

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der
Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt
(<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the
main library of the Vienna University of Technology
(<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Weichgelinjektion zur Abdichtung von Baugrubensohlen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Adrian Kainrath**

E220

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Supanz, BSc

0340713

Murlingengasse 29/2/1, 1120 Wien

Wien, am

Michael Supanz

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jene dankend erwähnen, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit und durch das Studium begleitet haben.

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam für die Möglichkeit, die Diplomarbeit am Institut für Geotechnik zu verfassen. Ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer Univ. Ass. Dipl.-Ing. Adrian Kainrath für die Unterstützung und Hilfe bei diesem Projekt.

Des Weiteren bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. Martin Leute für die vielen zur Verfügung gestellten Produkte. Weiters waren die anregenden und konstruktiven Gespräche mit Herrn Dipl.-Ing. Hornich, Ing. Kogler, Dr. Krenn und Dipl.-Ing. Hoffmann hilfreich für die Erstellung dieser Arbeit.

Meine größte Dankbarkeit gilt jedoch meiner Familie, die mich in der gesamten Ausbildungs- und Studienzeit unterstützt hat. Sie waren auch in schwierigen und sehr schwierigen Zeiten immer an meiner Seite. Ich widme diese Arbeit daher meinen Eltern Martina und Werner sowie meiner Familie Barbara und Heidi.

Kurzfassung

Zur horizontalen Abdichtung von tiefliegenden Baugruben gegen Grundwasser kann – unter anderen – das chemische Injektionsmittel Weichgel verwendet werden. Dieses besteht aus drei verschiedenen Komponenten: Natriumsilikat, Wasser und Natriumaluminat. Die Einzelkomponenten des Weichgels werden in einem bestimmten Verhältnis miteinander vermengt, wodurch sich eine niedrigviskose Lösung ergibt. Dabei entscheidet das jeweilige Mischungsverhältnis über die chemische Reaktionsgeschwindigkeit und die physikalischen sowie rheologischen Eigenschaften der Lösung. Wird Weichgel zur Abdichtung tiefliegender Baugrubensohlen verwendet, hängt der Injektionserfolg auch heute noch im Wesentlichen von den praktischen Erfahrungen der Ausführenden ab, da Qualitäts- und Prüfkriterien für Injektionsmaterialien fehlen. Diese Diplomarbeit soll als Grundlage dienen bzw. einen Beitrag liefern, um Prüf- und Qualitätskriterien für Weichgele festzulegen. Es sind umfangreiche Untersuchungen bezüglich der Mischungsverhältnisse im Hinblick auf Viskositätsentwicklung und Temperaturabhängigkeit während der Gelbildung sowie deren Einfluss auf die Gelier- und Kippzeit gemacht worden. Hierfür werden drei Untersuchungsmethoden herangezogen und verglichen. Darüber hinaus werden Untersuchungen die Synärese und Durchlässigkeit betreffend vorgestellt. Die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche sind so aufgebaut, dass analog dazu Untersuchungen anderer Weichgelprodukte durchgeführt werden können. Somit werden Vergleiche der unterschiedlichen Produkte im Hinblick auf die zuvor erwähnten Einflussparameter möglich.

Bezüglich der Mischungsverhältnisse hat sich Folgendes gezeigt: mit steigendem Reaktivanteil (Natriumaluminat) in der Lösung wird die Gelierzeit verkürzt. Bei steigendem Wasserglasanteil (Natriumsilikat) ist hingegen ein Anstieg der Gelierzeit festzustellen. Der Temperatureinfluss auf die Gelier- und Kippzeit ist nicht für alle Mischungen gleich, sondern immer in Abhängigkeit des jeweiligen Mischungsverhältnisses zu sehen. Betrachtet man das Synäreseverhalten (alterungsbedingte Schrumpfung) von Weichgelen, ist das Mischungsverhältnis mit einem niedrigen Reaktivanteil und hohem Wassergehalt am stärksten vom Schrumpfungsprozess betroffen. Dies führt auch zu einer Durchlässigkeitszunahme über die Zeit.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich Weichgele – insbesondere durch ihre leichte Verarbeitbarkeit und aufgrund ihres ökonomischen Einsatzes – sehr gut zur Sohlabdichtung eignen.

Abstract

Chemical grouting – in particular soft gel grouting – is one option among others in order to horizontally seal shallow excavation pits against groundwater. Soft gels consist of three components: sodium silicate, water and sodium aluminate. These separate elements need to be mixed up in a certain ratio. This process results in a solution of low-viscosity. The specific ratio is critical when it comes to the reaction rate as well as the physical and rheological properties of the solution. In case of using soft gel for the sealing of shallow excavation pits, the success of the grouting process basically depends on the experience of the operator, since quality and evaluation criteria regarding grouting material do not exist. This diploma thesis is supposed to serve as a basis for and contribute to the conception of these criteria for soft gels. Diverse mixing ratios of soft gels were examined with regard to the development of their viscosity and their temperature dependence in the course of the chemical reaction. Moreover, the influence of the mixing ratios on the gelling and tilting time was explored. Thus, three different methods of investigation were used and, subsequently, compared. Beyond that, examinations of the syneresis and permeability of the soft gels are presented. All the experiments described in this thesis are set up in a way that allows for an analog examination of other soft gels. Thus, different products can be compared with regard to the stated influencing factors.

Concerning the mixing ratios the following results were obtained: An increasing share of reactive (sodium aluminate) reduces the gelling time whereas a relatively larger percentage of water glass (sodium silicate) results in its increase. The influence of the temperature on the gelling and tilting time differs depending on the particular mixing ratio. As far as the syneresis (age-related contraction) of soft gels is concerned it was observed that solutions with a low amount of reactive and a higher percentage of water glass are affected most resulting in an increase of permeability over time.

In conclusion, it is noted that soft gels are an appropriate method for sealing excavation pits since they are economical and easy to process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problembeschreibung	2
1.2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	2
1.3	Aufbau der Diplomarbeit	3
2	Grundlagen der Injektionstechnik	4
2.1	Notwendigkeit der Grundwasserabspernung	4
2.2	Arten der Grundwasserabspernung	4
2.3	Grenzen der Injektion	5
2.4	Injektionsmaterialien	7
2.5	Historische Entwicklung	9
2.6	Demonstrationsbaugrube Ringcenter II, Berlin-Lichtenberg	10
2.7	Stand der Injektionstechnik	11
3	Chemie und Physik von Weichgelen	14
3.1	Allgemeine Beschreibung von Gelen	14
3.1.1	Hartgel	14
3.1.2	Weichgel	14
3.2	Eigenschaften von Weichgel und deren Ausgangsstoffen	15
3.2.1	Natriumsilikat (Wasserglas)	15
3.2.2	Natriumaluminat und Natriumbikarbonat (Reaktiv/Härter)	23
3.2.3	Wasser	24
3.3	Herstellung der Ausgangsstoffe	25
3.3.1	Herstellung von Natriumsilikat	25
3.3.2	Natriumaluminat	26
3.4	Gelbildungsprozess	26
4	Grundlagenversuche an Weichgelen	29
4.1	Untersuchungen zur Gelier- und Kippzeit	29
4.2	Versuchsrahmen	30
4.2.1	Versuchsumfang	31
4.2.2	Nomenklatur	32
4.3	Anmischen der Weichgelproben	32
4.4	Ermittlung der Gelierzeit mittels visueller Kontrolle	35
4.4.1	Ergebnisse und Interpretation der visuellen Ermittlung	36
4.5	Ermittlung der Kippzeit mittels Kipptest	39
4.5.1	Ergebnisse und Interpretation des Kipptests	40
4.6	Ermittlung der Gelier- und Kippzeit mittels Rotationsviskosimeter	42
4.6.1	Messprinzip	45

4.6.2	Versuchsdurchführung.....	46
4.6.3	Ergebnisse und Interpretation der Viskositätsbestimmung	47
4.7	Untersuchungen der Gelier- und Kippzeit mittels Marsh-Trichter	55
4.7.1	Versuchsdurchführung.....	55
4.7.2	Ergebnisse und Interpretation der Marsh-Trichter-Versuche	56
4.8	Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren und Messergebnisse	57
4.9	Untersuchungen des Fließverhaltens von Weichgelmischungen.....	59
5	Bestimmung der Gelstärke mit dem Kegelfallgerät.....	61
5.1	Versuchsdurchführung	62
5.2	Ergebnisse und Interpretation	63
6	Untersuchungen der zeitlichen Veränderung (Synärese) von Weichgel	65
6.1	Ermittlung der Synärese anhand von Standversuchen.....	66
6.1.1	Versuchsdurchführung.....	66
6.1.2	Ergebnisse und Interpretation.....	68
6.2	Ermittlung der Synärese anhand des zeitlichen Verlaufs der Dichte	71
6.2.1	Versuchsdurchführung.....	71
6.2.2	Ergebnisse und Interpretation.....	73
6.3	Vergleich der Versuchsmethoden Standzylinder und Dichtebestimmung.....	75
7	Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit	76
7.1	Darcysches Fließgesetz	76
7.2	Durchlässigkeit	77
7.3	Probenherstellung	78
7.3.1	Korngrößenverteilung	78
7.3.2	Lagerungsdichte	78
7.3.3	Probeneinbau und Versuchseinrichtung	80
7.4	Bestimmung des pH-Wert der Weichgellösung und des Eluats.....	81
7.5	Ergebnisse und Interpretation	82
7.5.1	Vergleich und Interpretation der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Lagerung	82
7.5.2	Vergleich unterschiedlicher Mischungsverhältnisse.....	83
7.5.3	Vergleich unterschiedlicher Wasserglasmoduln	84
7.5.4	Vergleich unterschiedlicher Reaktivanteile und Reaktive.....	85
8	Zusammenfassung.....	86
9	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	88
10	Literatur.....	91
11	Abbildungsverzeichnis	94
12	Tabellenverzeichnis	97
13	Anhang.....	98

1 Einleitung

Um eine tiefliegende Baugrubensohle, deren Untergrund aus durchlässigen Schichten besteht, gegen das Grundwasser abzudichten, werden unter anderem Weichgele eingesetzt.

Weichgele zählen zu den chemischen Injektionsmitteln. Diese haben den Vorteil, dass sie keine Feststoffe besitzen und dadurch ein besseres Penetrationsverhalten als zementbasierte Injektionsmittel in Sandböden aufweisen.

Das Injektionsmittel „Weichgel“ besteht aus drei verschiedenen Komponenten: Natriumsilikat, Wasser und Natriumaluminat. Die Einzelkomponenten des Weichgels werden in einem bestimmten Verhältnis miteinander vermengt, wodurch sich eine niedrigviskose Lösung ergibt. Dabei entscheidet das jeweilige Mischungsverhältnis über die chemische Reaktionsgeschwindigkeit und die physikalischen sowie rheologischen Eigenschaften der Lösung. Trotz des Faktums, dass Weichgele zum Abdichten von Baugrubensohlen schon seit Jahrzehnten Verwendung finden, existieren keine allgemein gültigen Mischverhältnisse und Vorgaben. Dies liegt einerseits an der Inhomogenität des Baugrundes, andererseits an der Vielzahl unterschiedlicher Produkte auf dem Markt. Aus diesem Grund müssen stets unterschiedliche Mischungsverhältnisse in Hinblick auf den Untergrund überprüft und an diesen angepasst werden. Nur dadurch kann eine Eignung hinsichtlich Injektionsdauer und Ausbreitungsverhaltens des Weichgels im Baugrund festgestellt werden.

Generell herrscht seitens der Auftraggeber und Planer eine grundlegende Verunsicherung dieses Material betreffend. Dem Planer fehlt in der Regel das nötige Spezialwissen, wodurch häufig wesentlich teurere Bauverfahren bevorzugt zum Einsatz kommen. Erschwerend wirkt dabei das Fehlen von allgemein gültigen Normen und Regelwerken zur Dimensionierung und Konzeption von Weichgelsohlen sowie klare Vorgaben zur Eignungsprüfung und Qualitätssicherung für Injektionsmaterialien.

Vor dem Hintergrund dieses existierenden Forschungsbedarfs ist es zu einer Kooperation zwischen dem Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien und der Firma ZÜBLIN Spezialtiefbau Ges.m.b.H. mit dem Ziel Qualitätskriterien und Prüfungen für Injektionsmaterialien und injizierte Böden zu entwickeln [KAINRATH, 2012]. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts entstand die vorliegende Diplomarbeit, die die chemischen Grundlagen von Weichgelinjektionen detailliert aufbereitet und die Durchführung von Grundsatzversuchen zur physikalischen Beschreibung von Weichgelmischungen erläutert.

1.1 Problembeschreibung

Für die Abdichtung von feinkörnigen Lockergesteinsböden werden unter anderem Weichgele eingesetzt. Zur Durchführung von Abdichtungsinjektionen mittels Weichgel müssen jedoch behördliche Bewilligungen eingeholt und detaillierte Angaben über das Produkt gemacht werden. Es dürfen nur zertifizierte und für den europäischen Raum (CE – Kennzeichnung) zugelassene Produkte zur Anwendung kommen. Es bedarf dabei genauer Angaben über die Menge, Art und Beschaffenheit des Silikatgels und des Eluates, welches aus dem Silikatgelgemisch ausgetragen wird. Der Wissensstand über die grundsätzlichen Eigenschaften von Weichgel ist meist jedoch nur sehr vage. Zudem werden Informationen über die chemischen und rheologischen Eigenschaften von den Produktherstellern nur selten zur Verfügung gestellt. Das jeweilige Mischungsverhältnis beeinflusst die Gelbildung und die Durchlässigkeit. Da aber das Silikatgel immer individuell dem jeweiligen Bauvorhaben entsprechend angemischt wird, können keine einheitlichen Aussagen getätigt werden. Ein weiteres Problem stellt die Gelalterung dar, diesbezüglich gibt es nur wenig Erfahrungswerte zur Beurteilung des Alterungsprozesses. Das führt bei den Bauherren und ausführenden Firmen gleichermaßen zu Unsicherheiten in Bezug auf Projekte mit tiefliegenden Dichtsohlen, bei denen die Weichgelinjektion zum Einsatz kommen soll.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit versucht diesen real existierenden Unsicherheiten etwas entgegen zu setzen. Es werden Weichgelprodukte genauer analysiert und die chemische Zusammensetzung der Bestandteile Natriumsilikat, Natriumaluminat und Wasser sowie deren Mischungsverhältnis und entsprechendes Verhalten zueinander betrachtet. Ausgehend von einem Überblick der am Markt befindlichen chemischen Injektionsmaterialien, soll eine Klassifizierung nach Einsatzmöglichkeiten und Haupteigenschaften erstellt werden. Anschließend werden mittels Versuchen die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Weichgelen analysiert und wesentliche Einflussfaktoren auf die Gelbildung die Temperatur, das Mischungsverhältnis und die Mischreihenfolge im Zeitablauf untersucht. Die für die Versuche verwendeten Proben wurden von relevanten Produktherstellern, wie WÖLLNER und OVERLACK zur Verfügung gestellt.

1.3 Aufbau der Diplomarbeit

Zu Beginn wird die grundsätzliche Notwendigkeit und Möglichkeit einer Grundwasser-
abspernung erläutert. Ein Überblick über die zur Verfügung stehenden Injektionsmaterialien
und deren Anwendungsgrenzen wird gegeben. Es werden die Ausgangsstoffe von Weich-
gel und der Gelbildungsprozess ausführlich dargestellt. Nach dieser grundlegenden
Erläuterung zu Weichgel, wird der Versuchsumfang festgelegt. Die Grundsatzversuche
orientieren sich an der zeitlichen Entwicklung von Weichgel – an dem Anmischvorgang,
dem Gelbildungsprozess, der Alterung und deren Einfluss auf die Dichte sowie Durchlässig-
keit. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert.

2 Grundlagen der Injektionstechnik

2.1 Notwendigkeit der Grundwasserabsperrung

Eine Grundwasserabsperrung – im Vergleich zu anderen Maßnahmen wie beispielsweise Grundwasserabsenkungen – kann für eine Trockenlegung von Baugruben, die sich im Grundwasserbereich befinden, aus verschiedenen Gründen erforderlich sein, z.B.

- wenn eine Entnahme von Grundwasser aus Schonungsgründen nicht erwünscht und eine Wiederversickerung nicht möglich ist,
- wenn aus einer Grundwasserabsenkung unzumutbare Folgen im Umfeld zu erwarten sind, z.B. Setzungen,
- wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes so groß ist, dass der Wasserandrang bei einer Absenkung technisch nicht zu beherrschen ist,
- wenn eine Abdichtung als Bauhilfsmaßnahme kostengünstiger ist als eine reine Grundwasserabsenkung,
- wenn das Baufeld so beengt ist, dass keine Grundwasserhaltung möglich ist.

2.2 Arten der Grundwasserabsperrung

Im Idealfall werden bindige Böden mit ausreichender Mächtigkeit, wie z. B. Ton oder Schluff, als natürliche Sohlabdichtung genutzt (Abbildung 1, Bauweise 1 und 4). Liegt jedoch eine wenig durchlässige Schicht so tief, dass eine Einbindung der seitlichen Dichtungswände nicht in Frage kommt, so kann man das Grundwasser auch in der Baugrubensohle durch Anwendung z.B. des Injektionsverfahrens absperren. Diese Bauweise wird auch „Wand – Sohle – Bauweise“ genannt. Dabei wird mittels vertikaler, wasserdichter Baugrubenumschließung – z.B. durch eine Schlitzwand, Spundwand oder überschnittene Bohrpfahlwand und einer künstlichen Dichtsohle – ein auftriebssicherer Trog hergestellt, siehe Abbildung 1, Bauweise 2 und 3. Die betreffende Bodenschicht wird hierbei penetriert oder verdrängt. Das vorhandene Porenwasser soll verdrängt werden, um es dann durch Suspensionen, Gele oder Kunstharze zu ersetzen. Der für die Injektion nötige Verpressdruck darf nicht größer sein, als die effektiven Spannungen im Boden (unter 20 bar [DONEL, 1995]), um die natürlichen Fließwege zwischen den Bodenpartikeln nicht aufzubrechen und das Einpressgut ausreichend in vorhandene Poren und Hohlräume einzuleiten. In der Praxis hat sich gezeigt, dass schon relativ dünne künstliche Sohlen von 1,0 - 1,5 m ausreichen, die Durchlässigkeit anstehender Böden um ca. zwei bis drei

Zehnerpotenzen zu verringern [SCHNELL, 1995]. Die Sohle und die Seitenwände der Dichtungswanne sind auf Erd- und Wasserdruckbelastung zu bemessen und die Auftriebssicherheit ist nachzuweisen. Bei der tiefliegenden Dichtungssohle mittels Weichgelinjektion ist die Auftriebssicherheit durch genügend Bodengewicht oberhalb der Dichtungssohle zu gewährleisten.

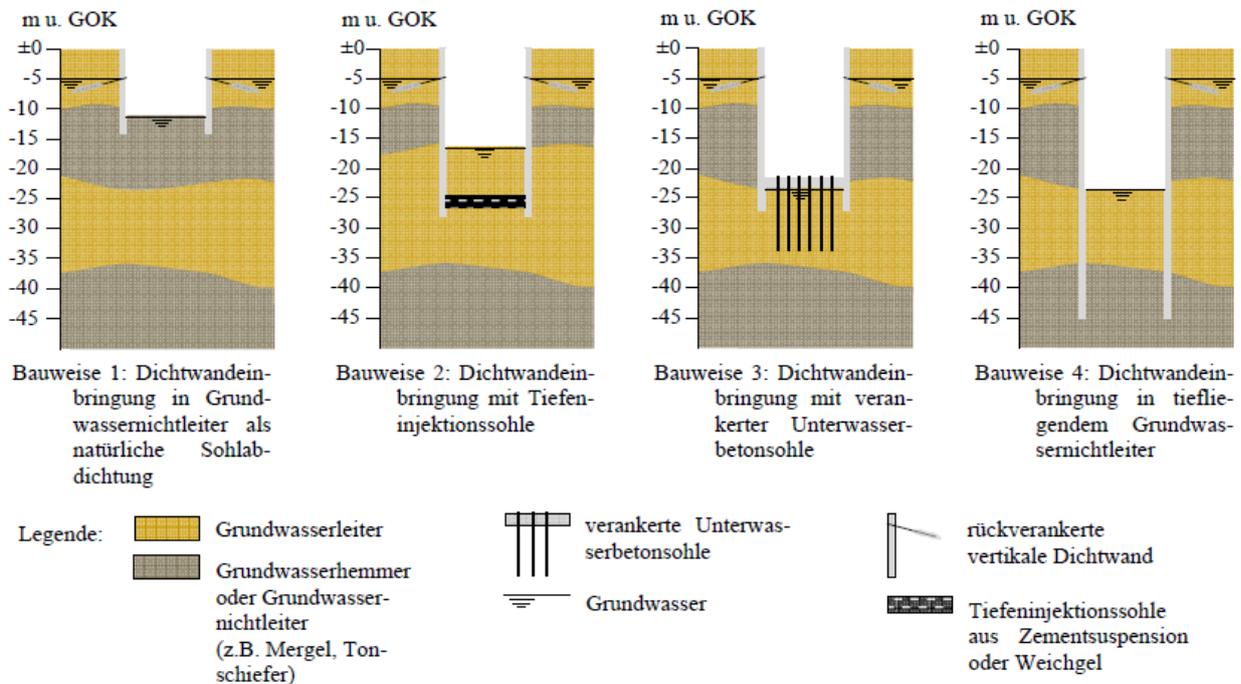


Abbildung 1: Bauweisen zur Herstellung (nahezu) wasserdichter Baugruben [geändert nach JUNGE, 1996]

2.3 Grenzen der Injektion

Die Wahl des Ausgangsmaterials für die Injektion wird von mehreren Parametern bestimmt. Neben der Umweltverträglichkeit und den Materialkosten stellt sich die Frage, ob der betreffende Boden eine Verpressung mit Suspension im Sinne einer Penetration des Porenraumes noch zulässt oder ob chemische Lösungen eingesetzt werden müssen. Abbildung 2 zeigt die Grenzen der Injizierbarkeit. Bei zunehmend enger werdendem Porenraum verhindern Filtrationseffekte eine vollständige Penetration des Untergrundes mit Zementsuspension, was zu Fehlstellen in der Dichtsohle führt. In diesem Fall bedarf es eines chemischen Injektionsmittels, wobei das sogenannte Weichgel (Wasserglaslösung) hier am häufigsten eingesetzt wird. Dieses hat die Fähigkeit zeitlich verzögert zu polymerisieren. Dabei wird der Porenhohlraum mit einer Weichgellösung ausgefüllt, welche das Grundwasser verdrängt. Nach der Polymerisation besitzt das Weichgel eine abdichtende Wirkung, was die Durchlässigkeit des injizierten Untergrundes vermindert. Weichgel ist vor allem bei

den chemischen Injektionen aufgrund seiner geringen Viskosität ($\eta = 10 \text{ mPas}$) und den damit verbundenen positiven Fließeigenschaften als besonders geeignet anzusehen. Als Faustregel gilt, dass solche Böden mit Chemikalien injiziert werden können, in denen eine Grundwasserabsenkung durchführbar ist (bis $k_f = 10^{-5} \text{ m/s}$) [SCHNELL, 1990]. Die Grenze der Anwendbarkeit von Weichgel liegt in der grobschluffigen Fraktion [TAUSCH, 1980]. Die in Abbildung 2 dargestellten Grenzen der Injizierbarkeit können jedoch nur als grobe Abschätzung angesehen werden, da bodentechnische Parameter – wie die Lagerungsdichte und die Ungleichförmigkeitszahl – unberücksichtigt bleiben. Ferner wird das Injektionsmittel selbst nur pauschal betrachtet. Die Anwendungsgrenzen sind experimentell bestimmt – dadurch findet man in der Literatur (z. B. CAMBEFORT, 1969; DONEL, 1995; SCHULZE, 1992) abweichende Angaben. Somit können Auswahlkriterien nur mit gewisser Erfahrung richtig eingeschätzt und angewendet werden.

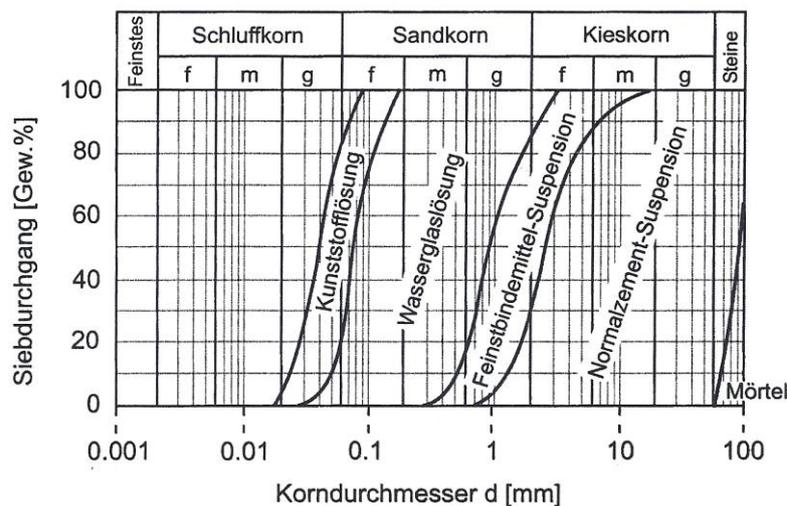


Abbildung 2: Injektionsmittel in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung [SMOLTCZYK, 2001]

Eine Verbesserung der Anwendbarkeit der Injektionskriterien wird erreicht, wenn neben den Baugrundparametern auch jene des Injektionsmittels herangezogen werden. CAMBEFORT [1969] ermittelte für Zementsuspensionen eine Beziehung zwischen einem mittleren Teilchendurchmesser des Einpressmittels und der Durchlässigkeit des Bodens, bei deren Einhaltung mit einer Penetration zu rechnen ist [SCHULZE, 1992], siehe Abbildung 3. Es sind Eindringgrenzen im technischen Sinn nur bei Feststoff-Injektionen möglich, da nur dort Teilchen vorhanden sind, die zurückgehalten werden können. Die Eindringgrenzen für Wasserglaslösungen (Weichgel) sind dagegen eher technologischer Natur [SCHULZE, 1992] und sind bestimmt durch Injektionsdauer und Mischungsverhältnis.

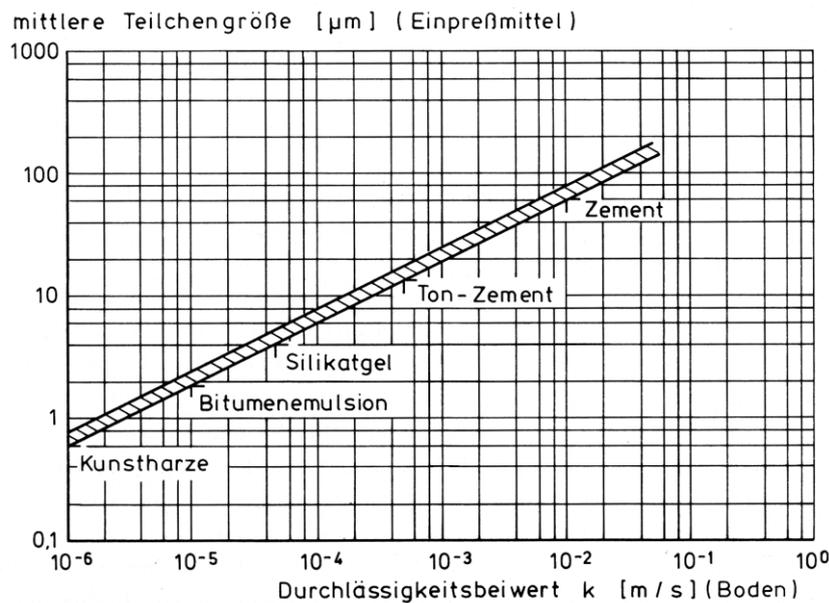


Abbildung 3: Grenzen der Eindringfähigkeit von Injektionsmaterialien [CAMBEFORT, 1969]

2.4 Injektionsmaterialien

Die Wahl des Injektionsmaterials ist von den gegebenen Bodeneigenschaften (Korngrößenverteilung, Porenanteil, Durchlässigkeit) abhängig. Nur in Kiesen und groben Sanden lassen sich Zementsuspensionen verwenden. In den darunter liegenden Kornbereichen werden chemische Injektionsmaterialien bevorzugt eingesetzt.

Die folgende Abbildung 4 soll einen Überblick über die gängigen Injektionsmaterialien verschaffen und einige Anwendungsbeispiele geben. Das am häufigsten eingesetzte Injektionsmittel ist die Zement- und Tonzementsuspension, jedoch bedingt durch die Anwendungsgrenzen nicht universell einsetzbar. Emulsionen sind heute weitestgehend von Feinstzementsuspensionen abgelöst und aus Umweltschutzgründen selten verwendet. Die Wasserglaslösungen (Weichgel) werden in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Zu den chemischen Mitteln zählen weiters die auf Acrylamiden basierenden Gele, Harze oder Schäume.

Die Schaumstoffe zeichnen sich im Unterschied zu anderen chemischen Injektionsmitteln durch die unter Gasentwicklung eintretende Reaktion des Aufschäumens aus, welches zu einer erheblichen Volumszunahme unter Druckentwicklung führt. Dabei werden selbsttätig Sekundärinjektion feiner Risse und Poren in der Umgebung erreicht [KUTZNER, 1991]. Bedingt durch die hohen Materialkosten kommen Schaumstoffe nur bei kleinräumigen Spezialanwendungen zum Einsatz.

Injektionsmittel für die Abdichtung und Verfestigung von Fels und Lockergestein		
Suspension	Emulsion	Lösung
Aufschlämmung fester Partikel (1-100µm) in einem Suspensionsmittel	Aufschwemmung einer Flüssigkeit in einer anderen meist unter Verwendung von Stabilisatoren	Auflösung fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe in einem Lösungsmittel
Mischung aus: - Wasser und Zement - Wasser, Zement u. Zusätze - Wasser Ton und Zement	Mischung aus: - Wasser, Bitumen, Emulgator und Koagulationsmittel	Mischung aus: - Wasser, Natriumsilikat und wasserlöslichem Härter
Anwendungsbeispiele		
Dichtungsschleier im Tunnel und Talsperrenbau Injektion im Kies	Injektion in Sand und Kies Fundamentverstärkung und Vertiefung Sohlabdichtung	Injektion im Sand Fundamentverstärkung und Vertiefung Sohlabdichtung
Kosten [€/l] (inkl. Personal, Geräte und Material, ohne Baustelleneinrichtung)		
Zementsuspension 0,2 – 10	Emulsion 0,5 – 10	Silikatgel 0,4 – 10
Feinstbindemittel 0,6 – 10	Kunstharz 10	Polyamid 8

Abbildung 4: Gliederung der Injektionsmittel [SMOLTZCYK, 2001]

Acrylatgele werden vorrangig als Schleierinjektionen zur Abdichtung von Bauwerkswänden eingesetzt. Hierbei wird das undichte Bauteil von innen nach außen durchbohrt. Der Bohrraster ist von der Bauwerksgeometrie, dem anstehenden Baugrund und der gewählten Technologie (Ein- oder Mehrstufeninjektion, Fördermenge, Injektionsdruck etc.) abhängig. Mittels Packer wird gewährleistet, dass die Injektion in Richtung Baugrund stattfindet. Mit einer Zwei-Komponentenpumpe werden die Bestandteile erst beim Packer zusammengeführt. Das Acrylatgel ist anfangs niedrigviskos. Es breitet sich im Baugrund aus und verdrängt das im Porenraum vorhandene Wasser. Je nach Produkt und Mischungsverhältnis setzt die Reaktionszeit ein und bildet einen elastischen Injektionskörper [HAACK, 2007], siehe Abbildung 5.

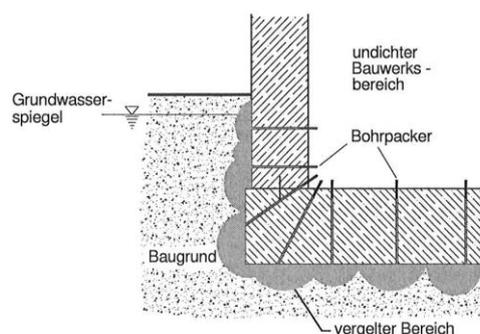


Abbildung 5: Prinzip der Gelschleierinjektion [HAACK, 2007]

Harze zeichnen sich durch ihre geringe Viskosität aus, sind aber nur bedingt im neutralen oder schwach basischen Baugrund einsetzbar, da sie zur Aushärtung eine saure Umgebung benötigen (pH-Wert < 7).

2.5 Historische Entwicklung

Im Jahr 1802 führte der Franzose CHARLES BERIGNY erstmals eine Zementinjektion unter einem Brückenpfeiler durch. Von ihm stammt die Bezeichnung „procede d`injection“, was übersetzt so viel wie „Injektionsverfahren“ bedeutet.

Die Anfänge der Untergrundinjektion reichen bis in das frühe 19. Jahrhundert zurück. Eine Suspension aus Wasser und Puzzolan-Zement diente als Basis zur Füllung von großen Hohlräumen im Boden. Die Drücke resultierten anfangs allein aus der Schwerkraft des Füllmaterials. Ein Jahrhundert später kamen im Zuge der Weiterentwicklungen der Injektionstechnik durch die Verbesserung der Maschinen und Geräte bereits regelbare Hochdruckpumpen und Druckschreiberdiagramme zum Einsatz [KUTZNER, 1991]. Die nur beschränkte Anwendung für Abdichtungen im Bereich von Mittel- bis Grobkies im Berg- und Wasserbau war in der relativ geringen Mahlfeinheit von Zement begründet.

Erst durch die Erfindung der Chemikalinjektion durch den Holländer H. JOOSTEN [1926] war es möglich, die engen Kanäle zwischen den Poren des Lockergesteins zu passieren. JOOSTEN verpresste, in dem nach ihm benannten Verfahren, nacheinander zwei Chemikalien in wasserdurchlässige Bodenschichten. Das aus einer Wasserglaslösung und einer konzentrierten Salzlösung (Chlorcalcium) spontan entstehende (Kieselsäure-) Gel ist in der Lage, den Boden dauerhaft zu verfestigen und die versteinerten Bodenschichten nachhaltig wasserundurchlässig zu machen [CAMBEFORT, 1969]. Das Verfahren wurde in Deutschland zum Einkomponentenverfahren, dem "Monosolverfahren", weiterentwickelt. Hierbei wurde mit einer einzigen Injektion eine Lösung aus stark verdünntem Wasserglas und Natriumaluminat verpresst. Die Gallerte aus Aluminiumsilikat hat aber nur eine geringe Verfestigungswirkung und wird einzig für Abdichtungen genutzt. Dabei werden Durchlässigkeiten von $k_f = 10^{-7}$ bis 10^{-8} m/s erreicht.

Bei einem anderen Verfahren, dem sogenannten "Monodurverfahren", bediente man sich einer Emulsion von Wasserglas und einer organischen Säure als Härterkomponente. Das Injektionsmittel reagiert in regelbarer Zeit und scheidet dabei Kieselsäure von fester, gipsartiger Konsistenz aus. Diese verkittet dann den Boden [SCHULZE, 1992].

Nach 1945 wurden Chemikalgemische sehr niedriger Viskosität entwickelt. An der Oberfläche angemischt, wurden diese in Bereichen von Lockergestein bis Feinsand injiziert. Ein

Großteil der nach dem Krieg entstandenen Büro- und Geschäftshäuser, sowie innerstädtische Verkehrsanlagen in zerstörten Großstädten konnten so schnell und günstig errichtet werden [KUTZNER, 1991]. Genaue Erkenntnisse auf dem Gebiet der mechanischen Eigenschaften der injizierten Böden und die Entwicklung des Ventilrohres ließen immer bessere Abschätzungen hinsichtlich des verfestigten Bereiches zu. Die Einpresskörper dienten nun nicht mehr einzig der Schaffung einer erhöhten Sicherheit. Sie konnten als Bauelement fest in die Planung (z.B. für Unterfangungen) einbezogen werden [CAMBEFORT, 1969]. Mit den höheren Ansprüchen des Umweltschutzes Anfang der 90er Jahre ist der Einsatz von Chemikalinjektionen stark zurückgegangen. Als Konsequenz der nachhaltigen Beeinträchtigung der Grundwasserbeschaffenheit beim Einsatz von organischen Härten, wurde bereits seit Ende der 80er Jahre weitgehend auf deren Einsatz in Europa verzichtet [SCHNELL, 2001].

2.6 Demonstrationsbaugrube Ringcenter II, Berlin-Lichtenberg

Speziell in Berlin wurden sehr große Mengen an Weichgelinjektionen durchgeführt. Der Baugrund ist geprägt von hohen Grundwasserständen und sehr mächtigen Sandschichten ohne einer natürlichen Stauschicht in angemessener Tiefe. Üblicherweise wurden Gebäude aller Art durch Grundwasserabsperzung mittels Wand-Dichtsohle-Verbau errichtet. Der erhebliche Umfang der Weichgelinjektion (in Berlin von 1990 bis 1995 ca. 100.000 m³ Injektionsvolumen) führte letztlich im Sommer 1995 in Berlin zum Bewilligungsstopp für Baumaßnahmen mit Weichgelsohlen. Die Gewässeraufsicht hat angeregt, ein Gutachten zu erstellen, welches der Frage einer Beeinträchtigung des Grundwassers oder gar einer Gefährdung des Trinkwassers aus der Anwendung von Weichgeleinpressungen nachgehen sollte. Das Gutachten wurde 1996 fertiggestellt und kam zu dem Schluss, dass keine langfristige Veränderung des Grundwassers zu erwarten wäre. Auf Wunsch der Wasserrechtsbehörde sollten jedoch die Aussagen der Gutachtergruppe an einem konkreten Bauprojekt überprüft werden. Realisiert wurde dieser Wunsch an dem Demonstrationsbauvorhaben (DBV) Ringcenter II in Berlin-Lichtenberg. Die Grundwassermessstellen sind so angeordnet, dass der Grundwasserzustrom wie auch -abstrom räumlich erfasst und Wasserproben entnommen werden können. Folglich war eine hydraulische und hydrochemische Beobachtung des umgebenden Raumes der Baugrube möglich. Die Restwassermengen in der Baugrube sind ebenfalls analysiert worden. Der Untersuchungszeitraum betrug drei Jahre. Als Leitparameter für eine potenzielle Grundwasserbeeinträchtigung wurden die anorganischen Wasserinhaltsstoffe Aluminium, Natrium und Kieselsäure untersucht. Weiters sind die elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und

Temperatur mittels Sonden aufgezeichnet worden. Mit den Messergebnissen des Untersuchungsprogrammes sind diverse Modellrechnungen durchgeführt worden. Dies führte nach drei Jahren zu der folgenden Bewertung, dass von den eingesetzten Stoffen bei fachgerechter Ausführung keine schädliche oder nachhaltige Beeinträchtigung der Grundwassersqualität ausgeht [SCHNELL, 2001]. Zwar führt eine Weichgelinjektion zur kurzfristigen, signifikanten Anhebung des pH-Wertes im angrenzenden Grundwasser, jedoch laufen die zu erwartenden Reaktionen infolge rascher Neutralisierung durch stetige Pufferung im Grundwasserstrom sehr rasch ab. Die wichtigste Erkenntnis beim DBV Ringcenter II ist, dass nach etwa 10 m Fließstrecke im Grundwasserabstrom keine Einwirkung der Injektion mehr messbar ist. Eine detaillierte Beschreibung aller erhobenen Daten und erzielten Ergebnisse findet sich in BRAUNS [1997,1998], EISWIRTH, OHLENBUSCH und SCHNELL [1997, 1998, 1999] sowie SCHNELL und OHLENBUSCH [2001].

