

Einsatz von XRF¹ zur Sanierung von Schiessanlagen

Seit einigen Jahren verlangen die Behörden bei der Sanierung von Schiessanlagen den Einsatz von mobilen XRF-Messgeräten (mXRF²) zur Messung des Bleigehalts im Boden³. Die Praxis zeigt, dass mXRF heute effizient und zuverlässig eingesetzt werden können, sofern gewisse Rahmenbedingungen und Vorgehensweisen berücksichtigt werden.

Pierre Gander, Geologe CHGEOL^{cert}
 Dr. Thomas Eisenlohr, Geologe
 Dr. Heinrich Jäckli AG, Zürich

Wunderwaffe «XRF-Pistole»?

Im Gegensatz zur mehrtägigen chemischen Blei-Analyse einer Bodenprobe im Labor liefert das mXRF «Sofortergebnisse». Gerätehersteller verkaufen das pistolenartige Gerät mit Halfter, und verleiten damit geradezu zum sorglosen Einsatz der «XRF-Pistole» in Cowboy-Manier. Ein Material ist rasch (in situ) «beschossen» und der kommagenauere Wert abgelesen. In Kenntnis der Schadstoff- und Geräteeigenschaften ist allerdings klar, dass ein solch lässiger Einsatz von mXRF nur unbrauchbare Daten liefert.



XRF-Handmessgerät.

Nicht zuletzt wegen dieser verbreiteten, unsachgemässen Anwendung löste die Einführung der Messmethode mXRF bei der Bearbeitung von Schiessanlagen eine bis heute anhaltende Kontroverse aus. Es kommt hinzu, dass mit dem Einsatz von mXRF die Berater neu in Konkurrenz zu den Umweltlabors stehen. Dieser Rollenwechsel führt bei Sanierungsarbeiten zu Diskussionen mit Entsorgern in Bezug auf die Deklarationsanalytik.

Bei der Diskussion kommt erschwerend hinzu, dass aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht alle Berater eigene Erfahrungen mit mXRF besitzen.

Nachfolgend werden gestützt auf umfangreiche Erfahrungen die Möglichkeiten und Grenzen der mXRF diskutiert und mit Fallbeispielen beleuchtet.

Voraussetzungen

Messwertkorrektur (Korrelation)

Die Messgenauigkeit von mXRF ist von den physikalischen Eigenschaften, wie z.B. dem Wassergehalt oder der Mineralogie, einer Probe abhängig. Da Bodenproben mit mXRF erdfeucht gemessen werden, sind die Messungen standort- und witterungsabhängig. Solche standortabhängigen Eigenschaften erdfeuchter Proben führen bei mXRF gegenüber den getrockneten und gemahlene Laborproben zu Messverlusten. Die gemessenen Gehalte sind zu tief.

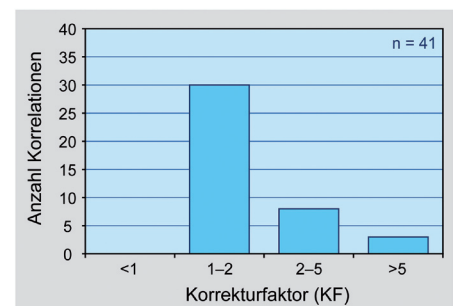
Messverluste bei mXRF lassen sich anhand einer Korrelation von mXRF-Messungen und Laboranalysen (Referenzproben) mit einem Korrekturfaktor (KF) korrigieren:

$$\text{Wert}_{\text{korrigiert}} = \text{KF} \times \text{Rohwert}$$

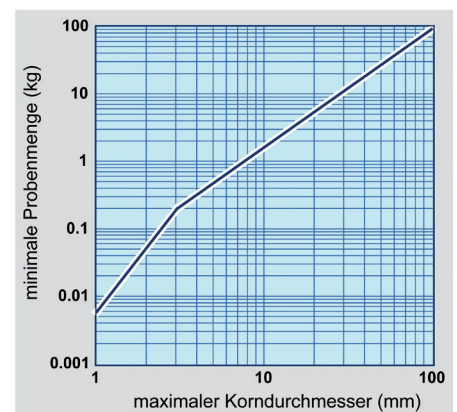
KF ist spezifisch je Gerät, Standort und ggf. Bodentyp. Er liegt meist zwischen 1,0 bis 2,0, kann in Sonderfällen aber auch grösser als 5,0 sein. Für eine überprüfbare Korrelation sind mindestens sechs Referenzproben notwendig.

