

INJIZIEREN IM FELS

Gedanken über grundlegende Zusammenhänge

Dipl.-Ing.Dr.mont.Gert STADLER

Erfolgreiche Injektionen im Fels enden mit einem hohen Verfüllungsgrad aller Klüfte, Risse und zusammenhängender Porenräume.

In der großen Mehrheit der Fälle wird versucht, diese Verfüllung mit Zementsuspensionen als Injektionsgut zu erreichen. Damit das auch möglichst homogen und mit dauerhafter Wirkung stattfindet, müssen diese Suspensionen

"leicht eindringen, weit reichen und dauerhaft verbleiben".

1. "Leicht eindringen" hängt u.a. von folgenden Faktoren ab:

der wirksamen Öffnungsweite des Risses, und Transmissivität des mit ihm verbundenen Systems von Strömungsquerschnitten,

- der Fließgrenze (steigend gemessen), Viskosität und Partikelgrößenverteilung in der Suspension zum Zeitpunkt der Verarbeitung (besonders: max. Teilchenabmessung, Agglomerationsneigung, Oberflächenspannung und Filterstabilität).

Verformbarkeit der Rißflanken, Erodierbarkeit von Kluffüllungen und Durchlässigkeitsveränderungen um den Bohrlochrand.

2. Hinter dem Wort "weit reichen" verbirgt sich eine ganze Liste von Parametern und Eigenschaften sowohl der Kluft als auch der Injektionsflüssigkeit und Ihrer Verarbeitung, die u.a. aus folgendem bestehen:

- dem wirksamen Injektionsdruck;
- den wirksamen Strömungsquerschnitten - Hauptabmessungen;
- der Fließgrenze (fallend gemessen), sie bestimmt den Stagnationsgradient als Summe der benetzten Kluftoberflächen, bezogen auf die Eintrittsquerschnitte durch die Bohrlochwand und die Reichweite;
- Filterstabilität, Affinität.

3. Und schließlich, wenn der bestmögliche Füllungsgrad erreicht ist, die Dauerhaftigkeit und Beständigkeit der Maßnahme. Sie bedarf einer gewissen

- **Mindestdurchlässigkeit des abgebundenen Injektionsgutes, sowie**
- **Mindestfestigkeiten (einachsig, Haftzugfestigkeit, Extrusions- und Erosionswiderstände),**
- **Eluations- und Lösungswiderstände,**
- **Schwindfreiheit,**
- **Widerstand gegen Verseifung,**
- **Alterung o.ä.,**
- **unzulässiger Materialveränderung mit veränderlicher Wassersättigung.**

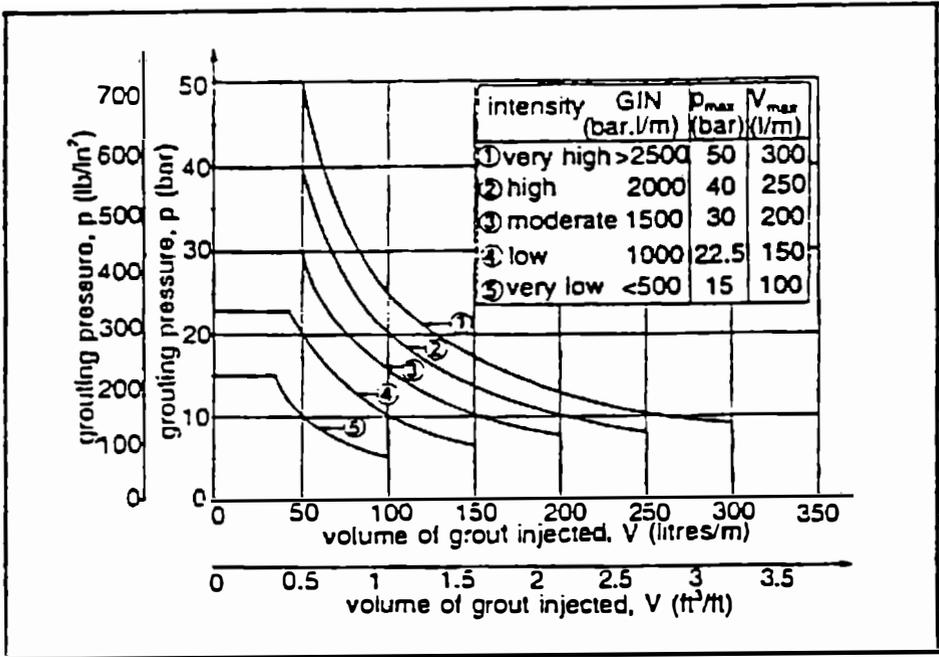
Cambefort hat, in der Literatur der letzten 40 Jahre, früh zu einigen dieser Fragen Stellung genommen. Von ihm stammt auch nachstehende Tabelle über eine vergleichende Betrachtung von Rißweiten und ihrer Anzahl je lfm Bohrung bei gleichen Transmissivitäten, ausgedrückt in Lugeon.

