISBN: 3-89653-530-7, Dt. Markscheiderverein e.V., Bochum, 1999.
- Kunert, K.H. (2002). Gesetzliche Grundlagen im Markscheidewesen (Deutschland). In: Markscheidewesen 109(2002), Nr.: 2, S. 41-79.
- Löbel, K.H. (2015) 250 Jahre Markscheidkunst an der Bergakademie Freiberg – Die Geschichte des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie. URL: https://mageoserv3.mabb.tu-freiberg.de/lfs1/Geschichte/IMGF_Lang_b01r.pdf ; Zugriff am 01.11.2019.
- Martienßen, T. (2017). Ein Beitrag zum Monitoring von Schachtanlagen im Raum Freiberg. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 162, pages 434–439 (2017).
- Martienßen, T. (2019). Punktwolken von Handscannern und ihr Potenzial. Tagungsband zum 20. Geokinematischer Tag, Mai 16–17, Freiberg, S 182–195. ISBN 978-3-938390-23-8.
- Mayer, G., Pilgram, R. & Preiner, A., (2012). Einsatz hydrographischer Vermessung im Markscheidewesen in: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte: BHM. S. 151-155
- Meier, G. (2001). Altbergbau in Deutschland: Umfänge – Probleme – Bearbeitung. Tagungsband 1. Altbergbau-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 08. - 09.11.2001, S. 5 - 17, VGE Verlag Glückauf GmbH, Essen 2001
- Meixner, H. Bukrinskij V. (1985) Markscheidewesen für Bergbaufachrichtungen. 2. Auflage. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Michaely, H. (1995) Rissmusteratlas Bergmännisches Risswerk. Essen Faberg 1995.
- Nensel, J., Studnicka, N., Högerl, A., Rasche, H. (2021) Einsatz eines mobilen Robotersystems zur automatisierten Messwerterfassung in einem Grubenbetrieb der K+S Minerals und Agriculture. Tagungsband des 21. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 05. und 06. Mai 2021

- Neubert, K. (1964) Markscheidewesen Band I. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. Berlin: de Gruyter Verlag, 2008
- Niemczyk, O. (1951) Bergmännisches Vermessungswesen, Erster Band. Akademie-Verlag Berlin.
- Ogundare, J.O. (2015) Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice. Wiley.
- pwc (2020): Mine 2020 – Resilient and resourcefull. Online-Quelle:
<https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/publications/mine.html>
 (Zugriff Februar 2021).
- Pilgram, R., Randjbar, B. (2004) Das Markscheidewesen in der Rohstoff-, Energie- und Entsorgungswirtschaft: neue Technologien und Aufgaben in den Geowissenschaften, Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen; Band 17 (2004), S. 290–299
- Restrepo, D.A. (2020): Land subsidence monitoring for small underground mines on reclamation and post mining stages using InSAR – Case study carbonates underground mine Lengfeld. Unpublished MSc-Thesis, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie 10/2020.
- Rülein von Calw, U (um 1500). Ein nützlich Bergbüchlin. Digitalisat, URL <https://digital.slub-dresden.de/werkansicht/df/12328/1/>; Zugriff am 01.11.2019.
- Schulte, Löhr W., Vosen H. (1969) Einleitung. In: Markscheidkunde für das Studium und die betriebliche Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-47437-8>
- Schäfer, A. (2016) Das neue Rissarchiv der RAG für das stillgelegte Steinkohlenrevier im Saarland. Tagungsband des 17. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie am 12. und 13. Mai 2016 in Freiberg, S. 111-122.
- Sroka, A. (2001): Die soziale Abbauverträglichkeit – der Grundgedanke der bergschadenminimierenden Abbauplanung. In Tagungsband der wissenschaftlichen Fachtagung des DMV in Trier 2001, S. 38 – 46.
- Sroka, A. (2007) Die Theorie von Professor Knothe im Weltbergbau (polnisch). Kongress des polnischen Bergbaus 20.-21.09.2007 in Kraków.
- Stoyan, D. and Morel, T. (2018) Julius Weisbach's pioneering contribution to orthogonal linear regression (1840). January 2018. Historia Mathematica 45(1)
- Tscharf, A. und Rumpler, M. und Fraundorfer, Friedrich und Mayer, G. und Bischof, H. (2015) On the use of uavs in mining and archaeology - geo-accurate 3d reconstructions using various platforms and terrestrial views. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-1/ (W1), Seiten 15-22.
- Wegert, E. Hebisch U. und Lyska W. (2006). Julius Weisbach als Wegbereiter der Angewandten Mathematik. Freiburger Forschungshefte D222 (2006) 147—167.
- Wilski, P. (1929) Markscheidkunde, Bd. 1 und 2. Verlag Julius Springer. Berlin 1929 und 1932.