Probennahme

Bei der Beprobung wird das Bodenmaterial meist bis 0,2 oder 0,4 m Tiefe von Hand gestochen. Eine Probe muss dabei die Gesamtheit des zu messenden Bodenmaterials repräsentie-



Korrekturfaktoren aus 41 Korrelationen.



Minimal notwendige Probenmenge je nach maximalem Korndurchmesser, nach BUNGE 1999.

ren können. Obschon Oberboden («Humus») recht homogen erscheint, sind mehrere Einstiche erforderlich, um eine repräsentative Bodenprobe zu erhalten⁴.

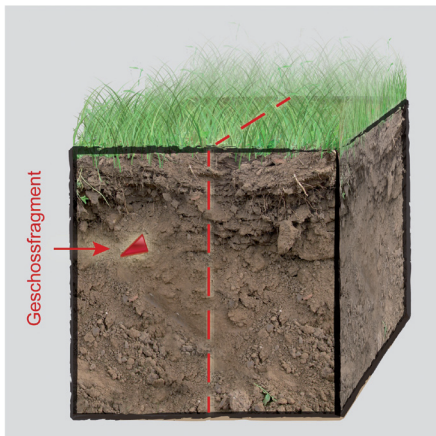
Die minimal notwendige Probenmenge für eine repräsentative Probe ist von der Kornverteilung des zu beprobenden Materials abhängig (BUN-

- 1 XRF – X-ray fluorescence spectroscopy (Röntgenfluoreszenzanalyse)
- 2 mXRF – Verwendung von XRF-Handmessgeräten
- 3 Kettler R., Schenk K., 2006: VASA-Abgeltungen bei Schiessanlagen. Mitteilung des BAFU
- 4 Verordnung über Belastungen des Bodens
- 5 Altlastenspektrum 3/1999

GE 1999⁵). Für Bodenaushub reichen meist 0,5–1,0 kg. Eine für sandig-kiesiges Material repräsentative Probe kann aber auch ohne weiteres 20 kg gross sein.

Bodenaushub aus einem Kugelfang enthält meist Geschossfragmente («partikuläres Blei») und ist deshalb extrem heterogen. Ein Beispiel:

Enthält 1 dm³ Boden (ca. 1,6 kg) ein etwa 4 mm grosses Blei-Partikel von 1 g, entspricht dies einem Gehalt von 625 mg/kg Blei (ppm Pb). Bei einer Probe von einem halben Kubikdezimeter würden je nach Wahl der Hälfte Gehalte von entweder 0 oder von 1250 ppm Pb resultieren!



Heterogenes Kugelfangmaterial.

Dieses plakative Anschauungsbeispiel zeigt, dass die repräsentative Beprobung von Kugelfangmaterial die grösste Herausforderung und Fehlerquelle darstellt. Diese Feststellung gilt für alle Messmethoden (mXRF, Labor-XRF oder nasschemische Laboranalytik).

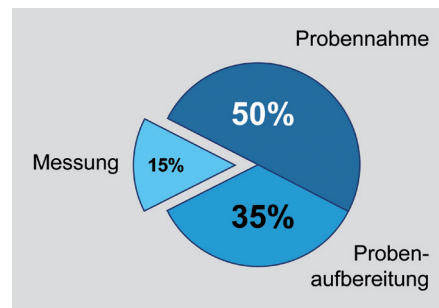
Probenaufbereitung

Die Probenaufbereitung hat zum Ziel, die Probenmenge (0,5–20 kg) soweit zu reduzieren, dass eine Probe überhaupt mit einem Gerät gemessen werden kann. Der Messstrahl eines XRF-Handmessgeräts erfasst etwa 10–20 mm² Materialoberfläche, im Labor werden für eine Analyse etwa 10 g Probenmaterial eingewogen. Um die Probenmenge zu reduzieren, muss dazu die Probe homogenisiert und die Korngrösse unter Berücksichtigung von BUNGE 1999 verkleinert werden.