Nombre d'unités Lugeon	Longueur de la passe	Ouverture d'une fissure		
		1 fissure	10 fissures	100 fissures
100	m	mm	mm	mm
	6 3	0,484 0,385	0,225 0,178	0,106 0,083
10	6 3	0,225 0,178	0,106 0,083	0,048 0,038
	6 3	0,106 0,083	0,048 0,038	0,022 0,018

Er kommt darauf über die Anwendung der Dupuit'schen Gleichung für radiales Fließen. Einer groben Vereinfachung zwar; aber Vereinfachungen sind notwendig, wenn man mit den vielen Einflußfaktoren modellhaft in Berechnungen einsteigen will. Wesentlich sind mathematische Darstellungen für radiales Fließen vom Bohrloch weg; sieht bei modernen Autoren "äußerlich" sehr unterschiedlich aus, nämlich je nachdem welche Einflüsse berücksichtigt wurden.

Im Kern der Aussage lassen sich aber tatsächlich alle Formulierungen auf die Dupuit'sche Gleichung zurückführen. Die Vielfalt der Randbedingungen, und die Unmöglichkeit auch nur die wesentlichsten richtig zu berücksichtigen, macht es verständlich, wenn Injektionsanweisungen für die Feldpraxis eine "ganz andere Sprache" sprechen.

Auch Lombardi, beispielsweise, formuliert sein Intensitätskriterium ("GIN") ganz und gar ohne Bezug auf eine von ihm formulierte Strömungsgleichung; er geht vielmehr auf eine spezifische Energiebegrenzung je Passe über. Eine "Integrale" Lösung, die er in seinem Artikel "Grouting design and control using the GIN principle" (Water Power & Dam Construction, Juni 1993) eingehend beschreibt.



Proposed limiting envelopes for grouting.

