Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Beurteilung des Injektionserfolgs – Einflussgrößen und praxisnahe Bewertungsmethoden



FORUM INJEKTIONS TECHNIK

04.11.2026 Köln
Ein Vortrag im Rahmen des Forums Injektionstechnik
Dipl.-Ing. Bernd Aberle
M.Eng. Maik Leipersberger, Comdrill

der Erfolg einer Injektion ist nicht immer sichtbar



Talsperre Scheibe-Alsbach, 2026

Ein Weg ohne Ziel ist kein Erfolgsnachweis



Das Ziel einer Injektion

- bestimmt das Injektionsgut
- legt fest: Einbauverfahren, Injektionsdruck, Volumenstrom, Packertypen, Pumpe
- steuert die Injektionsparameter wie Viskosität, Verarbeitungszeit, Verpressreihenfolge
- definiert das Abbruchkriterium
- bestimmt die Wirtschaftlichkeit/ den Aufwand
- bestimmt das Prüfverfahren zur Erfolgsbewertung



Zementsuspension Pasten Feinstbindemittel Kunstharz Hart- und Weichgele Wasserglas Dämmer	→	Abdichten Stabilisieren Heben Verfüllen	→	Niederdruck Hochdruck Manschettenrohr Rammlanzen ...	→	Trennflächen Risse Lunker Firstspalt Porenraum Hohlräume	→	Fels Boden Sand Beton Mauerwerk .....

C. Kutzner: Einpressen/ Injektion ist das Einpressen eines Injektionsmitteln zur Reduzierung der Durchlässigkeit oder Verfestigung in Trennflächen, Poren oder Hohlräume im Baugrund oder Bauwerksteilen.

Injektionsziele



Änderung der hydraulischen Eigenschaften
- Reduzierung der Durchlässigkeit (Permeabilität)
- Wasserzutritte zu stoppen
- Wasserzutritte gezielt umzuleiten
- Gasdichtigkeit



Verfestigung und Erhöhung der Tragfähigkeit
- Baugrundverbesserung durch Erhöhung der Scherfestigkeit u. Druckfestigkeit
- Verformungsminderung / Stabilisierung von Baugrund und Bauwerksteilen.
- Sanierung oder Vermeiden von Setzungsschäden
- kraftschlüssige Verbindung



Hohlraumverfüllung und Kontaktinjektion
- Formschluss und Kraftschluss
- Verfüllung anthropogener und natürlicher Hohlräume