Trotz der Fachgutachten und der Untersuchung des Demonstrationsbauvorhabens Ringcenter II, blieb der Zulassungsstopp, bis auf wenige Ausnahmen z.B. Baugrube Spreedreieck, in Berlin bis heute aufrecht.

2.7 Stand der Injektionstechnik

Einpressarbeiten zur Abdichtung und Verfestigung des Baugrundes sind heute ein im Grundbau vielfach angewendetes Spezialverfahren mit einer breiten Anwendungspalette. Die Theorie der Injektion ist aber trotz der für den Spezialtiefbau vergleichsweise langen Entwicklungsgeschichte noch nicht abschließend geklärt. KÜHLING / WIDMANN [1994] beschreiben den Wissensstand folgendermaßen: „Trotz der großen Injektionserfolge wird oftmals noch nach der Methode trial and error verfahren.“ Auch heute noch hat sich an diesem Stand nicht viel geändert. Der Injektionserfolg wird noch immer wesentlich von den praktischen Erfahrungen der Ausführenden bestimmt.

Zur Herstellung einer Abdichtungssohle mit Weichgel sind verschiedene Injektionsverfahren möglich. Das Injektionsmittel wird mit Injektionslanzen, Ventilrohren oder Manschettenrohren in den Baugrund gepresst. Im Lockergestein können Lanzen gerammt oder in zuvor erstellte Bohrlöcher eingestellt werden. Das Injektionsmittel wird dann über Austrittsöffnungen an der festen oder verlorenen Spitze in den Baugrund abgegeben. Ventilrohre werden dagegen mit Hilfe eines Aufsatzrüttlers und eines Schutzrohres in den Baugrund eingerüttelt. Nachdem die gewünschte Tiefe erreicht ist, wird das Schutzrohr gezogen und der mit einem Verpressschlauch verbundene Ventilkörper verbleibt im Boden. Das am häufigsten zur Anwendung kommende Manschettenrohrverfahren unterscheidet sich

dadurch, dass die Manschettenrohre in eine Bohrung, die mit Hilfe einer Verrohrung oder einer Stützflüssigkeit abgeteuft wird, eingestellt werden, siehe Abbildung 6. Das Verpressmittel wird über Packer durch Ventilöffnungen gezielt in bestimmte Tiefenlagen eingepresst. Die Ventilöffnungen sind längs des Rohres angebracht und von einer Gummimanschette verschlossen. Diese öffnet sich beim Verpressvorgang und gibt das Injektionsmittel unter Druck frei.

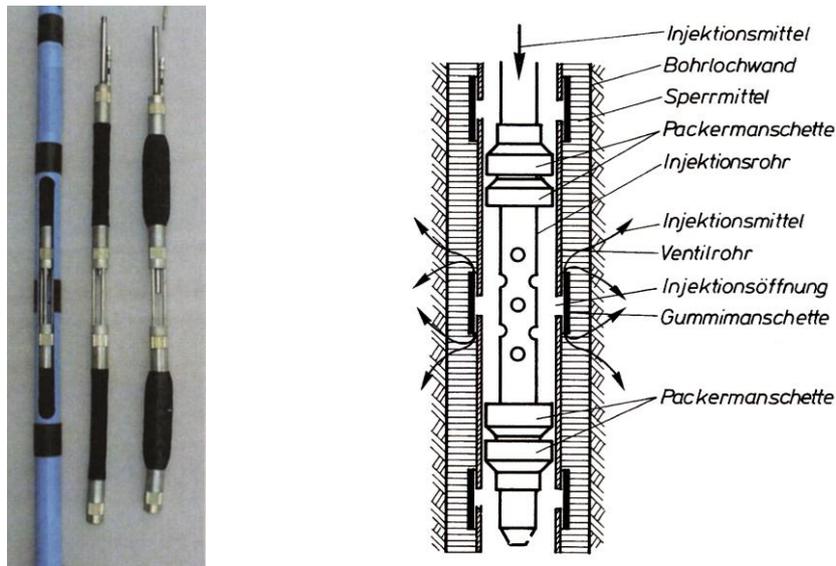


Abbildung 6: links Manschettenrohr mit Doppelpacker [BAUER, 2002]; rechts Ventilrohr mit Doppelpacker [SCHNELL, 1990]

Um bei der anschließenden Weichgelinjektion ein Aufsteigen der Lösung zu verhindern, werden häufig Deckelinjektionen mittels Zementsuspension ausgeführt, siehe Abbildung 7. Die Dicke der Sohle bestimmt der Injektionsraster und die Verpressmenge. Übliche Dicken von Injektionssohlen sind 1,0 m mit Dreiecksrasterabständen von 1,0 bis 1,5 m [SCHNELL, 1990], [CAMBEFORT, 1969].

Der Zulassungsstopp von Weichgelsohlen in Berlin stellte die ausführenden Firmen vor die Herausforderung ein Injektionsmaterial zu finden, welches den Umweltverträglichkeitsauflagen von Seiten der Behörde entsprach und dessen Einsatz gleichzeitig noch wirtschaftlich ist. Dies führte 2007 zu zwei neuen Produktzulassungen und gleichzeitig zu einer Art Renaissance von Weichgelinjektionen in Berlin. Die von INSOND / Züblin entwickelte GDT®-Sohle wurde bereits als horizontale Abdichtung im Bauvorhaben Spree-dreieck erfolgreich genutzt [HOFFMANN, 2008]. Das Silikatgel zur Herstellung der GDT®-Sohle sowie das BAUER-Silikatgel LWS [BALTRUSCHAT, 2011] reagieren durch den Einsatz neuer Fällmittel grundwasserneutral und bilden damit eine echte Alternative zu den herkömmlichen Natriumaluminatgelen.

Alternativen zur Weichgelinjektion haben sich aus unterschiedlichen Gründen nicht breitflächig durchgesetzt. Der Versuch das Weichgel durch Ultrafeinstzementsuspensionen zu ersetzen, hat sich bis heute wegen der deutlich höheren Materialkosten und der schwierigen Handhabung nicht durchgesetzt. Zudem wird das Penetrationsverhalten schon durch geringe Schwankungen der Korngröße, Kornverteilung und Lagerungsdichte stark beeinflusst, was zu Fehlstellen in der Dichtsohle führt [TAUSCH, 2002].

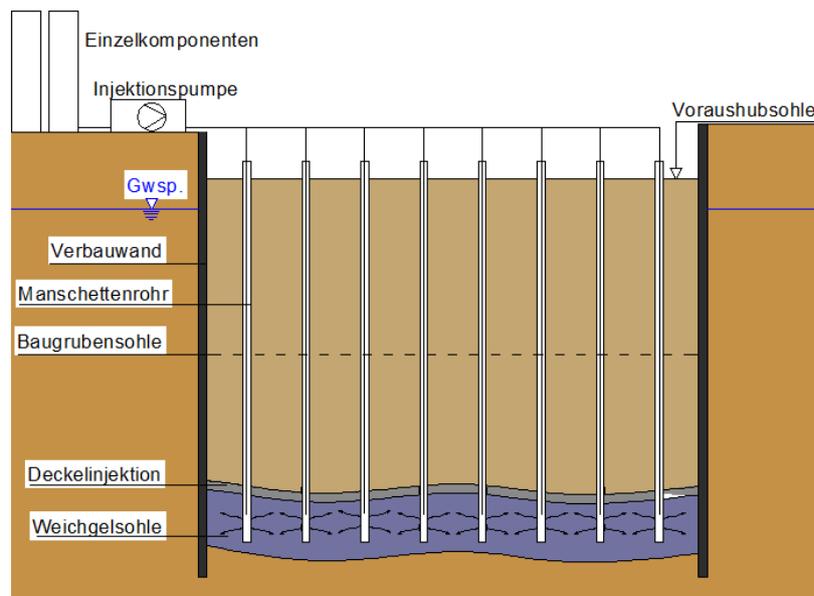


Abbildung 7: Fachgerechte Ausführung einer Grundwasserabspernung mittels Weichgelsohle

Bei der Technik des Düsenstrahlverfahrens (DSV) wird im eigentlichen Sinn nicht injiziert, sondern eher freigeschnitten und Material ausgetauscht. Der anstehende Boden wird, im Vergleich zur herkömmlichen Bodeninjektion, mit sehr hohen Drücken aufgesprengt. 400 bis 600 bar sind in den Zuleitungen erforderlich, um mittels eines rotierenden Hochdruckwasser- oder Hochdrucksuspensionsstrahls einen pfahlähnlichen Hohlraum zu schaffen, der im gleichen Arbeitsgang mit einem im Hohlraum entstehenden Gemisch aus Boden und Zementsuspension aufgefüllt wird. Die Anwendung der Düsenstrahltechnik zur horizontalen Abdichtung ist im Vergleich zu Weichgelsohlen ebenfalls mit deutlich höheren Herstellkosten verbunden und setzt eine sehr hohe Qualität in der Ausführung voraus. Dabei können Probleme mit Undichtigkeiten, Fehlstellen bedingt durch den Düsschatten auftreten. Dieses Verfahren kam in der Regel nur dort zur Anwendung, wo zusätzlich zur Abdichtung die statische Wirkung als aussteifendes Element unter der Aushubsohle erforderlich war [BORCHERT, 2009].

3 Chemie und Physik von Weichgelen

3.1 Allgemeine Beschreibung von Gelen

Die Hauptbestandteile von Silikatgelen zur Abdichtung/Verfestigung sind Wasser (meist Trinkwasser), Natriumsilikat (Wasserglas) und Natriumaluminat (Reaktive/Härter). Je nach Anteil des Reaktivs werden Gele in Hart- bzw. Weichgele unterteilt. Ist der Reaktivanteil ≥ 3 Vol.-% [TAUSCH, 1990] spricht man von Hartgel, andernfalls von Weichgel.

3.1.1 Hartgel

Hartgele dienen der Verfestigung und/oder Abdichtung von Bodenstrukturen. Aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften können sie in die statische Berechnung mit einbezogen werden. Als Reaktiv für Hartgele werden organische Härter verwendet. Aufgrund der verstärkt aufkommenden Ansprüche in Bezug auf den Umweltschutz werden Hartgele seit 1990 in Europa fast nicht mehr eingesetzt. Außerdem besitzen Hartgele ein besonders ausgeprägtes Alterungsverhalten, das zur Folge hat, dass chemisch eingelagertes Wasser ausgepresst wird. Dies führt zu einer volumenmäßigen Schrumpfung von bis zu 20 % bezogen auf das Anfangsvolumen [EISWIRTH, 2001]. Somit es mit der Zeit zu einer unvollständigen Verfüllung des Porenraumes. Das hat negative Auswirkungen auf die dauerhafte Festigkeit und/oder Abdichtung eines mit Hartgel injizierten Korngerüsts.

3.1.2 Weichgel

Weichgel wird hauptsächlich zur horizontalen Abdichtung von tiefliegenden Baugrubensohlen verwendet. Es besitzt reine abdichtende Wirkung, aber keine hohen Festigkeiten, die in einem Bereich von 0,3 bis 0,5 N/mm² liegen [HORNICH; STADLER, 2009]. Eingesetzt werden sie hauptsächlich im Fein- und Mittelsand. Als Auswahlkriterium für Weichgel gegenüber Zementsuspensionen gelten die Eindringfähigkeit der Lösung in die Porenräume des Baugrundes und der vergleichsweise niedrige Preis.

Für die Herstellung von Weichgel kommen in der Regel anorganische Härter zum Einsatz. Dazu gehören Natriumaluminat, Natriumbikarbonat und Calciumchlorid. Der Übergang von der Sol-Phase (flüssiger Zustand) in die Gel-Phase (flüssig-fester Zustand) wird als Gelzeit bezeichnet. Diese ist durch einen mehr oder weniger deutlichen Anstieg in der Viskosität gekennzeichnet. Der Gelbildungsverlauf ist über das Mischungsverhältnis vergleichsweise genau einstellbar. Geliert die Mischung während dem Injektionsvorgang aus, dann werden Porenräume nicht vollständig ausgefüllt und Fehlstellen sind die Folge. Geliert die Mischung zu spät aus, kann das Injektionsgut durch die Grundwasserströmung verfrachtet

werden. Die Folge sind Fehlstellen in der Dichtsohle und Verunreinigungen des Baugrundes. Weiters ist zu bemerken, dass die Temperatur einen maßgeblichen Einfluss auf den Reaktionsverlauf und damit insbesondere auf die Gelzeit hat [SCHULZE, 1992]. Der Reaktionsprozess ist bei Weichgelen jedoch nach der Gelbildung nicht beendet. Es findet ein Alterungsprozess statt, welcher als Synärese bezeichnet wird. Die Synärese an Weichgel ist bei Weitem nicht so ausgeprägt wie an Hartgelen.

3.2 Eigenschaften von Weichgel und deren Ausgangsstoffen

Gebräuchliche Mischungsverhältnisse lassen sich in der Literatur finden, siehe Tabelle 1. Eine typische Weichgelmischung besteht zu rund 78 Vol.-% aus Wasser, 18 Vol.-% Natriumsilikat und 2 Vol.-% Natriumaluminat. Die Zeit des Gelbildungsprozesses wird entscheidend durch den Natriumaluminatanteil, die Temperatur und den Natriumsilikatanteil (Wasserglas) beeinflusst. Das Natriumsilikat spielt eine zentrale Rolle bei der Gelbildung – einerseits ist das $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis von Bedeutung, andererseits die Konzentration des Natriumsilikats (Na_2SiO_3) in der Lösung.

	Wasserglas	Reaktiv	Wasser
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
KIRSCH (1982)	15	~ 2,5	82
SCHNELL W. (1990)	10 – 20	~ 3,0	77 – 87
JUNGE (1997)	10 – 20	1,4 – 2	80 – 87
SCHNELL K. (2001) Berliner Rezeptur	16	1,6	82,4

Tabelle 1: Typische Mischungsverhältnisse für Weichgele [MIELECKE, 2009]

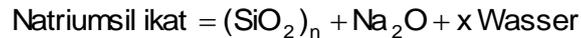
3.2.1 Natriumsilikat (Wasserglas)

Der Grundbaustein für Natriumsilikat ist Siliziumdioxid (SiO_2). Siliziumdioxid reagiert mit Wasser zu einer Kieselsäure. Fügt man der wässrigen Lösung nun Natriumcarbonat (Na_2CO_3) zu, erhält man Natriumsilikat. Aufgrund seiner Wasserlöslichkeit, wird Natriumsilikat als „Wasserglas“ bezeichnet und zählt zu den Alkalimetallsilicaten.

Die Eigenschaften und Reaktionen der Silikatlösung werden vor allem durch das $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis und den Gesamtgehalt an SiO_2 bestimmt. Bei der Verwendung im Tiefbau liegt meist ein Molverhältnis¹ von ca. 3,25 vor. Die Dichte von flüssigem Natronwasserglas

¹ Ist das Molekülmassenverhältnis von $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ und kann mit dem Faktor 1,032 in ein Gewichtsverhältnis umgerechnet werden.

mit einem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Verhältnis von 3,25 beträgt bei 20°C ca. $1,38 \text{ g/cm}^3$, die Viskosität 100 mPas [WÖLLNER, 2004]. Die stöchiometrische Betrachtung von Wasserglas ist:



n = Molverhältnis von $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

x = Wassergehalt der Lösung bzw. dessen Konzentration

Es können neben den Hauptbestandteilen des Natriumsilikates auch Anteile von Schwermetallen in geringen Mengen enthalten sein. Die Verunreinigungen sind darauf zurück zu führen, dass geringe Anteile der Schwermetalle im Quarzsand enthalten sind [SCHNELL, 2001].

Stoff	Einheit	Wert
Aluminium	ppm	260,00
Calcium	ppm	15,00
Cadmium	ppm	0,30
Chrom	ppm	0,80
Kupfer	ppm	0,80
Kobalt	ppm	1,20
Nickel	ppm	1,40
Blei	ppm	2,00
Titan	ppm	35,00
Zink	ppm	4,00

Tabelle 2: Gehalt an Nebenstoffen in Natriumsilikat mit dem Mol-Modul 3,3 [WÖLLNER, 2004]

Silicate

Silicate, einschließlich Siliziumdioxid, sind zu etwa 90 % am Aufbau unserer Erdkruste beteiligt. Sie werden im Bausektor entweder direkt als Natursteine verwendet oder sie bilden die Rohstoffbasis für technische Silicate wie Zement, Natriumsilikat, Glas und Keramik [MORTIMER, 2007].

Siliziumdioxid

Der wichtigste Grundstoff für Natriumsilikat ist das Siliziumdioxid (SiO_2). Siliziumdioxid tritt in zahlreichen kristallinen wie auch amorphen Modifikationen auf. Die wichtigste kristalline Modifikation ist der Quarz. Amorphe Formen des Siliziumdioxids sind Kieselgur, Trass und Opal. Kristalliner reiner Quarz, der für die Herstellung des Natriumsilikates verwendet wird ist sehr hart, wasserklar und schmilzt bei einer Temperatur von 1713°C [BENEDIX, 2011].

Anders als Kohlenstoff bildet Silicium nur in seltenen Fällen Doppelbindungen aus. Deshalb existiert Siliziumdioxid nicht wie CO_2 als isoliertes Molekül, sondern bildet ein dreidimensionales Kristallgitter aus. Jedes Si-Atom ist tetraedrisch von vier O-Atomen umgeben und

jedes Sauerstoffatom besitzt zwei Si-Atome als Nachbarn, siehe Abbildung 8. Demnach sind die SiO_4 -Tetraeder über gemeinsame Ecken verknüpft [HOLLEMANN, 1985].

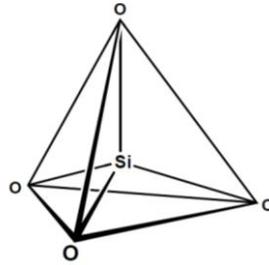
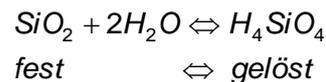


Abbildung 8: Räumliche Darstellung des $(\text{SiO}_2)_n$ -Tetraeders [HOLLEMANN, 1985]

Kieselsäure

Das Reaktionsprodukt aus Siliziumdioxid (SiO_2) und Wasser (H_2O) ist Monokieselsäure (H_4SiO_4). Diese ist praktisch in allen natürlichen Gewässern enthalten. Sie bildet sich durch Auflösen von amorphem Siliciumdioxid, das durch Verwitterung aus den Silicaten und Wasser entstanden ist:



Charakteristisches Merkmal der Kieselsäure ist ihre Neigung zur intermolekularen Wasserabspaltung (Kondensation) unter Bildung von Polykieselsäuren (siehe Abbildung 9). Die Geschwindigkeit der Kondensation ist abhängig von der Konzentration, der Temperatur und dem pH-Wert der Verbindung. Die sich zunächst im Solzustand befindlichen Polykieselsäuren kondensieren weiter. Unter Wasseraustritt werden weitere Si-O-Si-Bindungen geknüpft. Das Sol wandelt sich in eine gelartige Masse um, die als Kieselgel bezeichnet wird (auch: Kiesel-Hydrogel).

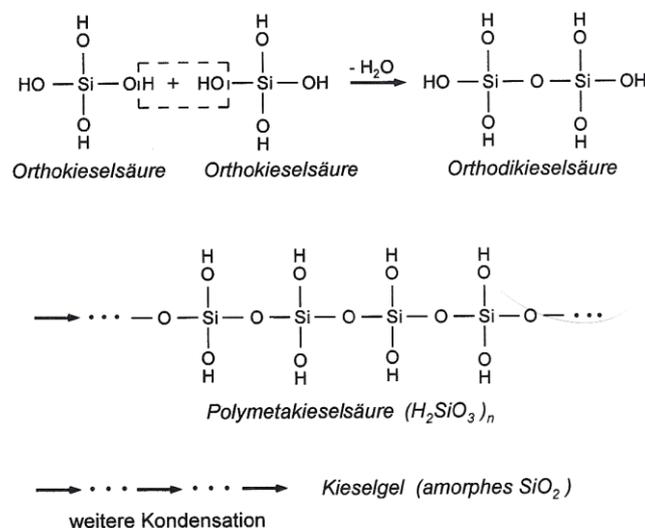
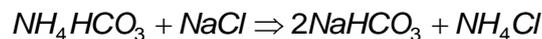


Abbildung 9: Kondensation der Kieselsäure [BENEDIX, 2011]

Der Übergang vom Sol- in den Gelzustand findet selbstständig statt. Dieser Zustandswechsel ist der Gelbildung mittels Weichgel sehr ähnlich. Mit dem einen Unterschied, dass die Kieselsäure mit Natriumcarbonat technisch verschmolzen wird und der Gelbildungsprozess erst durch Zugabe eines Reaktives einsetzt.

Natriumkarbonate (kalziniertes Soda Na_2CO_3)

Natriumcarbonat (Na_2CO_3) wird für die Herstellung von Natriumsilikat benötigt. Es wird auch als kalziniertes Soda bezeichnet und ist ein Salz der Kohlensäure. Soda wird unter anderem in der Papier-, Glas- und Seifenherstellung verwendet [GREENWOOD, 1990]. Es kann mittels SOLVAY Prozess (1861) (Ammoniak-Soda-Verfahren) hergestellt werden, dabei leitet man in eine nahezu gesättigte Kochsalzlösung zuerst Ammoniak und dann Kohlendioxid ein. Es entsteht hierbei Ammoniumhydrogencarbonat, das mit Kochsalz das verhältnismäßig schwer lösliche Natriumhydrogencarbonat ergibt:



Durch Erhitzen (calcinieren) des Natriumhydrogencarbonats erhält man Soda:



Das Ammoniak wird rückgewonnen und sowie das Kohlendioxid in den Produktionsprozess zurückgeführt [RÖMPP, 1993]

Alkalisilicate

Alkalisilicate sind die Salze der Kieselsäuren. Sie werden durch Zusammenschmelzen von SiO_2 mit Natriumcarbonaten bei etwa 1300°C gewonnen. Ob ein Orthosilikat² (z.B. Na_4SiO_4) oder ein polymeres Metasilicat (z.B. Na_2SiO_3) entsteht, hängt vom eingesetzten Molverhältnis ab [HOLLEMANN, 1985].



Die durch Schmelze technisch erzeugten Natrium- und Kaliumsilicate sind glasige, eventuell durch Verunreinigungen gefärbte Produkte. Wegen ihrer Wasserlöslichkeit werden sie als „Wassergläser“ bezeichnet. Wassergläser kommen als dickflüssige Lösungen in den Handel. Da die Silicationen als Anionen der schwachen Kieselsäure protolysieren, reagieren die Lösungen alkalisch. Wasserglaslösungen enthalten neben Alkalimetall – und Hydroxidionen unterschiedlich protolysierte Monosilicationen HSiO_4^{3-} ,

² Ist das Salz der Orthokieselsäure (siehe Abbildung 9).

$\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$, H_3SiO^4 sowie Polysilicationen. Diese werden als Kolloide bezeichnet. Die Kolloide können nach ihrer Bindungsart in drei Gruppen eingeteilt werden [BENEDIX, 2011]:

- Dispersionskolloide, welche durch Zerkleinerung von Materie entstanden sind.
- Molekülkolloide, dabei ist der Zusammenhalt der Kolloidteilchen durch chemische Bindung gekennzeichnet, z.B. Polykieselsäuren
- Assoziationskolloide besitzen einen besonderen Molekülaufbau und bilden sich erst ab einer bestimmten Konzentration.

Die Stabilität von Wasserglaslösungen beruht auf der oberflächlichen Anlagerung von Wassermolekülen in Form einer Hydrathülle um die Kolloide. Die gegenseitige Abstoßung der Hydrathüllen verhindert eine Aggregation der Teilchen zu größeren Partikeln und stabilisiert die kolloide Lösung [SCHNELL, 2001].

Durch Zugabe von Säuren bzw. Einwirkung von Kohlendioxid wird die Hydrathülle aufgebrochen und es kommt zu einer Verfestigung der Wasserglaslösung. Es erfolgt eine Neutralisation der OH-Gruppen, das Gleichgewicht wird gestört und die Kondensation verstärkt. Dieses Phänomen macht sich das JOOSTON Verfahren zu nutze.

Dichte und Modul von Wasserglas

Die Dichte von Natriumsilikatlösungen wird häufig in Grad Baumé (°Bé) angegeben. Das ist eine nach dem französischen Chemiker Antoine Baumé (1728–1804) benannte, Gradeinteilung der Aräometerskala zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten. Das für eine tiefliegende Weichgelsohle oft verwendete Wasserglas ist mit 38/40°Bé angeführt. Der Mittelwert von 38/40 beträgt 39 und die Dichte errechnet sich wie folgt

$$\rho = \frac{144,3}{(144,3 - ^\circ\text{Be})} = \frac{144,3}{(144,3 - 39)} = 1,37 \text{ g / cm}^3$$

Die Dichte ändert sich mit dem eingesetzten Modul. Das Modul bezeichnet das Verhältnis von Silicat und Natriumoxid. In der Praxis gängige Moduln sind 1,6 / 2,0 / 2,5 / 3,3 / 3,7. Die angegebenen Werte sind Gewichtsverhältniszahlen. Der Umrechnungsfaktor von Gewichts- in Massenverhältnis ist 1,032. Das folgende Beispiel soll dies veranschaulichen

Natriumsilikat besteht zu 27,4 % aus SiO_2 , 8,3 % Na_2O und 64,3 % Wasser. Für die Ermittlung des Modul spielt das Wasser keine Rolle. Somit ergibt sich $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 27,4/8,3 = 3,3$. Mit steigendem Modul nimmt der Anteil des Natriumoxids (Na_2O) ab, damit nimmt die SiO_2 Konzentration in der Lösung zu. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine höhere

SiO_2 Konzentration in der Lösung auch einen höheren Anteil an Polysilicaten bewirkt [WÖLLNER, 2004].

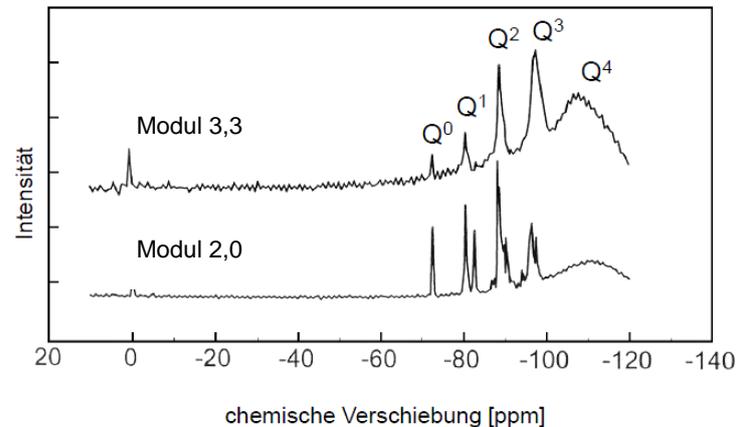


Abbildung 10: NMR-Spektroskopie von Natriumsilikat mit den Moduln 3,3 und 2,0 [WÖLLNER, 2004]

Die in Abbildung 10 bezeichneten Ausschläge Q von 0 bis 2 stellen Mono-, Di- und Trisilicationen, 3 und 4 Polysilicate dar. Aus der NMR-Spektroskopie ist ersichtlich, dass mit steigendem Modul die Polysilicate zunehmen. Die Anzahl an Polysilicaten beeinflusst mitunter die Viskosität (siehe Abbildung 11) und in weiterer Folge die Gelbildungszeit stark.

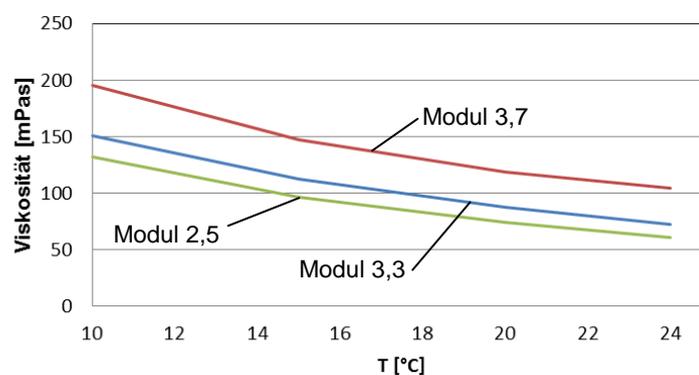


Abbildung 11: Viskosität von Natriumsilikatlösungen bei unterschiedlichen $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnissen

In Abhängigkeit der oben genannten Parameter liegen in den Natriumsilikatlösungen neben Alkali und Hydroxidionen unterschiedlich kondensierte Silikat-Anionentypen vor, welche die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Wasserglaslösungen entscheidend beeinflussen. So nimmt die Viskosität einer wässrigen Lösung mit hohem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis bei steigender Konzentration erheblich schneller zu als die Viskosität einer Lösung mit niedrigerem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnis, siehe Abbildung 12

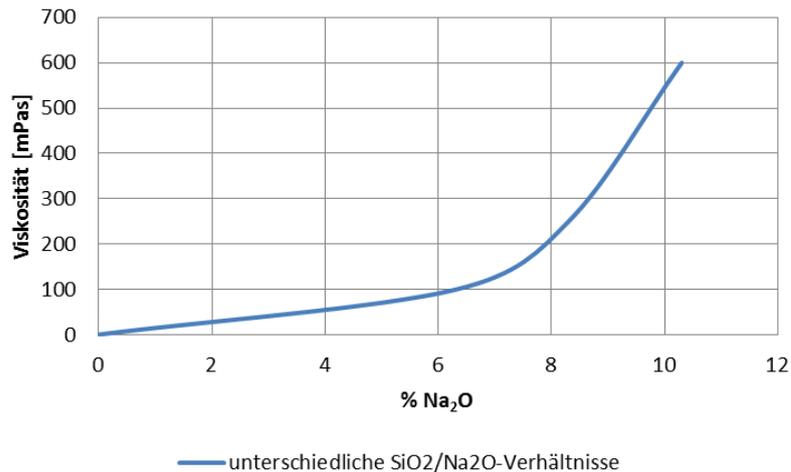


Abbildung 12: Viskosität von Natriumsilikatlösungen mit unterschiedlicher $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Konzentration

Chemische und physikalische Eigenschaften, sowie die Gelbildungsfähigkeit von Natriumsilikat

Wasserglaslösungen reagieren, wie oben erwähnt, infolge teilweiser Hydrolyse der Natriumsilikate immer alkalisch (pH-Wert 11-13). Der pH-Wert steht auch in enger Beziehung zum Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ und zum Gesamtgehalt an SiO_2 . Wie Abbildung 13 zeigt, hat bei gleichem Gehalt an SiO_2 , die Lösung mit dem höheren Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ den geringeren pH-Wert. Der Grund liegt in der geringeren Konzentration an calciniertem Natriumcarbonat, welches beim Herstellungsprozess zugesetzt wird.

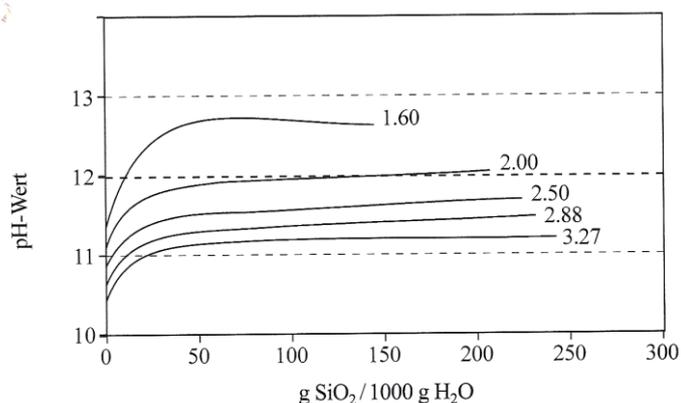


Abbildung 13: pH-Werte für Wasserglaslösungen unterschiedlicher Konzentrationen bei variablen Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ [AKZO-PQ, Produktinformation, 2004]

Natriumsilikate mit hohem Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ reagieren mit sauren Verbindungen zu Gelen. Die Pufferkapazität einer Silikatlösung steigt dabei mit höherem Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Sie ist relativ konstant bis der Alkalikomplex völlig neutralisiert ist. Sinkt der pH-Wert einer Natriumsilikatlösung unter 10, polymerisieren alle Lösungen unabhängig vom Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ zu einem Silikatgel. Der Polymerisierungsgrad und die Reaktionsge-

schwindigkeit hängen dabei von Lösungskonzentration, Temperatur, pH-Wert und anderen Faktoren ab. Die Gelbildung vollzieht sich am schnellsten im neutralen pH-Bereich. Nur die pH-Bereiche von 2-5 und 9-12 ermöglichen eine zeitlich verzögerte Gelbildung [SCHNELL, 2001], siehe Abbildung 14.

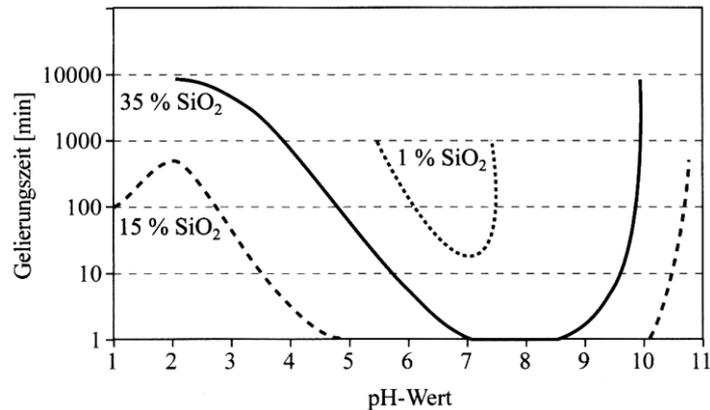


Abbildung 14: Gelerungszeit von Natriumsilikatlösungen mit einem variablen Verhältnis SiO₂ zu Na₂O in Abhängigkeit vom pH-Wert [AKZO-PQ Produktinformation, 2004]

Diese zeitlich verzögerte Gelbildung macht man sich beim Weichgelinjektionsverfahren zu Nutze. Die niedrig viskose Injektionslösung wird unmittelbar vor der Injektion angesetzt und die Gelbildung erfolgt erst in situ im Untergrund. Dabei entsteht ein adhäsiv im Porenraum gebundenes Gel. Natriumsilikatlösungen reagieren im Untergrund mit gelösten Kationen wie z.B. Ca²⁺, Al³⁺ und Mg²⁺. Das Produkt sind unlösliche Silikate [SCHULZE, 1992]. Auf diesem Reaktionsmuster beruht beispielsweise das JOOSTEN-Verfahren, bei dem Wasser-glas und eine konzentrierte CaCl-Lösung direkt nacheinander injiziert werden. Geraten beide Lösungen in Kontakt findet eine sofortige Neutralisation statt und es bilden sich im Untergrund nahezu unlösliche Calciumsilikat-Verbindungen [KIRSCH, 1982].

Anwendungen von Natriumsilikat

Neben der Anwendung im Tiefbau finden sich Natriumsilikate in zahlreichen Produkten wieder und dienen in verschiedensten Industriezweigen als Hilfs- oder Rohstoffe. Beispielsweise können Natriumsilikate zusammen mit einfachen, polaren Lösungsmitteln interagieren, d.h. Phasentrennungen oder Dehydratisierungen verursachen, wobei jedoch wenige organische Verbindungen mit konzentrierten Silikatlösungen kompatibel sind [HOLLEMANN, 1985].

Weiters reagieren Natriumsilikate mit Metallionen zu Komplexen und inaktivieren diese. Dieser Umstand wird z.B. zur Reaktionserweiterung grenzflächenaktiver Stoffe bei der Waschmittelproduktion angewandt. In der Trinkwasseraufbereitung werden kolloidale Sili-

katlösungen zur Korrosionsinhibierung in Rohrleitungen eingesetzt [DIETZEL, 1999]. Weitere Beispiele sind der Einsatz als Klebstoff in der Papierverarbeitung, als Flotationsmittel in der Erzaufbereitung, als Schleifmittel in der Keramikindustrie, als Flammschutzmittel für Holz und Gewebe u.v.a.m.