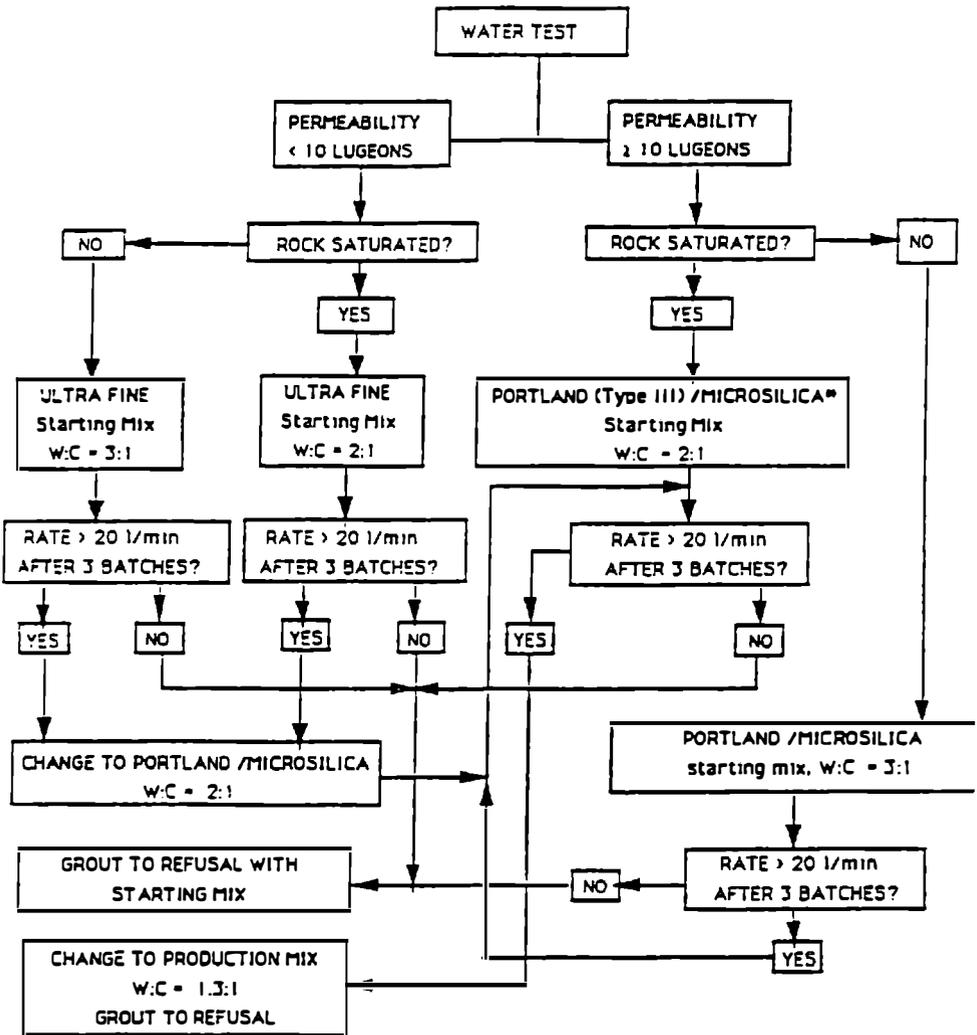
Man kann diese Lösung natürlich kritisch diskutieren, aber sie hat einen großartigen Vorteil: sie ist ihrem Grunde nach plausibel und in hohem Maße praktikabel.

Wenn man ihr noch einige quantitative Ergänzungen hinzufügt, über die Bestimmung des Injektionsdruckes, (z.B. auf dem Weg des Bohrlocheinschließens nach Stadler & Kiss), oder Injektionsgutmengen berücksichtigt, die bis zum Aufbau eines eigentlichen Injektionswiderstandes verpreßt werden, dann erhöht sich die Zielsicherheit in der Anwendung dieser Methode und die Ökonomie der Reichweiten noch um einiges mehr.

Jedenfalls ist sie eine herausragende Neuerung im Vergleich zu herkömmlichen Vorgangsweisen, wo entweder nach Lugeon-Kriterien der W/Z-Wert der Suspensionen festgelegt wird; oder nach arbiträr bestimmten Aufnahmegrenzen,

- Mischungen eingedickt werden,
- die Injektion unterbrochen wird,
- oder andere Abbruchkriterien festgelegt wurden.

Aus vielen praktischen Erfahrungen entstand in dieser Weise auch der "Mischungsfahrplan" von Weaver.



