

Verformungsnachweis

Bauvorhaben	Verfüllung und Renaturierung des Steinbruchs Laubenheim
Gegenstand	Verformungsnachweis der mineralischen Basisabdichtung
Auftraggeber	Entsorgungsbetrieb der Stadt Mainz Zwerchallee 24 55120 Mainz
Datum	30. April 2015
Textseiten	11
Anlagen	2
Projektnummer:	6015-500/365-10197N1

Erd- und Grundbau
Spezialtiefbau
Fels- und Tunnelbau
Deponie- und Dammbau
Straßenbau
Geothermie
Umwelttechnik
Altlastensanierung
Gebäuderückbau

Bodenmechanisches Labor
Baugrunduntersuchungen
Grundwasseruntersuchungen
Geotechnische Messungen
Altlastenerkundung
Geotechnische Beratung
Statische Berechnungen
Objektplanung
SiGe-Koordination
Bauüberwachung
Bauschadensanalysen



zertifiziert nach DIN EN ISO 9001



INHALTSVERZEICHNIS

1	Vorgang	3
2	Verwendete Unterlagen	3
3	Verformungsnachweis	5
3.1	Vorbemerkung	5
3.2	Ergebnis	7
3.2.1	Verformungssicherheit der Basisabdichtung	7
3.2.2	Unterschiedliche Steifigkeiten im Untergrund	9
4	Empfehlung	10

ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1	Lageplan mit Berechnungsquerschnitte
Anlage 2	Berechnungsergebnisse – Vertikalverformungen und minimale Krümmungsradien
Anlage 2.1	Berechnungsergebnisse BQ 1
Anlage 2.2	Berechnungsergebnisse BQ 2
Anlage 2.3	Berechnungsergebnisse BQ 3
Anlage 2.4	Berechnungsergebnisse BQ 4
Anlage 2.5	Berechnungsergebnisse BQ 5
Anlage 2.6	Berechnungsergebnisse BQ S1
Anlage 2.7	Berechnungsergebnisse BQ S2



1 Vorgang

Im Rahmen der Rekultivierung des Steinbruchs Laubenheim plant der Entsorgungsbetrieb der Stadt Mainz u. a. auch eine Verfüllung durch Realisierung einer oberirdischen Deponie, in die ausschließlich mineralische Materialien (Deponieklasse DK I / DK II) eingelagert werden sollen und an deren Auflager gemäß Deponieverordnung [2] eine Basisabdichtung herzustellen ist.

Die Ergebnisse der im Jahre 2011 durchgeführten Untergrunderkundung und die Berechnungsergebnisse der Setzungsprognose für den geplanten Verfüllbereich DK I / DK II sind im Gutachten unseres Instituts mit Datum vom 16.04.2014 [10] dokumentiert.

Die Baugrundinstitut Franke-Meißner und Partner GmbH (BFM), Wiesbaden-Delkenheim, wurde vom Entsorgungsbetrieb der Stadt Mainz beauftragt, den Verformungsnachweis für die mineralische Basisabdichtung durchzuführen.

Nachfolgend wird über das Ergebnis berichtet.

2 Verwendete Unterlagen

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurde folgende Literatur verwendet:

- [1] BUNDESEINHEITLICHER QUALITÄTSSTANDARD (BQS) 2-0 (2014): „Mineralische Basisabdichtungskomponenten – übergreifende Anforderungen“.- LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnik"; <http://www.laga-online.de/servlet/is/26509/>.
- [2] Deponieverordnung – Verordnung über Deponien und Langzeitlager, BMU, BGBl. I Nr. 22 vom 29.04.2009, S. 900.
- [3] Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - GDA; 3. Auflage 1997; herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.