Abschließend eine Übersicht über die chemischen und physikalischen Eigenschaften der verwendeten Produkte

WÖLLNER	Ligasil 39	HK 35	Betol 50 T
Form:	flüssig	flüssig	flüssig
Farbe:	farblos	farblos	farblos
Geruch:	geruchlos	geruchlos	geruchlos
pH-Wert (100 g/l) bei 20°C:	ca. 11,3	ca. 11,3	ca. 12,5
Siedepunkt/Siedebereich:	> 100°C	> 100°C	> 100°C
Modul	3,3	3,7	2,5
Dichte bei 20°C:	ca. 1,37 g/cm ³	ca. 1,32 g/cm ³	ca. 1,52 g/cm ³
dynamisch Viskosität bei 20°C:	ca. 100 mPas	ca. 150 mPas	ca. 600 mPas

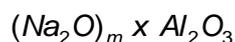
Tabelle 3: Eigenschaften der verwendeten Wassergläser [WÖLLNER, 2012]

3.2.2 Natriumaluminat und Natriumbikarbonat (Reaktiv/Härter)

Als Reaktiv für Weichgel kommen nach dem derzeitigen Stand der Technik nur anorganische Produkte zum Einsatz. Dazu zählen Natriumaluminat und Natriumbikarbonat. Die Vernetzung der Polysilikatkolloide mit Aluminat (Al(OH)₄) löst den Gelbildungsprozess aus. Der Anteil des Reaktivs bestimmt entscheidend die Dauer des zeitverzögerten Gelbildungsprozesses.

Natriumaluminat

Natriumaluminat ist eine amorphe, gut wasserlösliche Verbindung der allgemeinen Form



Natriumaluminat ist eine stark basische Lösung. Die Gelbildung erfolgt daher nicht wie beim JOOSTON-Verfahren durch Absenken des pH-Wertes, sondern die Gelierung setzt durch eine Verknüpfung der Polysilikatkolloide mit dem Aluminat ein. Natriumaluminat besitzt ebenfalls Anionenkomplexe der Form



welche vergleichbar mit jenen der Kieselsäure sind und auch zu mehrkettigen Kolloiden kondensieren. Folgende Reaktivprodukte wurden verwendet:

	Stabilil 19 (WÖLLNER)	Overlack
Form:	flüssig	flüssig
Farbe:	gelblich	gelblich
Geruch:	geruchlos	geruchlos
pH-Wert (100 g/l) bei 20°C:	ca. 14	ca. 13,5
Siedepunkt/Siedebereich:	> 100°C	> 100°C
Dichte bei 20°C:	ca. 1,48 g/cm ³	ca. 1,47 g/cm ³
dynamisch Viskosität bei 20°C:	ca. 120 mPas	ca. 130 mPas

Tabelle 4: Eigenschaften der verwendeten Natriumaluminatlösungen

Natriumbikarbonat

Natriumbikarbonat ist nur in Pulverform erhältlich. Um es injizieren zu können, muss es direkt vor dem Gebrauch in Wasser dissoziiert werden. Wichtig ist, dies direkt vor der Verwendung zu tun, da sich die Lösung zeitlich abbaut und dadurch die Kippzeit erheblich verlängert wird. Die Lagerung muss so erfolgen, dass die Temperatur nicht auf 65°C ansteigt, da ansonsten Natriumbikarbonat zu Soda, CO₂ und H₂O zerfällt. Bei einem Anteil von 2 % Natriumbikarbonat in der gesamten Lösung wird es nur mit einem Wasserglas des Moduls 3,3 gelförmig. Bei einem geringeren SiO₂/Na₂O-Verhältnis polymerisiert die Lösung nicht aus [WÖLLNER, 2004].

Derzeit kommt Natriumbikarbonat, nur in Frankreich und dort, wo Natriumaluminat von Behördenseite nicht zugelassen ist, zum Einsatz.

WÖLLNER	Stabilil 23
Form:	Pulver
Farbe:	weiß
Geruch:	geruchlos
pH-Wert (100 g/l) bei 20°C:	ca. 8,2
Dichte bei 20°C:	2,2 g/cm ³

Tabelle 5: Eigenschaften des verwendeten Natriumbikarbonats

3.2.3 Wasser

Weichgel kann auch als Hydrogel bezeichnet werden, da es je nach Mischungsverhältnis bis zu 81 % Wasser enthält. Dabei dient das Wasser in erster Linie als Lösungs- und Verdünnungsmittel. An das Anmachwasser werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Trinkwasser laut Trinkwasserverordnung (TWV-304) ist dabei sehr gut geeignet.

3.3 Herstellung der Ausgangsstoffe

3.3.1 Herstellung von Natriumsilikat

Für die Wasserglas-Herstellung benötigt man Quarzsand in möglichst reiner Form und Natriumcarbonat (kalziniertes Soda). Quarzsand selbst entsteht durch mechanische und/oder chemische Verwitterungsprozesse von ursprünglich magmatischen Gesteinen, wie beispielsweise Granit, siehe Abbildung 15. Dabei kann die Zeitspanne, bis aus Granit letztlich ein Quarzsand wird, sehr lange sein. Das Granitgestein wird durch mechanische und/oder chemische Prozesse zerkleinert und in seine einzelnen Bestandteile zerlegt. Das sind in diesem Fall hauptsächlich die Feldspäte, Quarz und Glimmer. Von diesen ist der Quarz am härtesten und widerstandsfähigsten. Daher reichert sich das Sediment immer mehr mit Quarz an, während die anderen Minerale langsam aufgelöst werden, je länger sie der Verwitterung ausgesetzt sind.

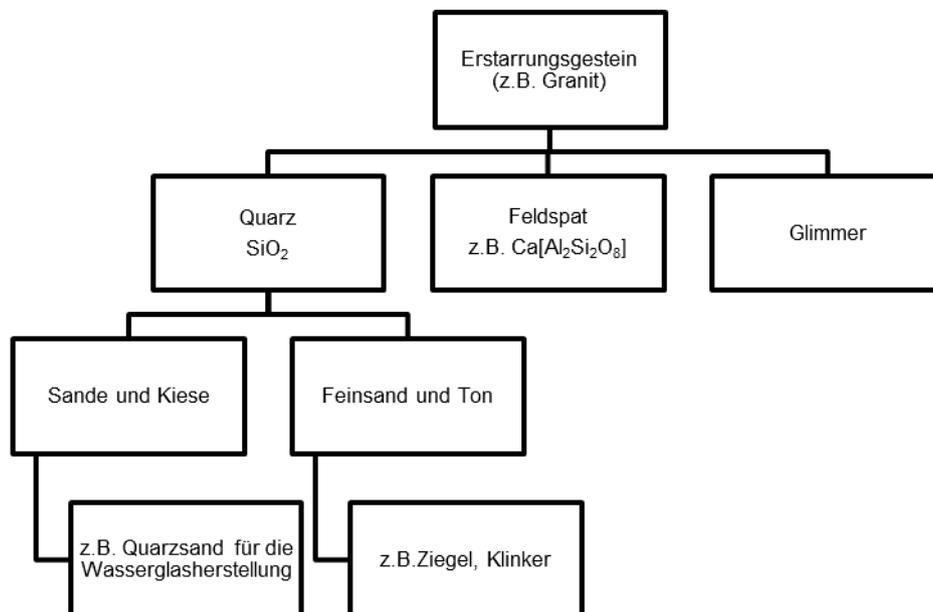


Abbildung 15: Verwitterungsprozess des Quarzes im Granit

Die durch Gesteinsverwitterung entstandenen und technisch aufbereiteten Quarzkiese und Quarzsande müssen einen hohen Reinheitsgehalt von min. 98 % SiO_2 besitzen, um weitere Verwendung in der Industrie zu finden. Quarzsand wird unter anderem für die Herstellung von Glas, Wasserglas und elementarem Silicium (Halbleiter Photovoltaik) verwendet.

Schmilzt man jedoch den Quarzsand mit Alkalihydroxiden (Natronlauge NaOH) oder Natriumcarbonaten (kalziniertes Soda Na_2CO_3), entstehen Alkalimetallsilicate [WÖLLNER, 2001].

Natriumsilikate werden großtechnisch durch Verschmelzung von kalziniertem Soda (Na_2CO_3) und ausgewählten Quarzsanden bei Temperaturen von $1300\text{-}1400^\circ\text{C}$ hergestellt.

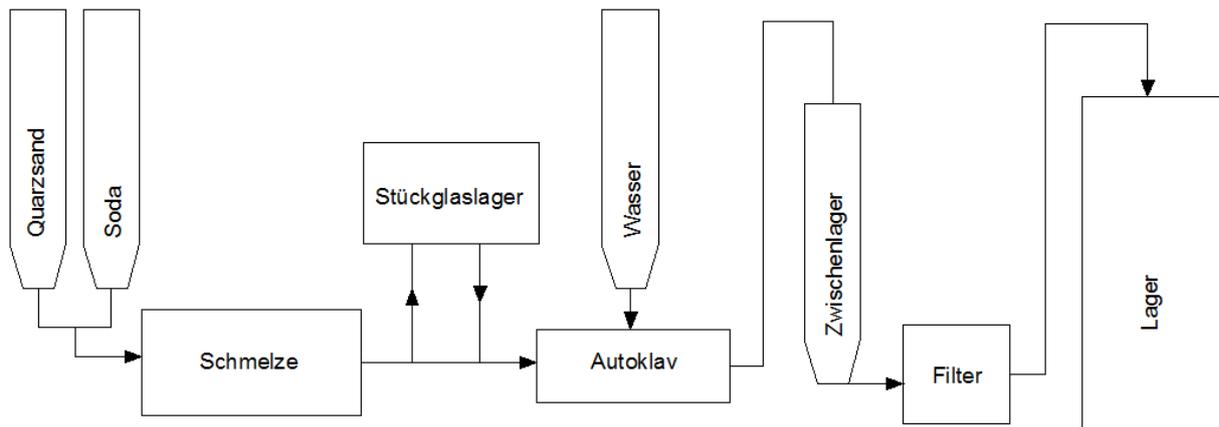


Abbildung 16: Schema des Herstellungsprozesses

3.3.2 Natriumaluminat

Natriumaluminat wird technisch aus Bauxit und Natronlauge nach dem "Bayer-Verfahren" aufgeschlossen. Der gemahlene Bauxit wird mit 36 %iger Natronlauge unter Druck (6 bar) und auf 175°C erhitzt [HOLLEMAN, 1985].



Die Lösung wird zwecks Stabilisierung mit bis zu 1 % Zucker versetzt. Durch die im Bauxit enthaltenen Nebengemengteile, hauptsächlich Metalloxide (Fe_2O_3), ist Natriumaluminat verunreinigt [WÖLLNER, 2012]. Die handelsüblichen Formen von Natriumaluminat sind wässrige Lösungen und Pulver.

3.4 Gelbildungsprozess

In Kapitel 3.2.2 sind die Eigenschaften von Natriumsilikatlösungen ausführlich beschrieben, unter anderem auch die Fähigkeit zu gelieren. Moderne Weichgele gelieren nicht wie dargelegt durch Herabsetzen des pH-Wertes, (wie es beim JOOSTEN-Verfahren der Fall ist), sondern durch Zugabe eines Reaktivs. Dieses löst einen zeitlich verzögerten Gelbildungsprozess aus. Der Starter für die Reaktion ist der Aluminatkomplex $Al(OH)_4^-$, welcher sich mit dem Polysilikatanteil des Natriumsilikates vernetzt. Dabei wird das Al^{3+} des Aluminats in das Gelgerüst miteingegliedert [TAUSCH, 1990], siehe Abbildung 17.

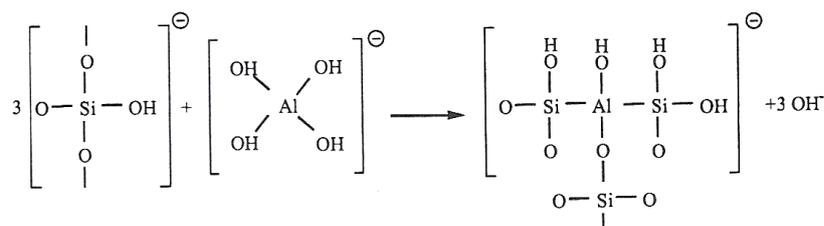


Abbildung 17: schematische Darstellung der Reaktionsgleichung [ILER, 1979]

Die Zeit bis zur vollständigen Gelbildung wird Kippzeit genannt. Diese ist – neben dem pH-Wert und der Temperatur – vor allem vom Natriumaluminatanteil abhängig. Die Ionenradien des Al^{3+} sowie Si sind sich sehr ähnlich, wodurch ein Gelgerüst entsteht. Die Struktur des entstehenden Netzwerkes ist durch Silizium/Aluminium Verhältnis von 1 zu 3 bis 1 zu 4 geprägt, siehe Abbildung 18 [DARIMONT, 1984].

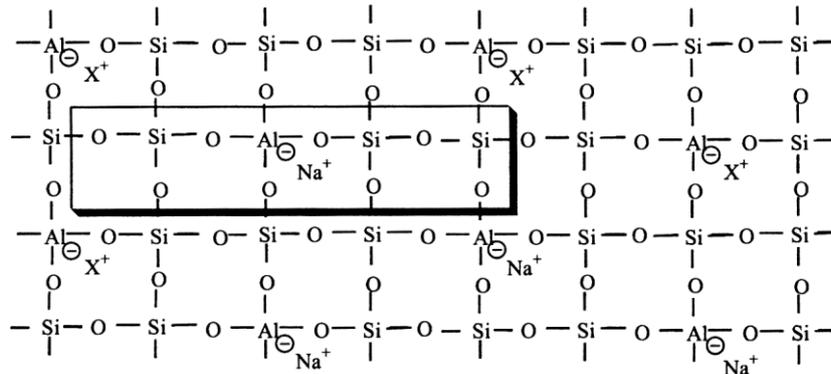


Abbildung 18: Schematischer 2D-Schnitt der Weichgelstruktur [DARIMONT, 1984]

Schon aus dem Mischungsverhältnis (rund 80 Vol.-% Wasser) geht hervor, dass es sich bei dem entstehenden Gel um ein stark wasserhaltiges Hydrogel handelt. Bedingt durch die räumliche Vernetzung der Weichgellösung kommt es zu einem fein dispersen kolloidalen System, welches sich im Laufe des Gelbildungsprozesses eintrübt und nach der vollständigen Polymerisierung undurchsichtig ist, Abbildung 19 zeigt diese zeitliche Entwicklung. Die Oberfläche eines polymerisierten Weichgels lässt auf eine Abdichtungsmasse schließen, da diese sehr glatt und homogen ist.

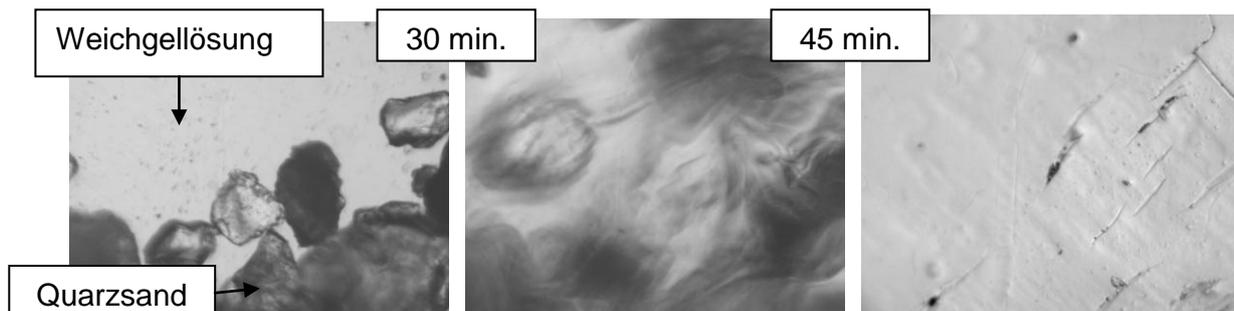


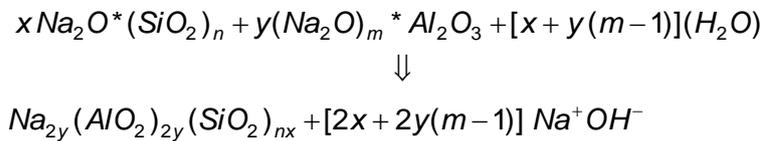
Abbildung 19: Aufnahmen des Gelbildungsprozesses mittels Lichtmikroskop

Die vernetzten Kolloide sind wie Makromoleküle zu sehen, welche einem Korngerüst sehr ähnlich sind. Im Porenraum des Weichgels befindet sich Wasser und zum Teil nicht auspolymerisierte Inhaltsstoffe der Weichgelmischung, vor allem aber in einem hohen Maß Natronlauge.

Exkurs

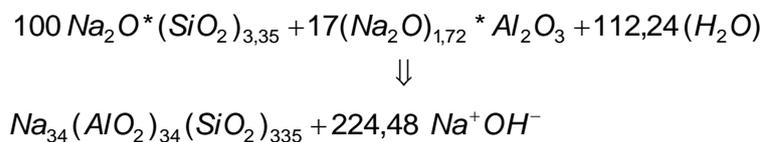
Den Gelbildungsprozess hat SCHNELL [2001] stöchiometrisch wie folgt beschrieben:

"Bei einer Mischrezeptur von 2 Vol.-% Natriumaluminat (=y), 18 Vol.-% Wasserglas (Modul 3,8) (=x) und 80 Vol.-% Wasser findet nachfolgende Reaktion statt:

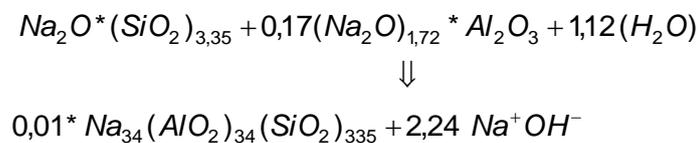


Legt man die Rezeptur 18/2/80 und die Analytik der verwendeten Chemikalien zugrunde, so ergeben sich die Parameter zu $m_{\text{molar}}=1,72$, $n=3,35$ (entspricht einem Gewichtsverhältnis von $n=3,3$), $x=100$, $y=17$.

Dies in die obige Gleichung eingesetzt ergibt:



Normiert man auf 1 Mol Wasserglas, entspricht das:



Es entstehen pro Mol eingesetztem Wasserglas 0,01 Mol Mischgel und 2,24 Mol Natronlauge [SCHNELL, 2001]".

Weichgele zählen zu den irreversiblen Gelen. Das bedeutet, dass sie nur unter extremen Laborbedingungen wieder in den Solzustand übergehen. Diese Bedingungen sind im Grundwasser aber nie anzutreffen [TAUSCH, 1990].

Im Gelgerüst können Schwer- und Spurenmetalle eingelagert werden, was zu einer Konzentration solcher Stoffe im Grundwasser-Abstrombereich des Injektionskörpers führt.

4 Grundlagenversuche an Weichgelen

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit den rheologischen Eigenschaften von Weichgelen. Die Rheologie beschäftigt sich mit dem Fließverhalten von Flüssigkeiten [MEZGER, 2006]. Das rheologische Verhalten von Weichgellösungen ist durch den Gelbildungsprozess geprägt. Dieser wird durch die Gelier- und Kippzeit beschrieben. Die Gelierzeit ist jene Zeitspanne, vom Zusammenmischen der Einzelkomponenten bis zum Beginn des Gelierprozesses [TAUSCH, 1980]. Der Beginn des Gelierprozesses ist visuell über die Eintrübung der Lösung bestimmbar. Genauer kann sie mittels Rotationsviskosimeter bestimmt werden. Durch die Bildung von Molekülketten ist ein deutlicher Anstieg der Viskosität messbar. Die Kippzeit wiederum ist erreicht, wenn die Weichgelprobe um 90° aus der vertikalen Achse geneigt wird und keine Flüssigkeit aus dem Behälter tritt. Sie kann mittels Kipptest bestimmt werden.

Gelier- und Kippzeit sind in der Baupraxis von großer Bedeutung, da sie für den Injektionserfolg entscheidend sind. Geliert eine Mischung zu früh, wird der Porenraum nicht ausgefüllt, kippt die Mischung zu spät, kann das Injektionsgut durch die Grundwasserströmung verfrachtet werden. Die Folge sind Fehlstellen in der Dichtsohle. Trotz dieser Bedeutung für die Praxis gibt es keine spezifischen Angaben, welche Mischungsverhältnisse der einzelnen Weichgelkomponenten (Natriumsilikat, -aluminat und Wasser) und welche Umgebungstemperatur zu einer optimalen Gelbildung führen. Da an dieser Stelle Forschungsbedarf besteht, werden im Rahmen dieser Diplomarbeit mit einzelnen Produkten Versuche durchgeführt, um ihre Gelier- und Kippzeit zu bestimmen.

4.1 Untersuchungen zur Gelier- und Kippzeit

Das rheologische Verhalten einer Weichgellösung hängt von vielen Einflüssen ab – von den verwendeten Einzelkomponenten und Produkten sowie dem Mischungsverhältnis und der Umgebungstemperatur, welche im Rahmen dieser Diplomarbeit untersucht werden. Der jeweilige Versuchsaufbau bzw. die angewandte Methode haben ebenso Auswirkungen auf den Gelbildungsprozess und werden bei den einzelnen Beschreibungen der Versuche mitberücksichtigt. In der Baupraxis sind darüber hinaus noch andere Faktoren, welche die jeweilige Gelier- und Kippzeit beeinflussen (z.B. der jeweilige Baugrund, in den eine Weichgellösung injiziert wird), von Bedeutung. In der konkreten Laborsituation, die immer eine Reduktion der Realität bedeutet, ist es jedoch nicht möglich all diese Einflussgrößen zu erfassen. Insofern können die hier erlangten Ergebnisse nicht direkt in die Baupraxis

umgesetzt werden, sollen aber dazu dienen, das grundlegende Verhalten von Weichgelen besser nachvollziehen zu können.

Die Gelier- und Kippzeit wird mit Hilfe von drei unterschiedlichen Versuchsaufbauten untersucht:

- Die optische Kontrolle der Gelierzeit durch Eintrübung sowie das Feststellen der Kippzeit durch den „**Kipptest**“
- Die Untersuchung der rheologischen Eigenschaften mit dem **Rotationsviskosimeter**
- Die Beurteilung der Kippzeit mit dem **Marsh-Trichter**.

Die jeweiligen Ergebnisse dieser drei Versuchsaufbauten werden anschließend zusammengeführt und miteinander verglichen.

Für die Weichgelproben, die bei den Versuchen zur Anwendung kamen, wurde mit Einzelkomponenten gearbeitet, die von den Firmen Wöllner Austria GmbH und Overlack GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Angefragt wurden zwar auch noch Produkte anderer Hersteller, eine Zusammenarbeit kam jedoch nicht zu Stande. Tabelle 6 gibt eine Übersicht der verwendeten Produkte.

Hersteller	Komponente	Bezeichnung	Modul	Dichte [g/cm ³]
Wöllner	Wasserglas	Natriumsilikat HK 35	3,7	1,52
	Wasserglas	Ligasil 39	3,3	1,38
	Wasserglas	Betol 50 T	2,5	1,32
Wöllner	Natriumaluminat	Stabilisil 19	-	1,48
	Natriumbikarbonat	Stabilisil 23	-	2,20
Overlack	Natriumaluminat	Overlack	-	1,47

Tabelle 6: Übersicht der Produkte

4.2 Versuchsrahmen

In der Praxis und Literatur gibt es unterschiedliche Angaben, in welchem Verhältnis die oben angeführten Einzelkomponenten gemischt werden, um ein Weichgel zu erzeugen. Die Versuche, die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt werden, orientieren sich an diesen Werten. Der sich daraus ergebende Versuchsumfang wird im folgenden Abschnitt detailliert dargelegt.

Als grundsätzliche Rahmenbedingung wurde bei allen Versuchen von – in der Literatur zu bezeichneten – Pumpzeiten von 30 bis 90 Minuten ausgegangen [KIRSCHNER,2008]. Das bedeutet, dass für diese Dauer die Lösung eine gewisse Fließfähigkeit (Viskosität) beibe-

halten muss, um erfolgreich injiziert werden zu können. Ausgehend von dieser Anforderung ist der Versuchsumfang festgelegt worden.

4.2.1 Versuchsumfang

Die Gelier- und Kippzeit wurde mittels visueller bzw. manueller Überprüfung, mit Hilfe des Rotationsviskosimeters und dem Marsh-Trichter untersucht. Tabelle 7 gibt eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen:

Versuchsreihe	Einzelversuch	Natriumsilikat	Natriumaluminat	Wasser	Temperatur	
		[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[°C]	[°C]
1	1	14,0	1,5	84,5	10	24
	2	18,0	1,5	80,5	10	24
	3	20,0	1,5	78,5	10	24
	4	22,0	1,5	76,5	10	24
	5	25,0	1,5	73,5	10	24
2	1	14,0	2,0	84,0	10	24
	2	18,0	2,0	80,0	10	24
	3	20,0	2,0	78,0	10	24
	4	22,0	2,0	76,0	10	24
	5	25,0	2,0	73,0	10	24
3	1	14,0	2,5	83,5	10	24
	2	18,0	2,5	79,5	10	24
	3	20,0	2,5	77,5	10	24
	4	22,0	2,5	75,5	10	24
	5	25,0	2,5	72,5	10	24

Tabelle 7: Übersicht des Versuchsumfanges

Eine Versuchsreihe umfasst fünf Einzelversuche. Pro Temperaturniveau und Ausgangsprodukt werden drei Versuchsreihen durchgeführt. Dabei bleibt je Versuchsreihe der Natriumaluminatanteil konstant, der Natriumsilikatanteil ist je Einzelversuch zu steigern und das Anmachwasser ist auf 100 Vol.-% zu ergänzen. Die Steigerung erfolgt in den folgenden Schritten 14 / 18 / 20 / 22 / 25 Vol.-% Natriumsilikat. Bei jeder Versuchsreihe wird der Natriumaluminatanteil gesteigert 1,5 / 2,0 / 2,5 Vol.-%. Es werden zwei Temperaturniveaus betrachtet, einmal bei 10 °C und ein zweites Mal bei 24 °C.

Es werden drei Natriumsilikate mit unterschiedlichen Moduln (Betol, Ligasil 39 und HK 35) und drei Natriumaluminat (Stabilil 19, Stabilil 23 und Overlack) untersucht. Da von den Wassergläsern Betol und HK 35 nur 10 Liter zur Verfügung standen, musste der Versuchsumfang eingeschränkt werden. Mit Betol werden zwei Versuchsreihen im grundwasserrelevanten Temperaturbereich von 10°C und einem Reaktivanteil von 1,5 / 2,0 Vol.-% im Rotationsviskosimeter gemacht. Parallel dazu wird die Gelier- und Kippzeit bei Raumtem-

peratur (auf der TU Wien Grundbauinstitut 24°C) optisch und mittels Kipptest bestimmt. Für das Wasserglas HK 35 gilt dieselbe Vorgehensweise, nur ist ein Natriumaluminatanteil von 2,0 / 2,5 Vol.-% verwendet worden. Mit den Produkten Stabisil 19 und Overlack ist der komplette Versuchsumfang gemacht worden. Stabisil 23 stand jedoch nur in einem sehr begrenzten Umfang zur Verfügung und ist daher nur mit 2,0 Vol.-% bei 10 und 24°C eingesetzt worden. Insgesamt ergibt dies 120 Versuche mit dem Rotationsviskosimeter und 120 Versuche mittels visueller bzw. manueller Bestimmung. Im Falle des Marsh-Trichters ließ sich nicht derselbe Versuchsumfang durchführen. Mit dieser Methode wurden lediglich sieben Weichgelproben getestet und analysiert.

4.2.2 Nomenklatur

Wie bereits oben erläutert, werden die Einzelkomponenten in unterschiedlichen Volumsverhältnissen gemischt um verschiedene Weichgelproben für Versuchszwecke zu erhalten. Um dies übersichtlich und nachvollziehbar darstellen zu können, wurde folgende Nomenklatur festgelegt: Bei den Verhältnisangaben gilt immer die Reihenfolge Wasserglas/Reaktiv/Wasser. Die Angabe 18 / 2 / 80 bedeutet somit, dass die Lösung aus 18% Wasserglas, 2% Reaktiv und 80% Wasser besteht. Um zu kennzeichnen, um welches konkrete Produkt es sich handelt, wurden folgende Abkürzungen gewählt:

Hersteller	Komponente	Bezeichnung	Abkürzung
Wöllner	Wasserglas	Betol 50 T	Betol
	Wasserglas	Ligasil 39	W
	Wasserglas	Natriumsilikat HK 35	HK35
Wöllner	Natriumaluminat	Stabisil 19	W
	Natriumbikarbonat	Stabisil 23	Stab23
Overlack	Natriumaluminat	Overlack	O

Tabelle 8: Übersicht der Produkte mit Abkürzungen

Die Bezeichnung W18 / W2 / 80 würde somit bedeuten, dass das Wasserglas Ligasil 39 und das Reaktiv Stabisil 19 verwendet wurde. Das Temperaturniveau wurde gegebenenfalls am Ende noch angehängt, z.B. HK35 18 / Stab23 2 / 80_10°.

4.3 Anmischen der Weichgelproben

Wie aus dem Versuchsumfang ersichtlich, mussten die unterschiedlichen Einzelkomponenten im konkreten Mischverhältnis vermengt werden. Hierbei muss beachtet werden, dass sich einerseits die Mischreihenfolge auf den Gelbildungsprozess von Weichgellösungen auswirkt. Andererseits haben unterschiedliche Mischverhältnisse einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Weichgels.

Bezüglich der Reihenfolge gibt es vier Möglichkeiten des Anmischens:

1) *Wasser + Wasserglas mischen, danach beide mit dem Reaktiv vermischen*

Es zeigt sich, dass die Zugabe der konzentrierten Natriumaluminatlösung in die durch das Anmachwasser vorverdünnte Wasserglaslösung zum Ausflocken führt siehe Abbildung 20. Der Grund hierfür ist die konzentrierte Natriumaluminatlösung. Die Aluminate sind nur von einer schwachen Hydrathülle umgeben, welche durch das Vermischen der vorverdünnten Wasserglaslösung sofort aufbricht und zu einer spontanen Verkieselung (Ausflocken) führt. Durch stärkeres Unterrühren mit einem Schneebesens konnte dieser Effekt auch nicht vermieden werden.

2) *Wasserglas + Reaktiv mischen, danach beide mit Wasser mischen*

Werden beide Lösungen in konzentrierter Form gemischt und erst anschließend Wasser beigemischt, kommt es nicht wie unter Punkt eins beschrieben zu einer spontanen Verkieselung. Viel mehr kommt es zu einer sofortigen Gelbildung, welche aber unvollständig ist. Eine komplette Gelierung konnte auch nicht durch Unterrühren mit Hilfe eines Schneebesens erreicht werden, siehe Abbildung 21.

3) *Wasser + Reaktiv mischen, danach beide mit Wasserglas mischen*

Mit dieser Mischreihenfolge wird eine gute Weichgelqualität erreicht. Es ergeben sich nahezu idente Kippzeiten wie mit der Mischreihenfolge unter Punkt vier. Auf der Baustelle wird diese am häufigsten angewendet, da sie platzsparend und einfach handzuhaben ist.

4) *½ Wasser + Reaktiv mischen und ½ Wasser + Wasserglas mischen und dann erst die beiden zusammenmischen*

Für die durchgeführten Untersuchungen hat sich bewährt, zuerst das Reaktiv (Natriumaluminat) mit der Hälfte des Anmachwassers zu vermischen. In einem weiteren Vormischgang wurde dann das verbleibende Anmachwasser mit dem Wasserglas versetzt. Am Ende wurden die beiden vorgemischten Chargen zu einer Probe zusammengefügt, siehe Abbildung 22. Diese Mischreihenfolge liefert das beste Ergebnis ist jedoch nur für Laborversuche relevant.

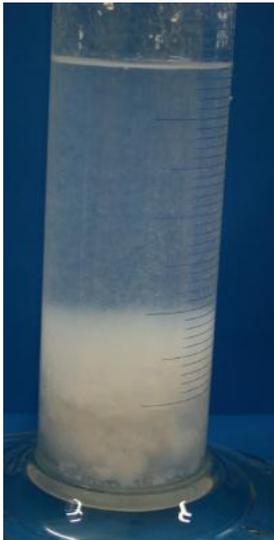


Abbildung 20:

Wasser + Wasserglas und dann
Reaktiv



Abbildung 21:

Wasserglas + Reaktiv und dann
Wasser



Abbildung 22:

½ Wasser + Reaktiv und
½ Wasser + Wasserglas

Abgesehen von der Reihenfolge ist nun der Anteil der unterschiedlichen Bestandteile an der Gesamtmenge für den Gelbildungsprozess von Bedeutung. Die im Versuchsumfang festgelegten volumetrischen Verhältnisse, die sich wiederum aus der Baupraxis und Erfahrungswerten herleiten ließen, müssen – um die jeweiligen Weichgelproben anmischen zu können – in ein Massenverhältnis (m.-%) umgerechnet werden. Für diese Herleitung ist die jeweilige Dichte ρ der Einzelkomponenten, die vom Hersteller angegeben ist, heranzuziehen. Exemplarisch wird diese Berechnung nun folgend für eine Weichgelmischung bei 20°C mit dem Volumsverhältnis 18% Wasserglas, 2% Reaktiv und 80% Wasser dargestellt (siehe Tabelle 9).

	Wasserglas	Reaktiv	Wasser	Summe
Vol.-%	18,00	2,00	80,00	100,00
ρ [g/cm³]	1,37	1,48	0,99	
m_A [g]	24,66	2,96	79,92	107,54
m.-%	22,93	2,75	74,32	100,00
Probemenge [g]				500,00
m_E [g]	114,66	13,76	371,58	500,00

Tabelle 9: Umrechnung der Volumenverhältnisse auf Einzelmassen einer Weichgelmischung

Ist das Massenverhältnis errechnet, muss anschließend die für den Versuch benötigte Probemenge festgelegt werden. Diese wird mit dem jeweiligen Massenprozentsatz m.-% der Einzelkomponenten multipliziert. Dies ergibt die Einzelmassen m_E im gewünschten Verhältnis. Mittels einer Waage, welche auf hundertstel Gramm genau misst, werden die ermittelten Einzelmengen abgemessen.

Für die folgenden Versuche wurde pro Einzelprobe 500 g angemischt, da 250 g für rheologische Untersuchungen und 200 g für die Untersuchung des Alterungsprozesses benötigt wurden. Der Rest dient als Reserve und zur optischen Unterstützung während der Versuche.

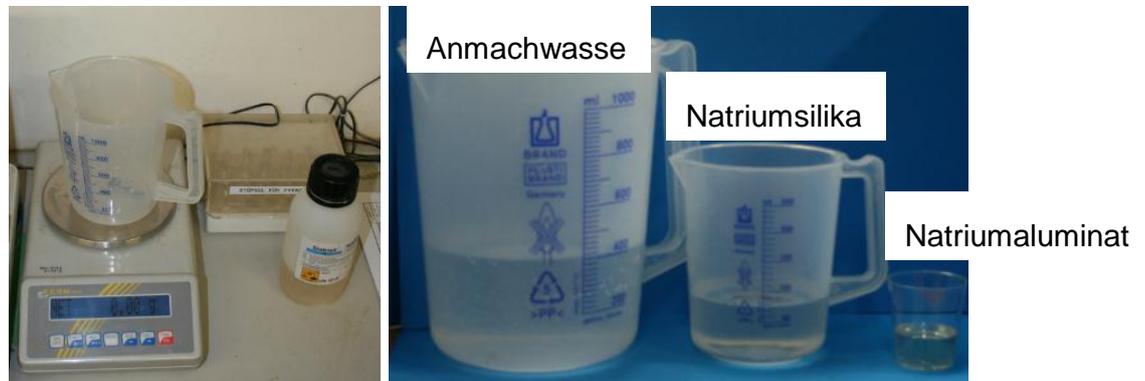
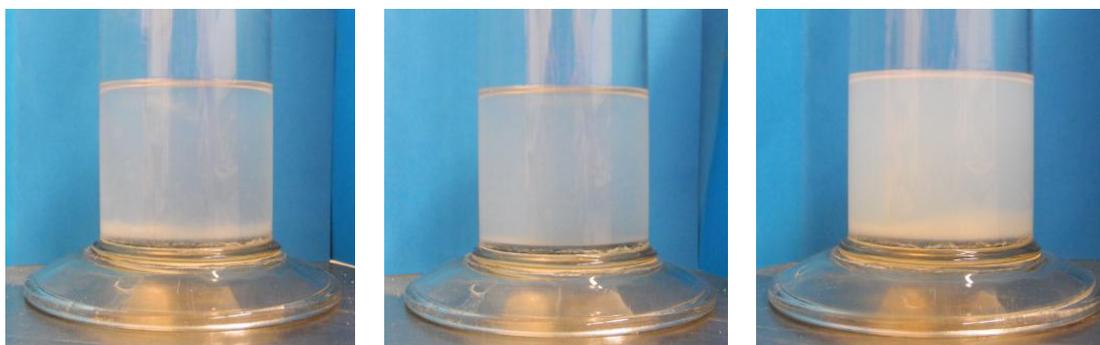


Abbildung 23: links Abwiegen der Einzelkomponenten, rechts veranschaulichen der Einzelmengen einer Standard Weichgelmischung

Um eine visuelle Beurteilung treffen zu können, sind durchsichtige Behälter verwendet worden. Die einzelnen Bestandteile wurden entsprechend ihrer Masse abgewogen und bereitgestellt, siehe Abbildung 23.

4.4 Ermittlung der Gelierzeit mittels visueller Kontrolle

Das Einsetzen des Gelierprozesses wird, wie in Kapitel 3.4 theoretisch beschrieben, visuell oder mittels Rotationsviskosimeter bestimmt. Die Ermittlung der Gelierzeit mittels visueller Kontrolle ist sehr von der individuellen Wahrnehmung des Prüfenden abhängig. Der Übergang von der klaren, leicht gelblichen Flüssigkeit in eine trübe, milchig Weiße geschieht in der Regel nicht schlagartig. Vielmehr findet ein allmählicher Wechsel statt, dessen Dauer hauptsächlich von den Mischungsverhältnissen abhängt, siehe Abbildung 24



Eintrübung nach 10 min

Eintrübung nach 15 min

Eintrübung nach 20 min

Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf der Eintrübung

Als Start des Versuches kann jener Zeitpunkt angesehen werden, an dem sich alle drei Komponenten vermischt haben [TAUSCH, 1990]. Die Uhrzeit sowie die Temperatur wird notiert, der pH-Wert gemessen und ebenso wie die Dichte in einem Messprotokoll festgehalten. Zur besseren visuellen Beurteilung der Gelierzeit ist es von Vorteil, wenn eine Vergleichsflüssigkeit zur Verfügung steht. Bestehend aus Wasser und einem entsprechenden Volumenanteil an Natriumaluminat, welches dem Wasser einen Gelbstich verleiht. Diese wird neben der Versuchslösung platziert. Die Trübung ist ein Zeichen für die Bildung von Molekülketten zu einem räumlichen Netzwerk. Dies nennt man Polymerisation, sie stellt den Zeitpunkt der Gelbildung dar.