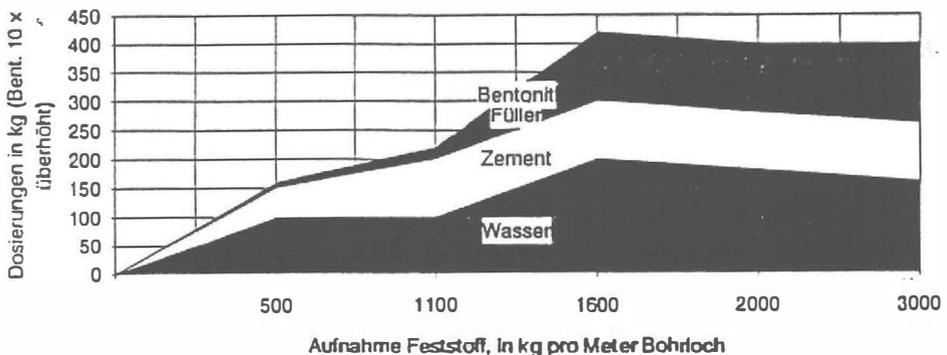
* Microsilica in proportion of 5% by weight of cement:

Preliminary flow chart for selection of grout mixes.

Er stellt darin sehr plausible Entscheidungshilfen zur Verfügung - interessanterweise läßt er aber den Druck ganz außer Betracht.

Der Druck ist andererseits wesentlich mitverantwortlich für die Reichweite und damit den Bohrlochabstand. Er wird in der Literatur meist nur in Bezug zur Tiefe der Packerstellung gebracht, was in manchen Ländern zu Regeln wie: 1 psi/ft depth, oder 1 bar/Meter Tiefe geführt hat. Der Unterschied zwischen beiden "Daumenregeln" ist der 4-fache!, und es läßt sich leicht zeigen, daß eine der beiden Regeln zu einer mangelhaften Verfüllung oder zu zu kleinen Bohrlochabständen führen muß.

Anhand einer aktuellen Injektionsausschreibung stellt sich, als weiteres Beispiel, das Druckstufen- und Mengenprogramm wie folgt dar;



Es geht nur indirekt und in groben Vereinfachungen auf die wirksamen Querschnitte durchströmter Klüfte ein. Verformungen und die Feststellung der Grenze zwischen notwendigen und schädlichen Drücken bleibt unberücksichtigt. Diese Grenze ist für jedes Projekt aber eine höchst individuelle, wichtige Größe! Eine Verbindung von Druckverhalten und Mengenbegrenzung geben solche Anweisungen jedenfalls nicht.

Hier ist das Lombardi'sche "GIN-Prinzip" bei weitem das realistischere Konzept. In seinen Beispielen zum Injektionsverlauf innerhalb der Intensitätsgrenzlinie zeigt er, wie sich unterschiedlich offene Klüfte auf die Entwicklung der Injektion auswirken. Auch er gibt aber keine weiteren Klärungen zum, auf der Y-Achse aufgetragenen, "Injektionsdruck"; und stellt damit einen Druck, der von Anfang an hoch ist, weil die Kluft kleine Abmessungen hat, gleich mit einem Druck, der sich nach weitreichender Füllung einer mäßig weiten Kluft ergibt.

Auch die Anzahl der Klüfte bestimmt die Mengenbegrenzung nicht eindeutig mit. Das Energiekriterium in der Ein-Riß-Injektion versteht sich aber sicher anders als in einer Mehr-Riß-Injektion.

Seit der Einführung dieses "GIN"-Injektionskriteriums haben sich zum Thema "Druck" zwei interessante Neuerungen ergeben.

Der "Ansprechdruck", erstmals 1989 definiert, und in der Folge durch Feder für ÖDK in wissenschaftlichen Versuchen recherchiert, zeigt, daß herkömmliche Suspensionen und hochviskose Harze bei kleinen Kluftweiten bedeutende Eintrittsverluste überwinden müssen. Diese sind oft größer als die vorgegebene Druckbegrenzung!

Die zweite Überlegung (Stadler/Kiss) bezieht sich auf die Möglichkeit, aus der Druckentwicklung Rückschlüsse auf

- die tatsächlichen Belastungen in der Rißstruktur,
- die tatsächlichen, relativ zur Mischung herrschenden Durchlässigkeiten, und
- die tatsächlich sich entwickelnden Sättigungen zu ziehen.

