

Abschlussbericht Studie

Auswertung

**Hinterfüllmessungen der Jahre
2022 - 2024**

Juni 2025

Dr. Eva Sutter & Marc Touzin
Geo Explorers AG
Wasserturmplatz 1, 4410 Liestal
Tel. 061 821 60 40
www.geo-ex.ch, info@geo-ex.ch



Boris Altmann & Oliver Genoni
Kanton Zürich, Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Stampfenbachstrasse 14
8090 Zürich



**Kanton Zürich
Baudirektion
Amt für Abfall, Wasser,
Energie und Luft**

Zusammenfassung

In der Schweiz werden Erdwärmesonden (EWS) mittels Injektion einer Zement-Bentonit-Suspension nach deren Einbau an den Untergrund angeschlossen (Hinterfüllung). Dabei ist es wichtig, dass die Injektion von unten nach oben lückenlos erfolgt. Aus gewässerschutzrechtlichen Gesichtspunkten ist es zudem essenziell, dass Grundwasserstockwerke nicht dauerhaft miteinander verbunden werden (also mittels einer Hinterfüllung abgedichtet werden) und dass keine grösseren Mengen an Suspension in die Grundwasserleiter abfliessen.

Die Bestimmung, ob eine Erdwärmesonde eine lückenlose Hinterfüllung aufweist, ist nachträglich sehr schwierig. Daher wurden vom AWEL Zürich im Frühjahr 2023 in gefährdeten Grundwassergebieten neue Auflagen beschlossen, welche eine digitale Aufzeichnung der Hinterfüllung bei jeder Erdwärmesondenbohrung verlangt. Im Rahmen dieser Studie wurden nun knapp zwei Jahre nach der Einführung dieser neuen Auflage alle bis Ende 2024 eingegangenen Hinterfüllungsprotokolle analysiert und ausgewertet.

Grundsätzlich wurde die neue Auflage von der Branche prompt und gut umgesetzt. Wo es noch Verbesserungsbedarf gibt, ist beim Rücklauf der Protokolle. Stand heute wurden nicht bei allen Erdwärmesonden auch alle verlangten Hinterfüllmessprotokolle geliefert (ca. 20 % aller geforderten Protokolle fehlen).

Die eingereichten Hinterfüllprotokolle wurden mit Messgeräten von vier verschiedenen Herstellern durchgeführt. Aufgrund der Darstellung und fehlender wichtiger Informationen auf den Protokollen, konnten allerdings nur Messungen von drei Geräteherstellern analysiert werden. Die Analyse der Protokolle umfasste Vergleiche zwischen Ist- und Soll-Werten der Dichte und des Volumens, sowie Vergleiche zwischen Messgeräten und Bohrfirmen.

Streng genommen konnten nur ca. 20 % der analysierten Hinterfüllmessprotokolle überhaupt gemäss den in diesem Bericht definierten Kriterien als "korrekt" kategorisiert werden. Die Studie kommt aber auch zum Schluss, dass bereits mit wenigen Änderungen die Qualität massgebend verbessert werden kann. Verbesserungen sehen die Autoren hauptsächlich im operationellen Bereich sowie bei der Darstellung der gemessenen Informationen. Dazu gehören eine gewisse Standardisierung, sowie die Automatisierung der Eingabeparameter, um Eingabefehler zu reduzieren.

Die Studie bietet eine Übersicht über den Ist-Zustand für die Protokollierung der Hinterfüllung bei Erdwärmesonden über einen Zeitraum von ca. drei Jahren¹. Eine messtechnische Überwachung dieses Vorganges wird immer mehr gefordert, sei dies von der Bauherrschaft, dem Planer oder von der Behörde. Solche Dokumentationen stärken das Vertrauen in das "Werk" Erdwärmesonde. Diese Studie soll als Möglichkeit verstanden werden, wie die Dokumentation weiter verbessert und somit das Vertrauen weiter gestärkt werden kann.

¹ Es bestehen vereinzelte Messprotokolle, welche auf freiwilliger Basis dem AWEL vor Einführung der Messpflicht eingereicht wurden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Ausgangslage	4
2 Datengrundlage	4
2.1 Wortlaut der Nebenbestimmungen zur Messpflicht	5
2.2 Datensatz	5
3 Vorgehensweise	6
3.1 Bewertungskriterien und Bewertung Datensatz	6
3.2 Datensatzbereinigung	7
4 Resultate	9
4.1 Bewertungskriterien a - d (Kapitel 3.1)	9
4.2 Kriterium e: Dichte	10
4.3 Kriterium f: Volumen	16
4.4 Trends und Zusammenhänge Dichte-Volumen	22
5 Diskussion	24
6 Schlussfolgerungen	26
Literaturverzeichnis	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anteil an Protokollen bei denen die Soll-Dichte korrekt eingetragen wurde.....	8
Abbildung 2:	Bewertung der Protokolle nach deren Verwendbarkeit	8
Abbildung 3:	Grafische Darstellung der Bewertungsparameter a – d.....	10
Abbildung 4:	Verteilungen der gemessenen Dichten und Abweichungen zur Herstellerdichte ...	11
Abbildung 5:	Messgeräte und gemessene Dichten in Zusammenhang mit Herstellerdichten	12
Abbildung 6:	Messgeräte und damit verwendete Zemente im Kontext Abweichung zur Herstellerdichte	13
Abbildung 7:	Bohrfirmen und Bohrmeister im Vergleich zur gemessenen Dichte	14
Abbildung 8:	Messgeräte, Bohrfirmen und Bohrmeister im Vergleich zur Abweichung von der empfohlenen Herstellerdichte	15
Abbildung 9:	Verteilung der gemessenen Volumina in Prozent vom Sollvolumen	16
Abbildung 11:	Abweichung vom Sollvolumen vs. temporärer Verrohrungstiefe.....	18
Abbildung 12:	Abweichungen des gemessenen Volumens zum Sollvolumen pro Bohrfirma	19
Abbildung 13:	Räumliche Verteilung der Abweichungen des gemessenen Volumens zum Sollvolumen	20
Abbildung 14:	Zusammenhänge Abweichungen Volumen/Dichte von Soll vs. Bohrtiefe	23
Abbildung 15:	Abweichungen von der Soll-Dichte und des Soll-Volumens	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele Volumenabweichungen von Soll-Volumen	21
Tabelle 2:	Beispiel Einfluss Angaben Hinterfüllungsprotokolle auf das Soll-Volumen	22

1 Ausgangslage

Eine in Bezug auf Material, Anmischung und Volumen korrekt eingebrachte Hinterfüllung gewährleistet eine dichte und lückenlose Einbindung der Erdwärmesonde in das Erdreich. Neben der thermischen Anbindung, der Stabilisierung der Sonde im Bohrloch und dem damit einhergehenden Schutz vor Beschädigungen erfüllt die Hinterfüllung durch ihre hydraulisch abdichtende Wirkung auch eine zentrale Funktion in Bezug auf den Gewässerschutz.

Der Wärmenutzungsatlas des Kantons Zürich bezeichnet die Zonen, in welchen Erdwärmesonden zulässig, bzw. mit besonderen Auflagen zulässig sind. In den Zonen C und E (nutzbare Schotter-Grundwasserleiter bzw. Quellwassergebiete) wird seit Mai 2023 in der kantonalen gewässerschutzrechtlichen Bewilligung die elektronische Aufzeichnung der Hinterfüllarbeiten verlangt.

Vorliegende Studie wertet die dem AWEL zugestellten Messprotokolle der Jahre 2022 - 2024 aus. Eine systematische Auswertung von elektronischen Hinterfüllmessungen wurde schweizweit noch nie durchgeführt und ist nicht nur aus regulatorischer Sicht interessant, sondern soll auch der Förderung von Qualitäts- und Handhabungsanpassungen «auf der Bohrstelle» dienen. Ziel dieser Auswertung ist es, einen Eindruck der Hinterfüllarbeiten aus dem realen Feld zu gewinnen und kann unter folgenden Fragestellungen zusammengefasst werden:

- Wie ist die Güte der Messprotokolle? Welche Aussagen lassen sich anhand dieser treffen?
- Welche messtechnischen Einflüsse sind vermehrt zu beobachten (Ausfall Gerät, vorzeitiger Abbruch der Messungen, fehlende Kalibration etc.)?
- Welche Hinterfüllbaustoffe werden eingebracht und entspricht die Anmischung den Herstellerangaben (Wasser-Feststoffgehalt/Dichte)?
- Statistische Auswertung der Soll- und Ist-Werte
- Sind geologische Problemzonen erkennbar (z.B. durch Zementverlust in die Formation)?

Explizit nicht Inhalt dieser Untersuchungen ist die materialtechnische Eignung der eingesetzten Baustoffe, welche grundsätzlich durch standardisierte Laborversuche festzustellen wäre. Nicht betrachtet werden auch die nach Einbringung der Hinterfüllung beim Abbinden und die während der Langzeitnutzung auftretenden Effekte auf die sogenannte «Systemdurchlässigkeit» (kombinierte Durchlässigkeit von Hinterfüllmaterial, Bohrloch und EWS (Personenkreis Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde 2015)).

Es wird daher im Rahmen dieser Auswertung davon ausgegangen, dass die eingebrachten Materialien, solange die Anmischung gemäss Herstellerangaben erfolgt, auch für den Zweck der Bohrlochhinterfüllung mit oben genannten Anforderungen geeignet sind.

2 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die Beantwortung der obigen Fragestellungen bilden total 240 Hinterfüllmessprotokolle aus den Jahren 2022, 2023 und 2024. Dies umfasst 100 einzelne Bewilligungen mit teilweise mehreren Bohrungen, respektive Messungen, pro Bewilligung. Von den 240 eingereichten und betrachteten elektronischen Hinterfüllmessprotokollen entsprechen 92 den Bewilligungsauflagen für die Zone C und E, d.h. ca. 38 % des ausgewerteten Datensatzes. Die restlichen, in dieser Studie ausgewerteten Hinterfüllmessprotokolle, wurden durch die Bohrunternehmen eigenständig zur Qualitätssicherung erstellt. Dies ist eine positive Entwicklung, die auf ein industrieeigenes Interesse an der Hinterfüllqualität hindeutet. Allerdings ist es auch

ernüchternd, dass von den bewilligungstechnisch geforderten Protokollen, d.h. jene aus den genannten Zonen C und E, nur ca. 38 % zum Zeitpunkt der Analyse zu Verfügung standen.

Nur nach nachträglicher expliziter Nachfrage durch das AWEL konnte die Rücklaufquote auf 79 % erhöht werden. Diese konnten jedoch, aufgrund des Zeitpunkts der Einreichung, für die Auswertungen nicht mehr berücksichtigt werden. Zusätzlich wurden 4 % der geforderten Protokolle als "nicht durchgeführt" gemeldet und die restlichen 17 % blieben zum Zeitpunkt des Berichtserstellung ausstehend.