4.4.1 Ergebnisse und Interpretation der visuellen Ermittlung

Gelierzeit bei unterschiedlichem Reaktiv- und Wasserglasanteil

In Abbildung 25 sind drei Versuchsreihen bei gleich bleibender Temperatur (24°C) dargestellt. Bei allen drei Chargen sind Produkte von der Firma Wöllner verwendet worden. Pro Versuchsreihe ist der Reaktivanteil konstant geblieben und der Wasserglasanteil schrittweise gesteigert worden. Die dunkelblaue Linie stellt eine fiktive Injektionsdauer von 30 min dar.

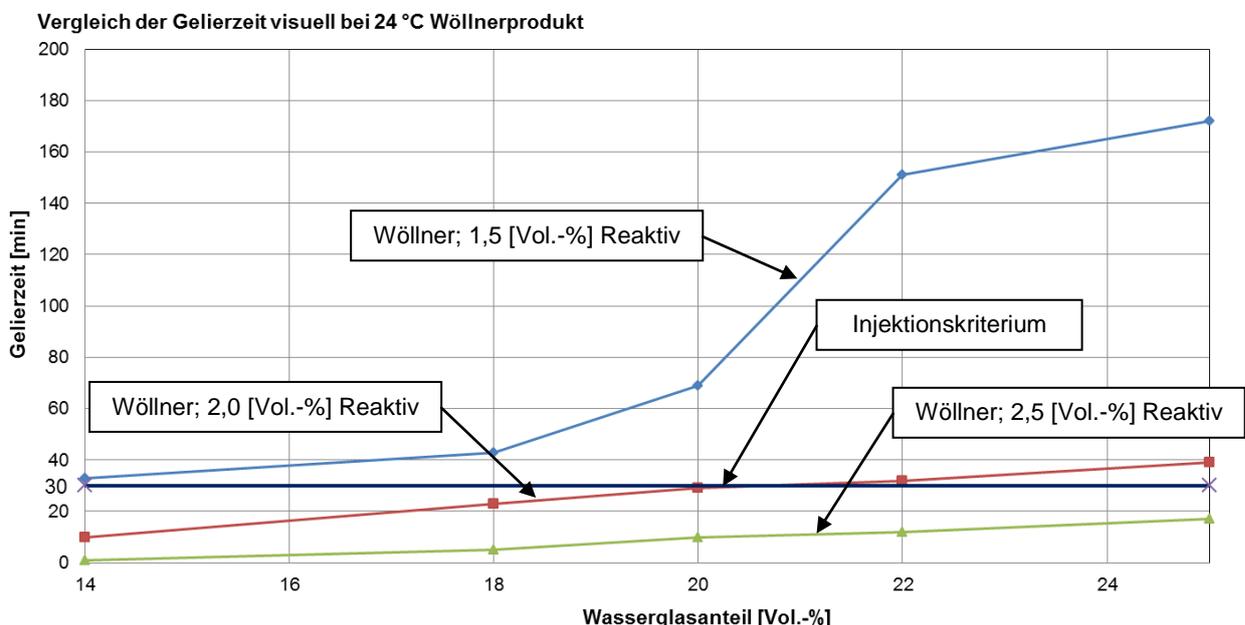


Abbildung 25: Vergleich der Gelierzeit bei 24 °C

Aus den Versuchen geht hervor, dass mit steigendem Reaktivanteil die Gelierzeit verkürzt wird. Mit steigendem Wasserglasanteil verlängert sich die Gelierzeit. Konkreter ergibt sich aus den drei Versuchsreihen:

- Ein Unterschied von 0,5 Vol.-% Reaktiv erzeugt eine zeitliche Differenz von 6 bis 130 min bei der Gelierzeit
- Ein Unterschied von 11 Vol.-% Wasserglas erzeugt eine zeitliche Differenz bei der Gelierzeit von 16 bis 130 min
- Die visuelle Bestimmung der Gelierzeit ist sehr subjektiv, speziell bei Mischungen mit niedrigem Reaktivanteil und hohem Wasserglasanteil zieht sich die Eintrübung über mehrere Minuten (bis zu 30 min).
- Die dunkelblaue Linie in Abbildung 25 stellt die Pumpdauer von 30 min dar. Liegt die Gelierzeit unter diesem Niveau, ist die Mischung nicht mehr ausreichend pumpfähig. Dies ist bei acht von fünfzehn Versuchen der Fall. Dabei ist zu beachten, dass die Versuche bei 24 °C Umgebungstemperatur durchgeführt wurden und die durchschnittliche Grundwassertemperatur in Österreich ca 10 °C beträgt.

Vergleich der Gelierzeit mit unterschiedlichen Reaktivprodukten

In der folgenden Abbildung 26 werden die Gelierzeiten mit unterschiedlichen Reaktivprodukten dargestellt. Pro Versuchsreihe ist der Reaktivanteil konstant geblieben und der Wasserglasanteil schrittweise gesteigert worden. Die Reaktive Stabisil 19 und Overlack sind flüssige Natriumaluminatlösungen mit einer Dichte von 1,48 g/cm³, Stabisil 23 ist ein Natriumbikarbonat Pulver mit einer Dichte von 2,2 g/cm³.

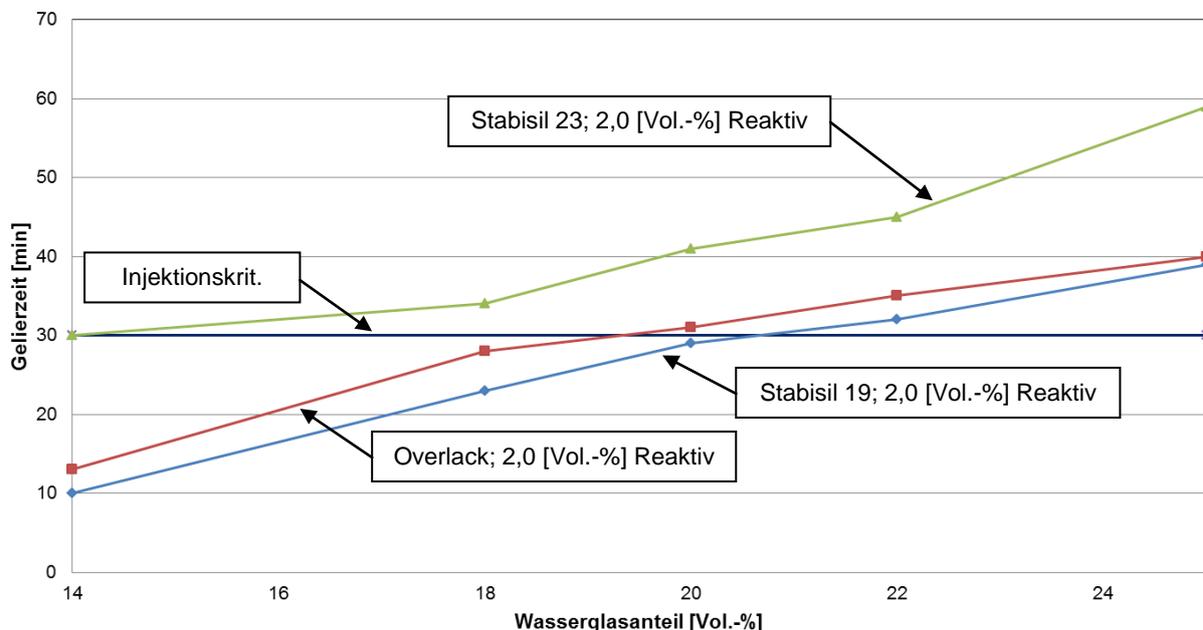


Abbildung 26: Vergleich der Gelierzeit bei 24 °C mit unterschiedlichen Reaktiven

Bei konstantem Natriumaluminatanteil und steigendem Natriumsilikatanteil ist eine deutliche Zunahme der Gelierzeit zu erkennen. Dies ist bei allen drei Reaktiven festzustellen. Die

Ursache für die abweichenden Gelierpunkte zwischen Overlack und Stabasil 19 liegt in der subjektiven Einschätzung des Gelierpunktes, diese beträgt fünf bis zehn Minuten. Stabasil 23 weicht jedoch deutlich von den beiden anderen Produkten ab. Da Stabasil 23 ein Natriumbikarbonat ist, kann der Zeitunterschied auf die chemische Zusammensetzung zurückgeführt werden.

Vergleich der Gelierzeit in Abhängigkeit der Temperatur

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Temperatur auf die Gelierzeit bei einem Reaktivanteil von 2,0 Vol.-% mit den Reaktiven Stabasil 19 (Wöllner) und Overlack gezeigt.

Die blaue Linie in Abbildung 27 stellt das dreißig Minuten Injektionskriterium dar. Dabei fällt auf, dass bei 10 °C Umgebungstemperatur acht von zehn Messwerten über der fiktiven Injektionsdauer liegen. Wohingegen bei 24 °C nur fünf von zehn Messwerten darüber sind. Damit gilt der Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und Gelierzeit als bestätigt, nämlich dass die Gelbildung bei niedrigen Temperaturen langsamer abläuft als bei hohen. Wobei der Einfluss der Temperatur wesentlich geringer bei niedrigem Wasserglasanteil (14-18 Vol.-%) ist als bei höherem Anteil (22-25 Vol.-%). Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Temperaturniveaus bei 14 Vol.-% Wasserglasanteil beträgt rund 10 min, bei 20 Vol.-% rund 15 min, bei 25 Vol.-% rund 26 bis 45 min.

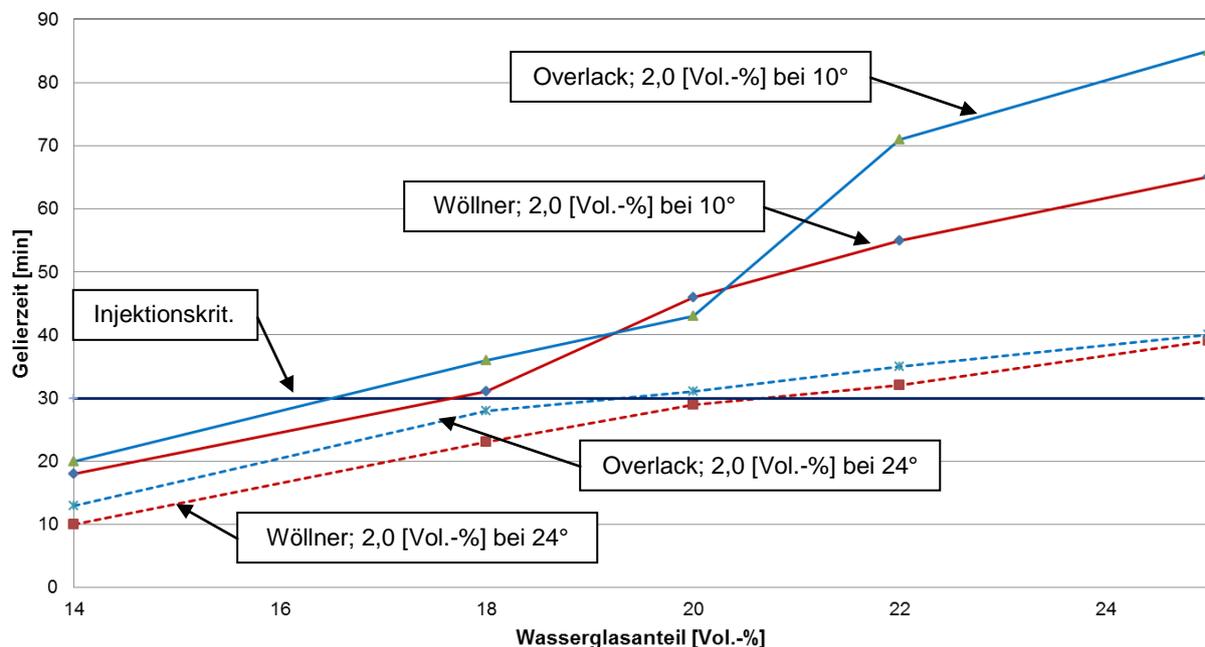


Abbildung 27: Vergleich der Gelierzeit bei zwei Temperaturniveaus

Vergleich der Gelierzeit unterschiedlicher Wasserglasmoduln bei 10 °C

Die Gelierzeit ist mit den Moduln 2,5 / 3,3 / 3,7 ermittelt worden, der Reaktivanteil betrug bei allen Versuchen 2,0 Vol.-%. Der Unterschied der Moduln ist durch das $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Verhältnis bestimmt.

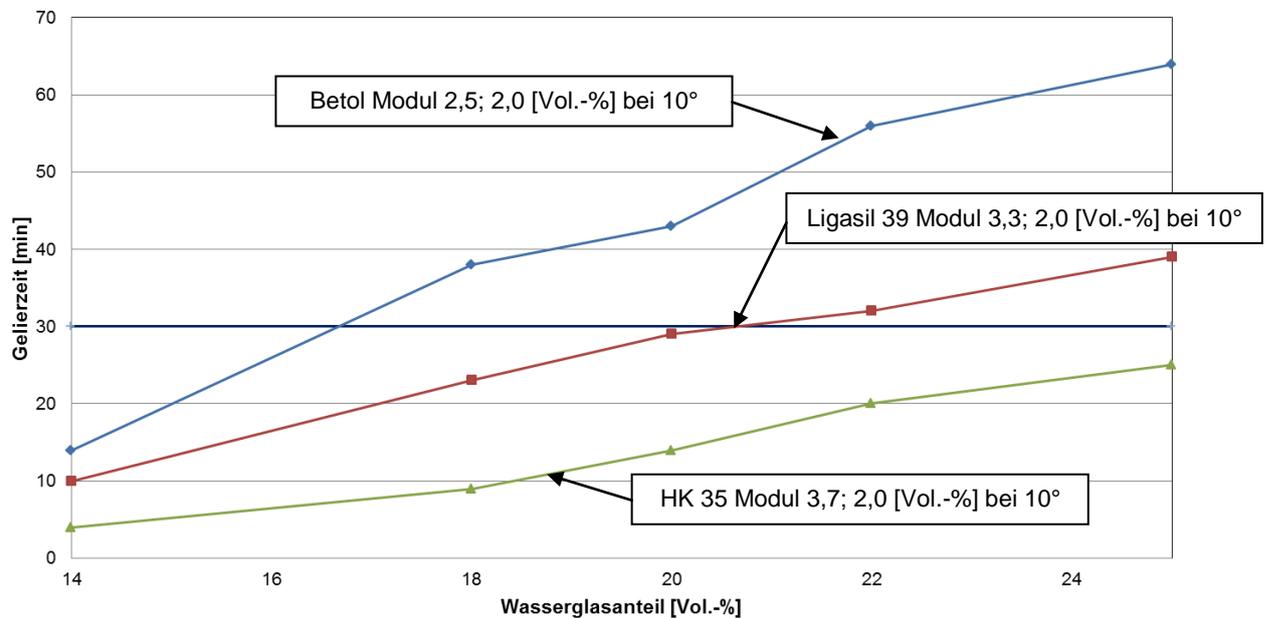


Abbildung 28: Vergleich der Gelierzeit mit unterschiedlichen Wasserglasmoduln bei 10°C

Abbildung 28 zeigt deutlich, dass wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, die Gelierzeit mit steigendem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Verhältnis abnimmt.

4.5 Ermittlung der Kippzeit mittels Kipptest

Neben der Gelierzeit ist die Kippzeit von Relevanz: Der Kippzeitpunkt ist erreicht, wenn die Probe um 90° aus der vertikalen Achse gedreht werden kann und keine Flüssigkeit mehr aus dem Behälter fließt. In Abbildung 29 sind die optisch relevanten Zeitpunkte abgebildet.



Abbildung 29: Gelier- und Kippzeitpunkt einer Mischung

4.5.1 Ergebnisse und Interpretation des Kipptests

Kippzeit bei unterschiedlichem Reaktiv- und Wasserglasanteil

In Abbildung 30 sind drei Versuchsreihen bei gleich bleibender Temperatur (10°C) dargestellt. Bei allen drei Chargen sind Produkte von der Firma Wöllner verwendet worden. Pro Versuchsreihe ist der Reaktivanteil konstant geblieben und der Wasserglasanteil schrittweise gesteigert worden.

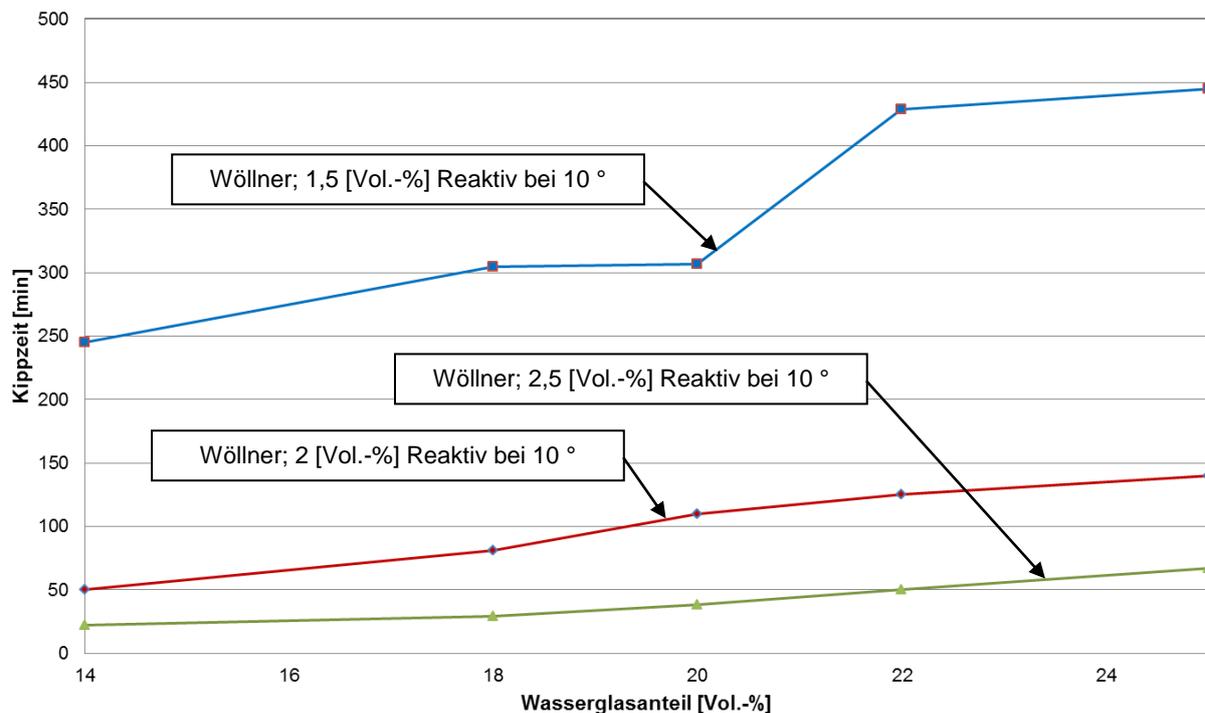


Abbildung 30: Vergleich der Gelierzeit bei 10 °C

Aus allen drei Versuchsreihen geht hervor, dass mit steigendem Reaktivanteil die Kippzeit verkürzt wird. Mit steigendem Wasserglasanteil verlängert sich die Kippzeit. Konkreter ergibt sich aus den drei Versuchsreihen:

- Ein Unterschied von 0,5 Vol.-% zwischen den Versuchsreihen mit 1,5 und 2 Reaktivanteil erzeugt eine zeitliche Differenz von 195 bis 305 min sowie zwischen 2 und 2,5 % eine Differenz von 28 bis 73 min bei der Gelierzeit. Daraus folgt, dass Mischungsverhältnisse mit einem Reaktivanteil zwischen 1,5 – 2 genauer dosiert werden müssen als jene zwischen 2 – 2,5, da schon geringe Mengenabweichungen zu erheblichen Änderungen bei der Kippzeit führen.
- Die Versuchsspanne des Wasserglasanteils beträgt 11 Vol.-% (14 – 25). Diese erzeugt eine zeitliche Differenz bei der Versuchsreihe mit 1,5 % von 200 min, mit 2 % von 90 min und mit 2,2 % von 45 ° in der Kippzeit. Der zeitliche Einfluss auf die Kippzeit ist

wiederum bei 1,5 % Reaktivanteil wesentlich höher. Daraus folgt, dass durch Zugabe von Wasserglas die Kippzeit verzögert werden kann und der Einfluss bei geringem Reaktivanteil wächst.

Kippzeit bei unterschiedlichen Reaktiv- und Natriumsilikatmoduln

In Abbildung 31 sind vier Versuchsreihen bei gleich bleibender Temperatur (10°C) dargestellt. Dabei kam das Reaktivprodukt Stabisil 23 sowie die Natriumsilikate HK 35 (Modul = 2,5), Ligasil 39 (Modul = 3,3) und Betol (Modul = 3,7) zur Anwendung. Pro Versuchsreihe ist der Reaktivanteil konstant geblieben und der Wasserglasanteil schrittweise gesteigert worden.

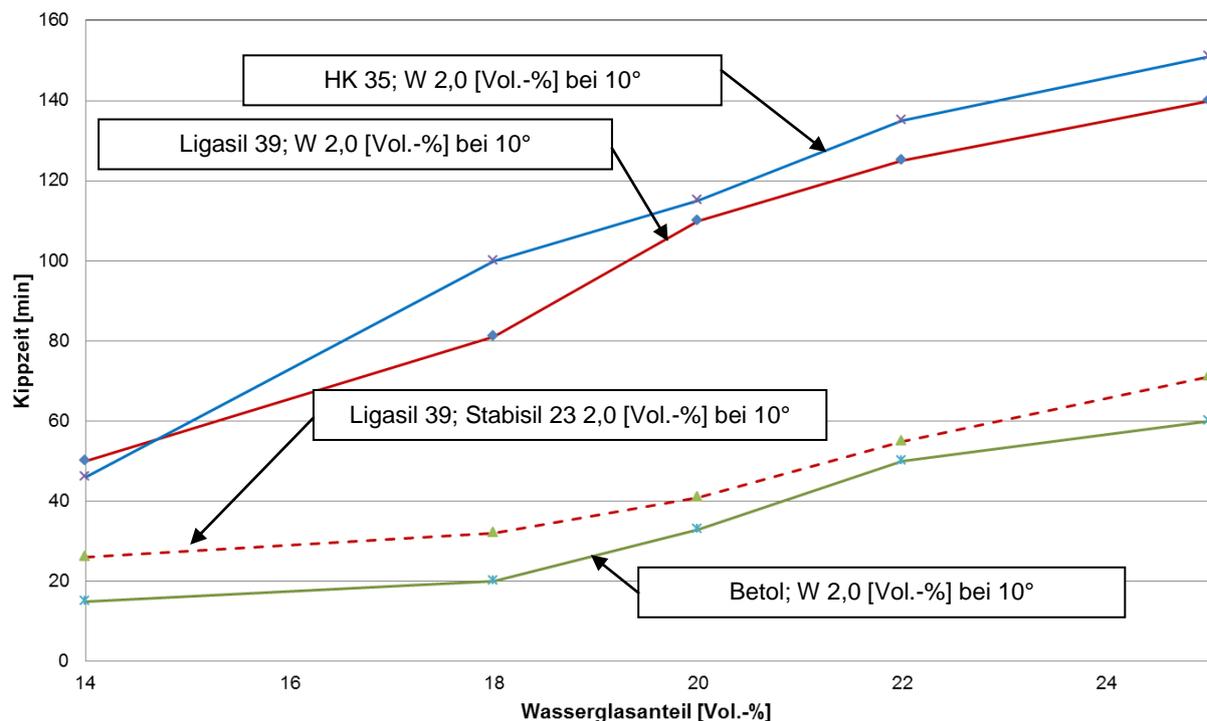


Abbildung 31: Kippzeiten bei 10 °C mit unterschiedlichen Produkten und einem Reaktivanteil 2,0 Vol.-%

Die wesentlichen Eigenschaften sind:

- Bei allen Weichgelprodukten steigt die Kippzeit mit zunehmendem Wasserglasanteil
- Bei allen Proben ist die Kippzeit mit sinkender Temperatur angestiegen. Die Ausnahme ist Stabisil 23 als Reaktiv – hier steigt die Kippzeit mit zunehmender Temperatur an. Dies ist auf die Löslichkeit von Natriumbikarbonat zurückzuführen. Diese ist bei 7 °C am größten und nimmt mit steigender Temperatur ab. Natriumbikarbonat wird in Pulverform geliefert und muss vor dem Einsatz in Wasser aufgelöst werden. Lässt man diese Lösung 24 Stunden stehen, verzögert sich der Kippunkt um eine Stunde.

- Mit steigendem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ Verhältnis (Modul) nimmt die Kippzeit ab, siehe Betol (Modul 2,5), Ligasil 39 (Modul 3,3) und HK 35 (Modul 3,7).

4.6 Ermittlung der Gelier- und Kippzeit mittels Rotationsviskosimeter

Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist der Gelbildungsprozess von der räumlichen Vernetzung der gelbildenden Stoffe (Polymerisation) bestimmt, welche einen deutlichen Anstieg der Viskosität in der Mischung bewirkt. "Viskosität ist Maß für die Zähigkeit eines Stoffes. Kommt es zum Fließen eines Stoffes, so werden Moleküle gegeneinander verschoben und es treten innere Reibungskräfte auf, deren Größe durch die Viskosität beziffert wird [KAINRATH, 2012]." Der Viskositätsanstieg über die Zeit ist mit einem Rotationsviskosimeter gemessen worden. Das Fließverhalten von Flüssigkeiten wird durch die Rheologie beschrieben. Die grundlegenden rheologischen Parameter werden mittels "Zwei-Platten-Modell" definiert, siehe Abbildung 32: Auf einem Flüssigkeitsfilm liegt eine Platte mit der Berührungsfläche A , die durch eine äußere Kraft F mit der Geschwindigkeit w_0 parallel zur ruhenden Unterlage bewegt wird.

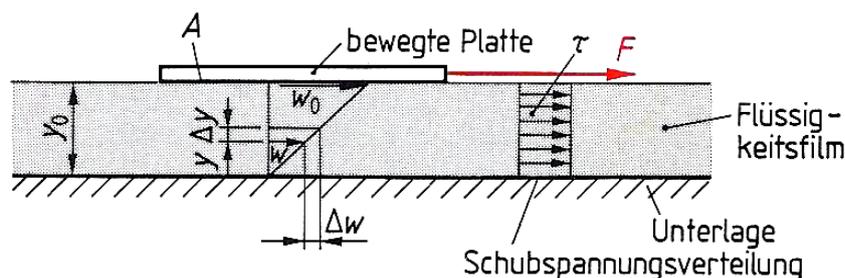


Abbildung 32: Bewegung einer Platte auf einem Flüssigkeitsfilm [STEGER, 1999]

Die Dicke des Flüssigkeitsfilms y_0 ist sehr klein und im einfachsten Fall kann die Geschwindigkeitsverteilung zwischen bewegter Platte und Unterlage als linear angenommen werden. Der Gradient stellt das Schergefälle $\dot{\gamma}$ dar [STEGER,1999]. Bei laminarem Strömen zeigt sich, dass die Kraft F proportional zur Fläche A und der Geschwindigkeit w sowie verkehrt proportional zur Dicke des Flüssigkeitsfilms y_0 ist.

$$F \sim A \frac{\Delta w}{\Delta y}$$

Um die stoffliche Eigenart einer Flüssigkeit zu berücksichtigen wird der Proportionalitätsfaktor bzw. die dynamische Viskosität (η) eingeführt, mit der Einheit Pa s ; Ns/m^2 .

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{\Delta w}{\Delta y}$$

So ergibt sich das Fließgesetz mit:

$$\tau = \eta * \dot{\gamma}$$

Flüssigkeiten werden nach ihrem Fließverhalten eingeteilt. Es wird zwischen newtonschen und nicht newtonschen Flüssigkeiten unterschieden. Bei newtonschen Flüssigkeiten ist das Fließgesetz linear, das heißt die Schubspannung τ ist proportional der Änderungsgeschwindigkeit des Scherungswinkels $\dot{\gamma} = dw/dy$. Die dynamische Viskosität η ist konstant. Solch ein Fließverhalten zeigen Wasser, Weichgele, Alkohol, usw. Bei den nicht newtonschen Flüssigkeiten ist die Fließkurve keine Gerade. Je nach Form unterscheidet man ideal-plastische, Bingham-plastische, pseudo-plastische und dilatante Flüssigkeiten, siehe Abbildung 33. Beispiele für nicht newtonsche Flüssigkeiten sind Emulsionen, Suspensionen, Pasten, usw.

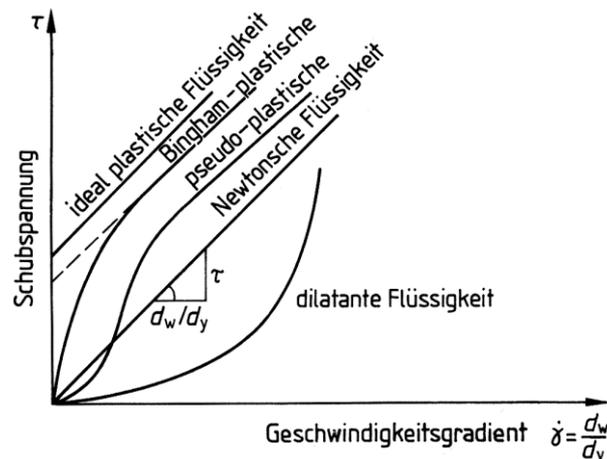


Abbildung 33: Fließkurven verschiedener Flüssigkeiten [STEGGER, 1999]

Rotationsviskosimeter bieten eine einfache und genaue Möglichkeit die relevanten rheologischen Parameter von Weichgelmischungen, für die Anwendung in der Injektionstechnik, zu ermitteln. Unter anderem ist es möglich die zeitliche Entwicklung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur zu messen. Für die Versuche wurde ein Viskosimeter VT 550 der Firma Haake verwendet, siehe Abbildung 34. Das zugehörige Messprogramm ist RheoWin. Dabei können das Schergefälle, die Temperatur, die Messintervalle für den individuellen Anwendungsfall geregelt bzw. gesteuert werden. Da die Randbedingungen genau einstellbar sind, ist es möglich reproduzierbare Messungen durchzuführen. Aus den standardisierten Versuchsdurchführungen lassen sich Unterschiede der Weichgelmischungen beurteilen. Weiters kann die Viskositätsentwicklung gemessen und die Kippzeit eindeutig bestimmt werden.

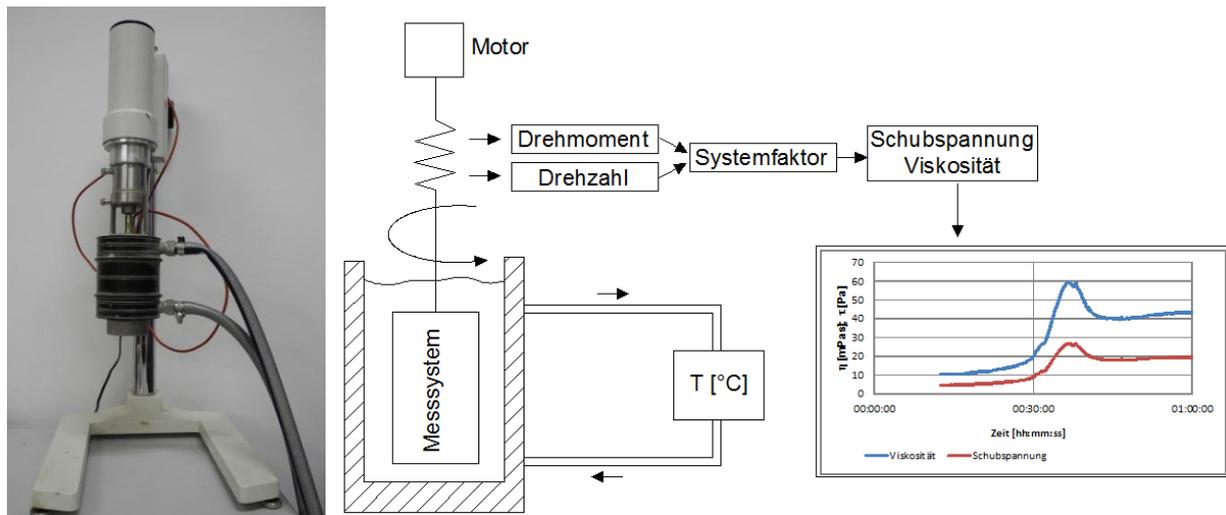


Abbildung 34 :links Rotationsviskosimeter; rechts Messprinzip [KAINRATH, 2012]

In der nachfolgenden Tabelle 10 werden kurz die wichtigsten technischen Daten des VT 550 angeführt.

Drehzahlbereich	0,45 min ⁻¹ bis 800 min ⁻¹
Drehmoment-Messung	bis 800 min ⁻¹ : 0,1 mNm bis 20 mNm
Auflösung [°]	Ca. 3 x 10 ⁻⁴
Messunsicherheit [%]	0,5
Temperaturmessung	-50°C bis +250°C
Auflösung [°C]	0,1
Messunsicherheit absolut [°C]	0,1

Tabelle 10: Technische Daten Haake Viscotester 550

Bei der Messeinrichtung handelt es sich um eine koaxiale Zylindermesseinrichtung mit einem Behälter aus Stahl und einem Zylinder. Die wesentlichen Parameter der Messeinrichtung sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

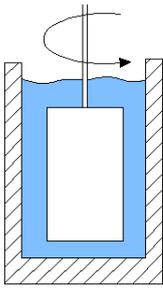
Messeinrichtung	MV2		Systemskizze
Messkörper			
Radius Ri [mm]	18,40		
Höhe L [mm]	60,00		
Messbecher			
Radius Ra [mm]	21,00		
Radienverhältnis Ra/Ri	1,14		
Spaltweite [mm]	2,60		
Füllvolumen [cm³]	56,00		
Systemfaktor			
f [Pa/Ncm]	76,80		
M [min/s]	0,90		

Tabelle 11: Technische Daten Haake VT 550

4.6.1 Messprinzip

"Das Grundprinzip eines Rotationsviskosimeters besteht darin, einen Messkörper bei vorgegebener Drehzahl in dem zu messenden Fluid zu rotieren und das benötigte Drehmoment zu messen. Als Messsysteme dienen für mittelviskose Proben in der Regel koaxiale Zylindersysteme. Das zu messende Fluid wird dabei im Ringspalt zwischen beiden Zylindern durch die Rotation des inneren (SEARLE-System) oder äußeren Zylinders (COUETTE-System) gemäß dem „Zwei-Platten-Modell“ einer definierten Scherung ausgesetzt. Als Messgrößen dienen dabei das Schergefälle, welches über die Umdrehungsgeschwindigkeit vorgegeben wird und das benötigte Drehmoment. Mittels der geometrischen Systemfaktoren des Messsystems kann die Viskosität aus dem gemessenen Drehmoment ermittelt werden. Das Viskosimeter wird in der Regel über den Computer gesteuert, wo auch die Auswertung der Messdaten und die grafische Darstellung der Fließkurven erfolgen [KAINRATH, 2012]".

Zur Veranschaulichung des Messprinzips folgt ein Beispiel. Dabei wird gezeigt, wie aus dem aufgewendeten Drehmoment zu einem bestimmten Zeitpunkt, die Viskosität ermittelt wird.

Gegeben ist ein Searle-System. Der Spalt zwischen den zwei konzentrischen Kreiszyllindern ist mit einer Weichgelmischung gefüllt. Der äußere Zylinder ist fix, führt also keine Bewegung aus. Im Messprogramm wird ein konstantes Schergefälle von $\dot{\gamma} = 450 [1/s]$ eingestellt, gemessen wird ein Drehmoment von $M = 9,50 \times 10^{-4} Nm$. Zylinderabmessungen $r_1 = 1,84 \text{ cm}$, $r_2 = 2,0 \text{ cm}$, $h = 6 \text{ cm}$, siehe *Skizze*.

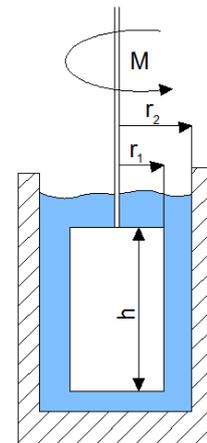
$$\tau = \eta * \dot{\gamma} = \eta \frac{dw}{dy} \quad dy = dr$$

$$M = \tau * A * r = 2r^2 * \pi * h * \tau \rightarrow \tau = \frac{M}{2r^2 * \pi * h}$$

Daraus folgt:

$$\eta = \frac{M}{2 * (r_2^2 - r_1^2) * \pi * \dot{\gamma} * h} = \frac{9,50 * 10^{-4}}{2 * (0,02^2 - 0,0184^2) * \pi * 450 * 0,06} =$$

$$\eta = 0,040 Pa * s = 40 mPas$$



Skizze

Die geometrischen Randbedingungen, sowie das Schergefälle bleiben konstant. Es ändert sich nur die Größe des Drehmomentes um das Schergefälle konstant zu halten, da die Viskosität mit der Zeit zunimmt. So wird die Viskosität über die Zeit messtechnisch erfasst.

4.6.2 Versuchsdurchführung

Eine Kühlzelle umschließt den fixen Zylinder. Die Kühlzelle ist über ein Schlauchsystem mit einem Kühlaggregat verbunden. Eine Pumpe fördert das Kühlmedium (Wasser) durch das System. Mittels Temperaturfühler, welcher in der Kühlzelle installiert ist und mit dem Kühlaggregat verbunden ist, kann für die Versuchsdauer eine konstante Temperatur erreicht werden. Der Messablauf sieht so aus, dass die Weichgelprobe in das Messsystem eingebaut wird. Anschließend wird über das Messprogramm (RheoWin) der Versuch gestartet. Dabei wird mittels Kühlsystem zuerst die eingestellte Temperatur geregelt. Erst dann beginnt sich der Zylinder zu drehen und die eigentliche Messung der Viskosität beginnt. Die Drehgeschwindigkeit des Zylinders wird über das Schergefälle geregelt. Bei allen Versuchen steigt das Schergefälle kontinuierlich an. Nach zwei Minuten bleibt das Schergefälle von 450 sec^{-1} über die gesamte Messdauer konstant. Das Messintervall beträgt 10 Sekunden. Die Messung erfolgt bis zum Erreichen des Peaks, dieser stellt den Kippunkt dar.