Quelle für diese Information ist die "Transiente Druckanalyse" (TPA), welche aus dem Druckabfall nach einem Bohrlocheinschluß in der ersten Zeit nach Pumpenstopp abgeleitet wird.

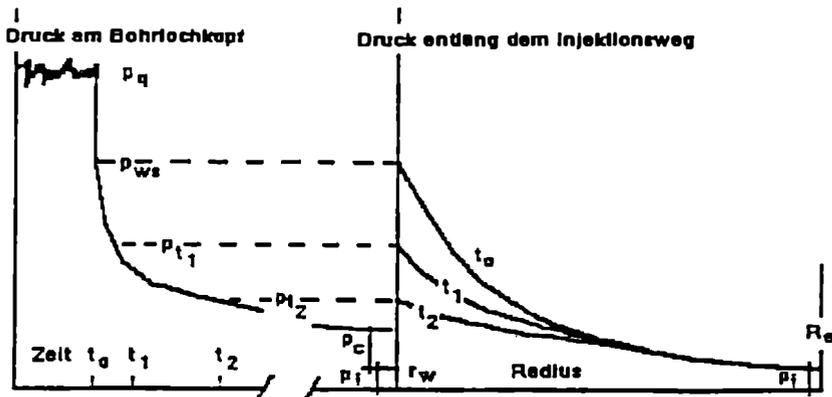
Horner hat die theoretische Grundlage für diese Interpretation schon in den 50er Jahren gelegt; wenn man sie vom porösen Medium auf geklüftete Durchlässigkeiten überträgt, erhält man qualitativ die gleiche Information über die aktuelle Transmissivität der getesteten Formation. Bezogen auf die vorangegangene Pumpzeit ist sie begrenzt auf den injektionstechnischen Einflußbereich der Bohrlochpasse. Bei genügender, zeitlicher Länge der Beaufschlagung hingegen können Informationen über die Durchlässigkeit der System-Ränder gewonnen werden.

Wenn man diese beiden Informations-Elemente auf die nach Lombardi zitierten Injektionsanweisungen "überstulpt", wird die vorgegebene Druckbegrenzung

- um Strömungs- und Eintrittsverluste entkleidet,
- Reichweiten- effektiv gemacht, und
- spiegelt plötzlich das, immer so sehr gewünschte, Bild der wahren Druckbelastung der Rißflanken wider.

Dieses neue Druckbild hat in den wenigsten Fällen zwar mit dem alten Begriff "Injektionsdruck" etwas zu tun, erhöht aber die Umsetzung von seiner Festlegung zur Wirkung ganz wesentlich.

Die rechnerische Beziehung zwischen der "Transienten Druckanalyse" und der Druckausbreitung gegen den Radius ist für den Plattenspalt theoretisch formulierbar, und stellt sich im Diagramm qualitativ wie folgt dar:



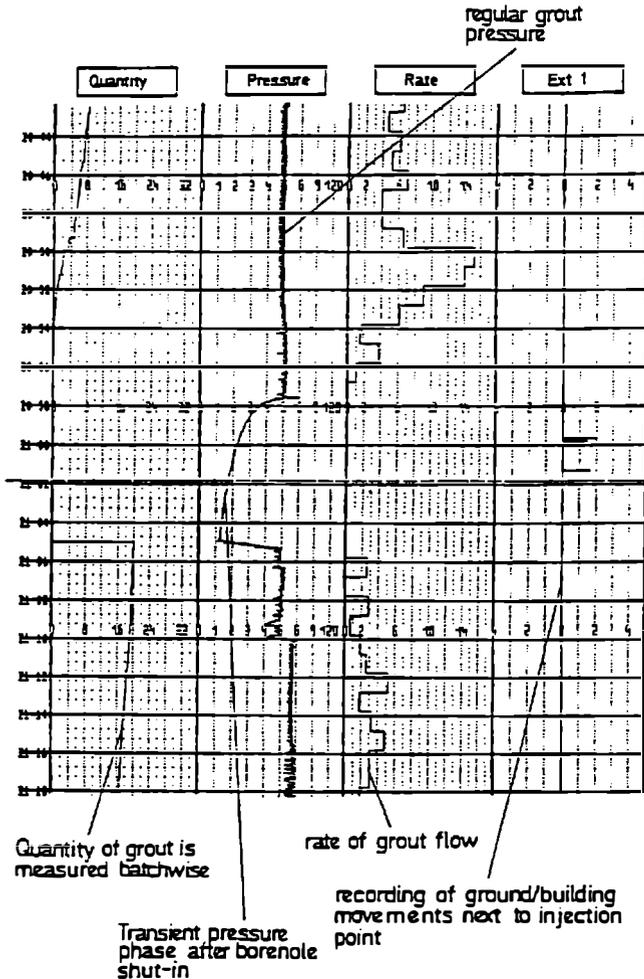
Druckabfall nach Injektionsunterbrechung,
gegenübergestellt dem Druckabfall über den
Radius der Entfernung vom Bohrloch

Die mit Kerngewinn hergestellte Injektionsbohrung liefert nach diesem Modell des "Druckföhigen Injizierens" (PSI) einerseits die Anzahl möglich wirksamer Klüfte, andererseits über die TPA die hydraulisch wirksamen Kluffweiten.

Sie ist insoferne eine mögliche Antwort auf die Rißweitendarstellung von Cambefort; und ergänzt damit auch jedes moderne Entwurfs-, Kontroll- und Steuerkriterium für Injektionen.

Cambefort hat ja damals einfach nur die Dupuit'sche Gleichung mit einem Gradient von 0,1 auf die angenommene Rißanzahl angewendet, um zu zeigen, wie sensibel das "cubic law" auf die Weite der Risse reagiert.

Moderne, EDV-unterstützte Injektions-Prozeßkontrolle erweitert den Informationswert über die Abläufe wesentlich (AIDEK, Kölnbrein), und macht die zitierten Analysen für das "Druckföhliche Injizieren" erst möglich.



ZUSAMMENFASSUNG:

Eine Übersicht über den Stand der Technik, gespiegelt in Injektionsanweisungen zu aktuellen Projekten, zeigt, daß Weaver's "Fahrplan", Lombardi's "GIN-Prinzip" und das hier vorgestellte "Druckfähige Injizieren" neuartige Optimierungen zulassen.

Der Stand des Wissens über Injektionen hat sich in den letzten zehn Jahren offenbar verdichtet. Praxisnahe Forschung hat den Schleier um die "Kunst" des Injizierens etwas gelüftet.

Die Phantasie im Modellieren ist aber nach wie vor gefragtes Instrument für den erfahrenen Injekteur; und er muß sie weiterhin gebrauchen, wenn er nicht mißverständlich durch EDV-gewappnete "Vereinfacher" oder bloße Administratoren überwältigt werden will.

Die Nähe zur "natürlichen Wirklichkeit", in welche sich die theoretisch begründete Methodik beim Injizieren entwickelt, gibt Hoffnung auf weitere Verfeinerungen.

So versteht Lombardi auch sein "GIN-Prinzip", und in gleicher Weise sehen Forscher in der ISRM unter Dr. Widmann zukünftige Entwicklungen.

Das "Druckfähige Injizieren" ist eine solche Verfeinerung. Sie nützt die Möglichkeiten der EDV, macht Erfahrung verarbeitbar, und ermöglicht so, das Ziel einer wirtschaftlichen Injektionslösung nie aus den Augen zu verlieren.

**Autor: Dip.-Ing.Dr.G.Stadler
Insond Ges.m.b.H.
Bahnhofstr. 45
5202 Neumarkt**