2.1 Wortlaut der Nebenbestimmungen zur Messpflicht

Die Anforderungen werden in der gewässerschutzrechtlichen Bewilligung mit folgenden Nebenbestimmungen formuliert:

- Der Hohlraum zwischen den Sondenbündeln und der Bohrlochwand ist nach Abschluss jeder Einzelbohrung vom Sondenfuss bis zur Oberfläche vollständig mit einer Zement-Bentonit-Suspension zu verpressen, die nach der Aushärtung eine dichte und permanente, physikalisch und chemisch stabile Einbindung der Sonde ins umliegende Gestein gewährleistet. Die Hinterfüllung muss den Anforderungen gemäss Anhang A7 der Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ des Bundesamtes für Umweltschutz (BAFU, 2009) genügen.
- Der Hinterfüllvorgang gemäss vorgehender Ziffer ist elektronisch zu überwachen. Hierbei ist der Injektionsdruck, das Suspensionsvolumen sowie die Suspensionsdichte kontinuierlich aufzuzeichnen. Auf die elektronische Dichtemessung darf verzichtet werden, wenn anhand zweier Suspensionsproben eine Dichtebestimmung vorgenommen wird. Die Suspensionsproben sind jeweils zu Beginn und am Ende des Hinterfüllvorgangs zu gewinnen, die Dichtebestimmung ist in geeigneter Form (z.B. als Fotodokumentation) festzuhalten. Das Messprotokoll soll mindestens eine zeitaufgelöste grafische Darstellung der Messparameter und einen Vergleich der Soll- und Ist-Werte beinhalten. Dieses ist dem AWEL spätestens 4 Wochen nach Abschluss der Bohrarbeiten zuzustellen

2.2 Datensatz

Für jede der im Datensatz vorhandenen Bewilligungsnummer war eine variierende Anzahl Hinterfüllungsprotokolle vorhanden (z. T. für alle Sonden, z. T. nur für einen Teil der gebohrten Sonden). Diese Protokolle unterscheiden sich in deren Layout, Informationsgehalt und der grafischen Darstellung der Messwerte, abhängig vom Messgerätehersteller. Zusätzlich zu den Hinterfüllmessprotokollen waren teilweise Bohrprotokolle, hydrogeologische Berichte, geologische Profile oder Berichte aus Vollzugskontrollen verfügbar. Aus diesen zusätzlichen Daten konnten zum Teil zusätzliche, nicht auf den Hinterfüllmessprotokollen aufgeführten oder unklare Daten ergänzt werden. Zudem waren diese Informationen wertvoll, um mögliche hydrogeologische Zusammenhänge mit den Messdaten zu untersuchen.

Auch wenn pro Bohrfirma und Messgerätehersteller zum Teil nicht viele Daten vorhanden sind, gibt es statistisch gesehen einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Variablen zu Dichte-, resp. Volumenabweichungen mit den Messgeräten und den Bohrfirmen. Die Auswertung kann also Trends und allfällige Probleme aufzeigen.

Sämtliche eingereichten Messprotokolle beinhalten die geforderte elektronische Dichtemessung, d.h. die Möglichkeit der Volumenstrommessung inkl. manueller Dichtebestimmung über zwei Suspensionsproben wurde nicht beansprucht.

3 Vorgehensweise

Folgende Informationen der eingesendeten Hinterfüllmessprotokolle wurden tabellarisch erfasst:

- Bewilligungsnummer und Landeskoordinaten der Anlage
- Eingesetztes Hinterfüllmaterial gemäss Messprotokoll
- Soll-Werte des Volumens gemäss Eingabe des Geräteführers
- Ist-Werte der Dichte und des Volumens gemäss Messung
- Soll-Werte der Dichte gemäss Herstellerangabe
- Abweichungen Ist- von Soll-Werten (%)
- Verwendetes Messgerät
- Tiefe der Bohrung/Einbautiefe EWS und Tiefe der Schutzverrohrung
- Bohrfirma und Bohrmeister

Die Messwerte und Grafiken jedes Hinterfüllmessprotokolls wurde gemäss den in Abschnitt 3.1 aufgeführten Kriterien bewertet und interpretiert. Dies wurde zweimal durchgeführt, zuerst durch das AWEL beim Erfassungsvorgang und danach durch die Geo Explorers AG. In einem nachfolgenden Gespräch wurden die Resultate und Bewertungen zwischen AWEL und Geo Explorers AG diskutiert und abgeglichen. Für die Soll-Dichte wurde eine akzeptable Abweichungstoleranz von -2 % vereinbart².

3.1 Bewertungskriterien und Bewertung Datensatz

Folgende Kriterien und Fragestellungen wurden im ersten Schritt bewertet:

a) Vollständigkeit der Messung

Eine Messung wird als vollständig bezeichnet, wenn sich das Summenvolumen in der Grafik vom Wert zu Beginn (0 m³) fortlaufenden erhöht (Bohrloch wird vom Sondenfuss bis an die Oberfläche hinterfüllt). Nach dem Ziehen der Schutzverrohrung ist eine Nachzementation (ein Nachfüllvolumen) erkennbar.

b) Dichte von Wasser gemessen

Vor oder nach der eigentlichen Hinterfüllmessung ist eine Dichtemessung von Wasser (1.0 kg/l) ersichtlich. Dieses deutet auf ein sauberes Messrohr hin und somit ist eine korrekte Messung der Dichte wahrscheinlich. Dichte-Messwerte von Wasser (vor oder nach der Volumenmessung), welche sich deutlich von 1.0 kg/l unterscheiden deuten auf vorhandene Ablagerungen oder ein verstopftes Messrohr hin, die Dichtemessungen sind somit verfälscht.

c) Die Dichte und der Durchfluss über den Messvorgang bleiben konstant.

Dies entspricht einem konstanten und kontinuierlichem Mischvorgang des Hinterfüllmaterials und erleichtert die Interpretation, insbesondere beim Druckanstieg der grafischen Darstellung.

d) Ein Druckanstieg über den Messvorgang ist erkennbar.

Bei einer korrekten und lückenlosen Hinterfüllung muss das Hinterfüllmaterial vom Sondenfuss bis an die Oberfläche eingepresst werden. Somit können Wasser und Bohrklein (Verunreinigungen) vollständig aus dem Bohrloch verdrängt und durch das Hinterfüllmaterial

² Die Toleranz wurde für die statistische Auswertung innerhalb dieses Berichtes festgelegt. Dies entspricht nicht einer tolerierten Abweichung des tatsächlichen Mischverhältnisses, d.h. eine (negative) Abweichung von 2 % soll nicht ein „akzeptables“ Wasser/Feststoffverhältnis suggerieren. Die Herstellerangaben sind grundsätzlich einzuhalten. Die hier definierte Toleranz von 2% entspricht der zehnfachen Genauigkeit der Messgeräte.

lückenlos ersetzt werden. Aufgrund der höheren Dichte der Hinterfüllung ist ein steigender Gegendruck im Verpressrohr eine Voraussetzung.

e) Die Soll-Dichte des Verfüllungsmaterials wurde erreicht und eingehalten.

Die Soll-Dichte des Hinterfüllmaterials entspricht den Vorgaben des Herstellers und garantiert die zu erwartenden Materialeigenschaften und dessen Verhalten im Untergrund. Eine Abweichung der Soll-Dichte von -2 % wurde dabei als tolerierbar angesehen.

f) Das Soll-Volumen der Bohrung wurde erreicht.

Das Soll-Volumen wird anhand des Bohrlochdurchmessers und Bohrtiefe mit Abzug des Volumens der einzubauenden EWS-Rohre und Injektionsrohr(e) berechnet. Das Soll-Volumen entspricht mindestens dem theoretisch benötigtem Hinterfüllvolumen.

3.2 Datensatzbereinigung

Für die Auswertung des Datensatzes wurden, falls möglich, noch fehlende oder offensichtlich nicht korrekte Daten durch die Geo Explorers AG ergänzt (z.B. Einbautiefen, fehlende Bewertungskriterien). Es wurde festgestellt, dass bei rund 33 % der Protokolle vom Geräteführer falsche Soll-Dichten eingetragen wurden, d.h. diese entsprechen nicht den vom Hersteller vorgegebenen Soll-Werten (Abbildung 1). Dies hat einen Einfluss auf die in den Protokollen angegebene Abweichung der gemessenen Ist-Dichte von der Soll-Dichte. Daher wurde für jedes Protokoll eine zusätzliche Spalte mit der vom Hersteller empfohlenen Soll-Dichte eingetragen. Bei Zement-Fertigmischungen mit einer Bandbreite an zulässigen Dichten wurde die empfohlene Minstdichte gewählt. Die maximale Abweichung zwischen den in den Protokollen angegebenen Soll-Dichten und der tatsächlich gemessenen Soll-Dichte entsprechend der Herstellerempfehlung liegt bei ca. $\pm 10\%$ (z.B. Soll-Dichte Küchler Injektherm 110 gem. Hersteller beträgt 1.46 kg/l, im Protokoll eingetragen wurde 1.3 kg/l – die Abweichung beträgt 10 %). Dies wurde bei der Datensatzbereinigung manuell nachkorrigiert, damit die Mehrheit der Protokolle überhaupt in der Datenanalyse verwendet werden konnten. Bei vier Protokollen wurde keine Soll-Dichte eingetragen. Diese wurden als "inkorrekte Soll-Dichte eingetragen" gezählt.

Es wurden total 240 Datensätze verwendet. Teilweise gab es von der gleichen Baustelle mehrere Hinterfüllmessprotokolle. Diese wurden jeweils einzeln betrachtet. Soweit nicht anders vermerkt, wurden 27 der Protokolle (11.2 %) nicht berücksichtigt (s. Abbildung 2 roter Anteil). Diese 27 Datensätze wurden im Verlaufe der Interpretation als "nicht brauchbar" kategorisiert. Gründe dafür waren:

- Nicht zeitaufgelöste Grafik und fehlende Angaben auf den Hinterfüllprotokollen oder offensichtlich unvollständige Messungen (z.B. Stromausfall), welche eine Interpretation unmöglich machen.
- Offensichtliche Fehlmessungen der Messgeräte (z.B. keinen Durchfluss aufgezeichnet, stark schwankender Durchfluss und Dichte).

Weitere 14 Stück (5.8 %) der Messungen waren zwar unvollständig (in Abbildung 2 «teilweise brauchbar»), wurden aber für die weitere Auswertung trotzdem verwendet, da zumindest gewisse Daten benutzt werden konnten. Beispielsweise wurden Bohrdurchmesser offensichtlich falsch angegeben (z.B. 151 m statt 151 mm oder 187 mm statt 178 mm Rohrdurchmesser) und somit das Soll-Volumen verfälscht. Mit Hilfe korrekter Daten (z.B. vom Bohrprotokoll) konnte das korrekte Soll-Volumen berechnet werden und die Messung wurde somit für die Studie verwendbar.

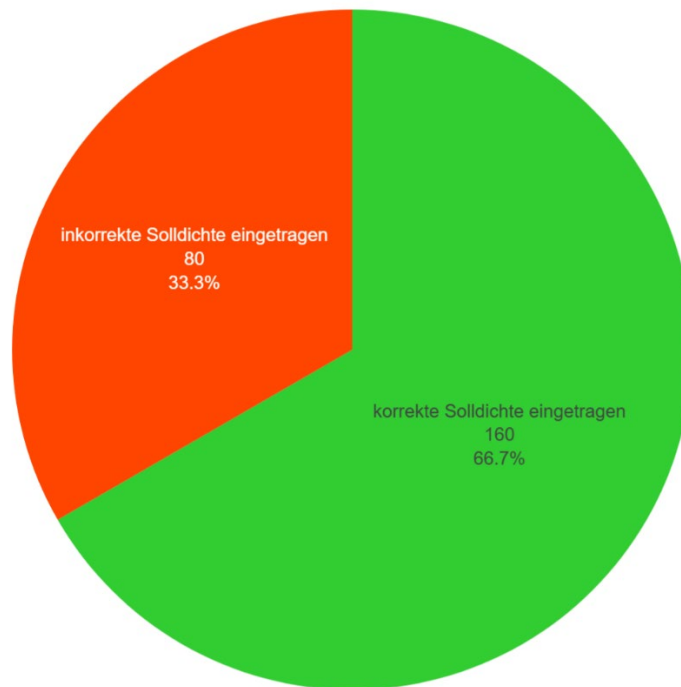


Abbildung 1: Anteil an Protokollen bei denen die Soll-Dichte korrekt eingetragen wurde

Bei rund zwei Dritteln aller betrachteter Protokolle wurde die korrekte, vom Hersteller vorgegebene Dichte als Soll-Dichte im Protokoll eingetragen. Die Soll-Dichte der verbleibenden Hinterfüllprotokolle wurden für die untenstehende Auswertung mit den empfohlenen Werten der Herstellerdatenblätter angepasst.