- [4] LWA LANDESAMT FÜR WASSER UND ABFALL NRW (1993): Nr. 18 Mineralische Deponieabdichtungen – Richtlinie –. Reproduktion mit aktualisierenden Hinweisen zur Anwendung nach Inkrafttreten der Abfallablagerungsverordnung und der Deponieverordnung, hrsg. Landesumweltamt NRW 2006.
- [5] LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2010): „Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen“ LANUV-Fachbericht 25.
- [6] SCHEFFLER, H., & MOSLER, J. (1990): Nutzung von Restlöchern von Kippenflächen von Braunkohletagebauen für Deponieflächen.- In: Neuzeitliche Deponietechnik, S. 55- 75, Hrsg. Jessberger, Balkema 1990.
- [7] FÖRSTER, W. (1992/1993): Setzungen und Sackungen unter Deponien auf Kippen.- Geotechnik im Deponiebau, Studien und Tagungsberichte, Band 1, Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam.
- [8] KATZENBACH, R., AMANN, P. & EDELMANN, L. (1995): Untersuchung von Schadensgrenzen mineralischer Barrieren durch Simulation von Verformungszuständen im Maßstab 1:1.- In: BMBF-Verbundforschungsvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen, Schlussbericht, Teilvorhaben 09, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, 1995.
- [9] AUGUST, H., AUGUST, U. & MEGGYES, T. (Hrsg.) (1998): Optimierung von Deponieabdichtungssystemen.- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, Springer-Verlag.

Eigene Unterlagen

BAUGRUNDINSTITUT FRANKE-MEßNER UND PARTNER GMBH:

- [10] Gutachten zur Verfüllung und Renaturierung des Steinbruchs Laubenheim – Gegenstand: Baugrund und Setzungsprognose.- Unveröffentlichtes Gutachten vom 16.04.2014 sowie darin aufgeführte Unterlagen.

Programm

- [11] Rocscience Inc. (2010): *Phase²* – Finite Element Analysis for Excavations and Slopes



3 Verformungsnachweis

3.1 Vorbemerkung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der im Jahre 2011 durchgeführten Gebirgserkundung und der geplanten geometrischen Abmessungen der Deponiekörper wurde unter Berücksichtigung der verschiedenen geplanten Bauabschnitte eine Spannungs-Verformungsanalyse unter Verwendung der Finiten-Elemente-Methode mit dem Programm *PHASE*² zur Abschätzung der möglichen spannungsabhängigen Setzungen an der Oberkante der Basisabdichtung durchgeführt.

Dazu wurden insgesamt sieben Berechnungsquerschnitte (BQ 1 bis BQ 5 sowie BQ S1 und BQ S2) festgelegt, die den inhomogenen IST-Zustand, d.h. bereits verfüllte Bereiche und nicht vollständig ausgesteinte Bereiche im geplanten Verfüllbereich DK I / DK II, erfassten (siehe hierzu Anlage 1 und [10]).

Mit diesen Berechnungen wurden erwartungsgemäß die geringsten Setzungen in den Randbereichen des Verfüllkörpers und in den Bereichen, wo unterhalb der Basisabdichtung unverritztes Kalktertiär ansteht, ermittelt. Die größten Setzungsunterschiede resp. Setzungsneigungen treten nach den Berechnungsergebnissen im Übergang vom unverritzten Kalktertiär zur bereits eingelagerten, bis zu rd. 20 m mächtigen Verfüllungsmassen aus überwiegend bindigen Materialien mit unterschiedlichen Nebengemenganteilen an Sand und Kies auf, d. h. in Bereichen mit sprunghaften Steifigkeitsänderungen.

Da ungleichförmige Setzungen Zwangsverformungen in der Basisabdichtung verursachen und zur Bildung von Zugrissen und / oder Scherfugen bzw. Scherzonen führen können, ist eine Untergrundverbesserung z. B. mittels einer Rüttelstopfverdichtung zur Erhöhung der Tragfähigkeit und zur Vergleichmäßigung der Setzungen frühzeitig vor Beginn der Herstellung der Basisabdichtung durchzuführen. Zuvor sind Probefelder mit unterschiedlichen Säulendurchmessern und Rastermaßen anzulegen, anhand deren Ergebnisse der Nachweis der Verbesserung des Setzungsverhaltens des Untergrundes erbracht bzw. die Bemessungswerte überprüft und ggf. die Setzungsprognose verifiziert werden kann.