Parallel zu einem Rotationsviskosimeterversuch ist immer ein manueller Versuch (Geliepunkt visuell bestimmt und Kippunkt mittels Kipptest) durchgeführt worden. War eine Eintrübung der Weichgellösung (Geliezeit) ersichtlich, ist der Zeitpunkt protokolliert worden. Nach Abschluss des Rotationsviskosimeterversuches ist das Messprotokoll ausgelesen und mit der Geliezeit abgeglichen worden. So ist die Viskosität zum Geliezeitpunkt bestimmt worden.

4.6.3 Ergebnisse und Interpretation der Viskositätsbestimmung

Im Folgenden werden Versuchsergebnisse gezeigt und interpretiert. Dabei werden die Einflussparameter – Mischungsverhältnisse, unterschiedliche Produkte und Temperatur untersucht. Der komplette Versuchsumfang ist dem Anhang A zu entnehmen.

Untersuchungen der Viskositätsentwicklung in Abhängigkeit des Wasserglasanteils bei 10°C

Es sind fünf Einzelversuche mit veränderlichem Wasserglasanteil und konstantem Reaktivanteil in Tabelle 12 dargestellt. Die Viskosität beim Gelpunkt bewegt sich in einem Bereich von 13 mPas. Die Mischungen mit einem Natriumsilikatanteil zwischen 18 - 26 % erreichen Gelierzeiten, die für die Weichgelinjektion von Relevanz sind (30 bis 90 Minuten).

Der Peak jedes Einzelversuches stellt den Kippunkt dar. Beim Erreichen des Kippunktes haben alle Versuche annähernd dieselbe Viskosität von 77 mPas. Nur Versuch W14 / W2 / 84 liegt etwas darunter mit 72 mPas. Grund dafür könnte das deutlich schnellere Polymerisieren der Mischung sein. Bedingt durch den niedrigen Wasserglasanteil sind auch weniger polymerisierte Silikate in der Lösung, was zur Folge hat, dass der innere Zusammenhalt der Mischung geringer ist.

Bezeichnung	Gelpunkt		Kippunkt	
	Gelierzeit	η	Kippzeit	η
	[min]	[mPas]	[min]	[mPas]
W 14 / W 2 / 84	00:16	12,9	00:49	71,5
W 18 / W 2 / 80	00:29	12,7	01:16	77,9
W 20 / W 2 / 78	00:45	13,1	01:44	77,9
W 22 / W 2 / 76	00:58	13,2	01:58	77,3
W 26 / W 2 / 72	01:06	13,1	02:11	76,6
Wasserglas...W = Ligasil 39 (Natriumsilikat, Modul 3,3) Reaktiv...W= Stabasil 19 (Natriumaluminat)				

Tabelle 12: Messergebnisse bei unterschiedlichen Wasserglasanteil und konstantem Reaktivanteil

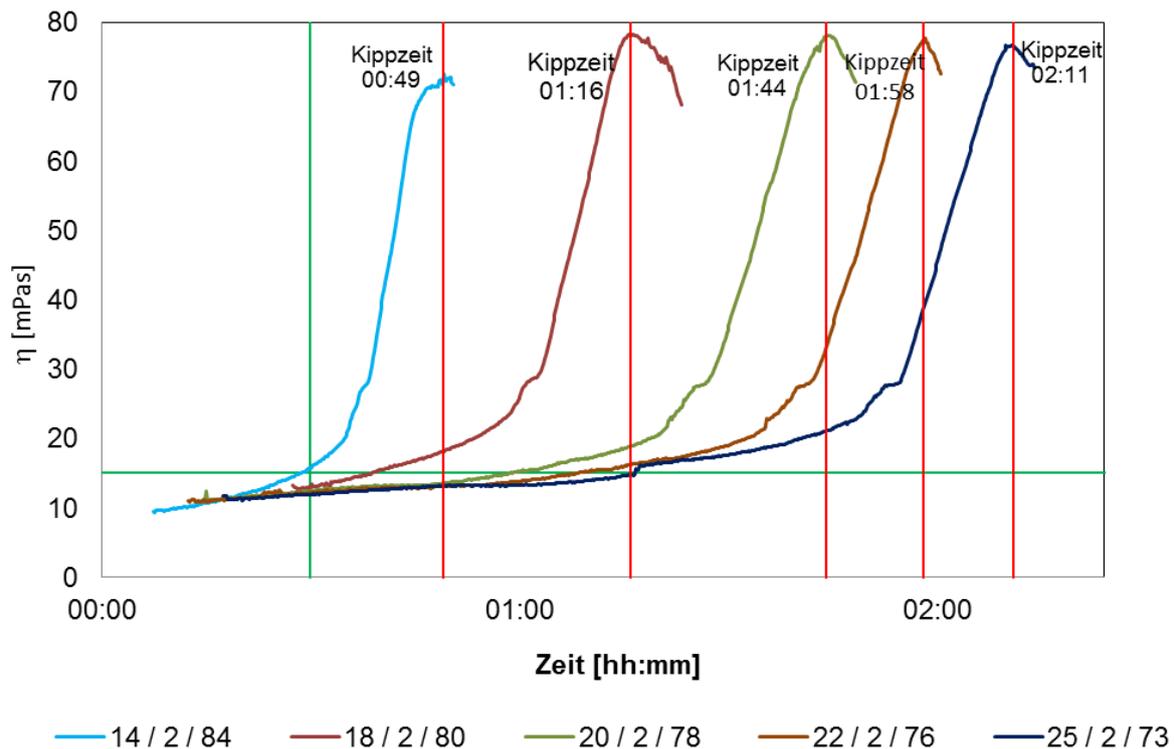


Abbildung 35: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichem Wasserglasanteil

Steigert man den Wasserglasanteil, nimmt damit verbunden auch die Gelier- und Kippzeit zu, siehe Tabelle 12 und Abbildung 35. Dies ist bereits durch die visuelle Beurteilung und den Kipptest bewiesen. Die Messung mit dem Rotationsviskosimeter ermöglicht jedoch die Abbildung der zeitlichen Viskositätsentwicklung. Daraus geht hervor, dass die Weichgellösungen zu Beginn eine Viskosität von 10 mPas aufweisen, beim Einsetzen des Gelbildungsprozesses (Gelierzeit) etwa 13 mPas. Die Viskositätsentwicklung zwischen Anfangsviskosität und dem Einsetzen der Gelierung ist für die Injektionstechnik von Bedeutung, weil in dieser Zeitspanne die angemischte Weichgellösung in den Baugrund injiziert werden muss. TAUSCH [1990] bestimmte die Grenze der Viskosität für die Injektion mit 15 mPas. Diese Grenze zeigt die horizontale grüne Linie in Abbildung 35. Erhöht man nun den Wasserglasanteil von 14 auf 18 Vol.-% bewirkt dies eine Steigerung in der Gelierzeit von 13 min, jedoch erhöht man von 22 auf 26 Vol.-% nur 8 min. Dies legt den Schluss nahe, dass die Gelier- und Kippzeit nicht durch immer weiteres Zugeben von Wasserglas verlängert werden kann. Ganz im Gegenteil, wie aus dem Kapitel Mischreihenfolge bekannt, setzt ein sofortiger Gelbildungsprozess, beim Mischen von Wasserglas und Reaktiv und anschließend beide mit Wasser, ein. Ab 35 Vol.-% kehrt sich der Prozess wieder um und die Kippzeit nimmt wieder ab. Jedoch bei 50 Vol.-% Wasserglasanteil geliert ein Teil sofort, der verbleibende Teil geliert gar nicht. Im Bereich zwischen 18 und 22 [Vol.-%] Wasserglas liegt das Optimum für die Injektion.

Legt man die Versuchskurven am Kippunkt übereinander, erkennt man, dass der Viskositätsanstieg nahezu ident ist. Daraus folgt, dass die Viskositätsentwicklung nicht vom Wasserglasanteil abhängt.

Untersuchungen der Moduln von Wasserglas bei konstantem Reaktivanteil bei 10°C

Es sind sechs Einzelversuche mit gleichem Wasserglasanteil, jedoch unterschiedlichen Moduln und konstantem Reaktivanteil durchgeführt worden, siehe Tabelle 13 und Abbildung 36.

Dabei wurde Betol (Modul 2,5), Ligasil 39 (Modul 3,3) und HK 35 (Modul 3,7) verwendet.

Bezeichnung	Gelierpunkt		Kippunkt	
	Gelierzeit	η	Kippunkt	η
	[min]	[mPas]	[min]	[mPas]
Betol 18 / W 2 / 80	00:16	12,7	01:36	91,3
Betol 20 / W 2 / 78	00:21	12,9	01:39	91
W 18 / W 2 / 80	00:29	12,7	01:16	77,9
W 20 / W 2 / 78	00:45	13,1	01:44	77,9
HK 35 18 / W 2 / 80	00:07	12,1	00:18	59,4
HK 35 20 / W 2 / 78	00:10	14,3	00:28	78,3
Wasserglas...Betol = Natriumsilikat, Modul 2,5; W = Natriumsilikat, Modul 3,3; HK 35 = Natriumsilikat, Modul 3,7 Reaktiv...W= Stabisil 19 (Natriumaluminat)				

Tabelle 13: Messergebnisse bei unterschiedlichen Wasserglasmoduln

Bei einem Modul von vier ist das Wasserglas fest und nicht mehr flüssig, weil das Natriumoxid (Na_2O) in so geringer Konzentration vorliegt, dass die Lösung von selbst verkieselt bzw. in einen gelförmigen Zustand übergeht. Theoretisch sollten damit die Gelier- und Kippzeiten mit sinkendem Modul länger werden. Das ist beim Modul 3,7 auch eindeutig so. Diese sind so gering, dass das Produkt für die Injektion zur Sohlabdichtung nicht geeignet ist. Vergleicht man die Versuche W18 / W2 / 80 und HK35 18 / W2 / 80 ist dem auch so. Jedoch bei den Versuchen W20 / W2 / 78 und Betol 20 / W2 / 78 kippt das niedermodulige um 19 min früher. Die Ursache dürfte die Auswirkung der Temperatur auf die Kippzeit sein. Wie Versuche beweisen, kippt die Probe W20 / W2 / 78 um 12 min früher als die Probe Betol 20/ W 2/ 78 bei 24°C, siehe Anhang A.

Die Viskositätsentwicklung wächst bei Betol nach dem Gelierpunkt fast senkrecht an, dabei beträgt die Anfangsviskosität schon 12 mPas. Das heißt bei diesem Produkt bleibt die zeitverzögerte Gelbildung aus. Hingegen liegt die Anfangsviskosität bei Ligasil und Betol bei 10 mPas und die Gelbildung setzt je nach Mischung und Produkt nach 16 bis 45 Minuten ein. Weiters ist der verwendete Modul auch für die Viskositätsentwicklung entscheidend.

Bei HK 35 ist ein fast senkrechter Anstieg der Viskosität zu verzeichnen, wo hingegen die Entwicklung bei Ligasil und Betol graduell verläuft. Der Peak, welcher die Viskosität beim Kippunkt bezeichnet ist beim Betol am höchsten, dagegen bei HK 35 am geringsten. Somit dürfte die Zeitspanne bis zum Kippunkt auch einen Einfluss auf die Höhe der Viskosität haben.

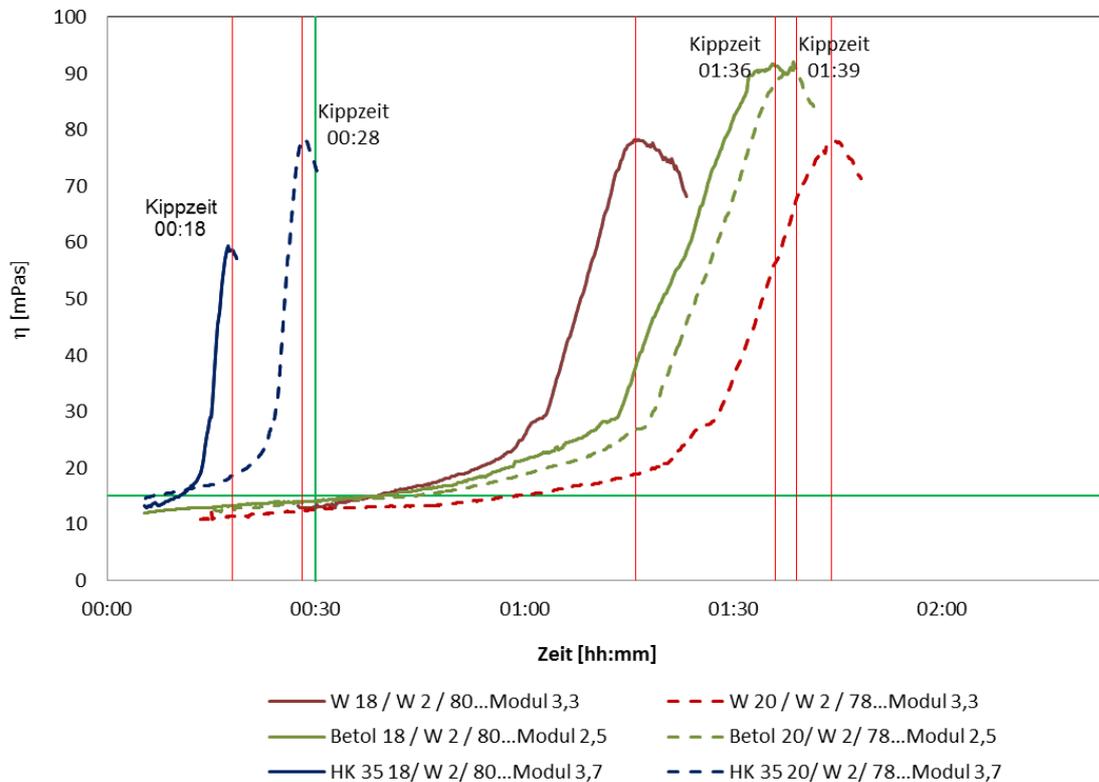


Abbildung 36: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichen Wasserglasmoduln

Untersuchungen in Abhängigkeit des Reaktivanteiles bei 10°C

Es sind sechs Einzelversuche mit Reaktivanteilen von 1,5 / 2,0 / 2,5 durchgeführt worden, siehe Tabelle 14 und Abbildung 37.

Bezeichnung	Gelierpunkt		Kippunkt	
	Gelierzeit	η	Kippzeit	η
	[min]	[mPas]	[min]	[mPas]
W 18 / W 1,5 / 80,5	01:28	12,9	04:53	40,8
W 20 / W 1,5 / 78,5	01:34	12,6	05:08	40,5
W 18 / W 2 / 80	00:29	12,7	01:16	77,9
W 20 / W 2 / 78	00:45	13,1	01:44	77,9
W 18 / W 2,5 / 79,5	00:10	11,6	00:25	105,8
W 20 / W 2,5 / 77,5	00:14	12,4	00:34	115,4

Wasserglas...W = Ligasil 39 (Natriumsilikat, Modul 3,3)
 Reaktiv...W = Stabisil 19 (Natriumaluminat)

Tabelle 14: Messergebnisse von unterschiedlichen Reaktivanteilen

Die Anfangsviskosität beträgt bei allen Mischungen etwa 10 mPas. Diese steigt jedoch mit zunehmendem Reaktivanteil stark an. So steigt die Gelierzeit bei einem Reaktivanteil von 1,5 auf 2 Vol.-% um etwa 60 Minuten an, wo hingegen von 2 auf 2,5 Vol.-% Reaktivanteil nur um 20 Minuten. Dabei entsprechen 0,5 Vol.-% Reaktivanteil gerade einmal 3,4 g bezogen auf eine Probemenge von 500 g. Im Vergleich dazu nimmt die Gelierzeit bei einem Unterschied von 2,0 Vol.-% Wasserglasanteil um max. 15 Minuten zu. Das entspricht 11,9 g, bezogen auf 500 g der Probe. Das zeigt den wesentlichen Einfluss der gerüstbildenden Aluminate (Al^{+3}) des Reaktivs auf die Gelier- und Kippzeit sowie die Viskositätsentwicklung. Der Viskositätsverlauf ist durch den Natriumaluminatanteil deutlich geprägt.

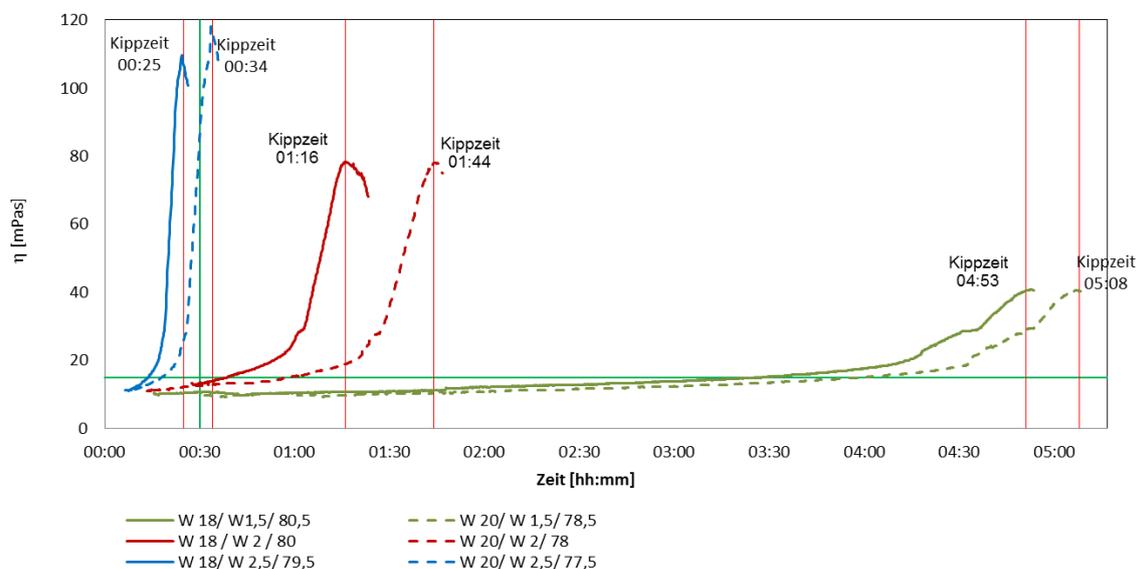


Abbildung 37: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichen Reaktivanteilen

Vergleich der Viskosität in Abhängigkeit des Reaktivanteils und der Temperatur

In Abbildung 38 ist die Viskosität zum Kippzeitpunkt aufgetragen. Aus den Versuchen können zwei wesentliche Einflussfaktoren auf die Viskosität abgeleitet werden. Das sind die Temperatur und der Natriumaluminatanteil.

Mit sinkender Temperatur nimmt die Zähigkeit einer Weichgelmischung zu. Vergleicht man die Weichgelproben (siehe Abbildung 38 z.B. Wöllner 2 Vol.-% Reaktiv_10 und Wöllner 2 Vol.-% Reaktiv_24) mit gleichem Reaktivanteil und unterschiedlichem Temperaturniveau, so ergeben sich Differenzen von 5 bis 30 mPas. So kann man feststellen, dass bei steigendem Natriumaluminatanteil der Einfluss der Temperatur auf die Viskosität zunimmt. Der Wasserglasanteil spielt bei den Versuchsreihen mit 1,5 Vol.-% und 2,0 Vol.-% Reaktivanteil, eine geringe Rolle bezogen auf die Viskosität beim Kippzeitpunkt. Bei 2,5 Vol.-% und 20 % Wasserglasanteil handelt es sich um ein messtechnisches Problem, da dieselben

Versuche mit dem Natriumaluminat von Overlack durchgeführt wurden und bei jener Versuchsreihe ein gleichmäßiger Verlauf messbar ist.

Der Reaktivanteil ist, neben der Temperatur für das Viskositätsniveau, ausschlaggebend. In Abbildung 38 ist die Staffelung der Viskosität sichtbar. Die mittlere Differenz zwischen 1,5 und 2,0 Vol.-% bei 24°C ist 22,9 mPas, zwischen 2,0 und 2,5 Vol.-% 26,6 mPas. Jedoch bei 10°C zwischen 1,5 und 2,0 Vol.-% 33,9 mPas und zwischen 2,0 und 2,5 Vol.-% 31,2 mPas. Daraus folgt, dass bei 10°C der Reaktivanteil einen größeren Einfluss auf die Viskosität zum Kippzeitpunkt hat als bei 24°C.

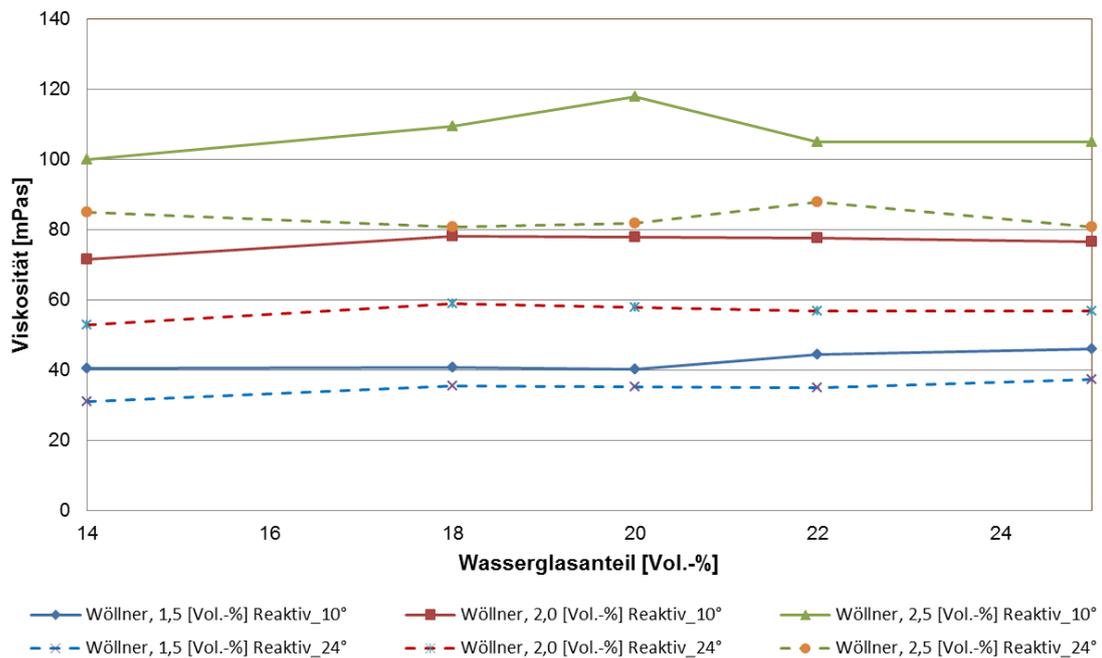


Abbildung 38: Viskosität zum Kippzeitpunkt

Untersuchungen des Einflusses der Temperatur auf das Gelierverhalten von Natriumbikarbonat als Reaktiv

Es sind sechs Einzelversuche mit dem Reaktiv Natriumbikarbonat (Stabilil 23) durchgeführt worden. Dabei sind die Gelier- und Kippzeiten bei Versuchstemperaturen von 10°C und 24°C untersucht worden. Der Wasserglasanteil ist in den Schritten 18 / 20 / 22 gesteigert worden, siehe Tabelle 15 und Abbildung 39.

Bezeichnung	Glierpunkt			Kippunkt	
	Temp.	Gelierzzeit	η	Kippzeit	η
	[°C]	[min]	[mPas]	[min]	[mPas]
W 18 / Stab.23 2 / 80	10	00:12	11,7	00:26	77,9
W 20 / Stab.23 2 / 78	10	00:13	11,9	00:30	71,6
W 22 / Stab.23 2 / 76	10	00:15	10,9	00:31	76,4
W 18 / Stab.23 2 / 80	24	00:25	11,6	00:45	34,3
W 20 / Stab.23 2 / 78	24	00:27	12,3	00:50	39,1
W 22 / Stab.23 2 / 76	24	00:36	10,9	00:53	30,1

Wasserglas...W = Ligasil 39 (Modul 3,3) Natriumsilikat
 Reaktiv...Stab 23 = Stabisil 23 (Natriumbikarbonat)

Tabelle 15: Messergebnisse bei 10 und 24°C mit dem Reaktiv Stabisil 23

Die Anfangsviskosität ist unabhängig vom Temperaturniveau und beträgt etwa 10 mPas.

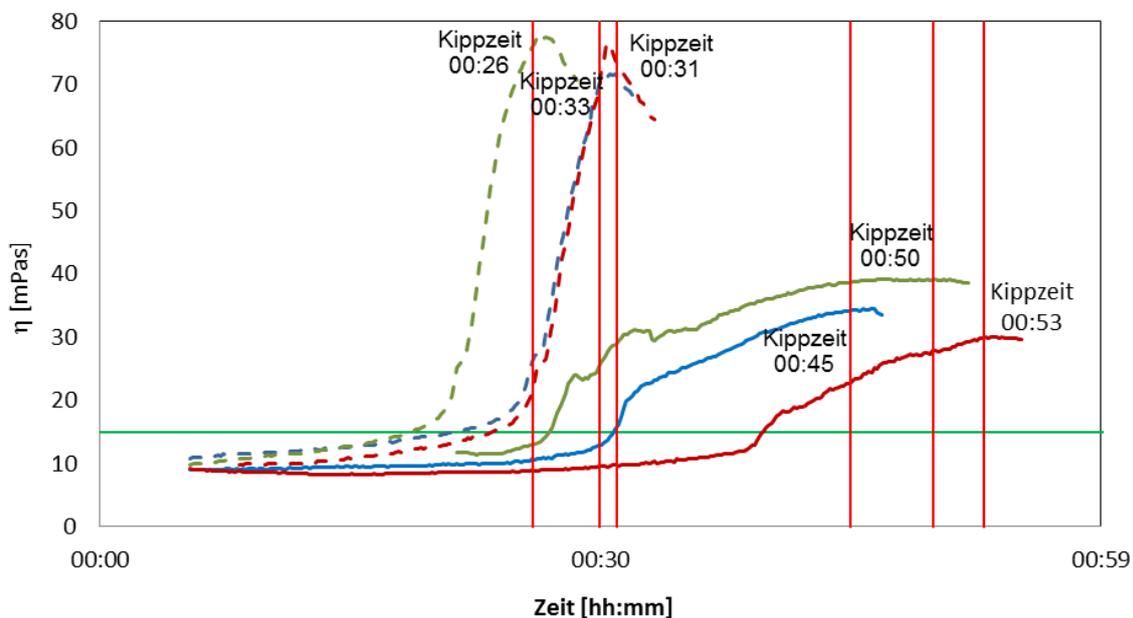


Abbildung 39: Viskositätsentwicklung mit Stabisil 23

Es sind mit dem Natriumbikarbonat (Stabisil 23) als Reaktiv im Vergleich zum Natriumaluminat genau gegenteilige Ergebnisse zu den bisher beschriebenen Versuchen erzielt worden. Die Gelier- und Kippzeit steigt mit zunehmender Temperatur an. Ein Temperaturunterschied (Versuchstemperaturen 10 und 24°C) von 14°C bewirkt, dass die Gelierung bei 10° um etwa 15 Minuten später einsetzt als bei 24°. Weiters ist die Viskositätsentwicklung zum Kippzeitpunkt stark von der Temperatur geprägt. Dies könnte mit der temperaturabhängigen Löslichkeit des Reaktivs zusammenhängen.

Untersuchungen mit unterschiedlichen Reaktivanteilen bei zwei Temperaturniveaus

Es sind sechs Einzelversuche mit den Reaktivanteilen von 1,5 / 2,0 / 2,5, einem Wasserglasanteil von 20 Vol.-% bei Versuchstemperaturen von 10 und 24°C durchgeführt worden, siehe Tabelle 16 und Abbildung 40.

Bezeichnung	Versuchstemperatur	Gelierpunkt		Kippunkt	
		Gelierzeit	η	Kippzeit	η
	[°C]	[min]	[mPas]	[min]	[mPas]
W 20 / W 1,5 / 78,5	24	02:20	13,48	03:45	38,1
W 20 / W 1,5 / 78,5	10	01:34	12,6	05:08	40,5
W 20 / W 2 / 78	24	00:21	11,4	00:43	58,2
W 20 / W 2 / 78	10	00:45	13,1	01:44	77,9
W 20 / W 2,5 / 77,5	24	00:11	11,4	00:17	58,2
W 20 / W 2,5 / 77,5	10	00:14	12,4	00:34	115,4

Wasserglas...W = Ligasil 39 (Natriumsilikat, Modul 3,3)
 Reaktiv...W= Stabasil 19 (Natriumaluminat)

Tabelle 16: Messergebnisse in Abhängigkeit der Temperatur

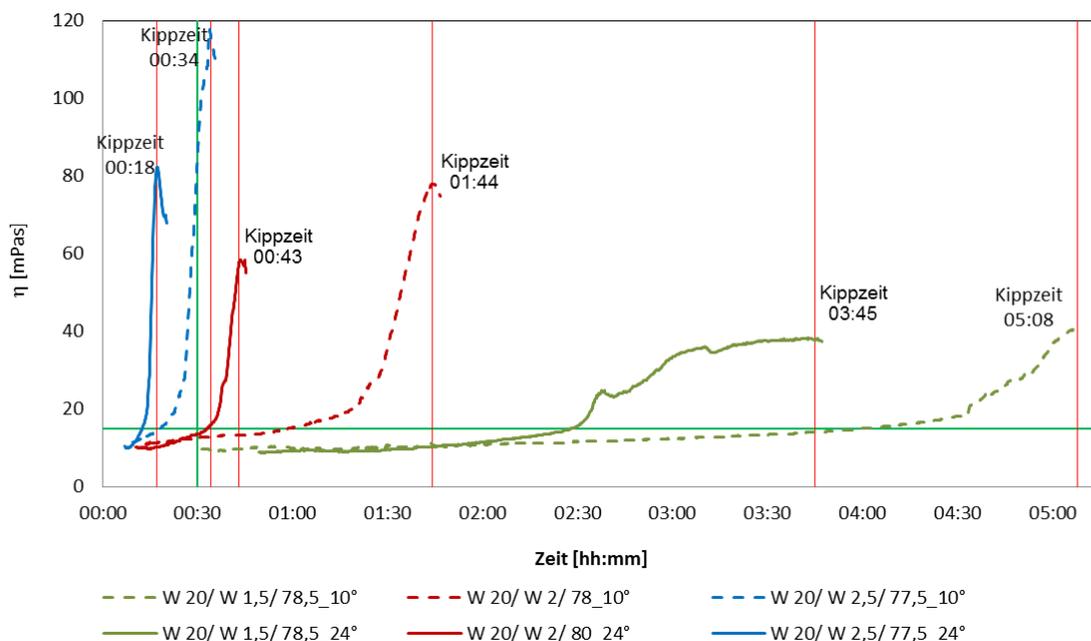


Abbildung 40: Viskositätsentwicklung in Abhängigkeit der Temperatur

Die Anfangsviskosität beträgt bei allen Versuchen 10 mPas. Die Gelier- und Kippzeit ist jedoch sehr durch die Versuchstemperatur geprägt. Das ist auf der Baustelle zu beachten, weil die Weichgellösung an der Oberfläche angemischt wird, wo eine ganz andere Umgebungstemperatur vorliegt als im zu injizierenden Baugrund. Der Einfluss der Temperatur auf die Gelier- und Kippzeit ist jedoch bei einem Reaktivanteil von 2,5 % geringer als bei 1,5 %.

4.7 Untersuchungen der Gelier- und Kippzeit mittels Marsh-Trichter

Der Marsh-Trichter ist eigentlich ein Messverfahren für Suspensionen zur Qualitätskontrolle auf der Baustelle. Es ist ein einfaches und billiges Messverfahren. Die Geometrie und der Messablauf ist in einer Vielzahl an Normen unterschiedlich geregelt, siehe Abbildung 41. Es muss daher neben den Messdaten auch immer die Norm, nach welcher geprüft wurde, angegeben sein. In Abbildung 41 sind die wesentlichen Regelwerke für Marsh-Trichter angeführt.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Parameter	API RP 13 B-1	ASTM C 939-02	DIN EN 1538	DIN 4126	DIN EN 14117	Merkblatt FBM	DIN EN 12715	ÖNORM B 4454
Auslauf-durchmesser [mm]	4,7	12,7	-	4,76	4,8 ± 0,1	4,7	4,75	k.A.
Auslaufvol. [ml]	946	1725 ± 5	946 (1000)	1000 & 1500	1500 ± 15	1000	k.A.	k.A.
Auslaufzeit Wasser [s]	26 ± 0,5	8 ± 0,5		28/47,5		28 ± 0,5	k.A.	k.A.
1. API RP 13 B-1 – Recommended Practice Standard Procedure for Testing Drilling Fluids 2. ASTM C939-02 – Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete 3. DIN EN 1538:2010 – Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Schlitzwände 4. DIN V 4126:2004 - Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden (Normenentwurf) 5. DIN EN 14117:2004 – Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren 6. Merkblatt für Einpreßarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein 7. DIN EN 12715:2000 – Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Injektionen 8. ÖNORM B 4454:2001 – Erd- und Grundbau – Injektionen in Fest- und Lockergestein – Prüfungen								

Abbildung 41: Festlegung in der Normung zur Verwendung des Marsh-Trichters [KAINRATH, 2012]

In den Regelwerken werden keine Angaben zu den Versuchsrandbedingungen, wie z.B. Misch- und Umgebungstemperatur gemacht. Es muss gesagt werden: der Marsh-Trichter erlaubt nur eine rudimentäre Aussage über die Viskosität, da die kompletten Einflussfaktoren auf die Auslaufzeit (Marsh-Zeit) reduziert werden. Unter Marsh-Zeit versteht man jene Zeit, die ein definiertes Volumen braucht, um aus einem geometrisch festgelegten Trichter auszulaufen [KAINRATH, 2012]

4.7.1 Versuchsdurchführung

Für die Messung der Marsh-Zeit ist der Trichter mit der Spezifikation nach DIN V 4126-100 verwendet worden. Damit die Standsicherheit des Zylinders während des Versuches gewährleistet bleibt, ist der Trichter auf einem Ständer befestigt worden. Die Marsh-Zeit ist für ein Volumen von 1000 ml bestimmt worden. Bedingt durch die Viskositätsentwicklung ändert sich auch die Marshzeit. Nach dem Anmischen der Weichgelprobe ist sofort die Marshzeit bestimmt worden. Für die weiteren Marsh-Zeiten ist ein Messintervall von fünf Minuten festgelegt worden. Der Versuch stoppt, wenn die Kippzeit erreicht ist.



Abbildung 42: Marsh-Trichter nach DIN V 4126-100

4.7.2 Ergebnisse und Interpretation der Marsh-Trichter-Versuche

Es wurden sieben Marsh-Trichter-Versuche durchgeführt. Tabelle 17 zeigt die Mischverhältnisse und Messergebnisse. Der letzte Messpunkt kennzeichnet den letzten Messdurchgang. Bedingt durch die Gelbildung erreicht eine Weichgelprobe einen Punkt an dem sie nicht mehr durch den Messtrichter fließt. Dieser ist 6 bis 9 Minuten vor dem Kippunkt erreicht. Der Kippunkt der Weichgelprobe wird dann mittels Kipptest bestimmt.

Bezeichnung	letzter Messpunkt	Kippzeit
	[min]	[min]
C_W 18 / W 2 / 80	35	42
D_W 20 / W 2 / 78	45	53
E_W 22 / W 2 / 76	65	71
F_Betol 18 / W 2 / 80	65	71
G_Betol 20 / W 2 / 78	75	83
A_HK 35 18 / W 2 / 80	10	17
B_HK 35 20 / W 2 / 78	20	29

Tabelle 17: Messergebnisse der Marsh-Trichter-Versuche

In Abbildung 43 werden die unterschiedlichen Marshzeiten der verschiedenen Weichgelproben dargestellt. Zu Beginn lagen bei allen Versuchen die Marshzeiten bei 30 Sekunden. Die Zunahme der Marshzeit ist durch die Viskositätsentwicklung geprägt und lässt sich auf die Gelbildung zurückführen. Die Gelierzeit kann daher über die Marshzeit im vorgegebenen Messintervall abgeschätzt werden. Bedingt durch das gründliche Reinigen nach jedem Versuch sind Messintervalle von mindestens fünf Minuten notwendig. Es sei denn, man verwendet zwei idente Trichter.

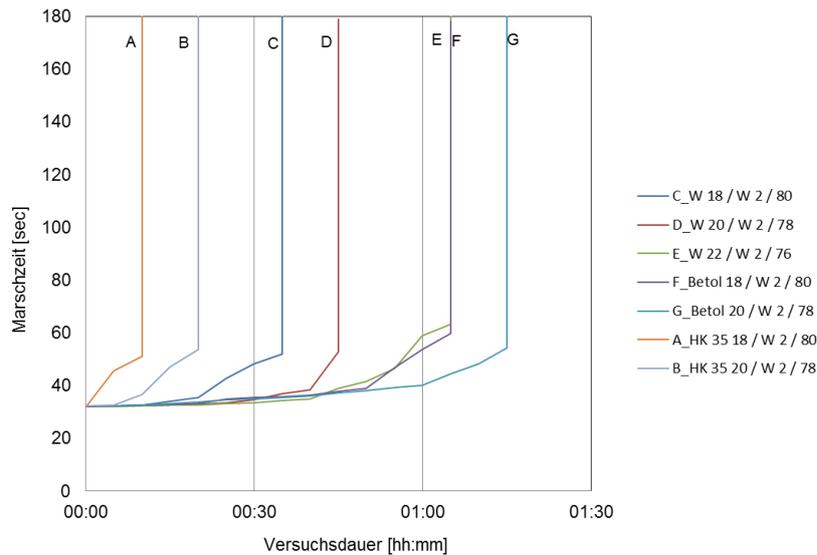


Abbildung 43: Marsh-Trichters-Versuche

Die Temperatur der Versuchsprobe ist nicht regulierbar. Ein Vergleich mit Weichgelinjektionen im Grundwasserbereich von 10°C ist daher nicht möglich. Ist die Weichgelmischung fünf bis zehn Minuten vor dem Kippen, kann die Probe nicht mehr durch den Trichter fließen. Der Marshtrichterversuch eignet sich nicht zur Bestimmung der Kippzeit und die Viskositätsentwicklung ist auch nur grob einzuschätzen.