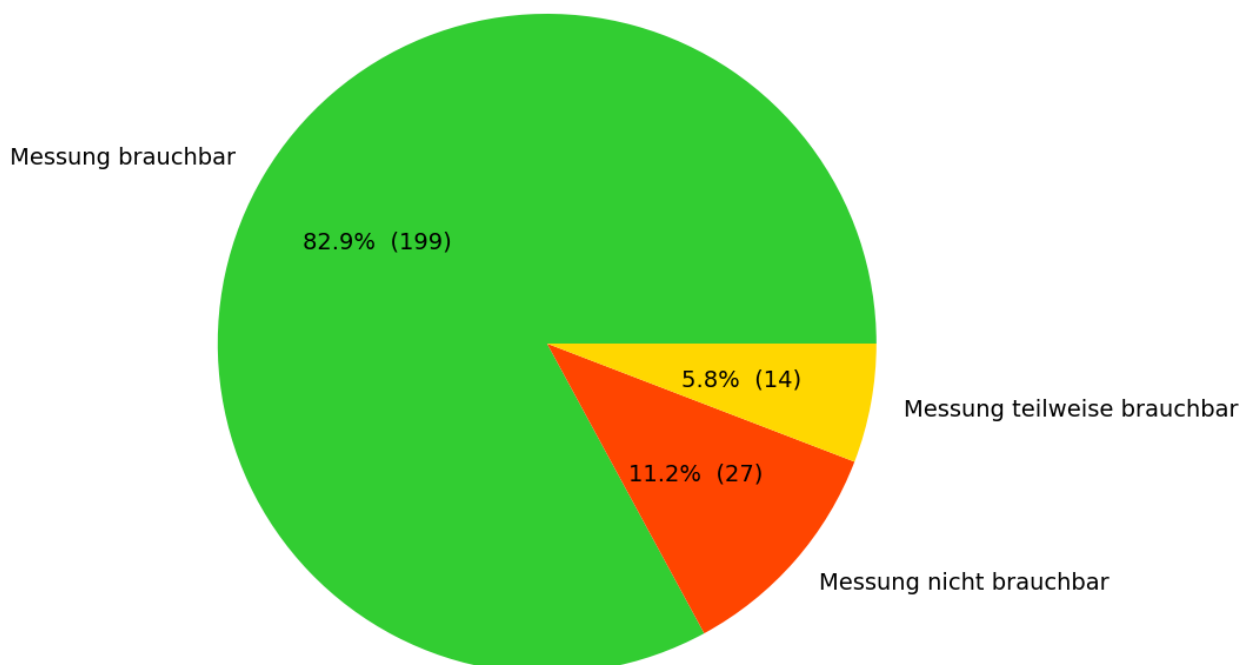


Abbildung 2: Bewertung der Protokolle nach deren Verwendbarkeit

Der rote Anteil (11.2 % / 27 Protokolle) des Datensatzes wurde in der Auswertung nicht berücksichtigt.

4 Resultate

Anhand der verschiedenen Bewertungskriterien aus Abschnitt 3.1 sowie der Daten zu Dichte und Volumen, gegeben auf den Messprotokollen, wurden verschiedene Zusammenhänge grafisch dargestellt. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln präsentiert.

4.1 Bewertungskriterien a - d (Kapitel 3.1)

In Abbildung 3 wurden alle 240 Protokolle nach deren Bewertung für die Parameter a bis d aus Kapitel 3.1 (erfüllt oder nicht erfüllt) dargestellt.

Kriterium a: Vollständige Messung inkl. Nachzementation

Bei nur rund 27 % der Messungen wurde der komplette Hinterfüllvorgang aufgezeichnet. Beim Grossteil der Messungen fehlt die Nachinjektion. Es ist naheliegend, dass das Messgerät nach der Hauptinjektion für die Nachinjektion nicht mehr angeschlossen oder in einem separaten Messprotokoll aufgezeichnet, aber nicht eingereicht wurde. Somit fehlt bei rund 73 % der Protokolle das korrekte, bzw. totale Injektionsvolumen. Insbesondere bei einer tiefen Schutzverrohrung kann die Nachinjektion mehrere 10 % vom Soll-Volumen ausmachen.

Kriterium b: Dichte Wasser vor oder nach Messung ~ 1.0 kg/l

Ähnlich sieht es bei der Nullmessung (= Kontrolle Dichte Wasser vor oder nach der Messung beträgt 1.0 kg/l) aus. Diese wurde nur bei 25 % der Messungen aufgezeichnet. Bei drei Vierteln aller Messungen ist also unklar, ob die aufgezeichneten Werte der Dichte korrekt sind, da die Vergleichsmessung mit Wasser fehlt. Dies kann einen, z. T. erheblichen Einfluss auf die Abweichung von der Soll-Dichte in den Protokollen haben. In seltenen Fällen wurde eine signifikantes Wasservolumenzu Beginn der Hinterfüllmessung dem Ist-Volumen hinzugerechnet und hat dieses so verfälscht.

Kriterium c: Konstante Dichte / Durchfluss während der Messung

Bei 71 % der Messungen wurde eine konstante Dichte und ein konstanter Durchfluss gemessen. Dies zeigt, dass die Mehrheit der Hinterfüllvorgänge mit einem konstanten Einbringen an Injektionsmaterial abläuft, was für die Interpretation des Druckanstiegs (Kriterium d) entscheidend ist. Bei den restlichen 29 % der Messungen gab es verschiedene Probleme. Am häufigsten war eine schlechte grafische Darstellung der Daten, so dass eine konstante Dichte oder ein konstanter Durchfluss nicht beurteilt werden konnte. Mit einer unregelmässigen Dichte und / oder Durchfluss schwankt der Gegendruck in der Injektionsleitung merklich, was eine Interpretation der ansteigenden Hinterfüllung im Bohrloch erschwert bzw. verunmöglicht. Bei wenigen Messungen gab es individuelle Probleme wie Stromausfälle auf der Baustelle oder dass die Messungen nur Teilmessungen des Gesamthinterfüllvorganges darstellten.

Kriterium d: Druckanstieg bis zum Ende der Messung

Beim Grossteil (78 %) der Messungen konnte ein Druckanstieg bis zum Ende der Messung beobachtet werden. Dies ist eine Voraussetzung für ein vom Sonden Fuss bis zur Oberfläche vollständig hinterfülltes Bohrloch. Bei den Messungen, bei denen dies nicht der Fall ist, erschwerte, bzw. verunmöglichte wiederum hauptsächlich eine mangelhafte grafische Darstellung die Auswertung.

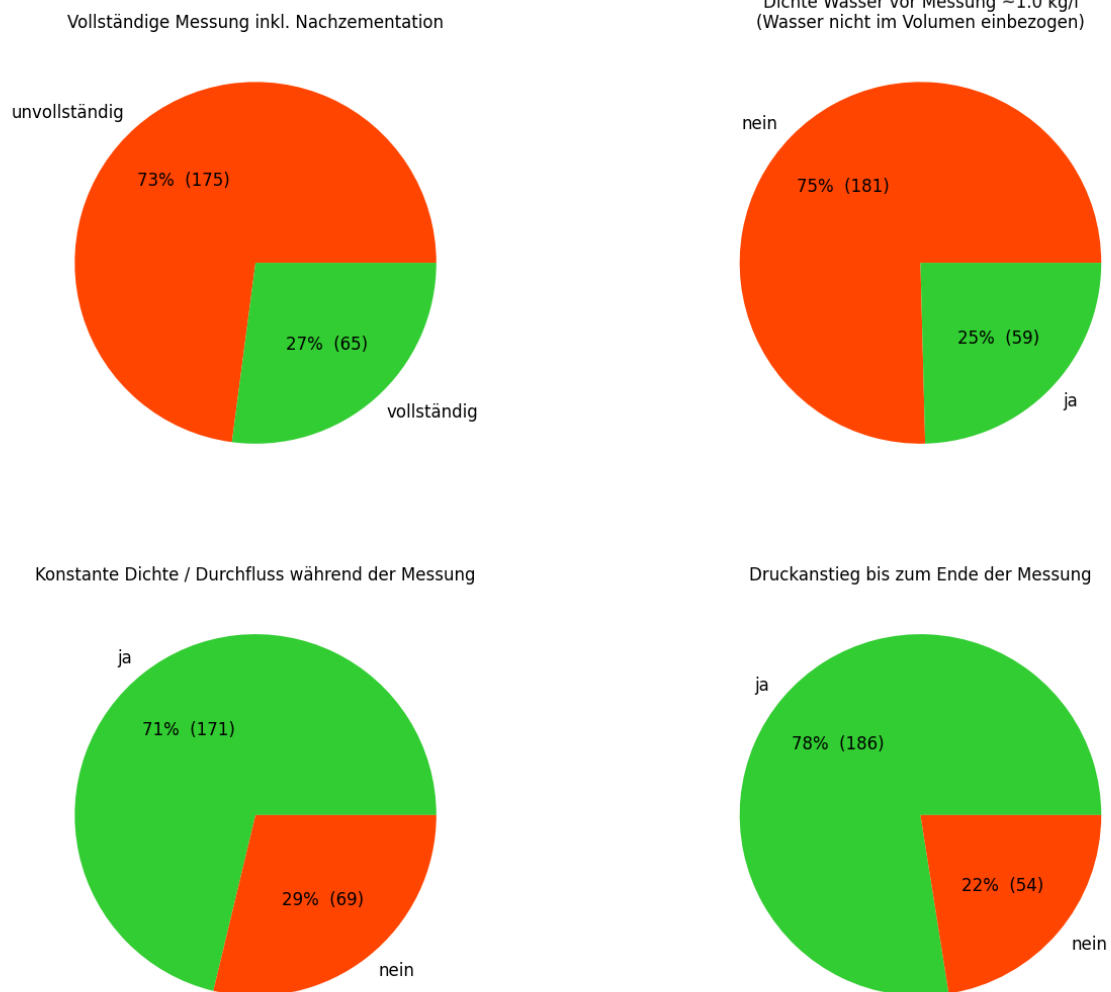


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Bewertungsparameter a – d
Bewertungsparameter gemäss Abschnitt 4.1. Alle 240 Messungen wurden berücksichtigt.

4.2 Kriterium e: Dichte

In der SIA 384/6:2021 sind unter Punkt 5.3.2 die Minimalanforderungen an die Hinterfüllung von Erdwärmesonden definiert. Darunter wird die Mindestdichte von 1.2 kg/l gefordert. Zudem sind die Mischungsvorgaben des Herstellers einzuhalten. Die kantonale Auflage ist unter Kapitel 2.1 aufgeführt. In Bezug auf die Dichte fordert diese eine kontinuierliche Aufzeichnung der Suspensionsdichte während des gesamten Hinterfüllvorgangs oder alternativ die Dichtebestimmung anhand zweier Suspensionsproben mittels Fotodokumentation (eine am Anfang und eine am Ende des Hinterfüllvorgangs). Die vom Hersteller empfohlene Dichte für Fertigmischungen muss eingehalten werden. Bei Baustellenmischungen, d.h. Zementeigenmischungen aus Bentonit, Zement und Wasser genügt gemäss Vollzugshilfe des BAFU (s. Verweis auf BAFU, 2009 Anhang 7) eine Dichte von 1.1 - 1.2 kg/l. Da der analysierte Datensatz nur wenige Zementeigenmischungen enthält und diese bis auf eine Ausnahme (Dichte 1.1 kg/l bei einer Messung (s. Abbildung 6)) immer mit einer höheren Dichte als 1.2 kg/l angemischt wurden, wird in den folgenden Abbildungen für

Zementeigenmischungen ebenfalls auf die von der SIA geforderten Minstdichte von 1.2 kg/l verwiesen.

Abbildung 4 stellt die Verteilungen der durchschnittlichen Dichten aller verwertbarer Protokolle sowie die Abweichungen der gemessenen Dichten von der empfohlenen Herstellerdichte dar. Rund 16 % der Messungen zeigten eine durchschnittliche Dichte von unter 1.2 kg/l, wenn man die in Kapitel 3.1 definierte Toleranz von -2 % beachtet. Die restlichen 84 % der Messungen haben eine durchschnittliche Dichte von 1.2 kg/l oder höher aufgezeichnet. Dabei wurde im ersten Schritt noch nicht unterschieden, ob die Soll-Dichten der einzelnen Rezepturen nach Herstellervorgaben erreicht wurden oder nicht. Diese Aufteilung ist in Abbildung 4 auf der rechten Seite dargestellt. Dabei weisen zwei Drittel der Messungen eine zu geringe Dichte auf, als sie vom Hersteller vorgegeben ist (die Toleranz von -2 % wurde bereits beachtet).