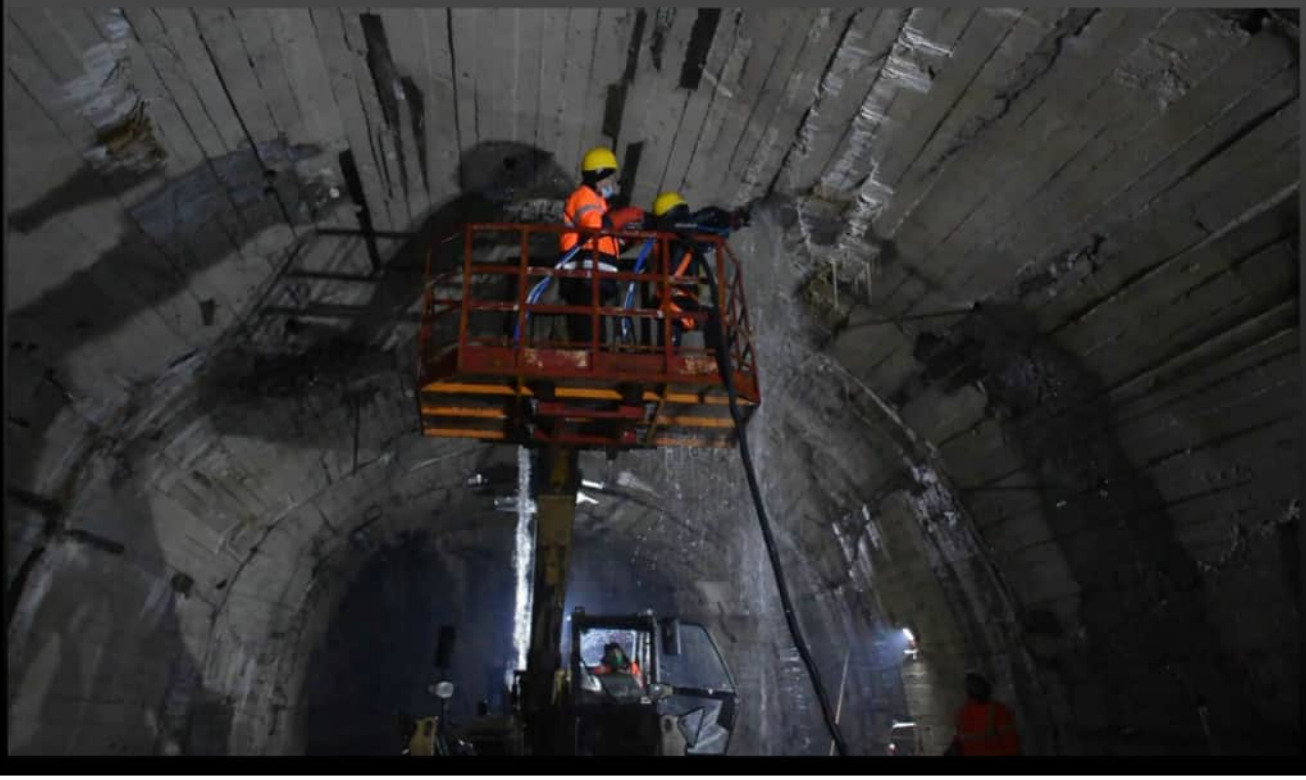
Artvin 2001

Nahe Ziele – Stoppen von Zuflüssen





Nahe Ziele – Stoppen von Zuflüssen

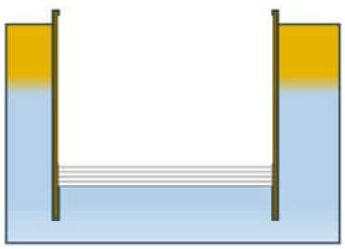


Unweite Ziele – Dichtigkeit einer Weichgel Sohle



Ibbenbüren 2020

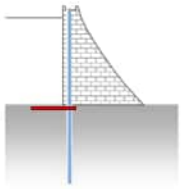


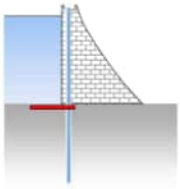


Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

weite Ziele – wasserdicht bei Vollstau







die Plombe eines Umleitungsstollen



2026



Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Sehr weite Ziele – dichtes Endlager für 1 Mio. Jahre



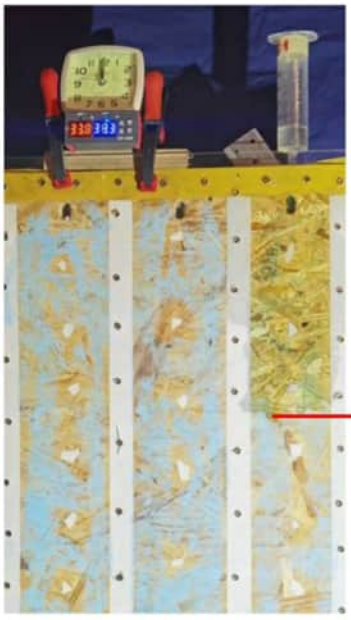
Auf dem Weg zum Ziel

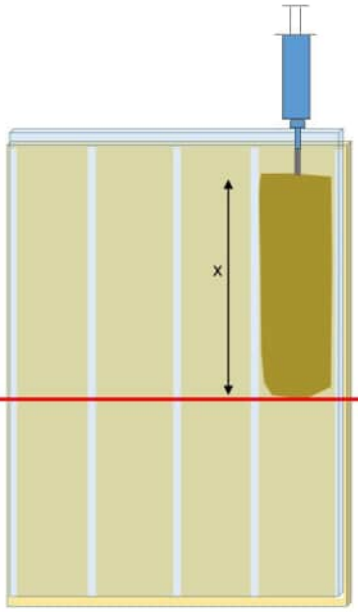
- Prüfen im Vorfeld
  Eignung des Verfahrens, Verpressmaterial, Geräte, Mannschaft

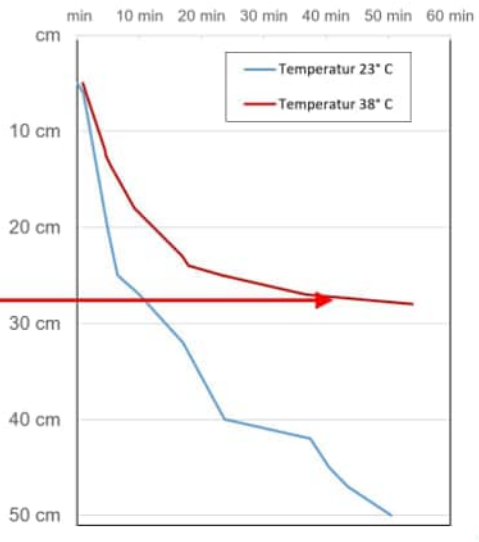
Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Verpressgut im Labor

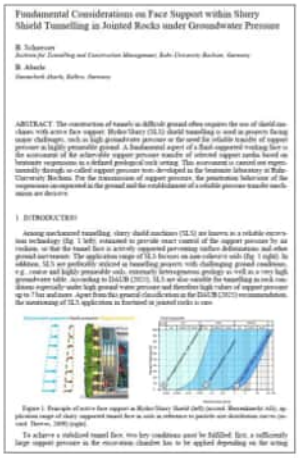








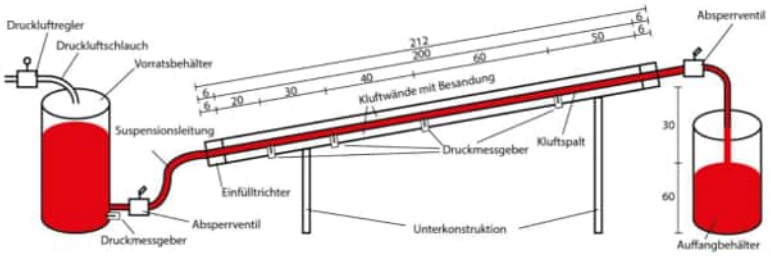
Verfahrenstechnik im Labor


Fundamental Considerations on Face Support within Slurry Shield Tunnelling in Jointed Rocks under Groundwater Pressure





Versuch zur Ausbreitung einer Suspension in klüftigem Fels an der Ruhr-Universität Bochum



Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Auf dem Weg zum Ziel

- Prüfen im Vorfeld
  Eignung des Verfahrens, Verpressmaterial, Geräte, Mannschaft
- Prüfen zu Beginn der Maßnahme
  Eignungsversuche vor Ort, Kalibrieren der Messeinrichtung und Geräte