Nach den Berechnungsergebnissen, die in Bereichen bereits verfüllter mächtiger Auffüllmassen unter Ansatz einer tiefengestaffelten Steifigkeit und einer Untergrundverbesserung in Form einer Rüttelstopfverdichtung ermittelt wurden, sind demnach durch die Belastung infolge Aufschüttung des Deponats an der Oberkante der Mineralischen Dichtung Setzungen in der Größenordnung zwischen rd. 0,24 m (Berechnungsquerschnitt BQ 3) und rd. 1,0 m (Berechnungsquerschnitt BQ S1) zu erwarten.

Die Ergebnisse der in [10] dokumentierten Berechnungen sind in der nachstehenden Tabelle für den jeweiligen Berechnungsquerschnitt mit Angabe der ermittelten Setzungen, Setzungsdifferenzen und Setzungsneigungen resp. Winkelverdrehungen aufgelistet:

Berechnungsquerschnitt	Setzung (max.) [m]	Setzungsdifferenz (max.) [cm]	Setzungsneigung [-]	Anlage in [10]
BQ 1	0,55*	1,9	1/53	4.1.4
BQ 2	0,47	2,5	1/40	4.2.4
BQ 3	0,24	1,3	1/77	4.3.4
BQ 4	0,69*	3,5	1/28	4.4.4
BQ 5	0,27	0,8	1/125	4.5.4
BQ S1	1,00*	3,2	1/31	4.6.4
BQ S2	0,66*	2,4	1/42	4.7.3

*Berechnungsquerschnitte mit Untergrundverbesserung im Bereich bereits eingelagerter mächtiger Verfüllmassen

Tab. 1: Setzungen, Setzungsdifferenzen und -neigungen an der Oberkante der Mineralischen Dichtung

Die Barrierewirkung und die Gebrauchstauglichkeit der mineralischen Basisabdichtung müssen über die Zeit der Betriebsdauer und der Nachsorge auch bei großen Verformungen erhalten bleiben resp. gewährleistet werden.

In Anlehnung an [3] werden im Rahmen des Verformungsnachweises der Fall der Dehnung der Basisabdichtung unter Ansatz der maximalen Auflast des Deponats resp. der max. Verfüllhöhe über Basisabdichtung und der Fall der lokalen Dehnung im Bereich großer Steifigkeitsunterschiede z.B. im Übergang von im Untergrund anstehendem unverritztem Kalktertiär zu bereits eingebrachten mächtigen Verfüllmassen geführt.



Dazu werden die mit dem FEM-Programm *PHASE*² an der Oberkante der mineralischen Basisabdichtung ermittelten Werte der Vertikalverformungen verwendet und die Krümmungsradien der Setzungsmulden resp. des mineralischen Dichtungsmaterials rechnerisch nach [7] bestimmt.

3.2 Ergebnis

3.2.1 Verformungssicherheit der Basisabdichtung

Nach den Ergebnissen der durchgeführten und in [10] dokumentierten numerischen Berechnungen nach der Finiten-Elemente-Methode (FEM) mit dem Programm *PHASE*² treten an der Oberkante der mineralischen Basisabdichtung Setzungsdifferenz zwischen zwei benachbarten Betrachtungspunkten von bis zu maximal $\Delta s = 3,5$ cm auf, woraus sich eine maximale Setzungsneigung resp. Winkelverdrehung von $\alpha = 1 / 28$ ergibt (siehe hierzu Tab. 1).

Infolge der Verformung des Untergrundes ergibt sich nach SCHEFFLER & MOSLER [6] aus dem Betrag der Setzungsneigung resp. Winkelverdrehung eine Dehnung ε der Basisabdichtung von

$$\varepsilon = \frac{1}{\cos(\arctan \alpha)} - 1 * 100 [\%].$$

Für die hier ermittelte max. Setzungsneigung ergibt sich somit eine max. Dehnung von $\varepsilon = 0,064$ % der Basisabdichtung infolge der Verformung des Untergrundes.