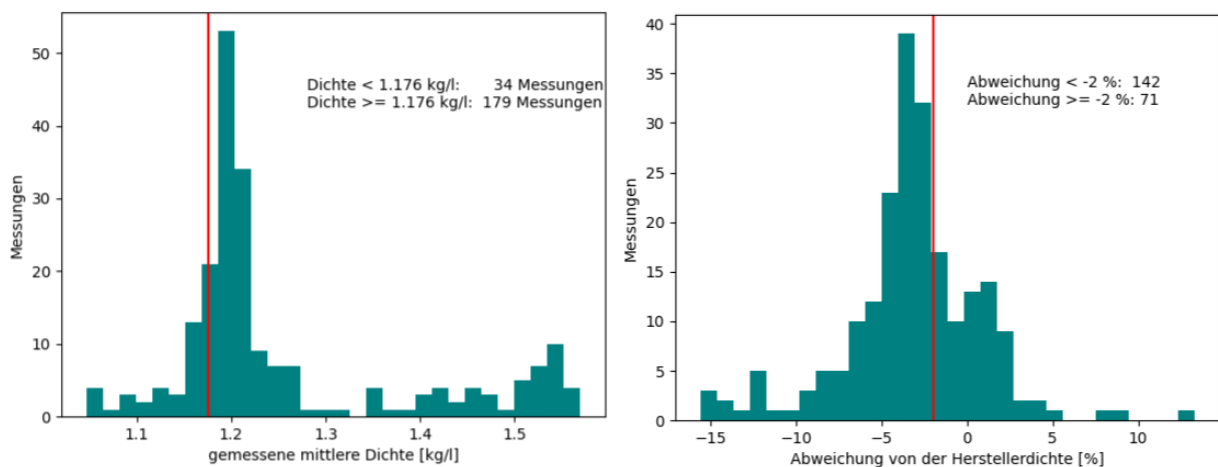


Abbildung 4: Verteilungen der gemessenen Dichten und Abweichungen zur Herstellerdichte
Links: Die von der SIA 384/6:2021 geforderte Minstdichte abzüglich der -2% Toleranz ist mit einem roten Balken markiert. Rechts: Der rote Balken markiert die -2 % Toleranz in der Abweichung zur Soll-Dichte.

4.2.1 Einfluss der eingesetzten Messgeräte

Es wurde zusätzlich eine Grafik erstellt, welche den Zusammenhang zwischen den verwendeten Messgeräten und den Dichten herstellt (Abbildung 5). Dafür wurden die Daten in Abhängigkeit der Messgeräte aufgeschlüsselt, die Messgerätehersteller wurden dabei anonymisiert (MG 1, MG 2, etc.).

Für Abbildung 5 wurden lediglich die 213 gemäss Abbildung 2 als brauchbar und teilweise brauchbar (= grösstenteils vollständige Messungen bei denen alle wichtigen Daten vorhanden und korrekt sind, sowie über eine zeitaufgelöste Grafik verfügen) definierten Datensätze verwendet. Die gemessenen Zementdichten wurden in zwei Kategorien eingeteilt (< 1.176 kg/l und 1.176 - 1.6 kg/l, Dichten über 1.6 kg/l wurden keine aufgezeichnet). Die Grösse der Kreissegmente beruht auf der Anzahl Messungen, welche in die jeweiligen Kategorien fallen. Die Farbgebung stammt von der vom Hersteller vorgegebenen Soll-Dichte (Durchschnitt aller Soll-Dichten für die in die Kategorie fallenden Messungen). Von den insgesamt vier unterschiedlichen Messgeräten, von denen Protokolle vorhanden waren, konnten nur von drei Geräten die eingereichten Protokolle ausgewertet werden und bei MG 3 war es nur eine Messung.

Mit Abstand der grösste Teil der Messungen wurde mit dem Gerät MG 1 erstellt (82 %). Rund 19 % der MG 1-Messungen liegen, unter Beachtung der Toleranz, unter der von der SIA 384/6:2021

geforderten Mindestdichte von 1.2 kg/l (mit 2% Toleranz entspricht dies einer Dichte von 1.176 kg/l). Die bei diesen Messungen verwendeten Zementsuspensionen hatten für die Dichte eine Herstellervorgabe von durchschnittlich 1.24 kg/l (violett). Ca. 81 % der Messungen liegen im Bereich von 1.176 - 1.6 kg/l mit einer Herstellerempfehlung für die Soll-Dichte von durchschnittlich 1.3 kg/l (pinkfarben).

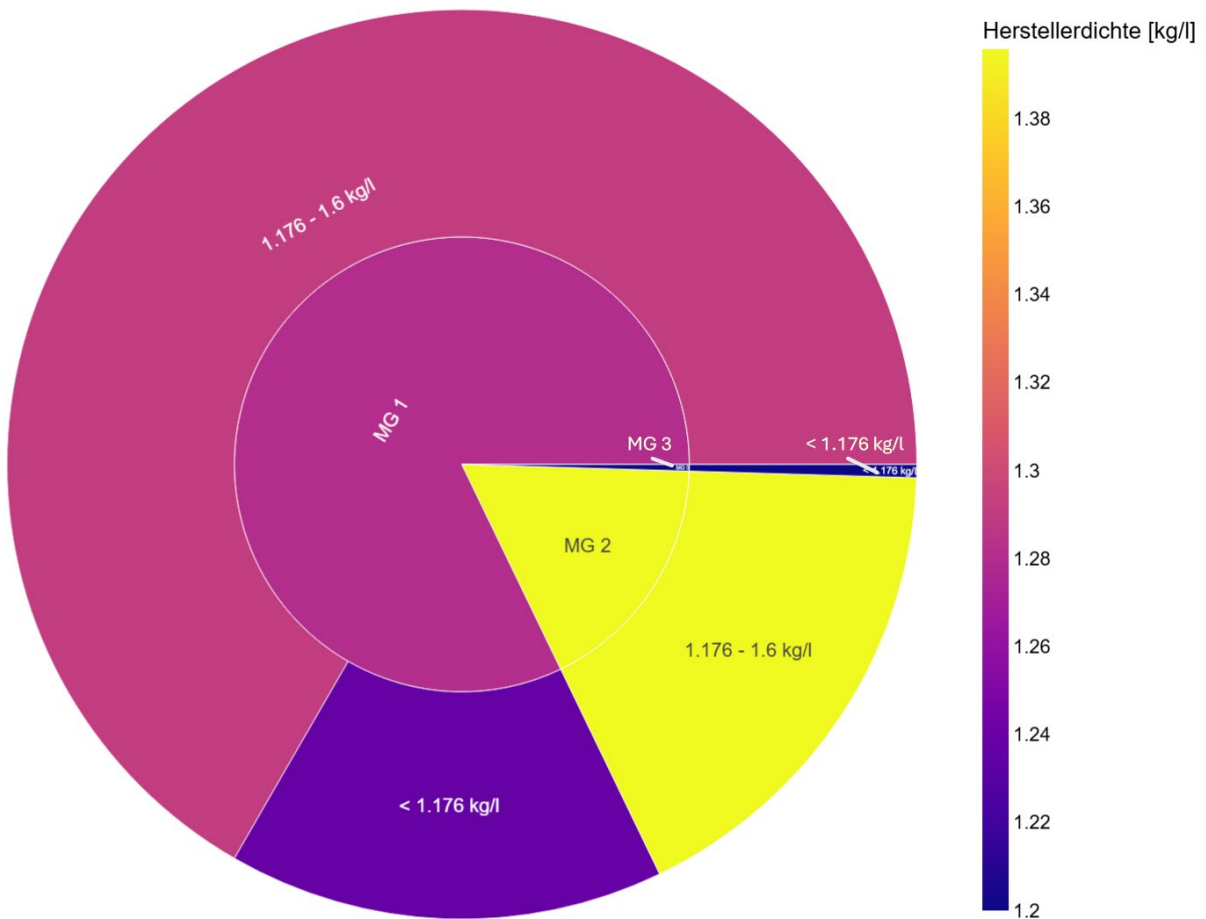


Abbildung 5: Messgeräte und gemessene Dichten in Zusammenhang mit Herstellerdichten

Die Farbgebung erfolgte gemäss der empfohlenen Herstellerdichten. Die Gewichtung ist bedingt durch die Anzahl Messungen pro Gerät. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Mit MG 2 (17 % der Messungen) werden überwiegend Zementmischungen mit empfohlenen Dichten von durchschnittlich 1.4 kg/l verwendet (22 von total 37 Messungen mit Zementen mit empfohlenen Mindestdichten von > 1.45 kg/l). Keine der Messungen mit diesem Gerät lag unter der geforderten Mindestdichte von 1.2 kg/l.

Bei der Verwendung von MG 3 wird ausschliesslich eine Zementeigenmischung verwendet. 90 % dieser Messungen waren als nicht brauchbar kategorisiert, weil die graphische Darstellung nicht lesbar oder mit falschen Werten versehen war. Die einzige Messung, welche als brauchbar klassifiziert wurde, weist eine Dichte unter 1.176 kg/l auf und erfüllt somit die SIA 384/6:2021 nicht.

Die Protokolle von MG 4 (0.8 % des Datensatzes) geben keinerlei Auskunft über die gemessene Dichte. Diese Protokolle waren daher alle nicht brauchbar und sind nicht Teil dieser Statistik.

Abbildung 6 stellt dar, welche Zemente mit welchem Gerät verwendet wurden, sowie die durchschnittliche Abweichung der gemessenen Dichte zur empfohlenen Herstellerdichte. Die meisten Bohrungen wurden mit dem Hinterfüllbaustoff Schwenk Füllbinder V hinterfüllt (vergleiche Studie Ebert 2018 in der festgestellt wurde, dass vorwiegend Kuchler Injektherm 110 eingesetzt wurde). Der Schwenk Füllbinder V wird beim MG 1 im Schnitt um ca. 4 % unter Herstellerempfehlung (1.24 kg/l) gemessen (orange). Das bedeutet, dass die durchschnittlich gemessene Dichte bei diesem Zement bei unter 1.2 kg/l liegt. Bei den Zementeigenmischungen (Jura Flex, Jura Fix, Zementeigenmischung) wurden bis auf eine Ausnahme (MG 3 – roter Bereich in Abbildung 6)) alle deutlich dichter als die Mindestdichte von 1.2 kg/l (hier als «Herstellerdichte» definiert) gemessen.