Einpressgut auf der Baustelle







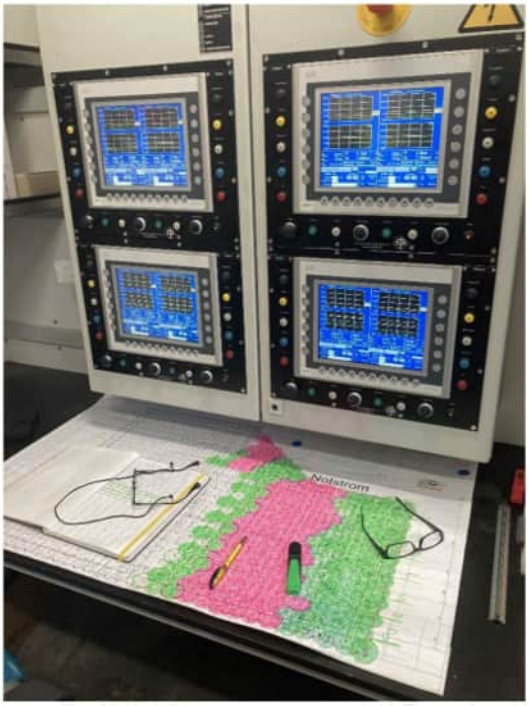


Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

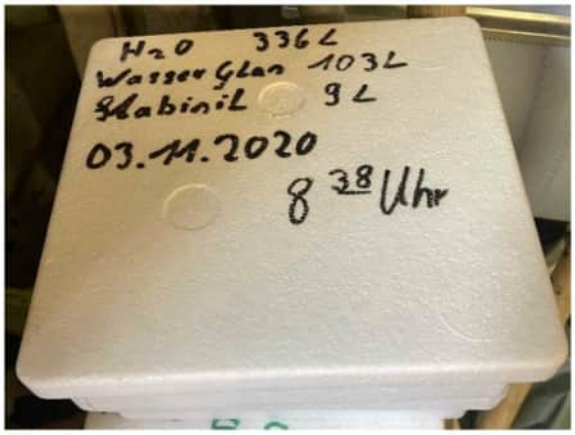
Auf dem Weg zum Ziel

- Prüfen im Vorfeld
  Eignung des Verfahrens, Verpressmaterial, Geräte, Mannschaft
- Prüfen zu Beginn der Maßnahme
  Eignungsversuche vor Ort, Kalibrieren der Messeinrichtung und Geräte
- Laufende Eigen- und Fremdüberwachung

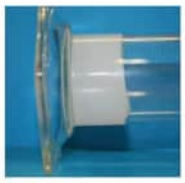
Dokumentation und Rückstellprobe








Gelzeit


Kippzeit

Auf dem Weg zum Ziel

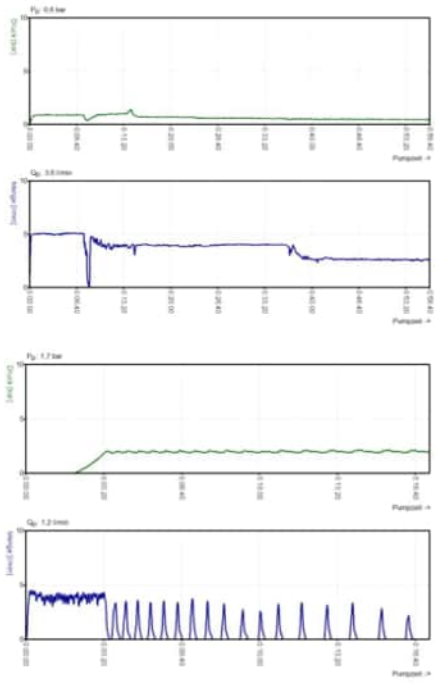
- Prüfen im Vorfeld
  Eignung des Verfahrens, Verpressmaterial, Geräte, Mannschaft
- Prüfen zu Beginn der Maßnahme
  Eignungsversuche vor Ort, Kalibrieren der Messeinrichtung und Geräte
- Laufende Eigen- und Fremdüberwachung
- **Zeitnahe Auswertung aller Ergebnisse**
  Bohrkerne, Bohrprotolle, WD-Tests, Verpressprotokolle, Überwachung der Arbeiten …
  Messsensoren

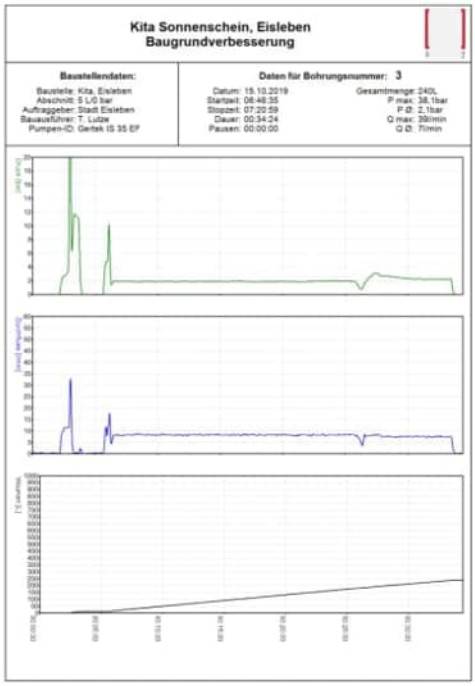
Prozesstechnische Auswertung

- Die kontinuierliche digitale Aufzeichnung von Injektionsdruck, Volumenstrom und Materialmenge liefert wertvolle Echtzeitdaten.
- Auswertung der Verpressdiagramme