4.8 Vergleich der unterschiedlichen Messverfahren und Messergebnisse

Die Versuchsmethoden, welche für die Bestimmung der Gelier- und Kippzeit eingesetzt wurden, werden nun miteinander verglichen. Die Tabelle 18 zeigt die Ergebnismatrix der Versuche.

	Versuchsdurchführung	Zeitlicher Verlauf	Regulierung der Temperatur	Genauigkeit der Ergebnisse	Kosten - Nutzen
Visuelle Bestimmung	++	~	~	~	+
Rotationsviskosimeter	~	++	++	++	+
Marschtrichter	~	+	~	+	+

++ sehr gut, + gut, ~ befriedigend

Tabelle 18: Vergleich der Messverfahren zur Bestimmung der Gelier- und Kippzeit

Bestimmung des Gelierpunktes

- *visuelle Kontrolle*: Der Versuch ist einfach durchzuführen. Die Lösung ist im gewünschten Mischungsverhältnis herzustellen, in ein Gefäß zu füllen und zu beobachten. Darin liegt auch die Unsicherheit des Versuches. Versuchsweise wurde eine zweite Person hinzugezogen und der Gelierpunkt derselben Mischung unabhängig voneinander bestimmt. Dies ergab eine zeitliche Diskrepanz von 15 min. Das Verfahren ist daher sehr von der subjektiven Wahrnehmung des Prüfenden abhängig. Die Simulation der Grundwassertemperatur, sprich die Regulierung der Temperatur während des Versuches, ist nur sehr aufwendig zu realisieren. Ein zeitlicher Verlauf der Gelbildung ist nur über die Eintrübung zu beobachten und diese besitzt nur eine geringe Aussagekraft.
- *Rotationsviskosimeter*: Das Anmischen ist bei allen Versuchsverfahren gleich, jedoch beim Rotationsviskosimeter muss die Probe in das Gerät eingebaut, das Messprogramm eingerichtet und der Versuch gestartet werden. Die Temperatur ist stufenlos regelbar und die Viskosität kann zu jedem Zeitpunkt gemessen werden. Der Gelierpunkt ist nicht direkt feststellbar, da die Probe nicht sichtbar ist. Um dennoch auf diesen schließen zu können, kann eine zweite, identische Probe angemischt und neben dem Rotationsviskosimeter platziert werden. Ist mittels visueller Bestimmung das Erreichen des Gelierpunktes erkennbar, ist davon auszugehen, dass die Mischung im Rotationsviskosimeter ebenfalls polymerisiert. Die Messergebnisse stimmen mit Werten aus der Literatur und den Angaben der Produkthersteller sehr gut überein. Das Gerät ist auf einem leistbaren Preisniveau angelegt, wodurch dessen Einsatz auf der Baustelle denkbar ist. Da das Wissen über die Viskositätsentwicklung einer Weichgelmischung von großer Wichtigkeit für den Erfolg einer Sohlabdichtung ist, kann das Kosten-Nutzen-Verhältnis als sehr gut angesehen werden.
- *Marsh-Trichter*: Der Messablauf ist sehr aufwendig – vor allem in Hinblick auf die geringe Aussagekraft der Ergebnisse. 1,5 Liter Probevolumen müssen angemischt werden. Handelsübliche Messzylinder fassen in der Regel jedoch nur 1 Liter. Dies hat zur Folge, dass nach dem Abstoppen der Marshzeit, der Durchfluss mit dem Finger unterbrochen und der Zylinder ausgetauscht werden muss, so dass die restliche Probemenge abrinnen kann. Die Reinigung nach jedem Versuch ist zeitaufwendig und beschränkt das Messintervall auf mindestens fünf Minuten. Auch wenn die Kosten für die Anschaffung eines Marsh-Trichters gering sind, können die Messergebnisse hinsichtlich Viskosität und Gelierzeit nicht zuverlässig interpretiert werden.

Bestimmung des Kippunktes

- *Kipptest*: Dieser eignet sich sehr gut für eine Qualitätsüberprüfung des Mischungsverhältnisses mit einer angemischten Weichgelprobe auf der Baustelle. Die Temperatur kann jedoch nicht reguliert werden. Dem kann Abhilfe verschafft werden, in dem man den Mischbehälter in ein temperiertes Wasserbad stellt und in Zeitabständen von zwei bis fünf Minuten den Kipptest durchführt.
- *Rotationsviskosimeter*: Bei jeder Messung hat sich ein mehr oder weniger deutlicher Peak gezeigt. Dieser kann als Kippunkt angesehen werden. Auffällig ist, dass der Peak meist fünf bis fünfzehn Minuten vor dem Kippunkt mittels Kipptest liegt. Speziell bei sehr „dünnen Mischungen“ (wenig Reaktiv und viel Wasserglas) liegen die Unterschiede bei 15 Minuten. Diese Proben sind über 20 bis 30 min sehr zähflüssig, aber noch nicht fest. Bedingt durch die Rotation des Messzylinders und dessen Oberflächenrauigkeit dürften die polymerisierten Silikatketten abreißen, was zu einem frühzeitigen Viskositätsabfall führt. Es empfiehlt sich daher immer parallel zum Rotationsviskosimeter-Test mit einer identen Probe einen Kipptest im Wasserbad durchzuführen.
- *Marsh-Trichter*: Mit dem Marsh-Trichter ist der Kippzeitpunkt nicht feststellbar, weil die Probe den Trichter nicht mehr durchfließen kann. Es kann lediglich ein Kippbereich angegeben werden. Der Marsh-Trichter eignet sich somit nicht zur Untersuchung von Weichgelen.

4.9 Untersuchungen des Fließverhaltens von Weichgelmischungen

Weichgele weisen bis zum Gelierpunkt ein Newton'sches Fließverhalten auf. Sie sind gekennzeichnet durch einen flüssigen Zustand zu Beginn des Anmischens, welcher nach einem Transformationsprozess in einen festen Zustand übergeht. Der Transformationsbereich ist jener, in dem sich die Polysilikate mit den Aluminaten räumlich vernetzen und schlussendlich in eine Gelstruktur übergehen. Dieser Bereich ist durch eine starke Viskositätszunahme gekennzeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt, dass die verwendeten Versuchsprodukte ein Newton'sches Fließverhalten aufweisen und daher keine Fließgrenze besitzen. Es ist zwar nicht zu 100 % mit dem theoretischen Modell ident, jedoch eine gute Näherung.

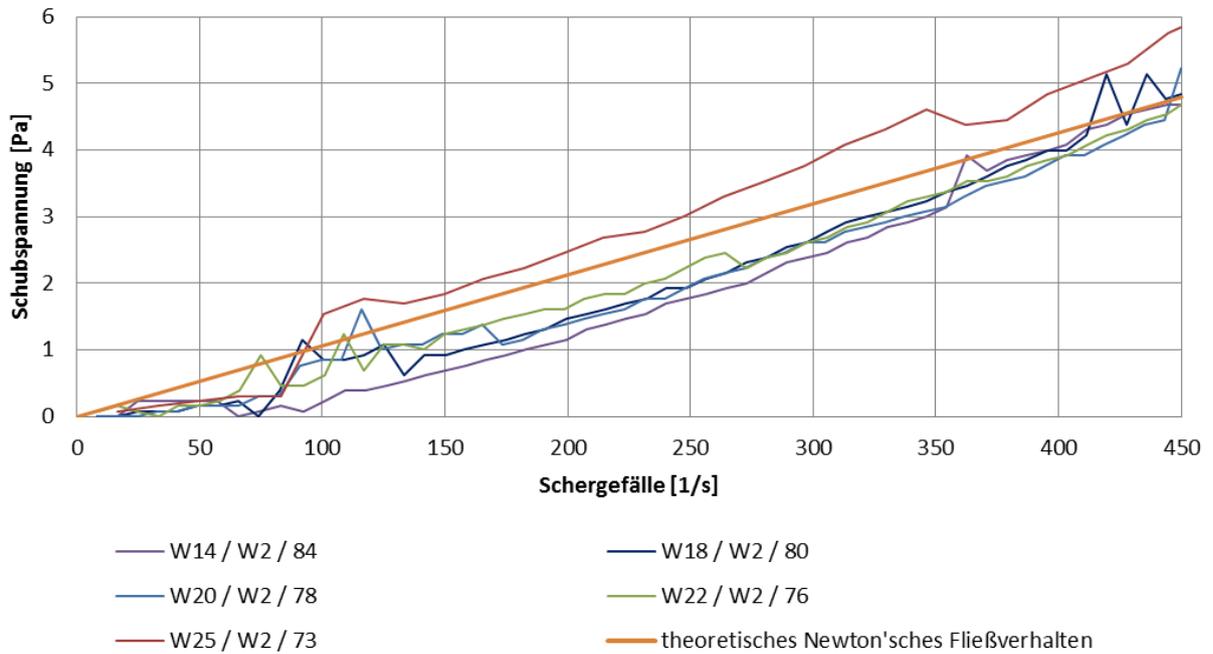


Abbildung 44: Fließkurven unterschiedlicher Mischungen bei 10°

Die Steigung der einzelnen Geraden stellt die Viskosität der unterschiedlichen Mischungen dar. Die jeweilige Steigung in Abhängigkeit des Schergefälles hängt von der Dichte bzw. dem Natriumsilikatanteil ab. So besitzt jene Mischung mit der geringsten Steigung auch den kleinsten Wassergehalt und umgekehrt. Die Unregelmäßigkeiten in der Fließkurve sind auf Messungenauigkeiten speziell im unteren Scherbereich zurückzuführen.

5 Bestimmung der Gelstärke mit dem Kegelfallgerät

Mittels des Kegelfallgerätes kann auf die Festigkeit des untersuchten Mediums geschlossen werden. Dieser sogenannte "Kegelwiderstand" wurde in Schweden das erste Mal verwendet und gilt heutzutage in Skandinavien und England als Standard für die Bestimmung der Fließgrenze von Tonen.

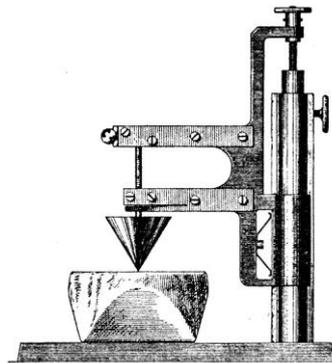


Abbildung 45: Kegelfallgerät von J. OLSSON aus dem Jahr 1915 [BJERRUM, 1960]

Der Kegelwiderstand eines Mediums ist der Widerstand, den das Medium dem Eindringen eines Kegels mit festgelegten Abmessungen entgegensetzt. Er wird durch das Gewicht des Kegels und dessen Eindringtiefe ausgedrückt und ist ein Maß für die Festigkeit. Dabei geht es um die Eindringtiefe des Kegels in die Weichgelprobe direkt nach dem Anmischen und nach 24 Stunden.

Der verwendete Fallkegel, der als Standardkegel bezeichnet wird, hat 60 g Masse und einen Öffnungswinkel von 60°. Wird ein Eindringen des Standardkegels unter 3 bis 5 mm oder über 16 bis 20 mm abgelesen, ist ein anderer Kegeltyp zu verwenden. Um Ungenauigkeiten bei den Ergebnissen zu vermindern, werden die Form und das Gewicht des Fallkegels je nach Weichgelmischung ausgewählt. Für die durchgeführten Versuche war der Kegel 60° / 60g ausreichend.

Die Scherfestigkeit hat HANSBO (1957) folgendermaßen hergeleitet:

$$\tau = K * \frac{P}{s^2}$$

K ist vom Öffnungswinkel des Kegels α , sowie von der Beschaffenheit der Kegelmanteloberfläche abhängig.

P vertikale Kraft des Kegels

s Eindringtiefe des Kegels

Anhand eines Beispiels wird die Beziehung zwischen dem Kegelwiderstand und der Scherfestigkeit für den Standardkegel (60° / 60 g) näher erläutert.

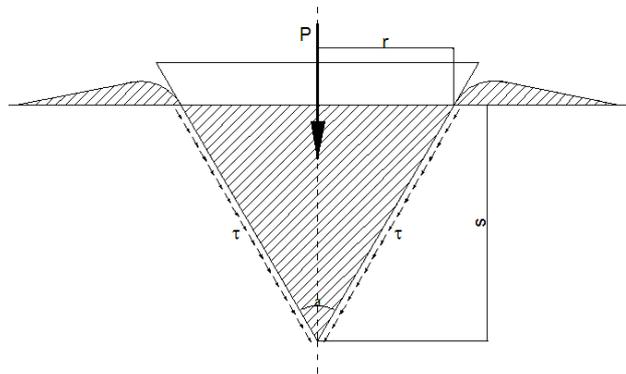


Abbildung 46: Kegeleindringung

$$G = P = 60 \text{ g} = 0,6 \text{ N} \quad \text{Kegelgewicht}$$

$$V = \frac{1}{3} * \pi * r^2 * s$$

$$r = s * \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$V = \frac{1}{3} * \pi * s^3 * \tan^2 \frac{\alpha}{2}$$

$$K = \frac{\sin \alpha / 2}{\pi(1 + \sin \alpha / 2) * \tan^2 \alpha / 2} = \frac{\sin 60 / 2}{\pi(1 + \sin 60 / 2) * \tan^2 60 / 2} = 0,318$$

Die Eindringtiefe s sei 10 mm, so ergibt sich die Scherspannung zu:

$$\tau = K * \frac{P}{s^2} = 0,318 * \frac{0,6}{10^2} = 0,00191 \text{ N/mm}^2$$

5.1 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde ein Kegelfallgerät der Firma GEONOR verwendet. Das Gerät besitzt einen magnetischen Mechanismus, mit dem der Fallkegel gehalten und gelöst wird. Zur Bestimmung der Gelstärke ist ein 60° / 60g – Fallkegel verwendet worden.

Insgesamt sind 16 unterschiedliche Proben mit etwa 750 g gemischt worden (siehe Abbildung 47) – jeweils drei Mischungen mit konstantem Reaktivanteil und variablem Wasserglasanteil. Dabei betrug der Reaktivanteil 2,0 und 2,5 Vol.-% und der Wasserglasanteil 18, 20 und 22 Vol.-%. Diese sechs Proben sind mit den Produkten der Firma Wöllner als auch der Firma Overlack hergestellt worden. Weiters sind zwei Lösungen mit einem niedrig moduligen Wasserglas (2,5) und einem hoch moduligen Wasserglas (3,7) gemischt worden. Nach dem Anmischen sind die Proben in Kunststoffgefäße gefüllt worden.



Abbildung 47: Versuchsumfang und Versuchsablauf

Unmittelbar nach dem Erreichen der Kippzeit, ist die erste Versuchsreihe durchgeführt worden. Die zweite Versuchsreihe ist 24 Stunden nach dem Kippunkt gemacht worden, um den relativen Unterschied der Eindringtiefe zu bestimmen und eine zeitliche Erstarrungsentwicklung abzuleiten.

5.2 Ergebnisse und Interpretation

In der nachstehenden Tabelle sind die Messergebnisse ersichtlich. Dabei ist die Versuchsreihe eins unmittelbar nach dem Kippen und die Versuchsreihe zwei ca. 24 Stunden später durchgeführt worden.

Probe	am 28.12.2012			am 29.12.2012		
	Zeitpunkt	Eindringtiefe	τ [N/cm ²]	Zeitpunkt	Eindringtiefe	τ [N/cm ²]
W 18 / W 2 / 80	0	10	0,191	24	7	0,389
W 20 / W 2 / 78	0	11	0,158	24	8	0,298
W 22 / W 2 / 76	0	11	0,158	24	8	0,298
W 18 / W 2,5 / 79,5	0	9	0,236	24	6	0,530
W 20 / W 2,5 / 77,5	0	9	0,236	24	6	0,530
W 22 / W 2,5 / 75,5	0	9	0,236	24	5	0,763
W 18 / O 2 / 80	0	11	0,158	24	8	0,298
W 20 / O 2 / 78	0	12	0,133	24	8	0,298
W 22 / O 2 / 76	0	12	0,133	24	8	0,298
W 18 / O 2,5 / 79,5	0	8	0,298	24	6	0,530
W 20 / O 2,5 / 77,5	0	8	0,298	24	5	0,763
W 22 / O 2,5 / 75,5	0	8	0,298	24	5	0,763
Betol 18 / W 2 / 80	0	11	0,158	24	8	0,298
Betol 20 / W 2 / 78	0	11	0,158	24	8	0,298
HK 35 18 / W 2 / 80	0	7	0,389	24	5	0,763
HK 35 20 / W 2 / 78	0	7	0,389	24	5	0,763

Tabelle 19: Messergebnisse der Eindringtiefe mit dem Kegelfallgerät (60° / 60g)

Bei allen Proben konnte eine verminderte Eindringtiefe nach 24 Stunden festgestellt werden. Dies hat zwei Gründe. Einerseits strebt das Gel auch nach abgeschlossener

Polymerisierung nach einer elektrostatischen Absättigung, was zur Folge hat, dass sich das Gel zusammenzieht und dadurch verfestigt. Andererseits sind die Proben unter Luft gealtert, was zur Folge hat, dass sie austrocknen und sich verfestigen.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Eindringtiefe mit zunehmendem Reaktivanteil sowohl nach dem Kippen als auch nach 24 Stunden abnimmt. Das heißt, mehr Aluminat bewirkt nicht nur ein schnelleres Kippen des Weichgels, sondern das Gel wird auch kompakter. In Kapitel 3 sind die Mischungsverhältnisse von Hartgelen erläutert worden, dabei spricht man von Hartgelen ab einem Reaktivanteil von 3 Vol.-%. Das bedeutet, dass der Reaktivgehalt entscheidend für die Festigkeit eines Gels ist und die Messergebnisse als richtig zu beurteilen sind. Auch der Modul eines Wasserglases hat einen Einfluss auf die Gelstärke. Vergleicht man das Wasserglas Betol (Modul 2,5) mit dem Standard-Wasserglas (Modul 3,3), so ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede. Das Wasserglas HK 35 (Modul 3,7) erzeugt Eindringtiefen, welche unter jenen der Proben mit einem Reaktivanteil von 2,5 Vol.-% liegen. Womit bewiesen ist, dass bedingt durch einen höheren Anteil an Polysilikaten, auch die Weichgelstärke zunimmt.

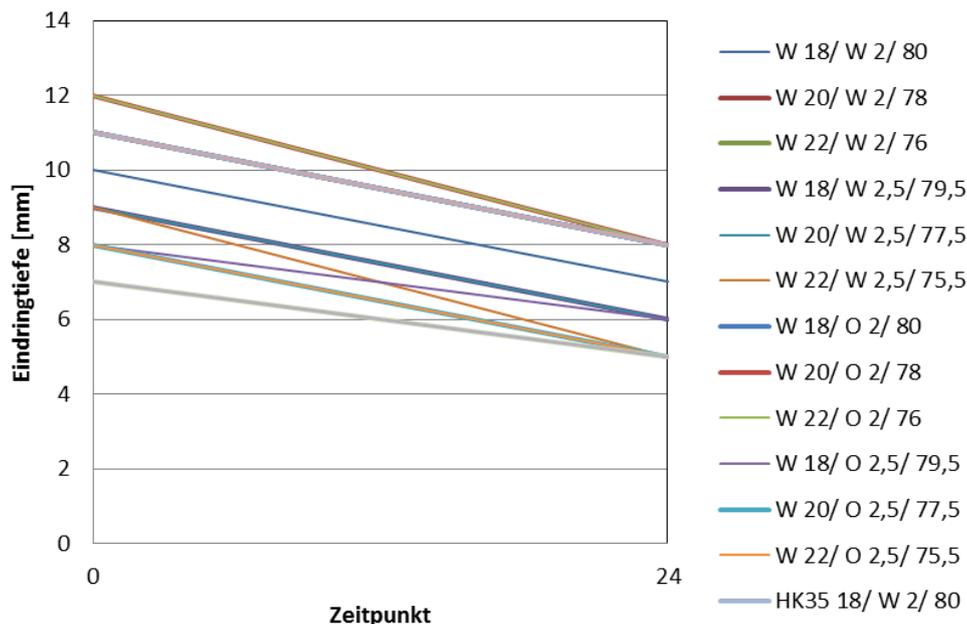


Abbildung 48: Messergebnisse mit dem Kegelfallgerät

6 Untersuchungen der zeitlichen Veränderung (Synärese) von Weichgel

Nach abgeschlossener Gelierung einer Weichgelsohle kommt es im Laufe des Alterungsprozesses zu weiteren chemischen Reaktionen. Bei der Umwandlung vom flüssigen Sol in ein homogenes Gel hat sich bereits durch den Polymerisationsvorgang ein dreidimensionales Netzwerk aus kettenartigen Makromolekülen gebildet [TAUSCH, 1990]. Das Gelnetzwerk zieht sich durch das Bestreben nach elektrostatischer Absättigung der Silikatkolloide weiter zusammen [SCHNELL, 2001]. Das Gel schrumpft somit unter Abgabe von Porenwasser. Dieser Prozess wird als Synärese bezeichnet.

Alltägliche Beispiele für das Austreten von Flüssigkeit aus einem Gel, ohne dass die Gelstruktur dadurch zusammenbricht (Synärese), sind die Abscheidung von Flüssigkeit aus Joghurt, Sauerrahm und Senf [SCHNELL, 2001].

Für Weichgele wird die Synärese mengenmäßig durch das Verhältnis des freigewordenen Wassers zum Anfangsvolumen erfasst. Der Ablauf der Synärese wird durch die Temperatur, die Art des Reaktivs, den Einfluss des Mischungsverhältnisses und den Silikatgehalt bestimmt. Zudem weist SCHNELL [2001] besonders auf den Einfluss der äußeren Umgebung bei der Gelalterung hin. Die Synärese verläuft im Grundwasser völlig anders ab als an der Luft. Abbildung 49 zeigt den Gelalterungsprozess in Abhängigkeit von der äußeren Umgebung.

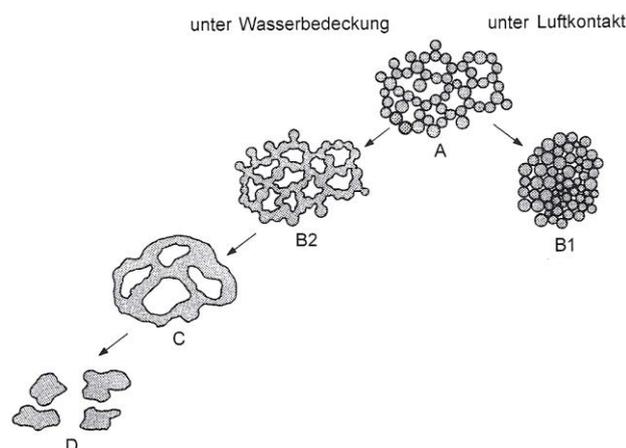


Abbildung 49: Phasen der Gelalterung [geändert nach ILER 1979]

Unter Punkt A ist ein 2D-Schnitt durch ein Gelnetzwerk direkt nach der Gelbildung dargestellt. Man erkennt, dass die Kolloidteilchen über Haftpunkte zu einem Netzwerk verbunden sind. Ist das Gel dann der Luft ausgesetzt (rechte Seite) verringern sich das Porenvolumen und der Durchmesser so stark, dass das Gel deutlich schrumpft. Im linken

Teil hingegen ist die spätere Situation unter Wasser abgebildet. Die Haftpunkte werden unter geringer Schrumpfung und Abnahme der spezifischen Oberfläche gestärkt (Punkt C). Die fortgeschrittene Alterung ist nicht abgebildet. Es kommt dabei zu einer noch intensiveren Verbindung der Strukturelemente unter weiterer Verringerung der spezifischen Oberfläche bis schließlich die Auflösung des räumlichen Netzwerkes in amorphe Einzelpartikel eintritt (Punkt D) [SCHNELL, 2001]. Mit zunehmendem Gelalter wird der zeitliche Verlauf der Synärese verlangsamt, das Gel nähert sich einem Gleichgewichtszustand der frühestens nach zwei Jahren erreicht ist [SCHNELL, 2001].

Die Synärese ist bei Weichgelen deutlich geringer als bei Hartgel. Trotzdem ist die Kenntnis über das Ausmaß der Synärese für die Dichtwirkung injizierter Korngerüste von großer Wichtigkeit. Durch die Volumenkontraktion des Gels können im Porensystem Wasserlinsen entstehen, die miteinander verbunden Porenkanäle schaffen und somit die Wirksamkeit der Abdichtung vermindern können [TAUSCH, 1990].

6.1 Ermittlung der Synärese anhand von Standversuchen

6.1.1 Versuchsdurchführung

Um die Volumenabnahme und den Schrumpfungsgrad über die Zeit beurteilen zu können, sind Standversuche durchgeführt worden. Dafür sind Glaszylinder mit exakt 500 ml unterschiedlicher Weichgelmischungen gefüllt worden. Nach dem Erreichen der Kippzeit ist der Zylinder auf 1000 ml mit Wasser aufgefüllt worden. Um etwaige Verdunstungsverluste auszuschließen sind die Zylinder mit einem Laborstopfen verschlossen und einem Isolierband luftdicht abgedichtet worden. So wird verhindert, dass der Alterungsprozess durch Verdunstung überlagert wird. Dies würde den Alterungsprozess beschleunigen bzw. das Ergebnis verfälschen und einen Vergleich mit der Alterung im Grundwasser ausschließen. Weiters sind zwei Proben mit 500 ml Weichgel gefüllt, jedoch nicht mit Wasser auf 1000 ml ergänzt worden. Alle Standzylinder wurden in einem Klimaschrank bei 10°C gelagert. Die Höhe des Weichgels im Standzylinder sowie jene des Wassers sind über einen Zeitraum von 51 Tagen täglich protokolliert worden. Aus der so gemessenen Volumenabnahme kann der Schrumpfungseffekt abgeleitet werden. Der Synäreseprozess ist zwar nach der durchgeführten Versuchsspanne noch nicht beendet, jedoch sind die Änderungen so gering, dass sie für die Praxis keine Relevanz besitzen.



Abbildung 50: Standversuch zur Bestimmung des Schrumpfungsverhaltens über die Zeit

Es sind insgesamt 13 Standzylinderversuche durchgeführt worden. Zwölf Versuche wurden über die komplette Versuchsdauer im Klimaschrank bei 10°C gelagert. Davon wurden zehn Proben mit Wasserüberdeckung und zwei ohne Überdeckung gelagert. Zum Vergleich wurde eine Probe bei Raumtemperatur (24°) gelagert.

Mischungsverhältnis	Wasserüberdeckung	Luft	Lagerungstemp.
			[°C]
W 18 / W 2 / 80	x		10
W 20 / W 2 / 78	x		10
W 20 / O 1,5 / 78,5	x		10
W 18 / O 1,5 / 80,5	x		10
W 23 / Stab23 1,9 / 75,1	x		10
W 20 / Stab23 2,0 / 78	x		10
W 18 / W 2,5 / 79,5	x		10
W 20 / W 2,5 / 77,5	x		10
HK 35 20 / W 2 / 78	x		10
Betol 20 / W 2 / 78	x		10
W 20 / W 2 / 78 ohne W.		x	10
W 18 / W 2 / 80 ohne W.		x	10
W 20 / W 2 / 78 ohne W. bei 24°C		x	24
Wasserglas...Betol = Natriumsilikat, Modul 2,5; W = Ligasil 39, Natriumsilikat, Modul 3,3; HK 35 = Natriumsilikat, Modul 3,7 Reaktiv...W= Stabisil 19 (Natriumaluminat); O = Overlack (Natriumaluminat)			

Tabelle 20: Übersicht der durchgeführten Versuche

Mit Wasserüberdeckung sind jeweils zwei Proben mit den Reaktivanteilen 1,5 / 2,0 / 2,5; Wasserglasanteilen 18 und 20 und Wasser auf 100 % ergänzt. Eine Probe mit HK 35 (Modul 2,5) und eine zweite mit Betol (Modul 3,7). Weiters sind zwei Versuche mit dem Reaktiv Natriumbikarbonat (Stabisil 23) durchgeführt worden. Die Proben ohne Wasserüberdeckung sind „Standardmischungen“ mit 2 % Reaktiv, 18 bzw. 20 % Wasserglas und auf 100 % mit Wasser ergänzt.

6.1.2 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 51, Abbildung 52 und Tabelle 21 zeigen die Volumenabnahme bzw. den Schrumpfungsgrad in Prozent bezogen auf das Ausgangsvolumen des Weichgels im Standzylinder über die Zeit.

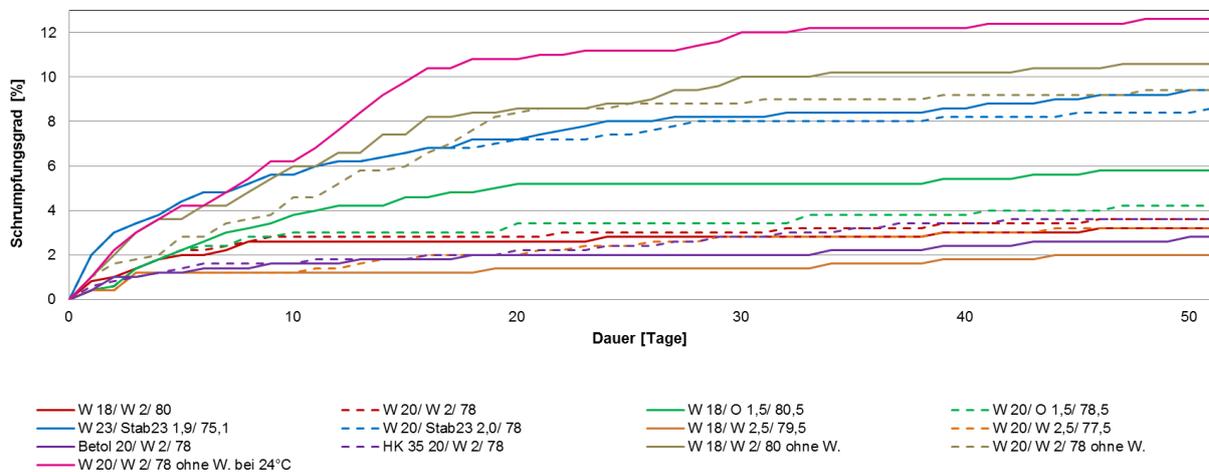


Abbildung 51: Schrumpfungsgrad der Weichgele über die Zeit

Vergleicht man das Synäreseverhalten mit Wasserüberdeckung und ohne, bei gleichem Mischungsverhältnis, dann wird der Unterschied zwischen Luft- und Untertrocknung ersichtlich. Bei den Mischungen mit Wasserüberdeckung W18 / W2 / 80 und W20 / W2 / 78 ist die Schrumpfung wesentlich geringer und weitestgehend nach 15 Tagen abgeklungen. Es bildet über die Versuchsdauer von 51 Tagen 16 ml und 18 ml. Im Gegensatz ist bei den Mischungen unter Lufttrocknung W18 / W2 / 80 ohne W. und W20 / W2 / 78 ohne W. der Schrumpfungsprozess erst nach 30 Tagen abgeklungen und fällt rund drei Mal so hoch aus. Es haben sich dabei 57 bzw. 53 ml Synäresewasser gebildet. Aus den Versuchen geht hervor, dass bedingt durch die Wasserüberdeckung das Weichgel nicht ungehindert Wasser aus den Kapillaren pressen kann, wodurch der Synäreseeffekt deutlich abgeschwächt wird.

Mischungsverhältnis	Volumenreduktion [%] nach					Synärese nach 51d [ml]
	5d	10d	15d	30d	51d	
W 18 / W 2 / 80	2,0%	2,6%	2,6%	2,8%	3,2%	16
W 20 / W 2 / 78	2,2%	2,8%	2,8%	3,0%	3,6%	18
W 20 / W 2 / 78 ohne W.	3,6%	6,0%	7,4%	10,0%	10,6%	53
W 18 / W 2 / 80 ohne W.	2,8%	4,6%	6,0%	8,8%	9,4%	57

Wasserglas...W = Ligasil 39,Natriumsilikat, Modul 3,3
 Reaktiv...W= Stabasil 19 (Natriumaluminat)

Tabelle 21: Vergleich der Volumenschrumpfung mit und ohne Wasserüberdeckung

Tabelle 22 zeigt den Vergleich unterschiedlicher Reaktiv- und Wasserglasanteile bei 10° Wasserlagerung. Betrachtet man die Volumenreduktion hinsichtlich des Reaktivanteils der Proben wird ersichtlich, dass die Schrumpfung mit steigendem Reaktivanteil abnimmt. Gele mit einem höheren Reaktivanteil bilden stärkere Vernetzungen aus. Das Netzwerk mit dem Reaktivanteil 2,5 % bindet bzw. lagert das Porenwasser besser in seine Struktur ein als jenes mit nur 1,5 %. Die Versuche mit dem Kegelfallgerät bestätigen diesen Zusammenhang. Die Schrumpfungsdauer ist nach 30 Tagen bei allen Versuchen größtenteils abgeschlossen. Ebenso spielt der Wasser- bzw. Feststoffgehalt der Mischung eine Rolle. Mit steigendem Wasserglas- bzw. sinkendem Wasseranteil der Probe (wie z.B. W18 / O1,5 / 80,5 im Vergleich zu W20 / O1,5 / 78,5) wird die Synäresewassermenge bzw. Volumenreduktion größer. Bedingt durch den höheren Feststoffgehalt ist die Gelstruktur stärker, wodurch auch die Schrumpfung ausgeprägter ist. Dieses Verhalten ist bei allen Versuchen beobachtet worden. Dies scheint ein Widerspruch zu sein, weil die Schrumpfung mit steigendem Reaktivanteil abnimmt. Betrachtet man jedoch die Mengen der Mischungsverhältnisse wird klar, dass ein Unterschied von 2 Vol.-% Wasserglas rund 12 g mehr oder weniger Wasserglas bedeuten und 1 Vol.-% Reaktivunterschied nur 7 g Lösungsunterschied bedeuten. Daraus folgt, dass die Menge an eingesetztem Wasserglas entscheidend für die Synärese ist und eine Steigerung des Reaktivanteils dem nur bedingt entgegen wirken kann.

Mischungsverhältnis	Volumenreduktion [%] nach					Synärese nach 51d [ml]
	5d	10d	15d	30d	51d	
W 18 / O 1,5 / 80,5	2,2%	3,0%	3,0%	3,4%	4,2%	21
W 20 / O 1,5 / 78,5	2,2%	3,8%	4,6%	5,2%	5,8%	29
W 18 / W 2 / 80	2,0%	2,6%	2,6%	2,8%	3,2%	16
W 20 / W 2 / 78	2,2%	2,8%	2,8%	3,0%	3,6%	18
W 18 / W 2,5 / 79,5	1,2%	1,2%	1,2%	1,4%	2,0%	10
W 20 / W 2,5 / 77,5	1,2%	1,2%	1,8%	2,8%	3,2%	16
Wasserglas...W = Ligasil 39,Natriumsilikat, Modul 3,3 Reaktiv...W= Stabilil 19 (Natriumaluminat)						

Tabelle 22: Vergleich unterschiedlicher Reaktiv- und Wasserglasanteil bei 10 °C

Tabelle 23 zeigt einen Vergleich zwei identer Mischungen mit Wasserlagerung bei 10° und 24°C. Die Probe bei 10° ist mit Wasserlagerung und jene bei 24° ohne Wasserüberdeckung. Dabei wird der signifikante Einfluss der Temperatur und Luft deutlich.

Die Mischung W 20 / W 2 / 78 ohne W. bei 24°C schrumpft in den ersten 30 Tagen vier Mal so schnell als die Probe W 20 / W 2 / 78 bei 10°C. Dabei entstanden 63 ml Synärese-

Untersuchungen der zeitlichen Veränderung (Synärese) von Weichgel

flüssigkeit. Das ist mit Abstand die größte Synäresemenge und das am stärksten ausgeprägte Schrumpfungsverhalten.

Legt man auf der Baustelle Referenzproben an, welche als Beweis dienen, muss darauf geachtet werden, dass sie bei der richtigen Temperatur und mit Wasserüberdeckung gelagert werden, damit ein Vergleich zur Einbausituation möglich ist.

Mischungsverhältnis	Volumenreduktion [%] nach					Synärese nach 51d
	5d	[ml]	15d	30d	51d	[ml]
W 20 / W 2 / 78 bei 10°C	2,2%	2,8%	2,8%	3,0%	3,6%	18
W 20 / W 2 / 78 ohne W. bei 24°C	4,2%	6,2%	9,8%	12,0%	12,6%	63
W = Ligasil 39, Natriumsilikat, Modul 3,3 W = Stabisil 19 (Natriumaluminat)						

Tabelle 23: Vergleich zwei identer Mischungen bei zwei Temperaturniveaus (10 und 24°C)

Tabelle 24 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Produkte mit Wasserüberdeckung bei 10°C. Das Reaktiv Natriumbikarbonat (Stabisil 23) besitzt ein sehr ausgeprägtes Synärese- bzw. Schrumpfungsverhalten. Die Gelstruktur schrumpft selbst Unterwasser so stark, dass die Oberfläche Risse bekommt und zerfällt. Die Synäresemenge beträgt bei W23 / Stab23 1,9 / 75,1 über die Versuchsdauer gesehen 47 ml und bei W20 / Stab23 2 / 78 43 ml. Verglichen mit dem Reaktiv Natriumaluminat ist die Synärese mehr als doppelt so groß. Die Mischungen mit anderen Wassergläsern zeigen keine nennenswerten Unterschiede, als zum "Standard Wasserglas (Ligasil 39).