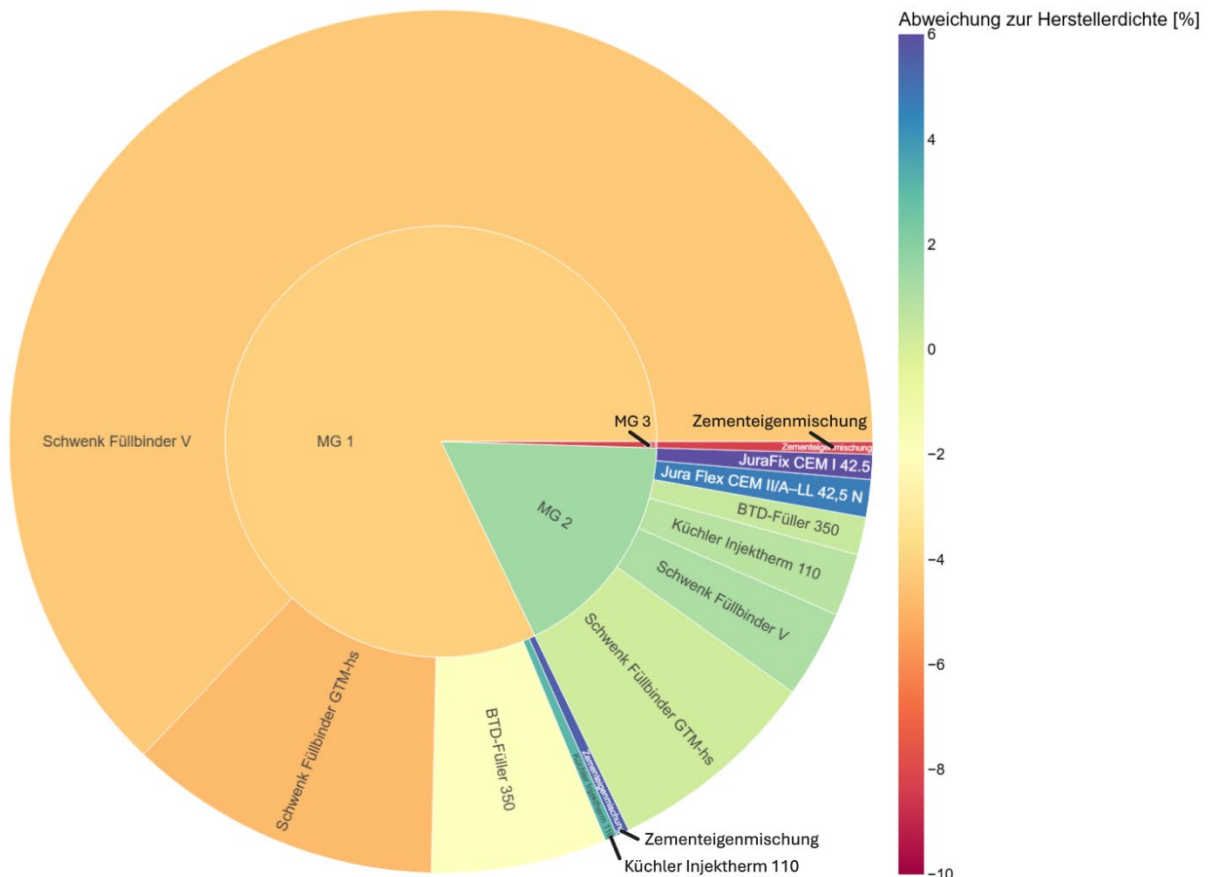


Abbildung 6: Messgeräte und damit verwendete Zemente im Kontext Abweichung zur Herstellerdichte

Die Farbgebung beruht auf den von den Zementherstellern empfohlenen Anmischdichten. Die Abweichung zur Herstellerdichte (Farbgebung) stellt einen Durchschnitt aller in die Kategorie fallender Daten dar. Die verwendeten Zemente wurden pro Gerät aufgeschlüsselt. Die Gewichtung erfolgte gemäss Anzahl Messungen pro Kategorie. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Eine zu geringe Dichte in Bezug auf die Herstellerempfehlung wurde insbesondere bei Verwendung von MG 1 festgestellt. Eine Ursache könnte die verwendete Messeinheit mit zwei Messrohren sein. Aus Erfahrung ist bekannt, dass teilweise eines der Messrohre mit ausgehärteten Zementresten vergangener Messungen verstopfen, der Hinterfüllvorgang jedoch über das zweite Rohr weiterhin durchgeführt werden kann. Die Messung selbst wird dadurch entsprechend verfälscht. Allerdings kann aufgrund der grossen Vielfalt an möglichen Gründen für Dichteviationen bei Hinterfüllmessungen und der Absenz einer Vergleichsmessung mit mehreren Gerätetypen pro

Baustelle keine eindeutige Aussage gemacht werden. Eine "Kalibriermessung" mit Wasser vor oder nach der Hinterfüllmessung könnte aufzeigen, ob die Messgeräte eine vermutlich korrekt Dichte gemessen haben.

59 % der ausgewerteten Protokolle stammen von Bohrfirma 1 (BF 1) (s. Abbildung 7). Im Durchschnitt liegen die Messungen der Dichte für diese Firma über der von der SIA 384/6:2021 geforderten Mindestdichte von 1.2 kg/l. Allerdings gilt dies nicht für alle einzelnen Messungen (siehe äusserer Kranz in Abbildung 7 für jeden Bohrmeister (BM)). Diese Bohrfirma verwendet ausschliesslich MG 1. Ob und inwiefern eine Problematik wie im oberen Absatz beschrieben hier eine Rolle spielt, ist anhand der vorliegenden Daten schwierig zu beurteilen. Dafür müssten Vergleichsmessungen mit mehreren Gerätetypen für den gleichen Hinterfüllvorgang gemacht werden.

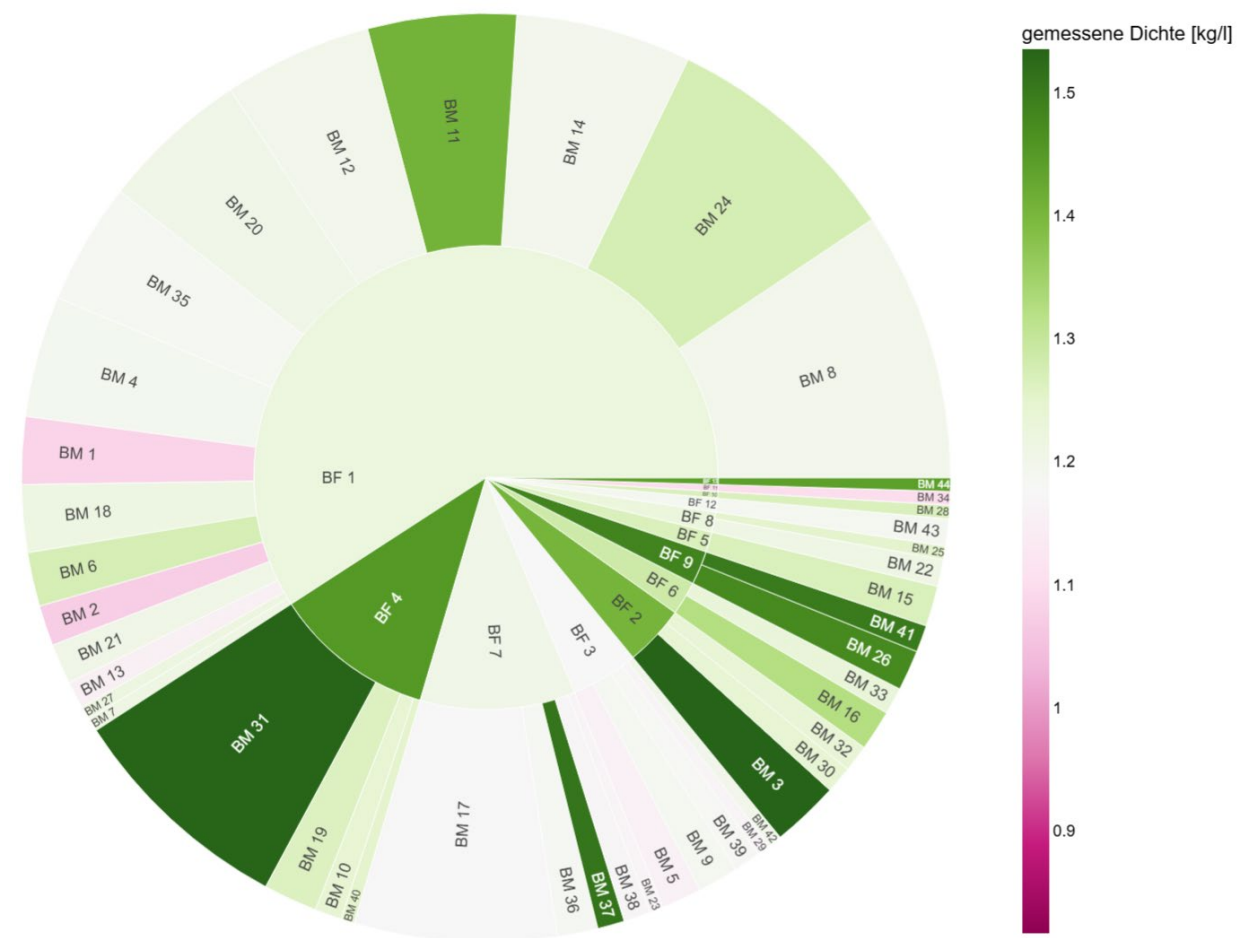


Abbildung 7: Bohrfirmen und Bohrmeister im Vergleich zur gemessenen Dichte

Die Namen der Bohrfirmen und der Bohrmeister wurden anonymisiert. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Es gibt nur zwei Bohrfirmen, welche auch mehrere Protokolle und von mehreren Bohrmeistern eingereicht haben (Bohrfirma 3 und 7) und bei denen die Mindestdichte, bis auf eine Ausnahme (BM 37 bei der BF 7), nie, oder höchstens in der Toleranz von -2 %, eingehalten wurde. Alle Messungen wurden mit MG 1 durchgeführt. Bei allen Messungen dieser beiden Bohrfirmen, sowie beim Grossteil der Messungen der Bohrfirma 1 wurden negative Abweichungen zur Empfehlung der Zementhersteller festgestellt (s. Abbildung 8, durchschnittliche Dichteabweichung zur Herstellerempfehlung pro Messgerät (MG), Bohrmeister (BM) und Bohrfirma (BF)).

Es gibt auch Beispiele, bei denen die Abweichung zur Herstellerdichte positiv ist und die Messungen ebenfalls mit MG 1 gemacht wurden (s. Abbildung 8, Bohrfirmen 2, 5, 9 und 10). Diese machen 8 % der Messungen mit diesem Gerät aus. Im Gegensatz dazu gibt es beim MG 2, innerhalb der definierten Toleranz, keine Messungen, welche unter der vom Hersteller empfohlenen Dichte liegen. Diese Beobachtungen sind nicht zufällig und deuten darauf hin, dass wesentliche Einflüsse auf das Resultat der Dichtemessung bei der Wahl des Messgerätes bestehen.

Messungen mit hohen Dichten, welche fast immer bedingt durch die geforderte Herstellerdichte bestehen (Abbildungen 7), heben natürlicherweise den Durchschnitt pro Bohrfirma, respektive Bohrmeister an.

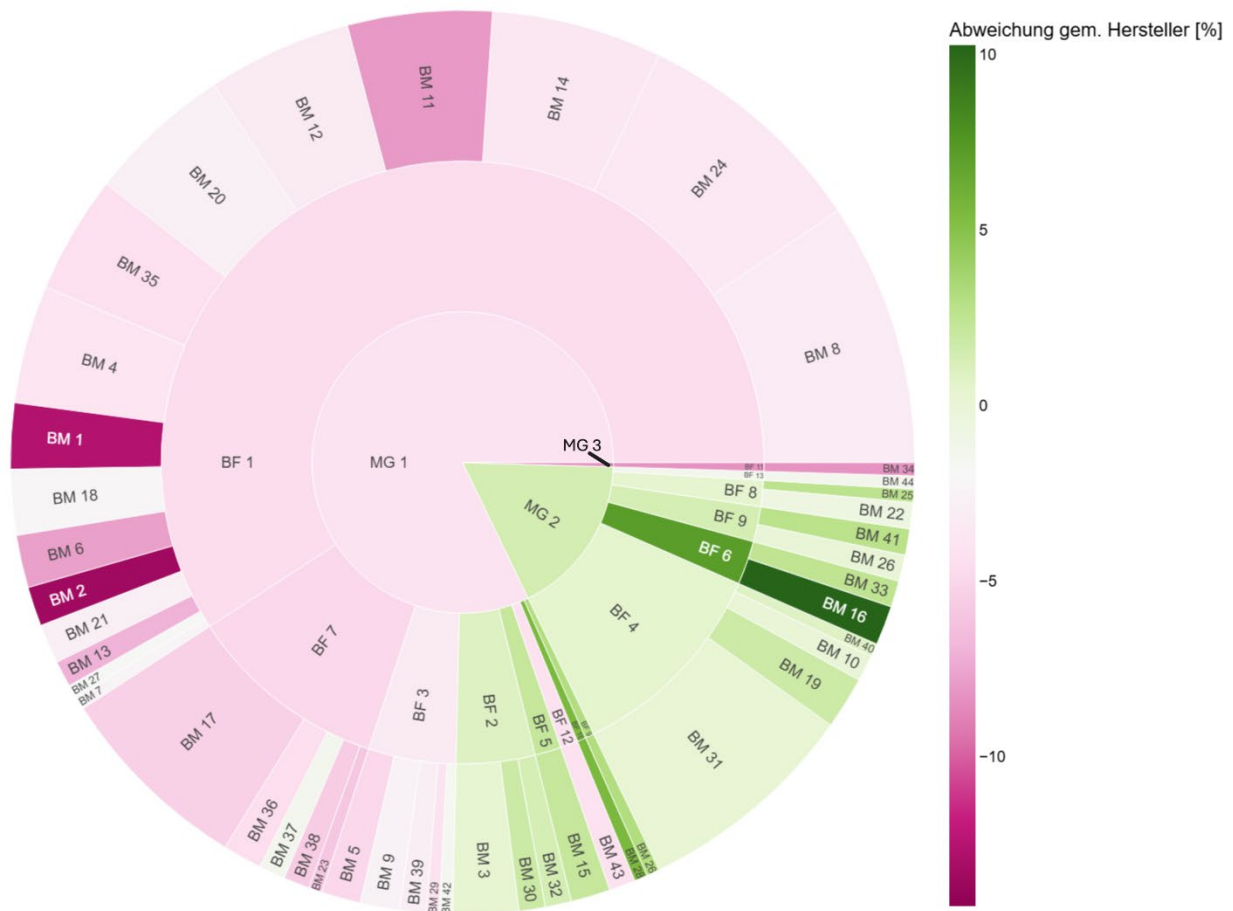


Abbildung 8: Messgeräte, Bohrfirmen und Bohrmeister im Vergleich zur Abweichung von der empfohlenen Herstellerdichte