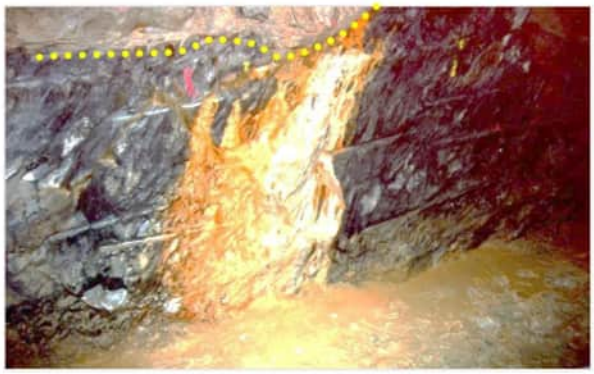




Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Visuelle Prüfung in Bohrungen

- Bohrkerne und Schürfe
- Kontroll- und Nachbarbohrungen
- Bohrlochkamera
- Bohrloch-Endoskopie







Visuelle Prüfung in Bohrungen

- Bohrkerne und Schürfe
- Kontroll- und Nachbarbohrungen
- Bohrlochkamera
- Bohrloch-Endoskopie





Probennahme nach DIN EN ISO 22475-1



Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Visuelle Prüfung in Bohrungen

- Bohrkerne und Schürfe
- Kontroll- und Nachbarbohrungen
- Bohrlochkamera
- Bohrloch-Endoskopie





Geomechanische und verformungsbasierte Prüfungen

- Rammsondierungen (DPL/DPM/DPH)
- Bohrlochaufweitungsversuche
- Statische & Dynamische Lastplattenversuche
- Präzise Höhenmessungen (Nivellierungen)
- Elektronische Schlauchwaagen, Laserscanner und Neigungssensoren





Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Geomechanische und verformungsbasierte Prüfungen

- Rammsondierungen (DPL/DPM/DPH)
- Bohrlochaufweitungsversuche
- Statische & Dynamische Lastplattenversuche
- Präzise Höhenmessungen (Nivellierungen)
- Elektronische Schlauchwaagen, Laserscanner und Neigungssensoren





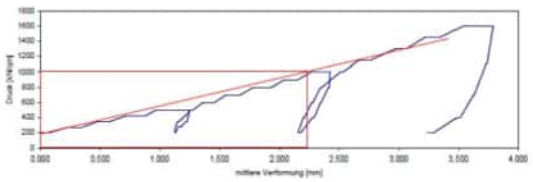


-12 m, Abteufen Ost

G | T | F

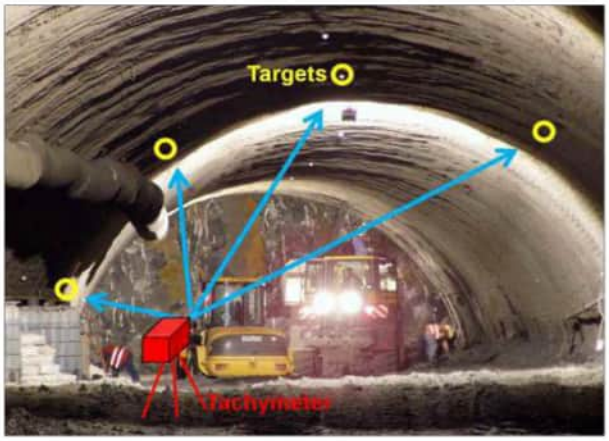
SEITENDRUCKVERSUCH

Projektbezeichnung	: Kasseler Kurve		
Bohrung	: Schacht 12m, Ost	Formation	:
Versuchstiefe	: 1.50 m	Gestein	:
Datum	: 06.03.24	Sondentyp	: Ettlinger Seitendruck 101 mm
Gerätenummer	: 66/42	Sondenlänge	: 490 mm
Messrichtung	: horizontal		
Bemerkung	:		



Geomechanische und verformungsbasierte Prüfungen

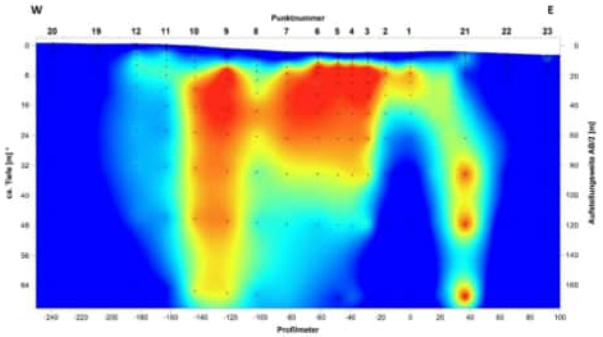
- Rammsondierungen (DPL/DPM/DPH)
- Bohrlochaufweitungsversuche
- Statische & Dynamische Lastplattenversuche
- Präzise Höhenmessungen (Nivellierungen)
- Elektronische Schlauchwaagen, Laserscanner und Neigungssensoren

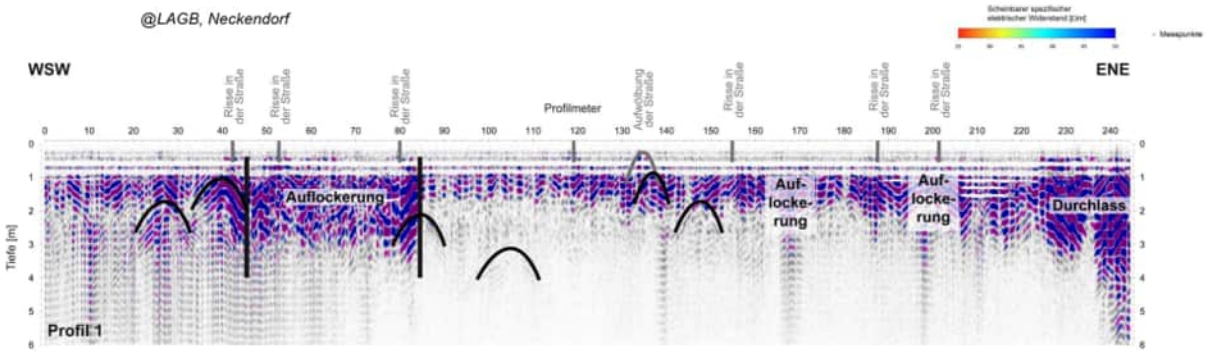




Physikalische und Geophysikalische Methoden

- Seismische / Akustische Tomographie (Crosshole-Verfahren)
- Georadar (GPR) & Ultraschall-Echo.
- Thermografie