Bei mXRF beschränken sich die Möglichkeiten zur Aufbereitung erdfeuchter Proben auf gutes Mischen und – nach Möglichkeit – Sieben. Angesichts dieser limitierten Möglichkeiten wird eine Probe in aller Regel 3fach gemessen. Im Labor wird eine Probe getrocknet und gemahlen. Da sich Blei duktil verformt, werden

Geschossfragmente meist nicht verkleinert, sondern «platt gewalzt», bleiben an den Mühlen kleben und verhindern eine Homogenisierung. Somit ist die Probenaufbereitung auch im Labor sehr anspruchsvoll und gelangt z.T. an die Grenzen der Machbarkeit.

In Proben mit partikulärem Blei ist dieses für den Gesamtgehalt der Probe ausschlaggebend.



Geschätzte Anteile des Messfehlers beim mXRF.

Die Quantifizierung des partikulären Bleis gelingt sowohl im Feld als auch im Labor nur durch manuelles Auszählen und Einwiegen der Geschossfragmente. Dieses Aussortieren ist zwangsläufig aufwändig.

Die Moral der Geschichte: Nur Lucky Luke zieht ein XRF-Handmessgerät schneller als sein Schatten, hält es einfach direkt auf den Boden und drückt cool ab.

Messfehler

Der gesamte Messfehler einer XRF-Feldmessung wird also in erster Linie durch die Probennahme und die Probenaufbereitung bestimmt. Wie bereits gesagt, gilt dies auch für Laboranalysen.

Vorteile mXRF

Trotz der diskutierten Einschränkungen gibt es für mXRF gegenüber Laboranalysen gute Argumente:

- Bei der Feinkartierung einer Schiessanlage kann eine Messkampagne laufend die neuen Messergebnisse berücksichtigen. Ein Messraster liegt damit immer am «richtigen» Ort.
- Bei einer Sanierung kann die Materialklassierung vor Ort und fast ohne Zeitverlust erfolgen. Eine Zwischenlagerung des Materials bis zum Vorliegen der Kontrollanalysen entfällt.
- Bei Unklarheiten lassen sich zusätzliche (Kontroll-)Messungen vor Ort ohne Zeitverlust ausführen.
- Das mXRF hat einen Preisvorteil. Die Ko-

sten für eine nasschemische Laboranalyse ohne die ohnehin erforderliche Probenahme und -aufbereitung liegen bei rund CHF 100.–, die Kosten für eine dreifache mXRF-Messung bei rund CHF 30.– (inkl. Amortisation).

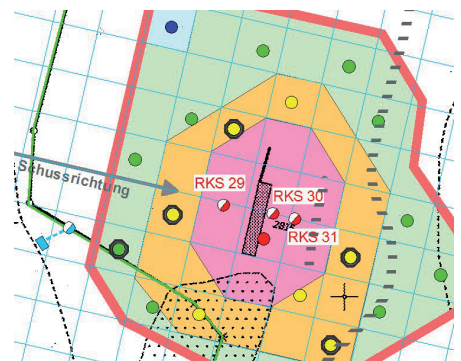
Einsatzzwecke

Je nach Arbeitsphase dient die XRF-Feldmessung einem unterschiedlichen Zweck mit spezifischen Ansprüchen. Immer nur die grösstmögliche Genauigkeit zu verlangen, ist nicht angemessen und unnötig aufwändig.

Untersuchung (XRF-Feinkartierung)

Bei der Untersuchung einer Schiessanlage muss der zu sanierende Perimeter eingegrenzt werden. Dazu wird der Boden in einem Raster in situ beprobt und die Proben vor Ort mit mXRF gemessen. Typischerweise werden dazu einige Dutzend Proben gemessen, wobei sich rasch ein Belastungsbild zeigt. Ist der belastete Bereich grösser als angenommen oder verschoben, kann das Messraster vor Ort ausgedehnt oder verlagert werden. Die Untersuchung wird somit «sehend» anstatt «blind» durchgeführt. Sollte eine einzelne Messung falsch sein, fällt dies wenig ins Gewicht, da dies anhand der benachbarten Messungen meist auffällt und mit einer Zweitmessung korrigiert werden kann. Die Ansprüche an eine Einzelmessung sind in dieser Arbeitsphase relativ gering.