Die Namen der Messgeräte, Bohrfirmen und der Bohrmeister sind anonymisiert. Die Abkürzungen stehen für: MG = Messgerät, BF = Bohrfirma, BM = Bohrmeister. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

4.3 Kriterium f: Volumen

Gemäss der SIA 384/6:2021 gilt in Bezug auf das Hinterfüllungsvolumen, dass das theoretisch berechnete Soll-Volumen und das tatsächlich eingefüllte Ist-Volumen festgehalten werden muss. Bei Erreichung des doppelten Bohrlochvolumens ist der Injektionsvorgang zu unterbrechen und die Bauleitung zu verständigen. Zudem besagt die SIA 384/6:2021, dass die Hinterfüllung vollständig ist, wenn die Suspension am Bohrloch austritt und die beim Ziehen der temporären Verrohrung absinkende Hinterfüllung von oben her nachgefüllt werden kann. Die kantonale Auflage ist in Kapitel 2.1 aufgeführt. In Bezug auf das Volumen ist der Hohlraum im Bohrloch vollständig zu verpressen und das Suspensionsvolumen ist kontinuierlich aufzuzeichnen.

In Abbildung 9 ist die Verteilung der gemessenen Volumina der Hinterfüllung in Prozent des Soll-Volumens dargestellt (100 % = exakt das berechnete Soll-Volumen erreicht). Bei einem Injektionsvolumen unterhalb des Soll-Volumens wurde dies als unvollständige Hinterfüllung gewertet. Es gibt zwar geologische und technische Verhältnisse (z.B. quellende Tone, Tonspülbohrungen), bei denen ein Bohrlochvolumen geringer sein kann als das theoretisch berechnete, in dieser Studie wurde aber grundsätzlich davon ausgegangen, dass Mindervolumina einer unvollständigen Hinterfüllung gleichzusetzen sind, da Tonspülbohrungen, oder quellende Tone nur eine Handvoll Hinterfüllmessungen innerhalb der Studie betrachteten Situationen ausmachen.

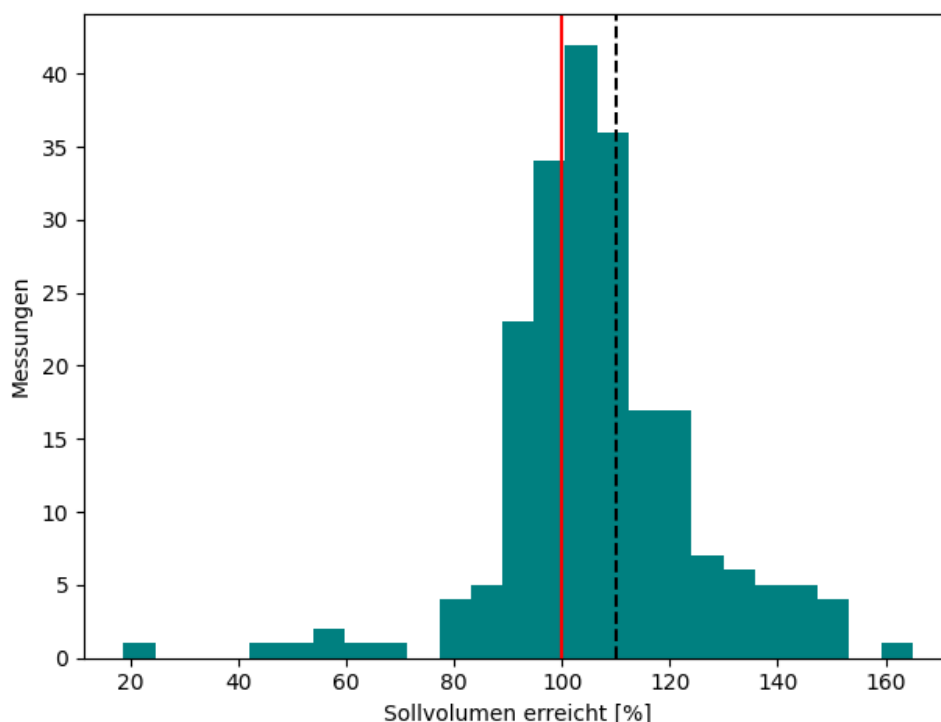


Abbildung 9: Verteilung der gemessenen Volumina in Prozent vom Sollvolumen

Die rote Linie definiert 100 % des Sollvolumens. Die gestrichelte schwarze Linie gibt 110 % des Sollvolumens an (10 % Mehrvolumen, erklärbar mit Bohrlochwand-Ausbrüchen). Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Ca. 31 % der Messungen zeigen ein eingebrachtes Volumen zwischen 80 und 100 % des Soll-Volumens. Sieben Messungen (3 %) hatten noch grössere negative Abweichungen zum Soll-Volumen. Rund 28 % der verwendbaren Messungen haben die gesamte Hinterfüllung, d.h. inkl. Nachinjektion aufgezeichnet. Bei den verbleibenden 72 % der Messungen fehlt in der Regel die

Nachinjektion, was das Totalvolumen verfälscht, respektive das tatsächliche Gesamtvolumen liegt höher, als die Daten vermuten lassen. 30 % der auswertbaren Messungen zeigten Volumen, die mehr als 10 % des Soll-Volumens aufweisen. Dabei lag die höchste Abweichung bei knapp über 60 % vom Soll.

Ca. 37 % der auswertbaren Messungen enden bei einem Ist-Volumen von 100 - 110 %. Da das Bohrloch der Regel Bohrlochwandausbrüche aufweist, ist ein Mehrvolumen in dieser Grössenordnung zu erwarten und tendenziell ohne Zementverluste in die Formation zu erklären.

Es gibt immer wieder Hinweise aus der Bohrbranche, dass Bohrmeister z. T. Strafen fürchten aufgrund abfliessenden Zements und deswegen lieber bei Erreichen des Soll-Volumens (100 %) den Hinterfüllvorgang stoppen. Weiter zeigen vereinzelte Beobachtungen und Aussagen von Bohrmeistern vor Ort tatsächlich, dass eine «100 %-Erreicht-Anzeige» auf dem Messgerät eine falsche Sicherheit suggeriert. Fliesst Zement allerdings im Untergrund weg, so tut er dies in der Regel auch, wenn bei 100 % vom Soll-Volumen gestoppt wird. Dies bedeutet dann aber, dass die Hinterfüllungen nicht bis zur Oberfläche hin komplett sind.

Eine Hinterfüllmessung wurde bei nicht aufgezeichneter Nachinjektion als unvollständig und mit aufgezeichneter Nachinjektion als vollständig definiert (Kriterium a). Abbildung 11 zeigt eine Darstellung von vollständigen und unvollständigen Messungen in Relation zur Verrohrungstiefe und in Abhängigkeit der angegebenen Abweichung vom Soll-Volumen. Verhältnismässig gibt es mehr unvollständige Messungen mit einer sehr geringen (<10 %) positiven oder einer deutlich negativen Abweichung vom Soll-Volumen im Vergleich zu den vollständigen Messungen. Im Schnitt liegen die unvollständigen Messungen bei einer Abweichung vom Sollvolumen von ca. +3 %, während die der vollständigen Messungen bei einer durchschnittlichen Abweichung von ca. +15 % liegen. Auffällig ist zudem, dass die vollständigen Messungen alle über 5 % (meist deutlicher) über dem Soll-Volumen zu liegen kommen, während die unvollständigen Messungen maximal bis ca. 8 % über dem Soll-Volumen aufgezeichnet haben.

Eine geringfügig positive Abweichung zum Soll-Volumen kann bei den unvollständigen Messungen bei Verrohrungstiefen unter 50 m beobachtet werden. Bei grösseren Verrohrungstiefen liegt die Abweichung bei durchschnittlich -8 %. Das heisst, stoppten die Bohrmeister tatsächlich die Hinterfüllung beim Erreichen um die 100 % des Soll-Volumens, hat dies einen geringeren Einfluss bei kleineren Verrohrungstiefen als bei grösseren. Dies liegt daran, dass bei grösseren Verrohrungstiefen prozentual an der gesamten Bohrung mehr Volumen fehlt, wenn die Nachinjektion nicht aufgezeichnet wird. Der Grund für die nur schwach positiven (<10 %) und negativen Abweichungen liegt also darin, dass die Nachinjektion bei den meisten Messvorgängen nicht aufgezeichnet wurden.

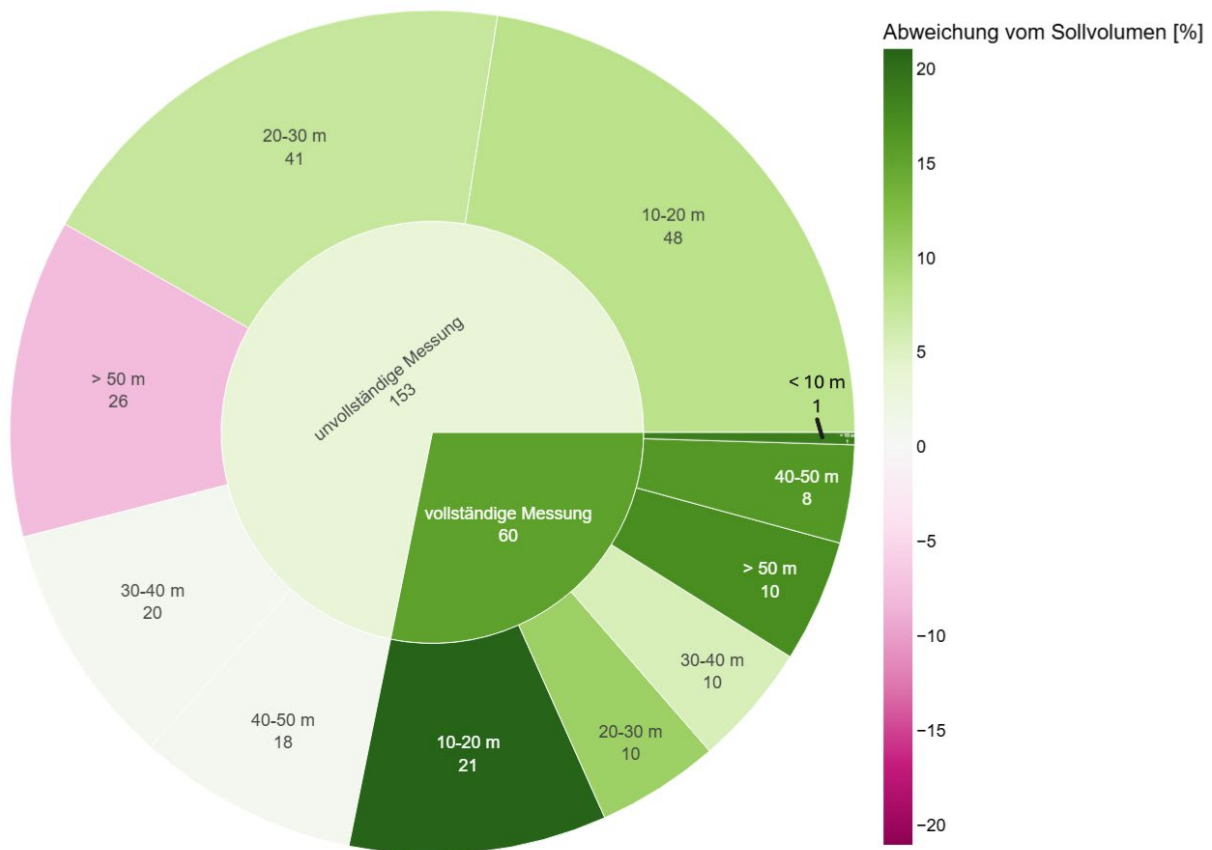


Abbildung 10: Abweichung vom Sollvolumen vs. temporärer Verrohrungstiefe

Die Abweichung vom Sollvolumen ist bei den unvollständigen Messungen verfälscht, da die Nachinjektion fehlt. Die Segmente stellen Durchschnittswerte aller in die Kategorie fallender Werte dar. Es sind ebenfalls die Anzahl Protokolle pro Kategorie gegeben. Im Gegensatz zur Abbildung 3 (Gesamtdatensatz) werden für diese Auswertung die als «nicht brauchbar» klassifizierten Messungen nicht beachtet.