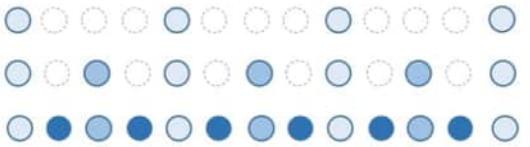


Pilgerschrittverfahren

Kainzmühlsperre 2024



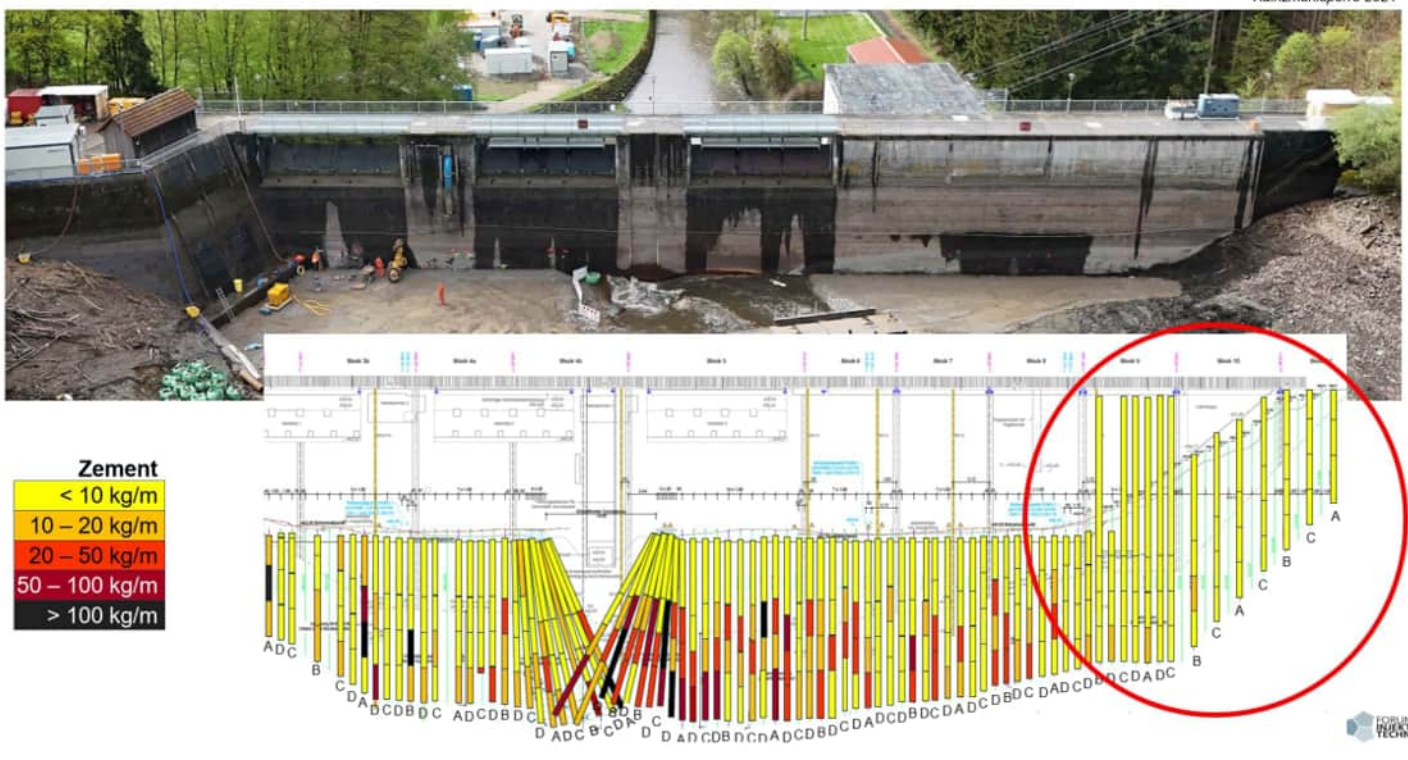
Zement
< 10 kg/m
10 – 20 kg/m
20 – 50 kg/m
50 – 100 kg/m
> 100 kg/m



Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Pilgerschrittverfahren

Kainzmühlsperre 2024

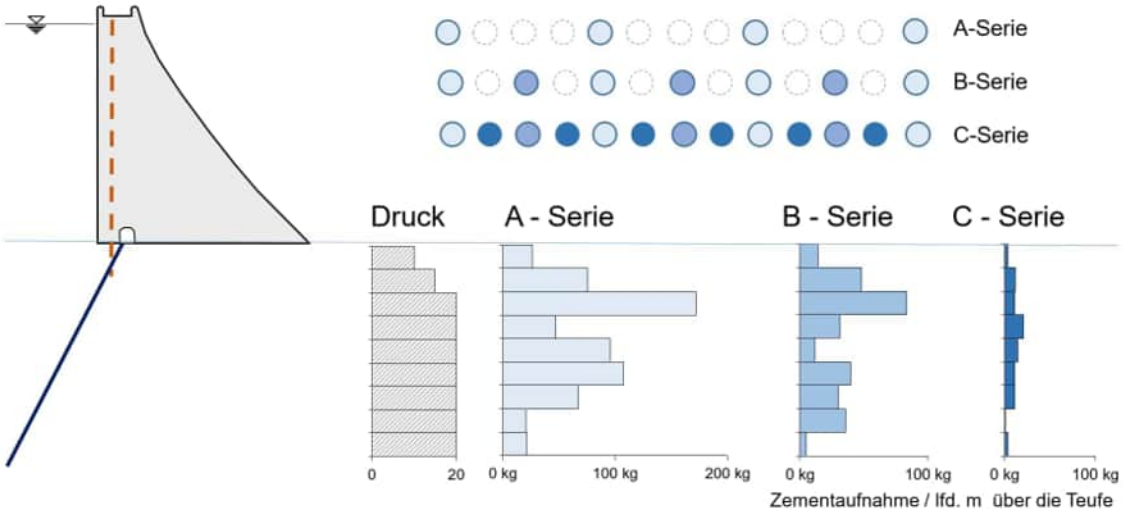


Zement
< 10 kg/m
10 – 20 kg/m
20 – 50 kg/m
50 – 100 kg/m
> 100 kg/m

Pilgerschrittverfahren



Diemeltalsperre 1996



Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Abbruchkriterien

eine im Vorfeld definierte Bedingung oder ein Grenzwert, bei deren Erreichen der Verpressvorgang automatisch oder manuell gestoppt wird.

Abbruch nach:

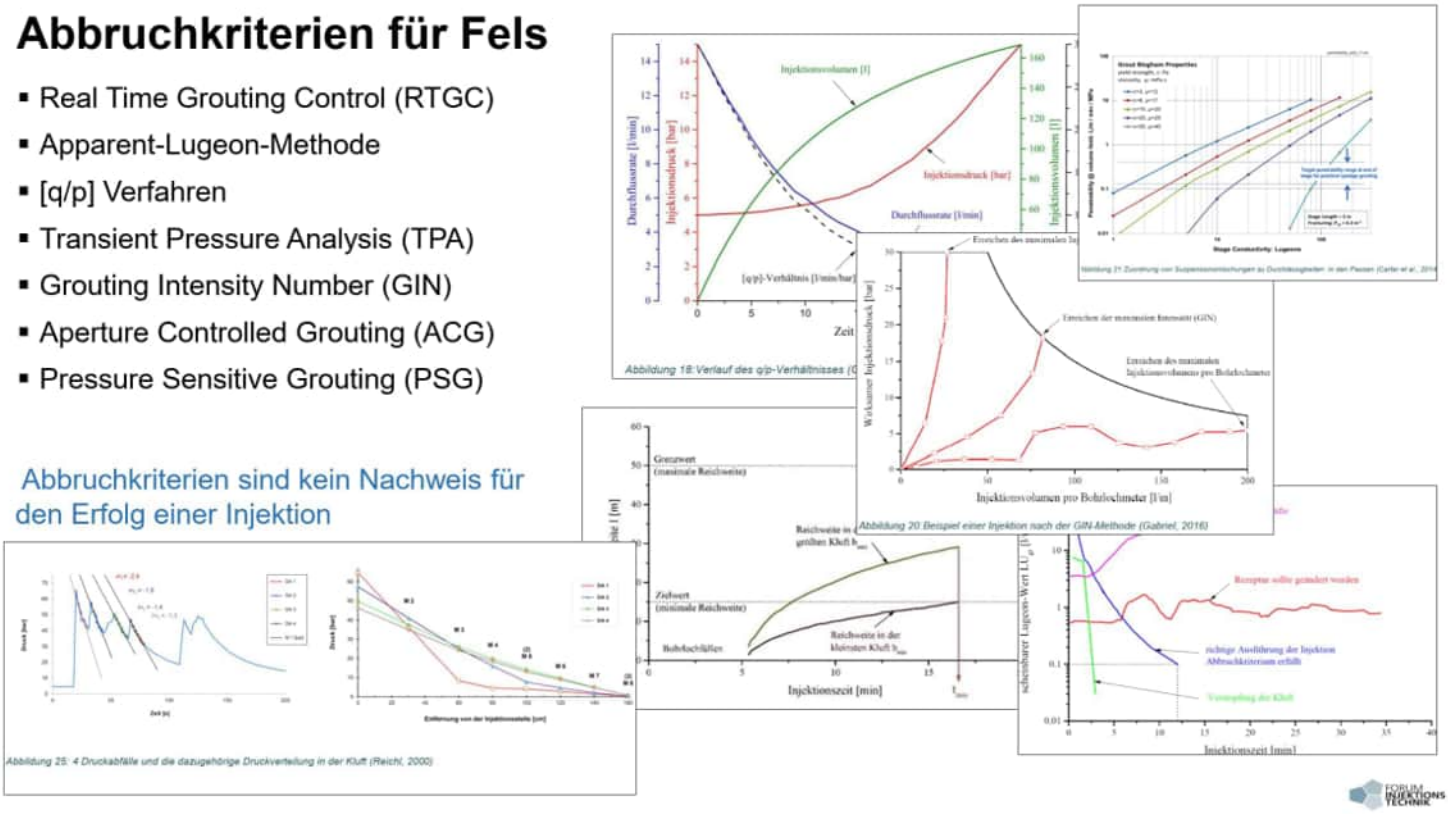
- Zeit
- Volumen
- Druck
- Durchflussrate



Abbruchkriterien für Fels

- Real Time Grouting Control (RTGC)
- Apparent-Lugeon-Methode
- [q/p] Verfahren
- Transient Pressure Analysis (TPA)
- Grouting Intensity Number (GIN)
- Aperture Controlled Grouting (ACG)
- Pressure Sensitive Grouting (PSG)