Die Belastbarkeit der Basisabdichtung bzw. die durch Auflast hervorgerufene Dehnung, bei der eine Biegerissgefährdung der mineralischen Basisabdichtung auftreten kann, lässt sich über die Poissonzahl (ν), auch Querdehnzahl genannt, ableiten, die das Verhältnis einer relativen Änderung der Schichtdicke zu einer relativen Längenänderung (Stauchung) beschreibt und mit nachstehender Formel berechnet werden kann.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{\text{quer, zul.}}}{\varepsilon_{\text{stauch}}} [-]$$



Nach dem *Hookeschen* Gesetz lässt sich die Stauchung der Basisabdichtung unter der Auflast des Deponats wie folgt ermitteln:

$$\varepsilon_{\text{stauch}} = - \frac{\sigma_{\text{Deponat}}}{E_{\text{Abdichtung}}} \quad [-]$$

mit

$E_{\text{Abdichtung}}$ Elastizitätsmodul der Technischen Barriere / Mineralischen Dichtung

σ_{Deponat} Auflastspannung aus Deponat ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$) und einer rd. 45 m mächtigen Verfüllhöhe (entspricht in etwa BQ 2)

Unter Ansatz einer Auflastspannung von $\sigma = 800 \text{ kN/m}^2$ (Deponat $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, Verfüllhöhe rd. 45 m – entspricht in etwa BQ 2) und des E-Moduls für die mineralische Basisabdichtung von $E = 10 \text{ MN/m}^2$ beträgt die maximale Stauchung

$$\varepsilon_{\text{stauch}} = -0,08 \approx -8,0\% .$$

Die Poissonzahl für die Technische Barriere / Mineralische Dichtung wurde in den numerischen Berechnungen in [10] mit $\nu = 0,33$ in Ansatz gebracht. Damit ergibt sich dann rechnerisch eine Querdehnung von

$$\varepsilon_{\text{quer,zul}} = -0,33 \cdot (-0,08) = 0,0264 \cong 2,64\%$$

Nach den mit dem Programm *PHASE*² an der Oberkante der Basisabdichtung ermittelten Verformungen ist rechnerisch von einer maximalen Querdehnung $\varepsilon_{\text{quer,vorh}} = 0,064 \%$ auszugehen, die somit deutlich unter der zulässigen Querdehnung von $\varepsilon_{\text{quer,zul}} = 2,64 \%$ liegt.

Die Funktionsfähigkeit der Basisabdichtung ist demnach auch infolge der Auflast des Deponats und der damit auftretenden Vertikalverformungen gewährleistet ($\varepsilon_{\text{quer,zul}} \geq \varepsilon_{\text{quer,vorh}}$).



3.2.2 Unterschiedliche Steifigkeiten im Untergrund

Zur Ermittlung der Beanspruchung der mineralischen Basisabdichtung infolge von Unstetigkeiten im Setzungsverlauf z.B. bedingt durch schroffe Steifigkeitsunterschiede zwischen unverritztem Kalktertiär und bereits eingelagerten mächtigen Verfüllungsmassen wurden unter Verwendung der mit dem FEM-Programm *PHASE*² ermittelten Vertikalverformungen die Krümmungen s'' zwischen benachbarten Knotenpunkten nach der Formel von Förster (1992/1993) [7] bestimmt:

$$s'' = \frac{1}{(\Delta x)^2} \cdot [s(x + \Delta x) - 2 \cdot s(x) + s(x - \Delta x)] \text{ [m]}$$

mit

Δx Abstand zwischen Knotenpunkten (Stützweite)

$s(x + \Delta x, x - \Delta x)$ Vertikalverformungen am Knotenpunkt

Der Krümmungsradius R ist der Reziprokwert der Krümmung s'' :

$$R = 1 / s'' \text{ [m].}$$

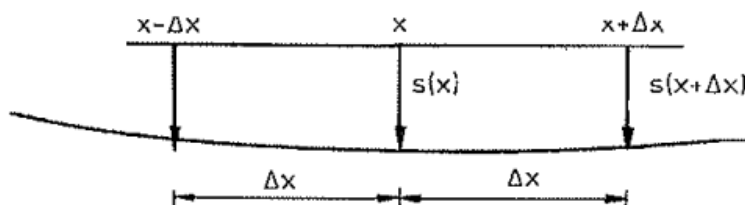


Abb. 1: Numerische Ermittlung der Krümmung s'' aus [7].