Mischungsverhältnis	Volumenreduktion [%] nach					Synärese nach 51d
	5d	[ml]	15d	30d	51d	[ml]
W 20 / W 2 / 78	2,2%	2,8%	2,8%	3,0%	3,6%	18
W 23 / Stab23 1,9 / 75,1	4,4%	5,6%	6,6%	8,2%	9,4%	47
W 20 / Stab23 2,0 / 78	4,4%	5,6%	6,6%	8,0%	8,6%	43
HK 35 20 / W 2 / 78	1,2%	1,6%	1,8%	2,0%	2,8%	14
Betol 20 / W 2 / 78	1,4%	1,6%	1,8%	2,8%	3,6%	18
Wasserglas...Betol = Natriumsilikat, Modul 2,5; W = Ligasil 39, Natriumsilikat, Modul 3,3 HK 35 = Natriumsilikat, Modul 3,7 Reaktiv...W = Stabisil 19 (Natriumaluminat); O = Overlack (Natriumaluminat)						

Tabelle 24: Vergleich zwei identer Mischungen bei zwei Temperaturniveaus (10 und 24°C)

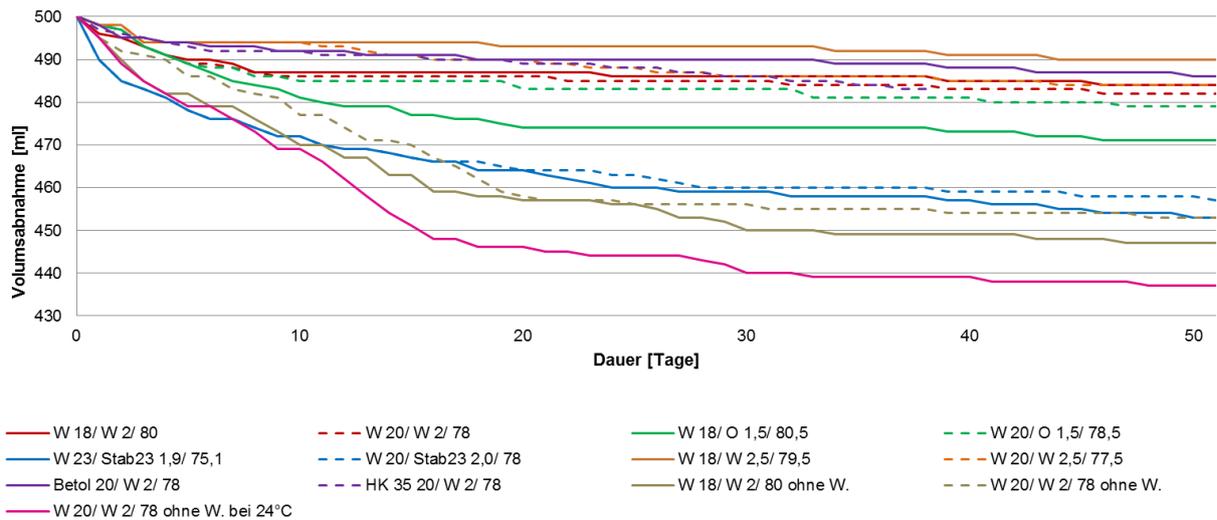


Abbildung 52: Volumenabnahme aus Standversuchen in Abhängigkeit der Zeit

6.2 Ermittlung der Synärese anhand des zeitlichen Verlaufs der Dichte

Bedingt durch das Auspressen von Synäresewasser kommt es zu einer Volumsreduktion, was zu einer Dichtezunahme des Gels im Laufe des Alterungsprozesses führt. Die Dichte ist nach dem Anmischen, weiters noch einmal nach ein und zwei Monaten mittels Tauchwägung bestimmt worden.

6.2.1 Versuchsdurchführung

Nach dem Anmischen einer Weichgelprobe sind in einen Messbehälter exakt 250 ml eingefüllt, abgewogen und protokolliert worden. Anhand des bekannten Volumens und der Feuchtmasse abzüglich Tara kann die Dichte nach der Gelierung bestimmt werden. Als Behälter dienen gewöhnliche verschließbare Getränkeflaschen. Diese wurde tariert und mit der Probemischung im flüssigen Zustand befüllt und verschlossen. Die Lagerung fand in einem Klimaschrank bei 10 °C statt. Nach einem Monat ist die Flasche aufgeschnitten, das entstandene Synäresewasser abgeschöpft und abgewogen worden. Ein Weichgelstück wurde mit einem Löffel entnommen und abgewogen. Das Volumen ist mittels Tauchwägung nach ÖNORM B 4414 Teil 1 bestimmt, siehe Abbildung 54, die Flasche mit einer Folie umwickelt, mit einem Klebeband verschlossen und wieder in den Klimaschrank gegeben worden. Die Dichte der Probe lässt sich mittels Tauchwägung folgendermaßen ermitteln (siehe Abbildung 53). Man benötigt dafür eine Waage, welche auf 0,01 g genau wiegt und eine Weichgelprobe abgewogen und m_f bestimmt. Die abgewogene Probe wird auf die Haltevorrichtung gelegt und an der Aufhängevorrichtung in die Tauchflüssigkeit gegeben. Damit ist die Masse unter Auftrieb m_u bestimmt. Abschließend wird die Temperatur der Tauchflüssigkeit gemessen und die von der Temperatur abhängige Dichte ρ_w bestimmt.

Untersuchungen der zeitlichen Veränderung (Synärese) von Weichgel

Dieser Vorgang wird zwei Mal in Zeitabständen von jeweils einem Monat wiederholt, somit ist V_1 und V_2 ermittelt und die Dichte $\rho_{1,2} = m_f / V_1$ bzw. V_2 bestimmt.



Abbildung 53: Tauchwägung zur Volumbestimmung einer Weichgelprobe

$$\rho = \frac{m_f}{V} = \frac{m_f}{\frac{m_f - m_u}{\rho_w}}$$

V = Volumen der Probe, w elchesmittels Tauchw ägungbestimmt wird

ρ = Dichte der Weichgelmischung

m_f = Masse des Weichgelstückes

m_u = Masse des Weichgelstückes in der Tauchflüssigkeit

ρ_w = Dichte der Tauchflüssigkeit

Das Volumen V_A und die Dichte ρ_A nach dem Anmischen sind bekannt, die Volumina V_1 und V_2 über die Zeit sind bestimmt. Der Schrumpfungsgrad S [%] berechnet sich wie folgt:

$$S = \left(1 - \frac{V_1 \text{ bzw. } V_2}{V_A}\right) * 100\%$$



6.2.2 Ergebnisse und Interpretation

Es sind insgesamt 30 Versuche durchgeführt worden. In der Tabelle 25 sind 15 Ergebnisse davon dargestellt. Es sind drei Versuchsreihen mit den Reaktivanteilen 1,5 / 2 / 2,5 sowie den Wasserglasanteilen von 14-25 % dargestellt. Die Lagerung fand bei 10° im Klimaschrank statt. Je Versuchsreihe blieb der Reaktivanteil konstant und ist in Abbildung 55 farblich gekennzeichnet.

Mischung	Dichte nach dem Anmischen	Dichte nach Monat 1	Schrumpfungsgrad nach 1 Monat	Dichte nach Monat 2	Schrumpfungsgrad nach 2 Monaten
Typ	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[g/cm ³]	[%]
W 14 / W 1,5 / 84,5	1,055	1,057	0,49	1,059	0,79
W 18 / W 1,5 / 80,5	1,070	1,076	0,54	1,079	0,82
W 20 / W 1,5 / 78,5	1,077	1,083	0,52	1,086	0,80
W 22 / W 1,5 / 76,5	1,083	1,088	0,55	1,092	0,83
W 25 / W 1,5 / 73,5	1,095	1,104	0,84	1,108	1,18
W 14 / W 2 / 84	1,058	1,060	0,38	1,063	0,51
W 18 / W 2 / 80	1,073	1,078	0,47	1,082	0,69
W 20 / W 2 / 78	1,081	1,085	0,43	1,088	0,68
W 22 / W 2 / 76	1,088	1,089	0,39	1,091	0,51
W 25 / W 2 / 73	1,099	1,101	0,38	1,105	0,53
W 14 / W 2,5 / 83,5	1,062	1,063	0,18	1,065	0,27
W 18 / W 2,5 / 79,5	1,075	1,076	0,18	1,078	0,28
W 20 / W 2,5 / 77,5	1,083	1,085	0,34	1,088	0,50
W 22 / W 2,5 / 75,5	1,091	1,093	0,24	1,095	0,35
W 25 / W 2,5 / 73,5	1,103	1,105	0,22	1,107	0,35

Tabelle 25: Übersicht der durchgeführten Versuche

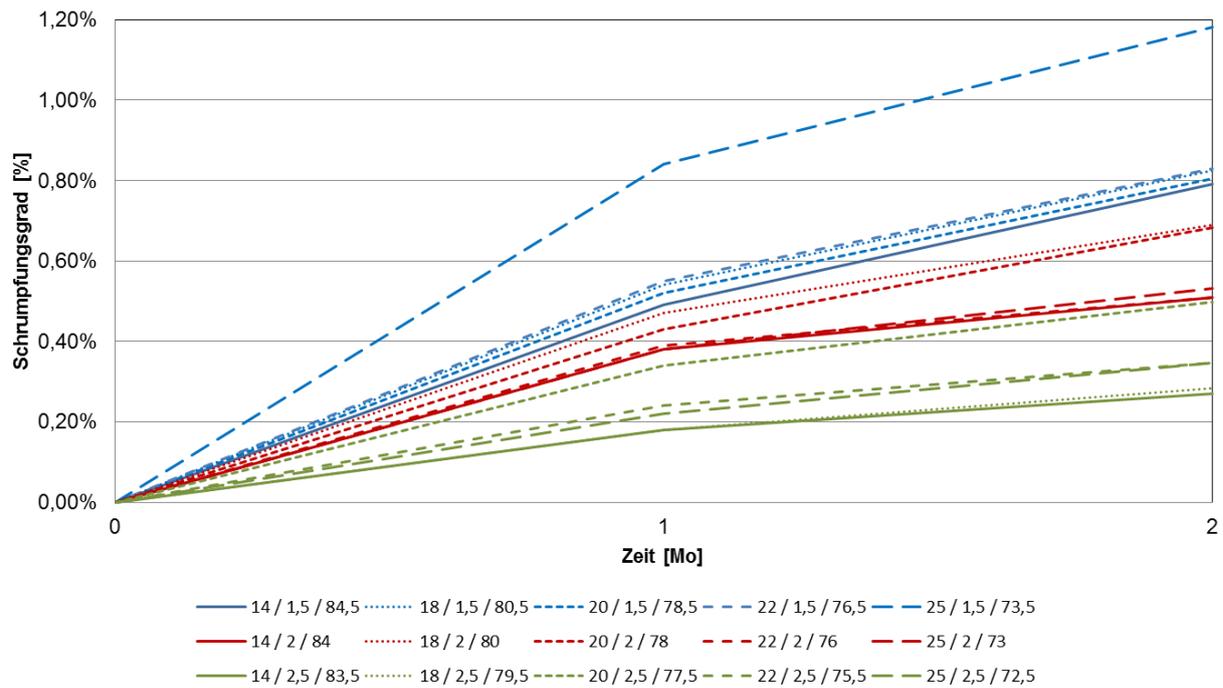


Abbildung 55: Volumsmäßige Schrumpfung in Prozent über die Zeit

Wie bei der Synäresemessung im Standzylinder zeichnet sich der Trend ab, dass Proben mit einem Reaktivanteil von 1,5 % einen höheren Schrumpungsgrad besitzen, als jene mit einem Reaktivanteil von 2,5 %. Ebenso steigt bei dieser Messmethode der Schrumpungsgrad mit zunehmendem Feststoffgehalt. Die Probe 25 / 1,5 / 73,5 ist nach dem Anmischen eine Woche unter Raumtemperatur bei 24°C gealtert. Es wird ersichtlich, was für einen eklatanten Einfluss Temperaturschwankungen auf die Weichgelalterung haben.

In Abbildung 56 ist die Dichteentwicklung in Abhängigkeit des Reaktivanteils ersichtlich. Es ist bei allen durchgeführten Versuchen eine Dichtezunahme feststellbar. Diese entsteht durch den Synäreseeffekt. Die Zunahme ist in etwa bei allen Versuchsreihen gleich.

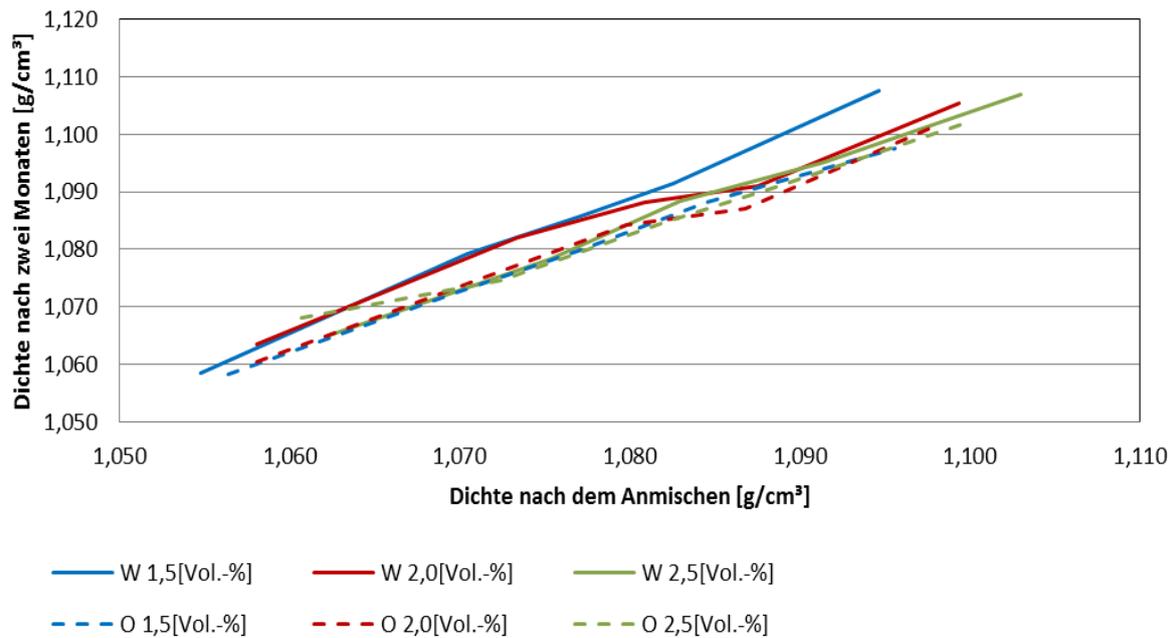


Abbildung 56: Dichteentwicklung von Mischungen mit unterschiedlichem Reaktivanteil

6.3 Vergleich der Versuchsmethoden Standzylinder und Dichtebestimmung

Aus beiden Versuchsmethoden kann der Einfluss der Temperatur, Natriumaluminatanteil und Feststoffgehalt auf die Synärese nachgewiesen werden. Der Schrumpfungsgrad ist zu Beginn stärker und nimmt mit der Zeit deutlich ab. Je nach Mischung ist nach 7 bis 14 Tagen die Schrumpfung größten Teils abgeschlossen.

Der Betrag der Schrumpfung ist jedoch bei den beiden Versuchsmethoden unterschiedlich. Dabei wird eine Weichgelprobe in einen mit Wasser gefüllten Becher gegeben und die Masse unter Auftrieb gewogen. Bedingt durch die Tatsache, dass die Dichte des Weichgels der des Wassers sehr ähnlich ist, sind die Weichgelproben teilweise im Wasser abgehoben. Weiters ist der Versuchsablauf durch Tauchwägung aufwendig und zeitintensiv. Im Gegensatz dazu wird die Volumenabnahme beim Standzylinderversuch direkt bestimmt. Die zeitliche Entwicklung kann jeden Tag visuell festgestellt, protokolliert und ausgewertet werden.

7 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Die Versuche sind in Anlehnung an die ÖNORM B 4422-1 für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Böden im Labor durchgeführt worden. Die Prüfgeräte sowie die Durchführung und Auswertung der Versuche sind so aufgebaut, dass reproduzierbare, vergleichbare und interpretierbare Prüfergebnisse erzielt werden.

Eine Weichgelsohle muss abgesehen von den Strömungskräften keinen besonderen Belastungen standhalten. Hierfür muss sie möglichst plastisch verformbar sein und für die Dauer der Baumaßnahme das vertraglich festgelegte Abdichtungsniveau erfüllen. Geforderte Restwassermengen liegen im Bereich von 1,5 bis 3,0 l/s1000m².

7.1 Darcysches Fließgesetz

Die Grundwasserströmung wird nur von der Schwerkraft und von den Fließwiderständen des Untergrundes beeinflusst. Wird nur die Schwere als Ursache der Wasserbewegung betrachtet, so stellt das Fließgesetz einen funktionellen Zusammenhang zwischen den Vektoren v_i und i_j dar. Der einfachste lineare Zusammenhang ist durch die Beziehung

$$v_i = k_{ij} * i_j$$

v_i = Fließgeschwindigkeit [m/s]

k_{ij} = Durchlässigkeitskoeffizient [m/s]

i_j = hydraulisches Gefälle = $\Delta H/L$ [-]

ΔH = Druckhöhendifferenz

L = durchströmte Länge

gegeben. Diese Beziehung wird als Darcysches Gesetz bezeichnet. Die Filtergeschwindigkeit v stellt einen Mittelwert über die gesamte Fläche, also Korn und Porenvolumen - dar und wird bei der Ermittlung von Durchflüssen herangezogen. Durch Kombination mit der Kontinuitätsgleichung

$$\int_A v * dA = Q$$

ergibt sich die folgende Gleichung

$$Q = k_f * A * \frac{\Delta H}{L} = k_f * A * i$$

Der Durchfluss Q , welcher durch einen konstanten Querschnitt fließt, ist proportional zum Druckgefälle (hydraulischer Gradient) und dem Durchlässigkeitskoeffizienten bzw. -tensor (siehe Abbildung 57)

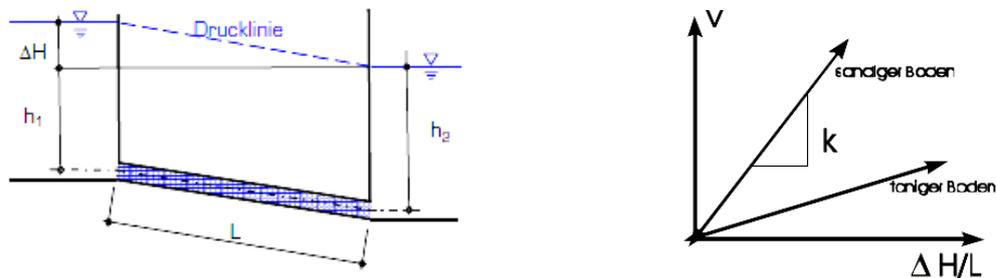


Abbildung 57: links Gedankenmodell zur Bestimmung der Durchlässigkeit [DRUCKER, 2009]; rechts Zusammenhang der Geschwindigkeit und dem hydraulischen Gefälle in Abhängigkeit des Bodens [LOISKANDL, 2010]

7.2 Durchlässigkeit

Der Durchlässigkeitsbeiwert ist kein konstanter Wert, der in jedem Boden gleich ist, sondern ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Hauptsächlich wird er von der Größe der einzelnen Poren und deren Anteil (Lagerungsdichte, Korndurchmesser, Kornform, Ungleichförmigkeit) im Boden bestimmt. Für den Durchlässigkeitsbeiwert sind weiters die Struktur und die Textur eines Bodens ausschlaggebend. Geschichtete Texturen, wie sie zum Beispiel bei horizontal angeordneten platten Geröllformen zu finden sind, bieten in horizontaler Richtung eine sehr günstige Beweglichkeit für das Grundwasser. Die Grundwasserbewegung in vertikaler Richtung dagegen kann um ein Vielfaches geringer sein. Das zeigt, dass Böden verschiedene Durchlässigkeiten in unterschiedlichen Richtungen aufweisen. Daher sollte der k_f -Wert auch für die maßgebende Richtung bestimmt werden [LANG, 2008]. Die Durchlässigkeit nimmt mit fallendem Sättigungsgrad ab, weil einerseits die Luftporen die Querschnittsfläche für den Durchfluss verkleinern und andererseits die Flüssigkeit durch die Kapillar- und Adsorptionskräfte nicht frei beweglich ist. Aus diesem Grund werden die Laborversuche nur im gesättigten Zustand durchgeführt. In diesem Zustand versteht man die Durchlässigkeit als Eigenschaft, das Grundwasser unter der Wirkung eines, durch das Schwerkraftpotential gegebenen Strömungsgefälles i durchfließen zu lassen [LANG, 2008]. Die Viskosität, die Temperatur und der Chemismus des Wassers sind weitere Einflussfaktoren. Bei gleichem Korngerüst wird die Durchlässigkeit mit steigender Wassertemperatur größer, da die Viskosität abnimmt und damit der innere Reibungswiderstand der Flüssigkeit abnimmt.

Bedingt durch eine Variation der Lagerungsdichte wird die Durchlässigkeit stark beeinflusst, da Hohlräume geöffnet oder geschlossen werden können.

7.3 Probenherstellung

Damit die Versuche reproduzier- und vergleichbar sind, muss die Kornverteilung, die Lagerungs- und Korndichte bestimmt werden.

7.3.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung ist nach ÖNORM B 4412:1978 für einen Quarzsand bestimmt worden, (siehe Abbildung 58). Aus der Kornverteilung kann die Ungleichförmigkeitszahl C_u und die Krümmungszahl C_c ermittelt werden. Für die vorliegende Versuchsprobe, gilt wie folgt:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,341}{0,147} = 2,3$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}} = \frac{(0,265)^2}{0,147 * 0,341} = 1,30$$

Daraus folgt, dass die Kornverteilung enggestuft und steil verlaufend ist.

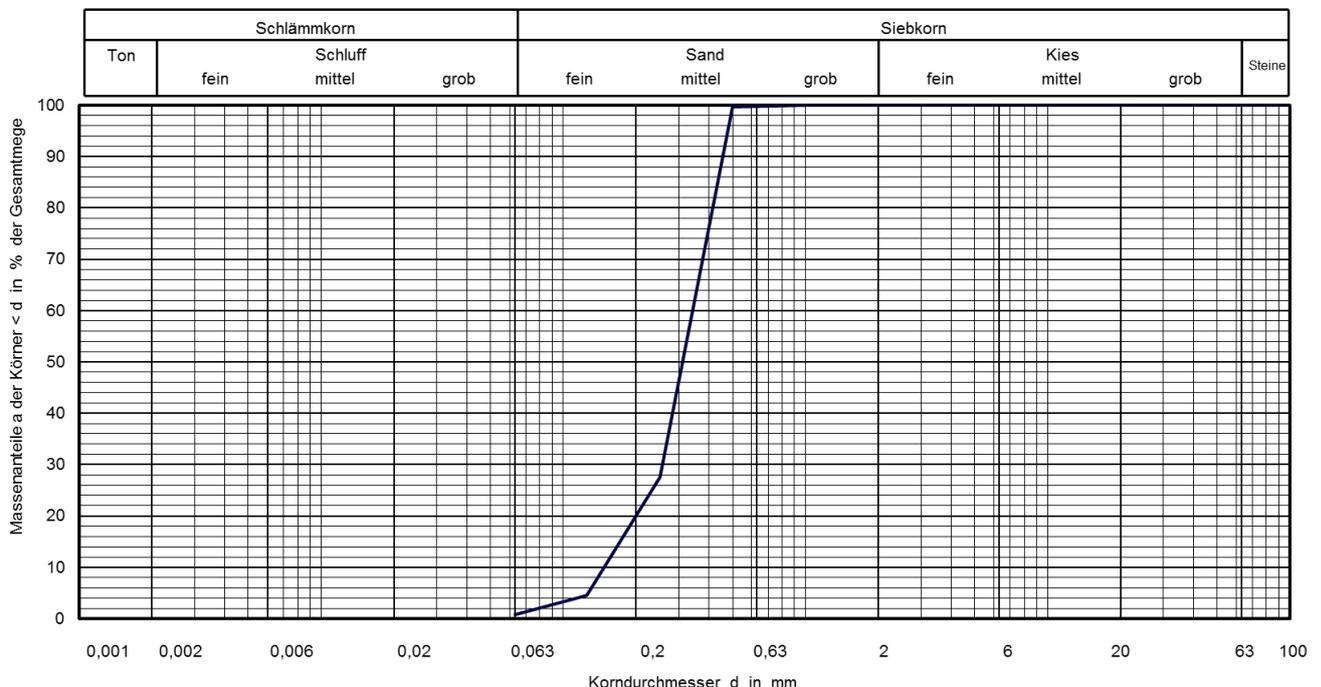


Abbildung 58: Korngrößenverteilung der Versuchsprobe

7.3.2 Lagerungsdichte

Zu Beginn ist die Korndichte nach ÖNORM B 4413 mit dem Kapillarpyknometer ermittelt worden. Die Korndichte beträgt $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$.

Die Bestimmung der Lagerungsdichte erfolgte nach DIN 18126. Es ist die jeweils lockerste und dichteste Lagerung der Sandprobe bestimmt worden.

Lockerste Lagerung

Die Sandprobe ist im Trocknungsofen bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet worden. Anschließend ist die Probe durch lockeres Einfüllen in ein Gefäß mit bekanntem Volumen eingerieselt worden, (siehe Abbildung 59).

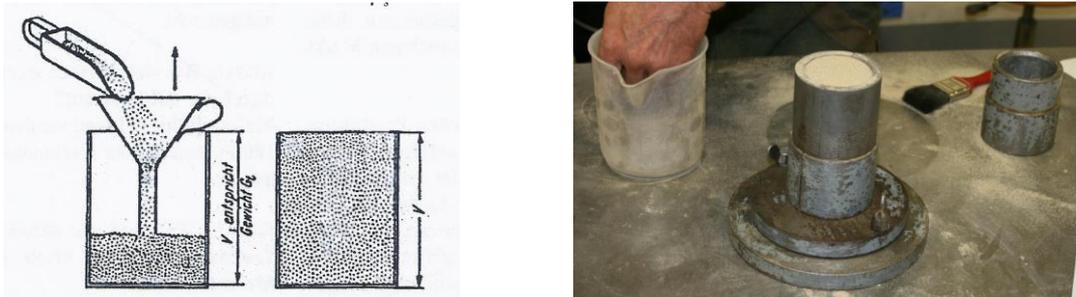


Abbildung 59: Zylinderversuch zur Bestimmung der lockersten Lagerung [BRANDL, 2006]

$$\rho_{dmin} = \frac{m_d}{V} = \frac{513,6}{353} = 1,45 \text{ g/m}^3$$

$$n_{max} = 1 - \frac{\rho_{dmin}}{\rho_s} = 1 - \frac{1,45}{2,66} = 0,45[-]$$

Dichteste Lagerung

Der trockenen Sandprobe wird Wasser zugegeben. Die Probe wird in fünf Lagen, mit je 30 Schlägen in den Zylinder eingebaut, abgewogen und im Trocknungsofen bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet. So kann der Wassergehalt, die Feuchtdichte und mittels bekannter Korndichte der minimal Porengehalt bestimmt werden.

$$w = \frac{m_f - m_d}{m_d} = \frac{722,8 - 631,9}{631,9} = 14\%$$

$$\rho_{dmax} = \frac{m_f}{V} \cdot \frac{1}{1+w} = \frac{746,9}{353} \cdot \frac{1}{1+0,14} = 1,86 \text{ g/m}^3$$

$$n_{min} = 1 - \frac{\rho_{dmax}}{\rho_s} = 1 - \frac{1,86}{2,66} = 0,34[-]$$



Abbildung 60: Zugabe des Wassers

Wählt man einen mittleren Porengehalt von z.B. $n = 0,40$, kann auf die Trockenmasse des Sandes und die notwendige Wassermenge rückgerechnet werden.

7.3.3 Probeneinbau und Versuchseinrichtung

Nach Bestimmung aller spezifischen Kennwerte der Sandprobe ist die gewünschte Lagerung für den Probeneinbau festgelegt worden. Die Trockenmasse des Sandes und die Wassermenge werden abgewogen. Der Versuchszylinder wird leer gewogen und anschließend die Probe lagenweise eingebaut. Erst wenn der Versuchszylinder angeschlossen, die Probe wassergesättigt und durchflossen ist, wird die Durchlässigkeit bestimmt. Dafür muss der Wasserspiegel im Standrohr auf Null eingestellt werden. Gemessen wird die Wasserspiegelabnahme pro Zeit, (siehe Abbildung 61).

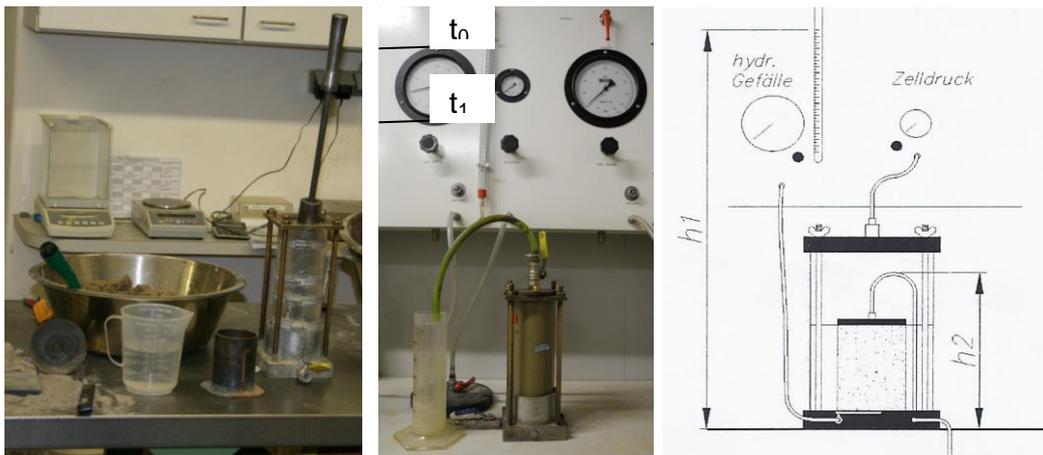


Abbildung 61: links Einbau der Probe; mitte Versuchszylinder an die Anlage angeschlossen; rechts Prüfung mit fallender Druckhöhe

Die Prüfung der Durchlässigkeit am Institut für Geotechnik der TU Wien erfolgt mit fallender Druckhöhe. Der Durchlässigkeitsbeiwert errechnet sich nach:

$$k_f = \frac{A_1 * l}{A * t} * \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes hat für jede Probe einzeln zu erfolgen, damit anschließend der Abdichtungserfolg bewertet werden kann. Die Auswertung der reinen Sandprobe in Abhängigkeit der Lagerung ergibt:

	k_f [m/s]	n [-]
lockerste Lagerung	$1,1 * 10^{-4}$	0,45
mitteldichte Lagerung	$5,5 * 10^{-5}$	0,40
dichteste Lagerung	$1,5 * 10^{-5}$	0,34

Anschließend wird die Weichgelprobe angemischt. Die Menge kann über das Probenvolumen und den Porengehalt abgeschätzt werden. Mittels „Injektionspumpe“ ist das Weichgel mit max. drei bar eingebracht worden, (siehe Abbildung 62). Anschließend wird

24 Stunden gewartet und dann wird die Probe an den Versuchsstand angeschlossen. Am Versuchsstand ist das hydraulische Gefälle stufenlos einstellbar. In der Regel ist am ersten Tag der Druck schrittweise bis auf 0,5 bar gesteigert worden. Bei einer Probenhöhe von 25 cm ergibt dies ein Gefälle von $i = 20$.



Abbildung 62: Injektion in die Probe

7.4 Bestimmung des pH-Wert der Weichgellösung und des Eluats

Es ist üblich, den sauren bzw. alkalischen Charakter von Lösungen quantitativ durch den pH-Wert zu beschreiben. Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus des Zahlenwertes der H_3O^+ – Konzentration. Lösungen mit $pH = 7$ bezeichnet man als neutral, Lösungen mit $pH < 7$ als sauer und Lösungen mit $pH > 7$ als basisch bzw. alkalisch [BENEDIX, 2011].

Die Bestimmung pH-Wertes erfolgte anhand von Indikatorstäbchen. Diese zeigen bei unterschiedlichen pH-Werten verschiedenen Farben. Anhand einer zugehörigen Farbvergleichsskala ist der pH-Wert ermittelt worden, dies zeigt Abbildung 63. Die Genauigkeit dieser pH-Wertmessung liegt bei $\pm 0,5$ pH und ist für die durchgeführten Untersuchungen ausreichend genau, weil der pH-Wertverlauf von Interesse ist und nicht der absolute Wert.

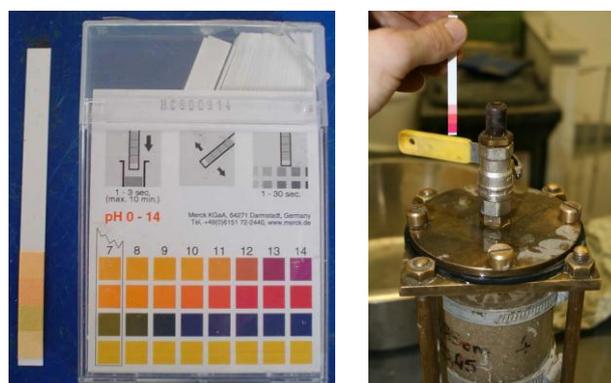


Abbildung 63: links Indikatorstäbchen mit Farbvergleichsskala; rechts pH-Wert des Durchflusses

Der pH-Wert ist von den Einzelkomponenten überprüft worden und mit den Angaben der Hersteller verglichen worden. Die gemessenen Werte stimmen mit den Angaben überein. Nach dem Anmischen ist der pH-Wert der Weichgellösungen bestimmt worden. Dieser lag bei allen Mischungen in einem Bereich von pH 12 - 12,5. Weiters wurde der pH-Wertverlauf bei der Durchlässigkeitsbestimmung untersucht. Dieser lag für die komplette Versuchsdauer bei allen Proben unabhängig vom Mischungsverhältnis bei pH 12. Betrachtet wurde der pH-Wert auch bei den Standzylinderexperimenten und dem Synäresewasser bei der Dichtebestimmung. Es sind auch bei diesen Untersuchungen pH-Werte von 12 – 12,5 gemessen worden. Der pH-Wert von 12 ist darauf zurückzuführen, dass Natronlauge und Natrium nur schwach in das Gelgerüst eingebaut und über das Porenwasser ausgetragen wird. SiO₂ liegt meistens in der Lösung im Überschuss vor und wird bei der Gelbildung nicht vollständig umgesetzt, wodurch es durch das Synäresewasser ausgetragen wird.

7.5 Ergebnisse und Interpretation

Es sind insgesamt zwölf Versuche mit einer Versuchsdauer von 40 Tagen durchgeführt worden. Dabei sind drei Versuche mit lockerster, mittlerer und dichtester Lagerung und einem Mischungsverhältnis von W20 / W2 / 78 gemacht worden. Weitere drei Versuche mit mittlerer Lagerung und veränderlichem Wasserglasanteil von 18 / 20 / 22 Vol.-%. Sowie drei Versuche mit mittlerer Lagerung und veränderlichem Reaktivanteil von 1,5 / 2,0 / 2,5 Vol.-%. Die Moduln 2,5 und 3,7, sowie das Reaktiv Natriumbikarbonat sind ebenfalls geprüft worden.

7.5.1 Vergleich und Interpretation der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Lagerung

	vor der Injektion k_{fm}	nach der Injektion k_{fm}
	[m/s]	[m/s]
lockerste Lagerung	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
mitteldichte Lagerung	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$
dichteste Lagerung	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$

Lockerste Lagerung

Bedingt durch die Weichgelinjektion ist ein Abdichtungserfolg von rund $1 \cdot 10^{-3}$ m/s erzielt worden. Dabei hat eine Weichgelmenge von ca. 800 ml die Sandprobe durchflossen. Rechnerisch beträgt das Porenvolumen 554 ml. Es ist davon auszugehen, dass das Weichgel den Porenraum vollständig penetriert hat. Ab dem 20. Tag war jedoch eine stetig steigende Durchflussmenge messbar. Nach 35 Tagen ist der Versuch abgebrochen worden. Bedingt durch den Wasserdruck und die adhäsive Einlagerung des Weichgels in den

Porenräumen ist es zu Erosionseffekten gekommen. Dadurch haben sich Wasserwegen gebildet, die Folge waren Durchflüsse von 4 ml/s.

Mittlere und dichteste Lagerung

Die Injektion von Weichgel brachte bei beiden Versuchsanordnungen einen Abdichtungserfolg von etwa drei Zehnerpotenzen. Dem vorhandenen Porenraum und den Injektionsmengen nach zu schliessen, sind die Proben vollständig penetriert worden. Der Durchlässigkeitsbeiwert hat über die gesamte Versuchsdauer wenig Schwankung gezeigt.

Vergleicht man die Injektionen - sprich die Durchlässigkeitsbeiwerte - in Abhängigkeit der Lagerung, ist eine relative Abnahme der Abdichtung in Bezug auf die zunehmende Lagerung ersichtlich.

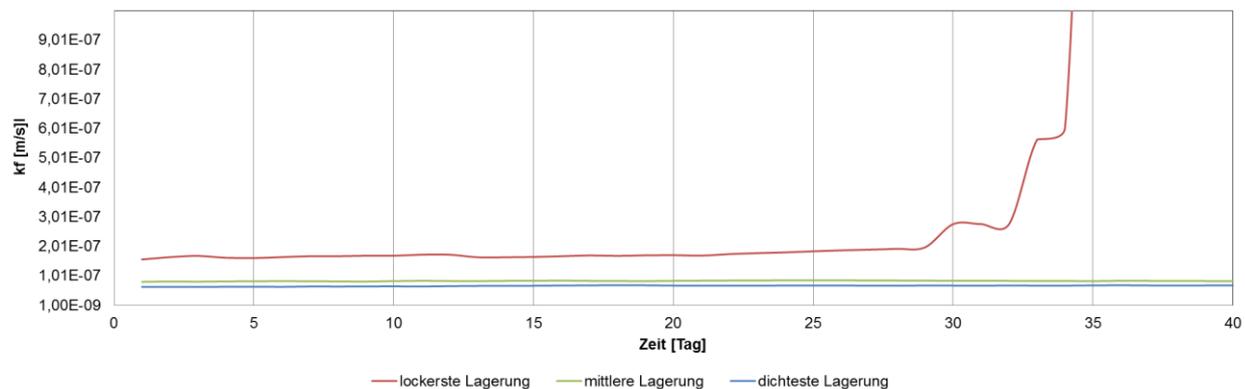


Abbildung 64: Unterschiedliche Lagerung

7.5.2 Vergleich unterschiedlicher Mischungsverhältnisse

Es sind drei Versuche mit mittlerer Lagerung und den Mischungsverhältnissen W18 / W2 / 80, W20 / W2 / 78 und W22 / W2 / 76 durchgeführt worden.