Abbruchkriterien sind kein Nachweis für den Erfolg einer Injektion



Versuche zur Wasseraufnahme/ Durchlässigkeit

- Pumpversuch
- Schluckversuch
- WD- Test

1990



2026



Lugeon-Test

- WD-Test, Wasserdrucktest, WAP = Wasserabpresstest
- Er ist ein Versuch im Bergbau, der Bohrtechnik und der Geotechnik, bei dem die Durchlässigkeit des umgebenden Gesteins in einem Bohrloch durch Einpressen von Wasser geprüft wird.
- Die Menge des eingepressten Wassers wird in der Einheit Lugeon (Lu) gemessen:

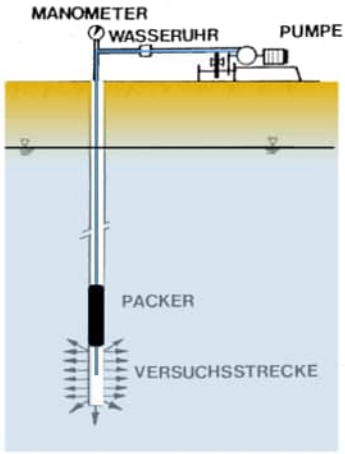
$$1\,Lu = 1\,\frac{1\,L}{\min \cdot m \cdot 1\,MPa}$$

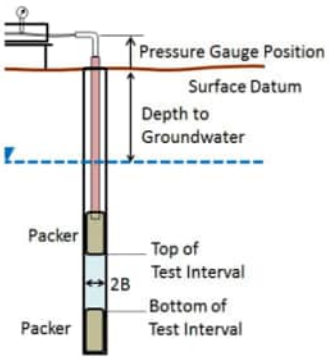
Lu = Lugeon
L = Gesamtmenge in Liter
min = Messdauer in Minuten
m = Bohrlochlänge in Meter
MPa = Überdruck

Grundlage: DIN EN 22 282-3

Maurice Lugeon 1870 - 1953







Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

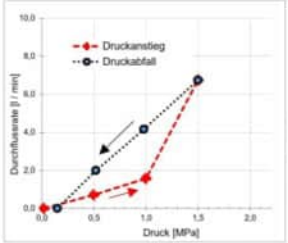
WD-Test Auswertung

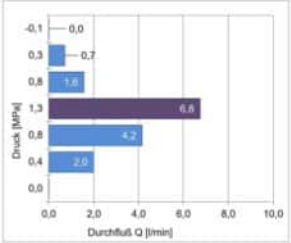


COMDRILL — WD-Test Bericht nach ISO 22282-3 — GEOTECHNIK ABERLE

Baustelle	TS Leibis Lichte	Wasserspiegel	2,0 m
Adresse	An der Kupfergrube 1	Testabschnitt oben	-14,2 m
	Unterweissbach	Testabschnitt unten	-19,1 m
Datum	14.05.2025; 17:11 h	Bohrlochdurchmesser	86 mm
Bohrung / Stufe	**12 C 7 / Stufe 3**	Länge der Packermanschette	100,0 cm
Versuchsdauer	07 min	Aufblasdruck des Packers	3,0 MPa
Versuch durch	D. Zeibig	Tiefe des Sensors	0,0 m
Auswertung durch	B. Aberle	Geologie	Tonschiefer

Gemessener Druck [MPa]	Dauer [min]	Wasser-stand [m]	Volumen [l] Anfang/ Ende		Durchfluss [l/min]	PPHR [MPa]	korrigierter Druck (MPa)	Durchfluss / Messstrecke
0,02	7,0	2,0	0	0	0,00	0,16	-0,14	0,00
0,50	7,0	2,0	0	5	0,71	0,16	0,34	0,15
1,00	7,0	2,0	0	11	1,57	0,16	0,84	0,32
1,50	4,0	2,0	0	27	6,75	0,16	1,34	5,51
0,98	6,0	2,0	0	25	4,17	0,16	0,82	5,10
0,52	6,0	2,0	0	12	2,00	0,16	0,36	2,45
0,15	7,0	2,0	0	0	0,00	0,16	-0,01	0,00





Kommentar

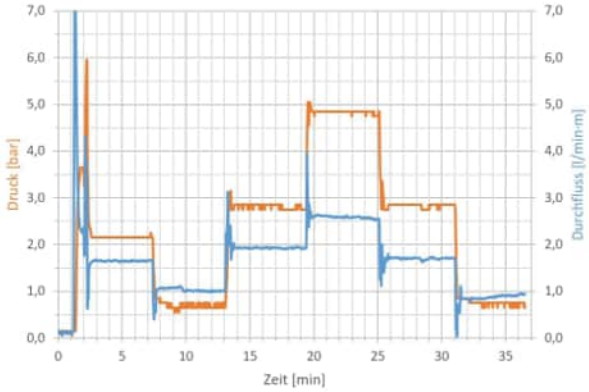
Ergebnis

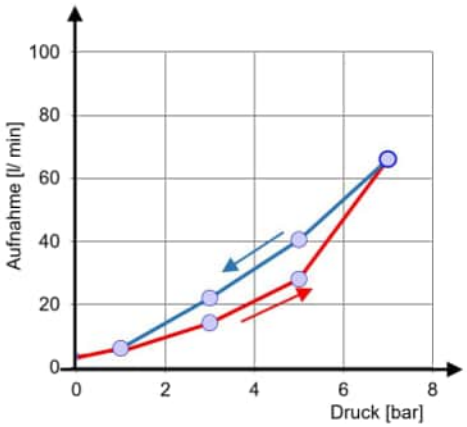
Fluss bei 1 MPa (10 bar)	5,04 l/min	Lugeon	1,03
Länge der Messstrecke	4,9 m		