Analog zur Dichteauswertung (Abschnitt 4.2) wurden die Volumina nach Bohrfirmen aufgeschlüsselt. Obwohl bei fast allen Bohrfirmen, welche mehrere Hinterfüllmessprotokolle eingereicht hatten, einzelne Messungen mit zu geringen Volumen vorhanden sind, gibt es nur eine Bohrfirma, bei welcher im Durchschnitt unter dem Soll-Volumen injiziert wurde (Bohrfirma 2). Es wurde bei einem Drittel der eingereichten Messungen dieser Bohrfirma ein Mindervolumen verzeichnet (siehe BF 2 in Abbildung 12). Bei allen diesen Protokollen gab es Probleme bei der Messung, was einen Teil der Abweichungen erklärt. Ansonsten wird im Schnitt grundsätzlich bei den meisten Bohrfirmen über das Soll-Volumen hinterfüllt.

Um einen möglichen geographischen Zusammenhang erkennen zu können, wurden die Daten zusätzlich auf einer Karte dargestellt (s. Abbildung 13). Teilweise gibt es mehrere Messungen pro Standort. Bedingt durch die Grösse des Kartenausschnittes (Massstab), sowie um die Sichtbarkeit der Punkte zu gewährleisten, erscheinen einige Messungen übereinander gelagert und es sind daher nicht alle Messungen sichtbar. Pro Standort, wo mehrere Punkte übereinander dargestellt werden, können Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen von -30 % bis +10 % festgestellt werden.

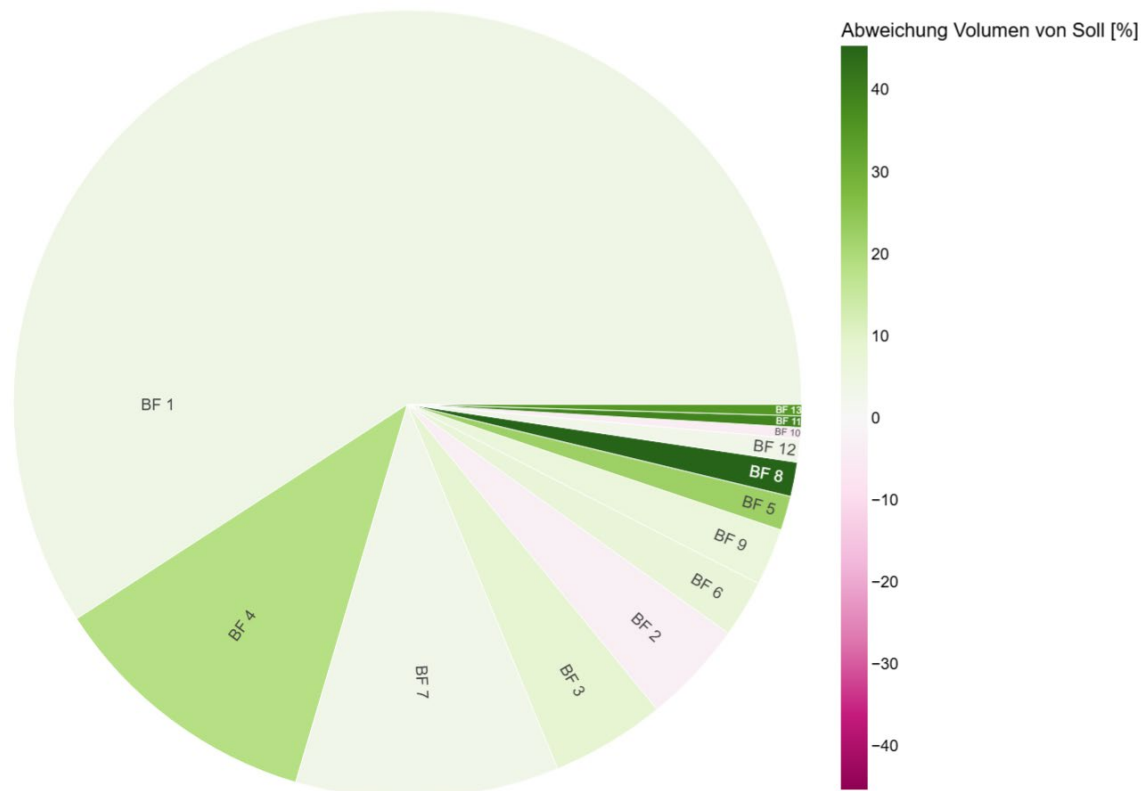


Abbildung 11: Abweichungen des gemessenen Volumens zum Sollvolumen pro Bohrfirma

Es gibt nur eine Bohrfirma mit mehreren Messprotokollen bei denen im Durchschnitt Mindervolumina aufgezeichnet wurden (BF 2). Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Extreme Volumenabweichungen (positiv oder negativ) wurden nur in wenigen Messprotokollen festgestellt (s. Abbildung 9). Dazu wurden in Tabelle 1 pro Region einige Beispiele ausgewählt und genauer betrachtet. Gewässerschutzrechtlich wäre ein Zusammenhang zwischen Mehrvolumen und Wasserzutritten, resp. Lithologie interessant. Gemäss den in Tabelle 1 geführten Beispielen ist ein solcher Zusammenhang erkennbar. Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage kann ein solcher Schluss aber nicht verallgemeinert werden. Die Gründe hier sind, wie bereits erwähnt, die grosse Menge an unvollständigen Messprotokollen, welche nicht die "wahre" Injektionsmenge wiedergeben. Andererseits ist auch die Rapportierung von Grundwasserzutritten in den Bohrrapporten und Berichten der geologischen Begleitungen nicht einheitlich und vergleichbar.

In wenigen aussagekräftigen Beispielen lässt sich auch ein Zusammenhang zwischen Mehrvolumen in den Lockergesteinsschichten erkennen. In diesen Bereichen wurde in der Regel zum Schutz des Lockergesteinsgrundwasserleiters ein Gewebestrumpf eingebaut (und in den Beispielen auch deren Injektion gemessen). Die Übervolumen in diesem Bereich lassen sich durch ein Versagen des Strumpfes erklären. Ob dieser beim Einbau verletzt, beim Hinterfüllvorgang aufreisst oder die Suspension "unten" aus dem Strumpf ausfliesst, lässt sich aufgrund der Messungen nicht eruieren. Es ist denkbar, aber weniger wahrscheinlich, dass für das Übervolumen auch Auswaschungen und/oder Einbrüche aufgrund fehlender Bohrlochstabilität in den Lockergesteinsschichten eingebracht werden können. Diese würden dann zu einem Überdehnen des Gewebestrumpfs während der Injektion führen, dieser würde jedoch seinen Zweck noch erfüllen. Diese Möglichkeit wird jedoch als eher unwahrscheinlich angesehen, da die Lockergesteinslagen während dem Bohrvorgang durch die Schutzverrohrung abgesperrt und so vor Auswaschungen und übermässigen Ausbrüchen geschützt ist.

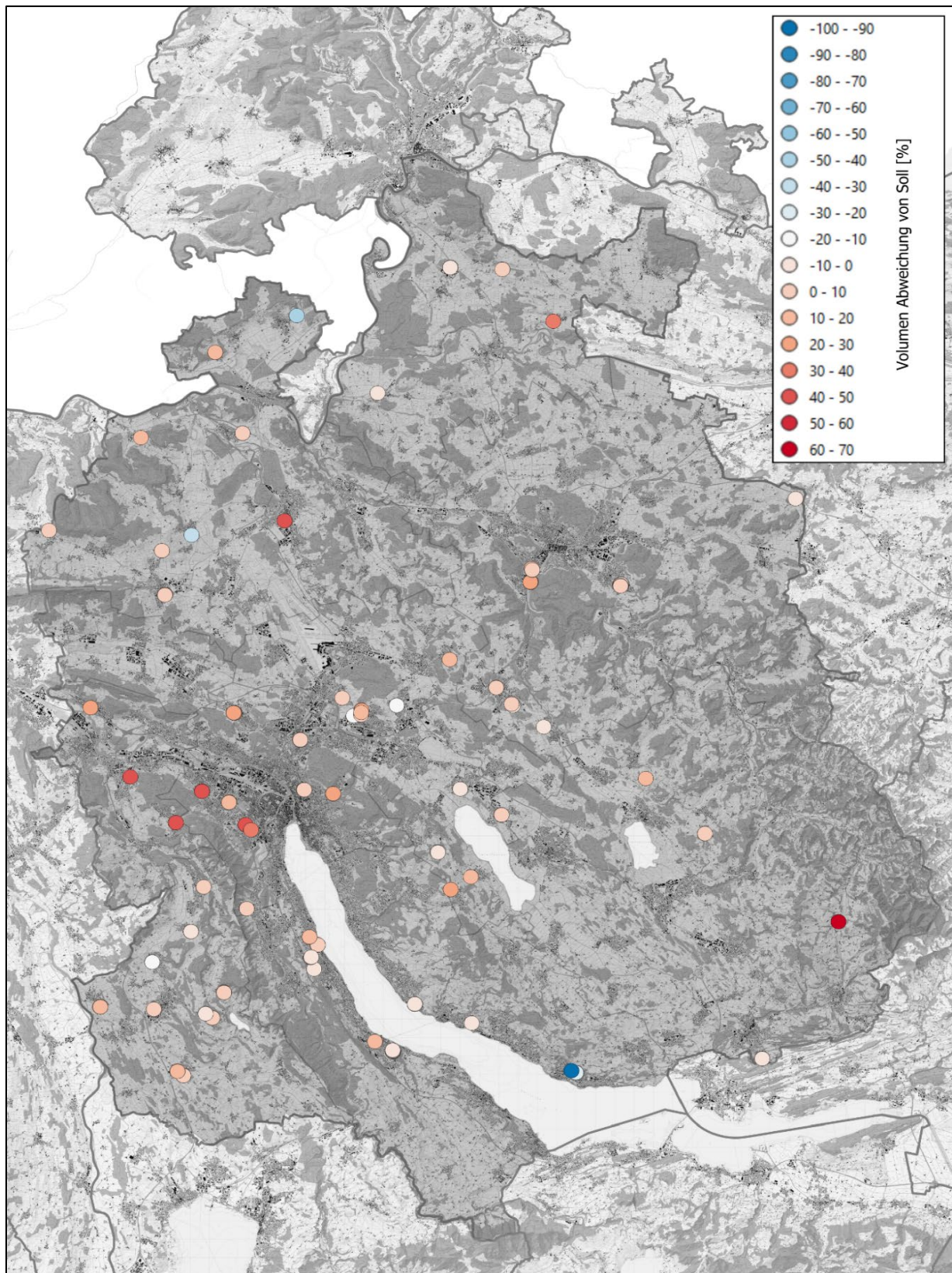


Abbildung 12: Räumliche Verteilung der Abweichungen des gemessenen Volumens zum Sollvolumen