Sanierung, Materialentsorgung



XRF-Feinkartierung.

Bei der Sanierung sind Materialchargen je nach Bleigehalt dem richtigen Entsorgungsweg zuzuweisen (Deklarationsanalyse). Diese Materialklassierung hat wenig Toleranz, da falsch klassiertes Material zu teuer oder gar «illegal» entsorgt würde.

Die Materialklassierung erfolgt anhand mehrerer der bereits vorhandenen Messungen aus der Untersuchung und wird zur Sicherheit meist



Entsorgung von belastetem Kugelfangmaterial.

mit der Kontrollmessung einer Probe «ab Haufen» kontrolliert. Zur Materialklassierung sind üblicherweise zwei bis drei Grenzwerte zwischen 50 und 2000 ppm Pb relevant (je nach Kanton). Eine Deklarationsanalyse muss damit nicht den exakten Gesamtgehalt wiedergeben, sondern eine sichere Klassierung anhand der Grenzwerte ermöglichen. Ob eine Charge 700 oder 900 ppm Pb enthält, ist nicht relevant. Für die Art der Entsorgung sind die effektiven Gehalte über 2000 ppm ebenfalls irrelevant (meist sind ohnehin Geschossfragmente sichtbar).

Erfolgskontrolle

Bei einer nachträglichen Kontrolle einer abgeschlossenen Sanierung wird der Sanierungserfolg resp. die verbleibende Belastung kontrolliert. Dabei wird das Bodenmaterial wie bei der Untersuchung in situ beprobt und gemessen. Üblicherweise liegen Sanierungszielwerte zwischen 200 und 1000 ppm Pb. Mit mXRF lassen sich auch relativ kleine Gehalte von bis zu 100 ppm Pb zuverlässig messen. Liegt der Zielwert jedoch tiefer, beispielsweise bei 50 ppm Pb, muss auf den Einsatz von mXRF verzichtet und auf Laboranalytik ausgewichen werden. Die Ansprüche an die einzelne Messung sind generell hoch, entscheidet diese doch über den Erfolg resp. die Weiterführung der Sanierungsarbeiten.

Fallbeispiel 1: Untersuchung

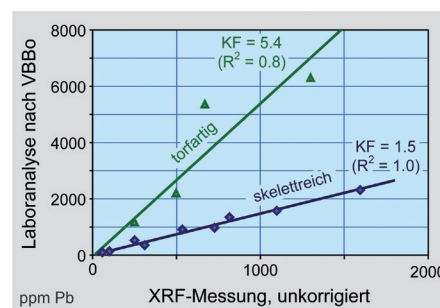
Eine seit Jahrzehnten reaktivierete Kleinkaliber-Schiessanlage war vor Jahren in traditioneller Manier mit Linienproben und Laboranalysen untersucht worden, wobei erstaunlicherweise nur eine mässig starke Bleibelastung bis zu mehreren 100 ppm Pb festgestellt worden war. Deshalb und angesichts der neuen Behördenvorgaben beschloss die Gemeinde, dieselbe Anlage nochmals mit mXRF untersuchen zu lassen. In einer mXRF-Messkampagne wurden inner-

halb eines Tages 41 Bodenproben gemessen. Die Beprobung bis 0,4 m Tiefe erfolgte mittels eigens hierfür entwickelten Bodenstechern, welche grössere Probenmengen liefern und Schadstoffverschleppungen vermeiden. Zur Beprobung bis in 1,0 m Tiefe wurden zusätzlich Rammkernsondierungen abgeteuft. Die mXRF-Feinkartierung bestätigte den früheren Befund. Offenbar war das stark belastete Kugelfangmaterial tatsächlich früher vom Standort entfernt worden. Anhand der 3fachen XRF-Messungen wurde jedoch ohne nennenswerten Mehraufwand nebst der Bleibelastung zusätzlich eine Bodenbelastung durch Kupfer entdeckt. Offenbar bestand auf dem Grundstück früher ein Rebberg. Im vorliegenden Fall war die Kupfer-Belastung von grösserer Relevanz als die Bleibelastung.