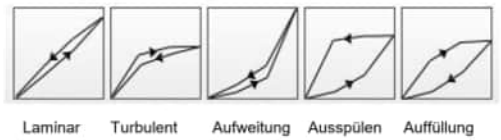
Differenzverfahren

Stufe 2 - Stufe 3	3,34 l/min	nur Stufe 3	**0,67 Lu**

WD-Test Auswertung







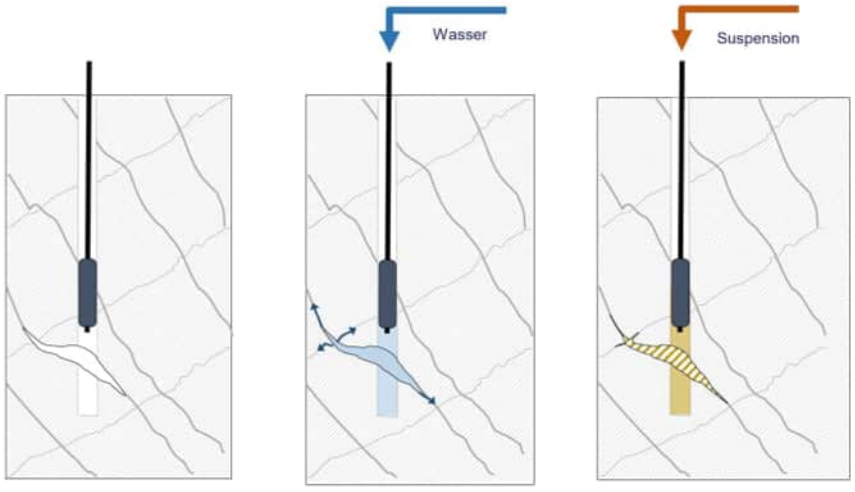
Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

LU-Wert = Verpressgutaufnahme?

- Unterschiedliche Medien und damit anderes Fließverhalten
- Der Lugeon-Test misst die Aufnahmemenge in Litern über die Zeit. Die Messung beginnt erst, wenn sich ein gleichmäßige Wasseraufnahme eingestellt hat. Also wenn alle Hohlräume gefüllt wurden.
- Bei der Verpressgutaufnahme wird das Gesamtvolumen bis zum Abbruch der Injektion bestimmt.

Beispiel im Fels
In der Skizze wird bei einem WD-Test die Wassermenge (blau) bestimmt die durch Trennflächen im Gebirge abgeleitet werden kann, nachdem der Hohlraum gefüllt wurde.

Mit der Verpressgutaufnahme wird das Volumen gemessen um den Bereich zu füllen.



Übersicht

	Verfahren	Bewertungsziel	Kernaussage
Visuelle Prüfverfahren	▪ Bohrkerne ▪ Kontroll- und Nachbarbohrungen ▪ Bohrlochkamera ▪ Bohrloch-Endoskopie	Direkter Nachweis des Injektionserfolgs	Verfüllgrad und Reichweite werden unmittelbar beurteilt
Geomechanische und verformungsbasierte Prüfverfahren	▪ Bohrlochaufweitungsversuche ▪ Rammsondierungen ▪ Lastplattenversuche ▪ Präzisionsnivellement	Verfestigung / Verformung	Vorher-/Nachher-Vergleich der Boden- und Bauwerksreaktion
Geophysikalische Prüfverfahren	▪ Seismik ▪ Georadar ▪ Ultraschall ▪ Thermografie	Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)	Flächenhafte indirekte Kontrolle
Hydraulische Prüfverfahren	▪ WD-/Lugeon-Test ▪ Pegelmessungen ▪ Sickerlinien ▪ Schluck-/Abpumpversuche	Hydraulische Dichtwirkung	Dichtwirkung und Durchlässigkeit werden bewertet
Prozessbegleitende Qualitätskontrolle	▪ Prozessdaten ▪ Verpressdiagramme ▪ Pilgerschritt	Prozesskontrolle	Kontinuierliche Optimierung und Plausibilisierung der Modellvorstellungen
Eignungs- und Langzeitnachweise	▪ Injektionsversuche ▪ Labor ▪ Bauüberwachung ▪ Pinhole-Test ▪ Einlagerungsversuche	Eignung und Dauerhaftigkeit	Bestätigen Materialeignung und Langzeitbeständigkeit

Aberle, Leipersberger - Beurteilung des Injektionserfolges – Injektionsforum 2026, Köln

Fazit

- Stets zu Anfang: ein Ziel bestimmen

=> Material, Einbauverfahren, Gerätetechnik

=> Parameter in einem Verpressregime

- kontinuierliche, digitale Erfassung von Druck, Volumenstrom und Menge in Echtzeit schützt vor Fehlinterpretationen und Folgeschäden.
- Zeitnahe Auswertung so dass Anpassung rechtzeitig möglich sind

Die bloße Überwachung von Herstellparametern und Materialrezepturen reicht für einen gesicherten Nachweis nicht aus.

- Punktuelle Prüfungen gewinnen im Vorher-Nachher-Vergleich an Aussagekraft

Auch wenn kein Absolutwert dennoch wichtige Aussagen bei WD-Test u. ä.

- In Kombination mit gestaffelten Ausführungsverfahren wie dem Pilgerschritt verfeinert die Datenauswertung das Bild des Untergrunds und erlaubt eine dynamische Anpassung des Rasters bis hin zur Einsparung ganzer Verpressserien.

- Erst das Zusammenspiel aus direkten, indirekten und verformungsbasierten Verfahren liefert ein belastbares Gesamtbild.