Die Mischung W18 / W2 / 80 mit dem geringsten Silikatanteil ist die ersten 20 Tage auf einem konstanten k-Wert von $6,7 \cdot 10^{-8}$ m/s, verschlechtert sich bis zum 35. Tag auf $9,0 \cdot 10^{-8}$ m/s und verbleibt die restliche Versuchsdauer auf diesem Niveau. Bei jener Versuchsprobe mit einem mittleren Silikatgehalt von 20 Vol.-% stellt sich ein k-Wert von $8,1 \cdot 10^{-8}$ m/s über die komplette Versuchsdauer ein. Die Probe W22/ W2/ 76 verbessert sich in den ersten 21 Tagen von $9,5 \cdot 10^{-8}$ m/s auf $8,3 \cdot 10^{-8}$ m/s und verbleibt für die restlichen 19 Tage auf diesem Niveau.

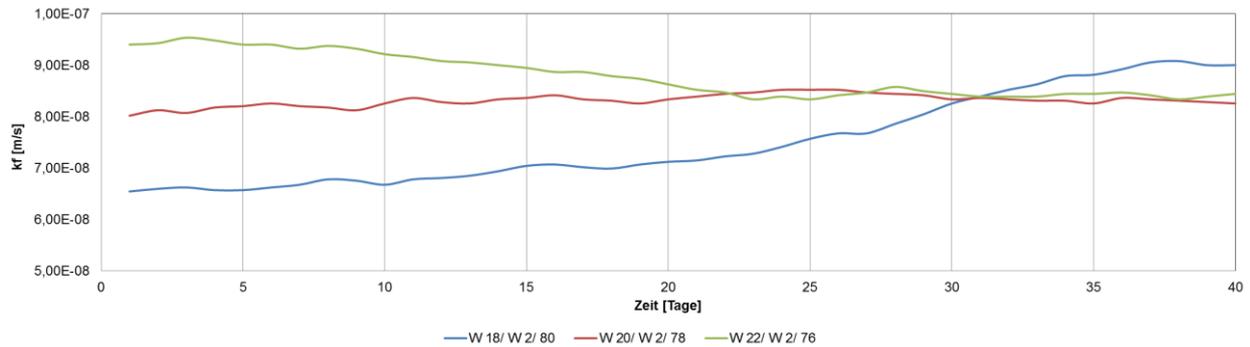


Abbildung 65: Unterschiedliche Mischungen

Ein möglicher Grund für die Erhöhung der Durchlässigkeit der Probe W18 / W2 / 80 ist die Synärese in Kombination mit Feststoffverlagerungen. Bedingt durch den geringeren Feststoffgehalt der Weichgelmischung und dem Wasserdruck von 0,5 bar, kommt es in Folge von Synäreseffekten zu Umlagerungen in der Probe. Erst wenn sich ein Gleichgewicht aus dem anfangs entstehenden Potentialunterschied einstellt, stoppt die Durchlässigkeitszunahme. Dieser Vorgang wird erst durch die eigentliche Synärese ermöglicht, wobei auch kleine Mengen an Silikat und Aluminat ausgetragen werden. Dies erklärt auch den hohen pH-Wert des Abflusswassers von 12.

7.5.3 Vergleich unterschiedlicher Wasserglasmoduln

Es sind drei Versuche mit mittlerer Lagerung und den Moduln 2,5 / 3,3 / 3,7 durchgeführt worden.

Der Versuch W20 / W2 / 78 ist nur zum Vergleich in Abbildung 66 dargestellt und wurde nicht ein zweites Mal durchgeführt. Der k-Wert beträgt $8,1 \cdot 10^{-8}$ m/s und verläuft über die Versuchsdauer konstant. Versuch HK 35 20/ W2/ 78 hat die höchste Durchlässigkeit mit $1,26 \cdot 10^{-7}$ m/s und Betol 20 / W2 / 78 eine von $1,22 \cdot 10^{-8}$ m/s. Ein möglicher Grund für die etwas höhere Durchlässigkeit könnte eine nicht vollständige Penetration und/oder geringfügige Randumläufigkeiten sein.

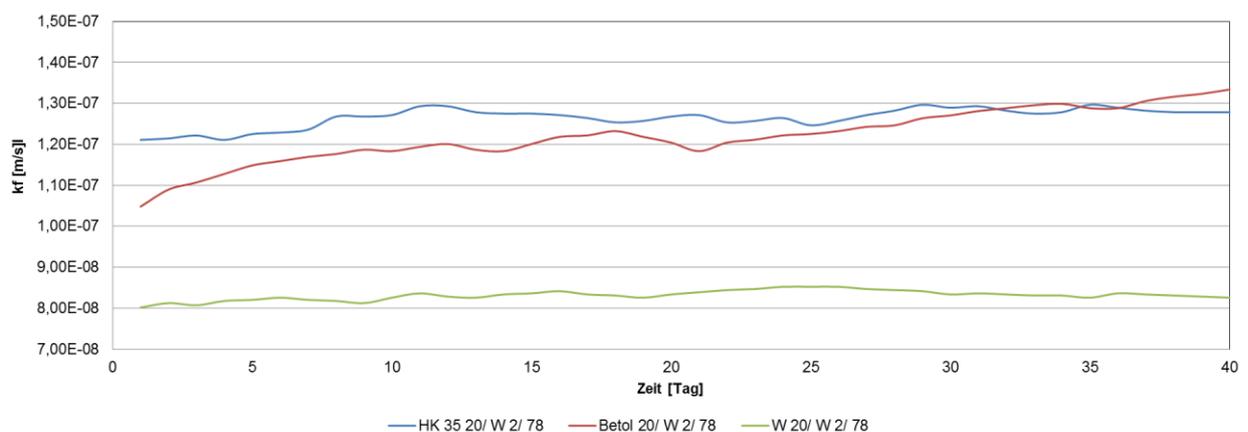


Abbildung 66: Unterschiedliche Wasserglas Moduln

7.5.4 Vergleich unterschiedlicher Reaktivanteile und Reaktive

Es sind vier Versuche mit den Reaktivanteilen 1,5 / 2,0 / 2,5 sowie mit dem Natriumbikarbonat-Pulver Stabisil 23 durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 67 dargestellt. Die Versuche W 20 / W 1,5 / 78,5 und W 20 / W 2,5 / 77,5 sind aus Zeitgründen nur 14 Tage durchgeführt worden.

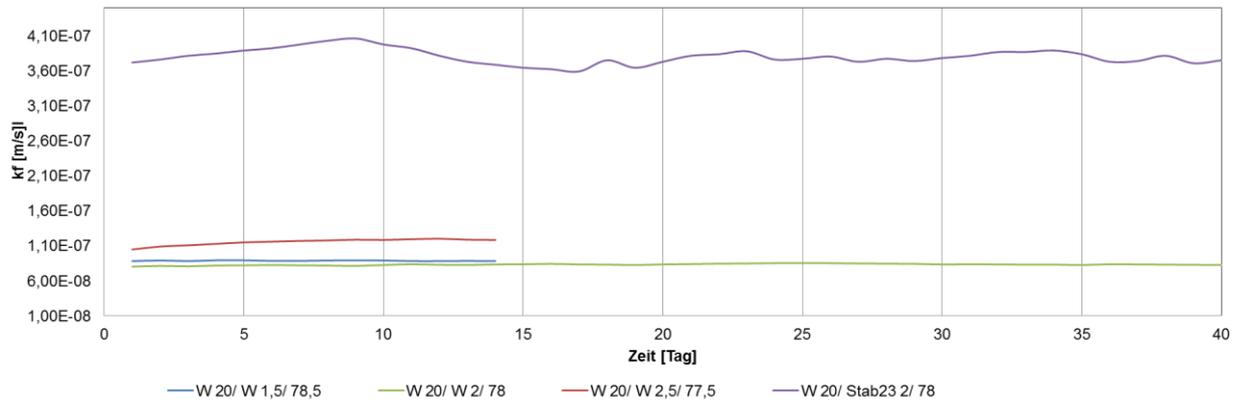


Abbildung 67: Unterschiedliche Reaktivanteile und Reaktivprodukte

Mischung	k_f
	m/s
W 20 / W 1,5 / 78,5	$8,9 \cdot 10^{-8}$
W 20 / W 2 / 78	$8,3 \cdot 10^{-8}$
W 20 / W 2,5 / 77,5	$7,9 \cdot 10^{-8}$
W 20 / Stab23 2 / 78	$3,8 \cdot 10^{-7}$

Bis auf die Probe W 20 / Stab23 2 / 78 haben alle Versuche den erwarteten Ergebnissen entsprochen. Es konnte eine Durchlässigkeitsverminderung von drei Zehnerpotenzen erreicht werden. Der Versuch mit dem Reaktiv Natriumbikarbonat zeigte jedoch starke Schwankungen in der Durchlässigkeit und der Abdichtungserfolg liegt auch nur bei zwei Zehnerpotenzen.

8 Zusammenfassung

Um die Erfahrungen bezüglich der Eigenschaften und Einflussparameter von Weichgel besser beurteilt zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit Laborversuche durchgeführt. Genauer betrachtet wurden die Mischreihenfolge, der Gelbildungsprozess, die Alterung und deren Einfluss auf die Dichte sowie die Durchlässigkeit. Bei den Versuchen zur Gelier- und Kippzeit ist der Anteil an Wasserglas für drei verschiedene Reaktivanteile variiert worden.

Bedingt durch eine gezielte Variation der Mischverhältnisse und Produkte, können folgende Ergebnisse festgehalten werden. Aus den Versuchen geht hervor, dass mit steigendem Reaktivanteil (1,5 / 2 / 2,5 Vol.-%) die Gelbildung verkürzt wird und mit steigendem Wasserglasanteil (14 / 18 / 20 / 22 / 25 Vol.-%) die Gelier- und Kippzeit verlängert wird. Vergleicht man die eingesetzten Mengen der beiden Stoffe, wird der wesentlich größere Einfluss des Natriumaluminates ersichtlich. Daraus folgt, dass die Gelier- und Kippzeit am einfachsten über den Reaktivanteil gesteuert werden kann. Die Dosierung des Reaktives muss jedoch auch dementsprechend genau sein. Der Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und Gelierzeit hinsichtlich Mischverhältnisse ergab, dass in Abhängigkeit des Wasserglasanteils der Temperatureinfluss mehr oder weniger ausgeprägt ist. So beträgt die Zeitdifferenz auf die Gelierzeit zwischen den beiden Temperaturniveaus 10 und 24 °C mit 2 Vol.-% Reaktivanteil und bei 14 Vol.-% Wasserglasanteil rund 10 min, bei 20 Vol.-% Wasserglas rund 15 Minuten und bei 25 Vol.-% Wasserglas schon bis zu 45 Minuten. Der Temperatureinfluss auf die Gelier- und Kippzeit ist daher nicht für alle Mischungen gleich, sondern immer in Abhängigkeit des jeweiligen Mischungsverhältnisses zu untersuchen. Die Untersuchungen bezüglich der Viskositätsentwicklungen zeigten, dass die Anfangsviskosität für alle Weichgellösungen bei rund 10 mPas liegt und die Gelbildung bei allen Mischungen bei etwa 12 bis 14 mPas einsetzt. Die Zeitspanne zwischen niedrig viskoser Weichgellösung und einsetzender Gelbildung jedoch maßgebend vom Mischungsverhältnis und Temperatur abhängt. Die Gelier- und Kippzeit ist in Abhängigkeit der Mischung und der Temperatur mit drei Versuchsmethoden untersucht worden. Vor allem das Rotationsviskosimeter mit Kühlzelle lässt eine genaue und realitätsnahe Viskositätsentwicklung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur zu. Die optische Kontrolle dient dabei als gute Unterstützung.

In Hinblick auf das Synäreseverhalten in Abhängigkeit der Temperatur und dem Mischungsverhältnis sind zwei Untersuchungsmethoden (Dichtebestimmung und Standzylinder)

vorgestellt worden, einerseits die Bestimmung der Schrumpfung über die Dichte, welche aufwendig ist und den Synäreseffekt unterschätzt, andererseits der Standzylinder Versuch, mit Hilfe dessen die Synärese zeitlich beobachtet und direkt bestimmt werden konnte. Betrachtet man die Mischungsverhältnisse, so sind jene mit einem niedrigen Reaktivanteil und hohem Wassergehalt am stärksten vom Synäreseprozess betroffen. Wie mit dem Kegelfallgerät nachgewiesen wurde, bilden Gele mit einem höheren Reaktivanteil stärkere Vernetzungen aus. Das Netzwerk mit dem Reaktivanteil 2,5 Vol.-% bindet bzw. lagert das Porenwasser besser in seine Struktur ein als jenes mit nur 1,5 Vol.-%, wodurch die Schrumpfung mit einem Reaktivanteil von 1,5 Vol.-% um 2,2 Vol.-% höher ist, als jene mit 2,5 Vol.-% Reaktivanteil.

Weiters ist ein möglicher Zusammenhang zwischen Synärese und zeitlicher Entwicklung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Lagerungsdichte sowie den Mischungsverhältnissen untersucht worden. Dabei konnte bei allen durchgeführten Versuchen, bedingt durch die Weichgelinjektion, eine Verminderung der Durchlässigkeit in Abhängigkeit der Lagerungsdichte um drei Zehnerpotenzen erzielt werden. Es konnte zudem ein möglicher Zusammenhang zwischen Synärese und Durchlässigkeitszunahme festgestellt werden. Bedingt durch den Wasserdruck und die Schrumpfung kommt es bei Mischungen mit einem geringen Feststoffgehalt (18 / 2 / 80) zu Erosionserscheinungen, welche zu einer Zunahme der Durchlässigkeit führten.

Was diese Ergebnisse für die Baustellenpraxis bedeuten und wo noch etwaige Fragen offen blieben, wird im nun folgenden Abschnitt erläutert.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Einsatz von Weichgelen zur Baugrubenabdichtung ist zurzeit gering verbreitet. Das liegt einerseits daran, dass der Einsatz dieses Materials vorübergehend untersagt war, da bezüglich des Einflusses von Weichgel auf die Umwelt Unsicherheit herrschte. Diese Bedenken konnten jedoch mittels Untersuchungen entkräftet werden. Andererseits gibt es noch einige Unbekannte in Bezug auf die Eigenschaften von Weichgelen – wie beispielsweise Gelier- und Kippzeit. Diese werden unter anderem durch die Mischungsverhältnisse der Einzelkomponenten, deren Hersteller sowie die jeweilige Umgebungstemperatur bestimmt. Diese Aspekte wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit anhand von verschiedenen Produkten zweier Hersteller erforscht. Da die jeweilige Gelier- und Kippzeit von Weichgelen grundsätzlich bedeutend von den Einzelkomponenten und deren Herstellern abhängen, besitzen die hier gewonnenen Ergebnisse nur für die konkreten, im Rahmen der Versuche eingesetzten Produkte Gültigkeit. Eine direkte Übertragbarkeit der Erkenntnisse – z.B. bezüglich des Mischungsverhältnisses – auf Produkte anderer Hersteller ist nicht gegeben. Welche allgemeinen Erkenntnisse lassen sich jedoch aus den diversen Versuchsergebnissen für die Baupraxis ableiten?

Die Einzelkomponenten von Weichgelen können in unterschiedlicher Reihenfolge vermischt werden. Das Natriumaluminat mit Wasser zu verdünnen und erst anschließend mit Wasserglas zu vermengen ist jene Möglichkeit, die einerseits gute Ergebnisse bezüglich der Qualität des entstehenden Weichgels liefert und die sich andererseits relativ unkompliziert auf Baustellen umsetzen lässt, da in diesem Fall der Platzbedarf für das Anmischen gering bleibt.

Bezüglich der Mischungsverhältnisse hat sich Folgendes gezeigt: mit steigendem Reaktivanteil in der Lösung wird die Gelierzeit verkürzt. Bei steigendem Wasserglasanteil ist hingegen ein Anstieg der Gelierzeit festzustellen. Um zeitsparend – was in der Praxis auch immer kostensparend bedeutet – vorzugehen, darf nun aber nicht der Schluss gezogen werden, den Reaktivanteil stark zu erhöhen. Dies würde zu einem Weichgel führen, das nicht injizierbar ist, da es seine hochviskosen Eigenschaften zu früh verlieren würde, um den Porenraum aufzufüllen. Grundsätzlich bewirken bereits sehr kleine Änderungen des Reaktivanteils starke Unterschiede in den Eigenschaften des Weichgels. Zudem haben Weichgelmischungen mit einem geringen Reaktivanteil weitaus höhere Schrumpfungseigenschaften. Dies bedeutet, dass für ein Weichgel in adäquater Qualität ausreichend Wasserglas und Reaktiv vermischt werden müssen, auch wenn der Einsatz dieser

zwei Komponenten – vor allem im Vergleich zu Wasser – kostenintensiv ist. Dichtet ein Weichgel aufgrund inadäquater Qualität nicht ab, würde dies die Mehrkosten für das Material bei Weitem übersteigen. Allein schon erhöhte Restwassermengen führen zu Mehrkosten, weil das geförderte Eluat einen pH-Wert von 12 aufweist und mit Natrium, Aluminium und Silikat verunreinigt ist und daher entsorgt werden muss. Ganz zu schweigen davon, wenn eine Fehlstelle entsteht, weil die Mischung nicht richtig auf den Baugrund abgestimmt ist.

Einen Spezialfall stellt das Reaktiv Natriumbikarbonat dar. Es besitzt ein sehr ausgeprägtes Synäreseverhalten. Die Gelstruktur schrumpft dermaßen, dass die Oberfläche selbst unter Wasser Risse bekommt und zerfällt. Somit ist die Anwendung dieses Stoffes in der Baupraxis nicht empfehlenswert.

Stets zu beachten ist, dass auf einer Baustelle das Weichgel an der Oberfläche bei einem Temperaturniveau angemischt wird, das sich von jenem des Grundwasserbereichs zumeist unterscheidet. Wie gezeigt wurde, verändern sich die Eigenschaften von Weichgel je nach Umgebungstemperatur. Eine Mischung, die an der Oberfläche die gewünschten Eigenschaften aufweist, kann im Zuge der Injektion – findet diese bei einem anderen Temperaturniveau statt – anders reagieren als gewünscht.

Da die Entwicklung des Weichgels im Anschluss an die Injektion nicht beobachtet werden kann, ist es zur Feststellung des Gelier- und Kippunktes der jeweiligen Lösung empfehlenswert, an der Oberfläche eine Referenzprobe mit dem identen Mischungsverhältnis anzulegen. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen, muss diese jedoch mit Wasserüberdeckung und bei gleicher Temperatur, wie sie im Grundwasserbereich herrscht, gelagert werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass sich Weichgele – insbesondere durch ihre leichte Verarbeitbarkeit und aufgrund ihres ökonomischen Einsatzes – sehr gut zur Sohlabdichtung eignen.

Während Unterwasserbeton- und Düsenstrahlsohlen eine dauerhafte, irreversible Veränderung der Grundwasserströmung darstellen, lässt die Gelalterung den Baustoff Weichgel soweit schrumpfen, dass die hydraulische Durchlässigkeit eines injizierten Bodens nach einigen Jahren wieder annähernd dem vor der Baumaßnahme entspricht [EISWIRTH, 1998]. Dieser Aspekt ist von zunehmender Bedeutung, werden Bestimmungen und Vorschriften, die den Schutz der Umwelt betreffen, in Zukunft gewiss nicht geringer. Eher ist eine Verschärfung der Vorschriften zu erwarten. Insofern wird die Bedeutung des Einsatzes von Weichgel zukünftig größer werden. Zugleich sind die Eigenschaften und das

Verhalten dieses chemischen Injektionsmittels jedoch nicht ausreichend bekannt. Auf diesem Gebiet besteht großer Forschungsbedarf. Im Speziellen wären umfassende Untersuchungen zu den Produkten der unterschiedlichen Hersteller notwendig, um individuell für das Verhalten und die Eigenschaften jeder Einzelkomponente aussagekräftige Erkenntnisse zu gewinnen.

10 Literatur

Baltruschat, M. [2001]; *Bauer Silikatgel LWS-Ein ökologisch unbedenkliches Weichgel, Neue Erkenntnisse zur Ausbreitung von Silikatlösungen.* Veröffentlichung vom Grundbauinstitut der Technischen Universität Berlin, Heft 58.

Brandl, H., Plankel, A. [1987]; *Vergleichende Untersuchungen an chemischen Bodeninjektionen.* Mitteilung für Grundbau, Bodenmechanik und Felsbau; Technische Universität Wien, Heft 4.

Benedix, R. [2011]; *Bauchemie, Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten,* 5.; überarb. Auf., Vieweg+Teubner, 2011

Borchert, K. M., Mittag, J. [2006]; *Erfahrungen und Risiken bei Düsenstrahlsohlen in Trogrubengruben.* Baugrundtagung, Bremen.

Borchert, K. M. [1997]; Dichtigkeit von Baugruben bei unterschiedlichen Sohlkonstruktionen. STUVA-Tagung.

Brauns, J., Eiswirth, M, Hötzl, H. und Kast, K. [1995]; *Anwendung von Weichgelen zur horizontalen Abdichtung von Baugruben durch Injektionssohlen - Fragen zur Beeinflussung der Grundwasserqualität.* Gutachten im Auftrag des Hauptverbandes der Deutschen Bauindustrie, Bundesfachabteilung Spezialtiefbau, Sept. 1995, TU Karlsruhe.

Brauns, J., et al. [2001]; *Nachweis der Umweltverträglichkeit von Weichgelinjektionssohlen.* in Bautechnik Heft 7.

Cambeftort, H. [1969]; *Bodeninjektionstechnik.* [Übers.] Klaus Back. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1969.

Darimont, M, Barowsky, T, Milde, G. und Oetting, R. [1984]; Grundwasserbeeinflussung durch chemische Bodeninjektion auf der Basis von Natriumaluminat Wasserglasgelen.- Gwk 125:608-612

Donel, M. [1995]; *Bodeninjektionstechnik.* [Hrsg.] W. Richwien. Essen: Verlag Glückauf GmbH.

Drucker, P. [2009]; *Gedankenmodell zur Bestimmung der Durchlässigkeit.* Grundbau und Bodenmechanik, Vorlesungsskriptum 2010, TU Wien

Eiswirth, M., Hötzl, H. [1990]; *Grundwasserbeeinflussung durch Weichgelinjektionssohlen.* Veröffentlichung der Technischen Universität Graz.

Eiswirth, M., Ohlenbusch, R. und Schnell, K. [1998]; *Grundwasserbeeinträchtigungen durch Weichgelinjektionssohlen -* Schriftreihe Angewandte Geologie Karlsruhe Nr. 50, S. 117 - 134, Karlsruhe.

Gutachtergruppe [1997]; *Abdichtung von Baugruben durch Weichgelsohlen, Verifikation anhand einer Demonstrationsbaugrube,* Kurzfassung. Karlsruhe 1997.

Hoffman, J., Mittag, J. und Armbruster, R. [2008]; *Spreedreieck-Planung und Bau einer innerstädtischen Baugrube mit komplexen geologischen Randbedingungen und Verformungsanforderungen.* [Hrsg.] DGGT. Dortmund: VGE Verlag GmbH, S.53-62.

Holleman, A. [1985]; Lehrbuch der *anorganische Chemie*, 3.; überarb. Auf., Berlin/New York, Walter de Gruyter.

Hornich, W., Stadler, G. [2009]; *Injektionen*, 7.; überarb. Auf., Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, Ernst & Sohn.

Iler, R.K. [1979]; *The chemistry of silica*. New York/Chichester/ Brisbane/ Toronto, John Wiley & Sons.

Kainrath, A., Krenn, H und Adam, D. [2012]; *Die Injektionstechnik auf dem Prüfstand*. [Hrsg.] Prof. Dietmar Adam und Prof. Richard A. Herrmann. Veröffentlicht am 2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik an der Technischen Universität Wien.

Kaufmann, S. B. [1983]; *Stoffverhalten chemisch injizierter Sande*. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 95.

KAZO-PQ Produktinformation [2004];

<http://www.inchem.org/documents/sids/sids/SolubleSilicates.pdf>, März 20013.

Kutzner, K. [1991]; *Injektion im Baugrund*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Kühling, G., Widmann, R. [1994]; *Injektionen im Fels – ein Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe Felsinjektionen der ISRM*. In: 11. Nationales Felsmechanik Symposium, Aachen. Geotechnik – Sonderheft. Essen, Glückauf Verlag.

Lang, D. [2008]; *Durchlässigkeit von Böden. Übliche Verfahren und deren Überprüfung im Labor*. Diplomica Verlag GmbH, Hamburg.

Loiskandel, W. [2010]; *Geohydraulik (Hydraulik und Hydromechanik)*, Vorlesungsskriptum 2010 BOKU.

Neumann, H. [1965]; *Unterfangung von Gebäuden durch chemische Bodenverfestigung*. Tiefbau 1: 23ff.

Mezger, T. [2006]; *Das Rheologie-Handbuch für Anwender von Rotations- und Oszillationsrheometer*, 2.; überarb. Aufl. ed. Hannover: Vincentz Network.

Mielecke, S. [2009]; *Untersuchungen von Weichgel in Berliner Sand*. Veröffentlichung vom Grundbauinstitut der Technischen Universität Berlin, Heft 47.

Mortimer, C., Müller, U. [2007]; *Chemie*, 9.; überarb. Auf., Georg Thieme Verlag.

Müller-Kirchenbauer, H. 1969]; *Untersuchungen zur Eindringung von Injektionsmassen in porigen Untergrund und zur Auswertung von Probeverpressungen*. Veröffentlicht am Institut für Boden und Felsmechanik. Karlsruhe, Heft 39.

Ohlenbusch, R. [2000]; *Numerische Modellrechnungen zur Ausbreitung von Inhaltsstoffen aus Weichgelsohlen*. Doktor der Naturwissenschaften, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, Universität Karlsruhe, 2000.

ÖNORM B 4414-1 [1976]; *Erd- und Grundbau Untersuchungen von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens*. Wien.

ÖNORM B 4422-1 [1992]; *Untersuchungen von Bodenproben, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit; Laborprüfung*, Wien.

ÖNORM B 4454 [2001]; *Erd- und Grundbau Injektionen in Fest- und Lockergestein Prüfungen*. Wien.

Schnell, K. [2001]; *Hydrogeologische Prozesse bei Weichgelinjektionen – Stoffbilanzierung, potenzielle Langzeitfolgen und Grundwassergefährdungspotenzial*. [Hrsg.] Prof. Dr. Kurt Czurda und Prof. Dr. Heinz Hötzl, Karlsruhe: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 61.

Schnell, W. [1990]; *Verfahrenstechnik zur Sicherung von Baugruben*. [Hrsg.] Prof. Dipl.-Ing. K. Simons. Stuttgart: B. G. Teubner.

Schulze, B. [1992]; *Injektionssohlen Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit*. [Hrsg.] G. Gudehus, O. Natau. Karlsruhe: Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 126, 1992.

Smolczyk, U., Idel, H. [1996]; *Injektionsverfahren*, 5.; überarb. Auf., Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, Ernst & Sohn.

Steger, A., Sieghart, H und Gaulinger, M. [1999]; *Viskosität (innere Reibung)*, 3.; überarb. Auf.; Thermodynamik - Festigkeitslehre - Schwingungen, Teubner Verlag Stuttgart, S. 294.

Sünder, S. [2006]; *Bestimmung der Fließgrenze mit dem Kegelfallgerät*. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien, Institut für Geotechnik.

Tausch, N. [1980]; *Untersuchungen zur Eignung von Silikatgelen für Abdichtungsinjektionen*. [Hrsg.] H. Müller-Kirchenbauer. Berlin: Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Technischen Universität Berlin, Heft 9.

Tausch, N., Poremba, H. [1979]; *Herstellung von Sohldichtungen mittels Weichgel*, in Geotechnik Heft 2.

Tausch, N. [2002]; *Untersuchungen zum Ausbreitverhalten von Feinstbindemittelinjektionen-oder Kunst im Injektionslabor*, [Hrsg.] G. Riedemüller, W. Schubert und Semprich S.17. Christian Veder Kolloquium-Injektionen in Boden und Fels. Technische Universität Graz, Heft 13.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bauweisen zur Herstellung (nahezu) wasserdichter Baugruben [geändert nach JUNGE, 1996].....	5
Abbildung 2: Injektionsmittel in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung [SMOLTZCYK, 2001].....	6
Abbildung 3: Grenzen der Eindringfähigkeit von Injektionsmaterialien [CAMBEFORT, 1969]	7
Abbildung 4: Gliederung der Injektionsmittel [SMOLTZCYK, 2001]	8
Abbildung 5: Prinzip der Gelschleierinjektion [HAACK, 2007]	8
Abbildung 6: links Manschettenrohr mit Doppelpacker [BAUER, 2002]; rechts Ventilrohr mit Doppelpacker [SCHNELL, 1990].....	12
Abbildung 7: Fachgerechte Ausführung einer Grundwasserabspernung mittels Weichgelsohle	13
Abbildung 8: Räumliche Darstellung des $(\text{SiO}_2)_n$ -Tetraeders [HOLLEMANN, 1985]	17
Abbildung 9: Kondensation der Kieselsäure [BENEDIX, 2011]	17
Abbildung 10: NMR-Spektroskopie von Natriumsilikat mit den Moduln 3,3 und 2,0 [WÖLLNER, 2004]	20
Abbildung 11: Viskosität von Natriumsilikatlösungen bei unterschiedlichen $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Verhältnissen.....	20
Abbildung 12: Viskosität von Natriumsilikatlösungen mit unterschiedlicher $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Konzentration.....	21
Abbildung 13: pH-Werte für Wasserglaslösungen unterschiedlicher Konzentrationen bei variablen Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ [AKZO-PQ, Produktinformation, 2004]	21
Abbildung 14: Gelierungszeit von Natriumsilikatlösungen mit einem variablen Verhältnis SiO_2 zu Na_2O in Abhängigkeit vom pH-Wert [AKZO-PQ Produktinformation, 2004]	22
Abbildung 15: Verwitterungsprozess des Quarzes im Granit	25
Abbildung 16: Schema des Herstellungsprozesses	26
Abbildung 17: schematische Darstellung der Reaktionsgleichung [ILER, 1979].....	26
Abbildung 18: Schematischer 2D-Schnitt der Weichgelstruktur [DARIMONT, 1984].....	27
Abbildung 19: Aufnahmen des Gelbildungsprozesses mittels Lichtmikroskop	27
Abbildung 20: Wasserglas + Wasser und dann Reaktiv	34
Abbildung 21: Wasserglas + Reaktiv und dann Wasser.....	34
Abbildung 22: $\frac{1}{2}$ Wasser + Wasserglas und $\frac{1}{2}$ Wasser + Reaktiv.....	34
Abbildung 23: links Abwiegen der Einzelkomponenten, rechts veranschaulichen der Einzelmengen einer Standard Weichgelmischung	35
Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf der Eintrübung	35
Abbildung 25: Vergleich der Gelierzeit bei 24 °C	36
Abbildung 26: Vergleich der Gelierzeit bei 24 °C mit unterschiedlichen Reaktiven	37

Abbildung 27: Vergleich der Gelierzeit bei zwei Temperaturniveaus.....	38
Abbildung 28: Vergleich der Gelierzeit mit unterschiedlichen Wasserglasmoduln bei 10°C	39
Abbildung 29: Gelier- und Kippzeitpunkt einer Mischung	39
Abbildung 30: Vergleich der Gelierzeit bei 10 °C	40
Abbildung 31: Kippzeiten bei 10 °C mit unterschiedlichen Produkten und einem Reaktivanteil 2,0 Vol.-%.....	41
Abbildung 32: Bewegung einer Platte auf einem Flüssigkeitsfilm [STEGER, 1999]	42
Abbildung 33: Fließkurven verschiedener Flüssigkeiten [STEGER, 1999].....	43
Abbildung 34 :links Rotationsviskosimeter; rechts Messprinzip [KAINRATH, 2012].....	44
Abbildung 35: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichem Wasserglasanteil	48
Abbildung 36: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichen Wasserglasmoduln	50
Abbildung 37: Viskositätsentwicklung über die Zeit mit unterschiedlichen Reaktivanteilen .	51
Abbildung 38: Viskosität zum Kippzeitpunkt.....	52
<i>Abbildung 39: Viskositätsentwicklung mit Stabisil 23</i>	<i>53</i>
Abbildung 40: Viskositätsentwicklung in Abhängigkeit der Temperatur.....	54
Abbildung 41: Festlegung in der Normung zur Verwendung des Marsh-Trichters [KAINRATH, 2012].....	55
Abbildung 42: Marsh-Trichter nach DIN V 4126-100.....	56
Abbildung 43: Marsh-Trichters-Versuche	57
Abbildung 44: Fließkurven unterschiedlicher Mischungen bei 10°	60
<i>Abbildung 45: Kegelfallgerät von J. OLSSON aus dem Jahr 1915 [BJERRUM, 1960].....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 46: Kegeleindringung</i>	<i>62</i>
Abbildung 47: Versuchsumfang und Versuchsablauf	63
Abbildung 48: Messergebnisse mit dem Kegelfallgerät.....	64
Abbildung 49: Phasen der Gelalterung [geändert nach ILER 1979]	65
Abbildung 50: Standversuch zur Bestimmung des Schrumpfungsverhaltens über die Zeit .	67
Abbildung 51: Schrumpfungsgrad der Weichgele über die Zeit.....	68
Abbildung 52: Volumenabnahme aus Standversuchen in Abhängigkeit der Zeit	71
<i>Abbildung 53: Tauchwägung zur Volumbestimmung einer Weichgelprobe</i>	<i>72</i>
Abbildung 54: links Bestimmung der Dichte nach ÖNORM 4414; rechts Klimaschrank mit den Versuchsproben	72
<i>Abbildung 55: Volumsmäßige Schrumpfung in Prozent über die Zeit</i>	<i>74</i>
Abbildung 56: Dichteentwicklung von Mischungen mit unterschiedlichem Reaktivanteil	75
Abbildung 57: links Gedankenmodell zur Bestimmung der Durchlässigkeit [DRUCKER, 2009]; rechts Zusammenhang der Geschwindigkeit und dem hydraulischen Gefälle in Abhängigkeit des Bodens [LOISKANDL, 2010].....	77

Abbildung 58: Korngrößenverteilung der Versuchsprobe78

Abbildung 59: Zylinderversuch zur Bestimmung der lockersten Lagerung [BRANDL, 2006]
.....79

Abbildung 60: Zugabe des Wassers79

Abbildung 61: links Einbau der Probe; mitte Versuchszylinder an die Anlage angeschlos-
sen; rechts Prüfung mit fallender Druckhöhe80

Abbildung 62: Injektion in die Probe.....81

Abbildung 67:links Indikatorstäbchen mit Farbvergleichsskala; rechts pH-Wert des Durch-
flusses.....81

Abbildung 63: Unterschiedliche Lagerung.....83

Abbildung 64: Unterschiedliche Mischungen.....84

Abbildung 65: Unterschiedliche Wasserglas Moduln.....84

Abbildung 66: Unterschiedliche Reaktivanteile und Reaktivprodukte85

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Mischungsverhältnisse für Weichgele [MIELECKE, 2009]	15
Tabelle 2: Gehalt an Nebenstoffen in Natriumsilikat mit dem Mol-Modul 3,3 [WÖLLNER, 2004].....	16
Tabelle 3: Eigenschaften der verwendeten Wassergläser [WÖLLNER, 2012]	23
Tabelle 4: Eigenschaften der verwendeten Natriumaluminatlösungen	24
Tabelle 5: Eigenschaften des verwendeten Natriumbikarbonats	24
Tabelle 6: Übersicht der Produkte	30
Tabelle 7: Übersicht des Versuchsumfanges	31
Tabelle 8: Übersicht der Produkte mit Abkürzungen	32
Tabelle 9: Umrechnung der Volumenverhältnisse auf Einzelmassen einer Weichgelmischung.....	34
Tabelle 10: Technische Daten Haake Viscotester 550	44
Tabelle 11: Technische Daten Haake VT 550	45
Tabelle 12: Messergebnisse bei unterschiedlichen Wasserglasanteil und konstantem Reaktivanteil.....	47
Tabelle 13: Messergebnisse bei unterschiedlichen Wasserglasmoduln	49
Tabelle 14: Messergebnisse von unterschiedlichen Reaktivanteilen.....	50
Tabelle 15: Messergebnisse bei 10 und 24°C mit dem Reaktiv Stabisil 23	53
Tabelle 16: Messergebnisse in Abhängigkeit der Temperatur.....	54
Tabelle 17: Messergebnisse der Marsh-Trichter-Versuche	56
Tabelle 18: Vergleich der Messverfahren zur Bestimmung der Gelier- und Kippzeit.....	57
Tabelle 19: Messergebnisse der Eindringtiefe mit dem Kegelfallgerät (60° / 60g)	63
Tabelle 20: Übersicht der durchgeführten Versuche	67
Tabelle 21: Vergleich der Volumenschrumpfung mit und ohne Wasserüberdeckung.....	68
Tabelle 22: Vergleich unterschiedlicher Reaktiv- und Wasserglasanteil bei 10 °C	69
Tabelle 23: Vergleich zwei identer Mischungen bei zwei Temperaturniveaus (10 und 24°C)	70
Tabelle 24: Vergleich zwei identer Mischungen bei zwei Temperaturniveaus (10 und 24°C)	70
Tabelle 25: Übersicht der durchgeführten Versuche	73

13Anhang

Anhang Teil A: Protokolle der Rotationsviskosimeter-Versuche

S. 99

Anhang Teil B: Protokolle der Durchlässigkeits-Versuche

S. 118