In der nachstehenden Tabelle sind die minimalen Krümmungsradien für den jeweiligen Berechnungsquerschnitt sowie die jeweilige Verfüllhöhe über Basisabdichtung aufgelistet.



Berechnungs- querschnitt	Verfüllhöhe über Basisabdichtung [m]	Minimaler Krümmungs- radius** [m]	Anlage
BQ 1*	20	498	2.1
BQ 2	43	184	2.2
BQ 3	41	213	2.3
BQ 4*	38	116	2.4
BQ 5	15	760	2.5
BQ S1*	29	114	2.6
BQ S2*	23	267	2.7

*Berechnungsquerschnitte mit Untergrundverbesserung im Bereich bereits eingelagerter mächtiger Verfüllmassen

** nach FÖRSTER (1992/93) [7]

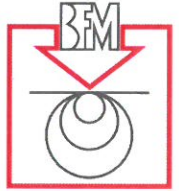
Tab. 2: Verfüllhöhe und minimale Krümmungsradien an der Oberkante der Mineralischen Basisabdichtung

Wie der vorstehenden Tabelle und den Anlagen 2 zu entnehmen ist, ergeben sich rechnerisch lokal minimale Krümmungsradien von $R_{\min} = 114 \text{ m}$, die den nach [4] zulässigen Krümmungsradius von $R_{\text{zul}} \geq 200 \text{ m}$ unterschreiten und nach [1] zusätzliche Nachweise für das mineralische Basisabdichtungssystem erforderlich werden lassen.

In diesem Zusammenhang wird auf Untersuchungsergebnisse in [8] hinweisen, die zeigen, dass Abdichtungsschichten aus leicht- und mittelplastischen Tonen bei entsprechenden Einbauwassergehalten erhebliche Untergrundsetzungen und damit einhergehende Dehnungen bis zu einem gewissen Grad rissfrei, d. h. ohne Durchlässigkeitsanstieg überstehen können, deren Krümmungsradien deutlich unter dem in [4] genannten Wert von $R = 200 \text{ m}$ liegen. So wurden in [8] für einen schwach sandigen, tonigen Schluff, der nach DIN 18196 als leicht plastischer Ton einzustufen ist, Krümmungsradien von $R = 70 \text{ m}$ bis $R = 40 \text{ m}$ ermittelt, bei denen der Grenzverformungszustand erst erreicht wurde.

4 Empfehlung

Die Langzeitfunktionsfähigkeit des mineralischen Basisabdichtungssystems zum Schutz des Grundwassers hat im Deponiebau stets oberste Priorität.



Neben der Dichtigkeit ist die mechanische Widerstandsfähigkeit anhand der Kriterien Krümmungsradius und Zugdehnung nachzuweisen.

Der in BQS 2-0 [1], Pkt. 2.2.3, geforderte versuchstechnische Nachweis der „Verformbarkeit“ sollte daher nicht erst im Rahmen der Bauausführung, sondern bereits im Zuge der Ausführungsplanung durch Zug- und Biegezugversuche gemäß GDA E 2-13 an den dafür in Frage kommenden Materialien ermittelt werden, um ggf. zusätzliche bautechnische Stabilisierungselemente (z.B. Geogitter) frühzeitig in der Ausschreibung berücksichtigen und erdstatisch nachweisen zu können und um projektbezogene zusätzliche Qualitätsanforderungen an das zu liefernde Dichtungsmaterial im Qualitätsmanagementplan (QMP) und im LV der Baumaßnahme kumulieren zu können.

Es wird empfohlen, den Untersuchungsrahmen im Vorfeld mit der zuständigen Behörde auf der Grundlage der BQS abzustimmen.

ppa.

Dipl.-Geol. Sachtleben



Dipl.-Ing. Ringelb