Fallbeispiel 2: Sanierung

Zur Sanierung eines Waffenplatzes mit zahlreichen Kugelfängen und einem weitläufigen Zielhang wurden während drei Jahren umfangreiche Erdarbeiten in teils schwierigem Gelände durchgeführt. Dank des baubegleitenden Einsatzes von mXRF konnte im Laufe der Sanierung der Sanierungssperimeter verifiziert werden. Es wurden bisher unbekannte, belastete Flächen festgestellt, welche später teils ebenfalls saniert werden mussten. Insgesamt wurden weit über 1000 Bodenproben entnommen, aufbereitet (ca. 40% gesiebt) und mittels mXRF gemessen.

Die mXRF-Messungen im Zielhang und die zusätzlichen Referenz-Laboranalysen ergaben anfänglich keine brauchbare Korrelation. Erst die bodenkundliche Differenzierung zwischen skelettreichen und torfartigen Proben ergab zwei gute Korrelationen (KF 1,5 resp. 5,4). Unter Berücksichtigung der verschiedenen Bodentypen resp. Korrelationsfaktoren konnten die Materialdeklaration und die Erfolgskontrolle einwandfrei und ohne jegliche Beanstandung



Je nach Bodentyp resultieren im selben Objekt stark unterschiedliche Korrekturfaktoren (KF) für mXRF.

Schiessanlagen-Sanierungen sind kein Massengeschäft

Die Sanierung einer klassischen «300-m-Schiessanlage» wird teils noch als Standardfall banalisiert. Aufwändige Untersuchungen seien dafür nicht nötig. Umfang und Aufwand einer Sanierung einer Schiessanlage hängen jedoch von zahlreichen und vielfältigen Parametern ab. Diese reichen von der Nutzungsart (z.B. 300 m- vs. Jagd-Schiessanlage) über die Baugeschichte (Umlagerung von Kugelfangmaterial) bis hin zu den lokalen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen. In der Regel sind mehrere Umwelt- und Fachbereiche tangiert resp. Behörden involviert (z.B. Boden-, Gewässer- und Naturschutz). Je nach Lage einer Schiessanlage kann deren Sanierung auch logistisch und bautechnisch eine Herausforderung darstellen.

Insgesamt sind Sanierungsprojekte oft komplexe Vorhaben, welche für eine zuverlässige Budgetierung und reibungslose Durchführung durchaus hohe Anforderungen an die Beteiligten stellen.

der Aufsichtsbehörde resp. des Entsorgungunternehmers durchgeführt werden.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von mXRF bei der Untersuchung und Sanierung von Schiessanlagen ist eine taugliche und kostengünstige Methode. Der sachgemässe Einsatz von mXRF setzt aber spezifisches Know-how voraus.

Die grösste Herausforderung stellt unabhängig von der Messmethode die extreme heterogene Schadstoffverteilung im Kugelfangmaterial dar. Trotz einer sorgfältigen Probenahme und Probenaufbereitung, welche verhältnismässig bleiben muss, wird bei Bleigehalts-Bestimmungen immer eine gewisse Unschärfe verbleiben.

Da das konkrete Vorgehen bei der Probenahme und Messung einen derart grossen Einfluss auf die Qualität der Messungen hat, sollte dieses möglichst genau und phasengerecht definiert resp. vorgegeben werden. Dies verhindert auch Marktverzerrungen. Es ist deshalb zu begrüssen, dass die zuständigen Behörden des Kantons Zürich kürzlich eine «Anleitung zum Einsatz von XRF bei der Untersuchung und Sanierung von Schiessanlagen»⁶ mit Mindeststandards publiziert haben. Wir hoffen, dass dieses Beispiel Schule macht. www.jaeckli.ch

6 Anleitung zum Einsatz von XRF bei der Untersuchung und Sanierung von Schiessanlagen. Juli 2011. Bezugsquelle: www.awel.zh.ch