Es werden nicht alle Punkte dargestellt, da die Punktgrösse eng nebeneinander-stehende Punkte überdecken. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

Tabelle 1: Beispiele Volumenabweichungen von Soll-Volumen

Ortschaft	Volumen-abweichung [%]	Grund	Interpretation Problem
Bülach	0.6 / 49.1	Hinterfüllung kam nicht bis an die Oberfläche. Übervolumen hauptsächlich oberflächennah (Strumpfstrecke). Aus einer Temperaturmessung gibt es Anzeichen, dass die Suspension in ca. 20 - 25 m Tiefe in die Formation fließt, gem. geol. Proben besteht bei 21 - 25 m eine saubere Kieslage	Injektionsverluste in geologische Formation vermutlich durch Versagen des Strumpfes
Gibswil	42 / 65	Gem. geol. Bericht gab es starke Wasserzutritte im Lockergestein ab ca. 24 m Tiefe, es wurden bei beiden EWS im Strumpf ca. 1 m ³ Suspension injiziert bei einem theoretischen Bohrlochvolumen von 0.47 m ³ (ohne Abzug des Sondenvolumen, d.h. in Realität weniger als das)	Injektionsverluste oberflächennah trotz Einbau Strumpf
Winterthur	Ca. 10-30	Injektionsverluste sichtbar auf wenigen Messungen	Injektionsverluste in geologische Formation (OSM)
Umgebung Zürich Süd-West und Uitikon (5 Baustellen, 4 Bohrfirmen, 5 Bohrmeister)	Ca. 10-45 (Mehrheit über 30 %)	Grössere Mehrvolumen bei geringerer Schutzverrohrungstiefe bei zwei der drei Bohrungen (25 - 24 %) als bei der tieferen Schutzverrohrung der dritten Bohrung (13 %) Strumpf bis 32 m Tiefe -> 11 - 15 % Mehrvolumen, eine Fehlmessung & einmal viel Spülwasser nach Messung zum Volumen gerechnet (37 % Mehrvolumen) Mässige Wasserzutritte im Fels verzeichnet gem. Protokoll, min. so viel von oben injiziert wie von unten EWS wurde hauptsächlich von oben hinterfüllt. Gem. Bericht Strumpf bis 22 m Tiefe eingebaut der zerrissen ist, ca. 1 m ³ Suspension im Strumpf injiziert bei einem theoretischen Bohrlochvolumen von 0.43 m ³ (ohne Abzug Sondenvolumen)	Injektionsverluste in geologische Formation (Lockergestein und Fels, Nachinjektion "von oben") (untergeordnet: Fehlmessung, resp. Fehler Messgerät)
Zürich Altstetten (1 Baustelle, 2 Bohrmeister)	-46 bis +47	Bei Mindervolumen Injektion vorwiegend von oben erfolgt bei Mehrvolumen tiefe Verrohrung (140 m) und starke Wasserzutritte bei ca. 78 m Tiefe vermerkt	Unvollständige Hinterfüllung Injektionsverluste im Fels (?)

Fortsetzung Tabelle 1

Ortschaft	Volumenabweichung [%]	Grund	Klassifizierung Problem
Neerach	-36	Injektion nur von oben erfolgt da Injektionsschlauch verstopft	Unvollständige Hinterfüllung
Stäfa (2 Baustellen, 2 Bohrmeister, gleiche Firma)	-10 bis -72	Einbauprobleme in Folge einer instabilen Mergellage (nur ca. Hälfte der Sondentiefe erreicht), zudem Zweifel an der angegebenen Verrohrungstiefe von 180 m sowie an den angegebenen Einbautiefen (Kontrollprotokoll)	Unvollständige Hinterfüllung

Bei der Mehrheit der Beispiele in Tabelle 1 gab es entweder grössere Wasserzutritte, die Schutzverrohrung wurde tiefer gezogen als erwartet, die Hinterfüllung kam nicht nach oben oder unverhältnismässig grosse Volumina wurden im Gewebestrumpf injiziert. Die in Tabelle 1 beschriebenen Beispiele mit einem Mehrvolumen deuten auf Injektionsabflüsse im Untergrund hin.

An den vier Standorten, wo erhebliche Mindervolumen aufgezeichnet wurden, erfolgte die Injektion mehrheitlich von oben her. Zudem wurden in den dazugehörigen Bohrprotokollen Einbauproblem oder Probleme mit verstopften Injektionsschläuchen rapportiert. Bei einer Baustelle bestehen Zweifel an den angegebenen Verrohrungs- und Einbautiefen, da eine kantonale Kontrolle dieser Baustelle gegensätzliche Angaben macht. Bei falschen Angaben im Hinterfüllungsprotokoll würde dies einen erheblichen Einfluss auf die zu hinterfüllenden Volumina (Soll-Volumen) und somit auf die Abweichungen davon haben. Tabelle 2 zeigt ein einfaches Beispiel von verschiedenen Angaben im Hinterfüllungsprotokoll auf die berechneten Soll-Volumina.

Tabelle 2: Beispiel Einfluss Angaben Hinterfüllungsprotokolle auf das Soll-Volumen

Die erste Zeile beinhaltet Daten aus einem der Messprotokolle. Das Hinterfüllvolumen berechnet sich aus dem Soll-Volumen des Bohrlochs abzüglich des Volumens der Sondenrohre und der Injektionsschläuche. Einfachheitshalber wurde hier nur vom theoretischen Bohrlochvolumen ausgegangen.

Bohrtiefe (130 mm) [m]	Verrohrungstiefe (152 mm) [m]	Einbautiefe Sonde [m]	Soll-Volumen Bohrloch ca. [m ³]
300	180	300	4.9
300	180	150	3 (- 40 % von 4.9)
300	60	150	2.4 (- 50 % von 4.9)

Bei Fehlern während der Eingabe der verschiedenen Tiefen im Hinterfüllungsprotokoll können schnell grössere Abweichungen vom tatsächlichen Soll-Volumen entstehen. Ein kleiner Teil der Mindervolumen in Abbildung 11 kann mit solchen Fehleingaben erklärt werden. In der Regel gehen Mindervolumen bei der Hinterfüllung in den in Tabelle 1 dargestellten Beispielen mit einer unvollständigen Hinterfüllung einher. Diese stehen in Zusammenhang mit nicht erreichter Einbautiefe der Sonde oder einer überwiegenden Injektion «von oben».

4.4 Trends und Zusammenhänge Dichte-Volumen

Um weitere Zusammenhänge zu erkennen, wurden die Daten zu den gemessenen Dichten und Volumen zusätzlich zusammen betrachtet. In Abbildung 14 ist einerseits die Abweichung vom Soll-Volumen, als auch die Abweichung von der empfohlenen Herstellerdichte jeweils gegen die Bohrtiefe aufgetragen. Dabei sind die rot markierten Punkte Messdaten, welche das Minimumkriterium nicht

erfüllen (Ist-Volumen gleich oder kleiner Soll-Volumen, Dichte weniger als -2 % Abweichung zur Herstellerempfehlung). Daten, welche die Mindestkriterien erfüllen, sind blau eingefärbt.

Es kann weder bei der Dichte noch beim Volumen ein klarer Trend mit der Bohrtiefe erkannt werden. Daher ist die Bohrtiefe kein bestimmendes Kriterium für Mindervolumen, respektive zu geringe Dichten. Bei den Volumina gibt es mehr Messungen, welche über dem Sollvolumen liegen (69 %) als darunter (31 %). Dies ist bei der Abweichung der gemessenen Dichten vom Hersteller-Soll anders. Hier zeigen 67 % der Messungen eine zu geringe Dichte und nur 33 % erfüllen oder übertreffen die Vorgaben.

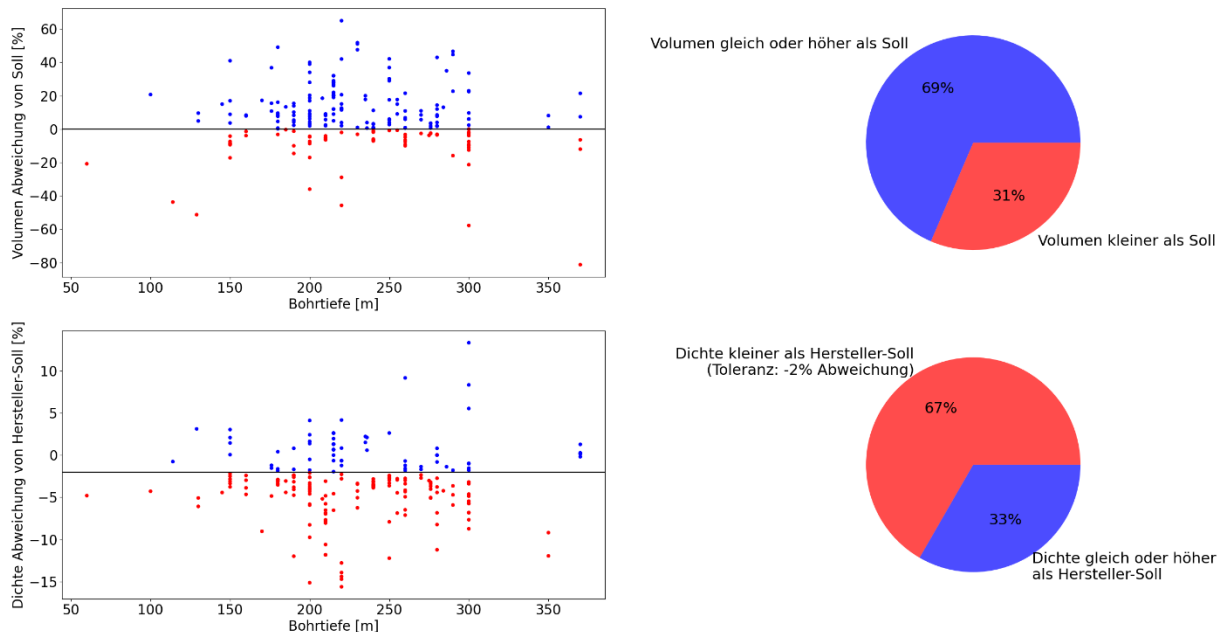


Abbildung 13: Zusammenhänge Abweichungen Volumen/Dichte von Soll vs. Bohrtiefe

Oben: Volumen – Die Abweichung vom Soll-Volumen soll nicht negativ sein (interpretiert als unvollständige Hinterfüllung). Die Mehrheit der Messungen hat keine negative Abweichung zum Soll-Volumen. Unten: Dichte – Die Abweichung vom Hersteller-Soll darf nicht weniger als -2 % betragen. Die Mehrheit der Messungen zeigt eine grössere, negative Abweichung zur Soll-Dichte. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet. Dieselbe Auswertung mit den als «vollständig» (d.h. inkl. Nachinjektion) gewerteten Protokollen ergibt ein analoges Bild: Es ist kein Zusammenhang zwischen Bohrtiefe und Volumenabweichung zum Soll erkennbar.

Bei den Mindervolumen gibt es nur drei Messungen mit einem mehr als 50 % zu geringem Injektionsvolumen. Diese sind alle auf technische Fehler zurückzuführen (entweder nur Teilmessungen oder falsche Angaben Verrohrungsdurchmesser und -tiefe). Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, weist ein Grossteil der Messungen eine Dichte auf, welche mehr als 2 % unter der vom Hersteller vorgegebenen Soll-Dichte liegt. Ob dies ein messtechnisches Problem ist oder ein Versäumnis seitens der Bohrbranche, kann anhand der Daten nicht eindeutig beantwortet werden.

In Abbildung 15 werden die Abweichungen der Ist-Volumen zum Soll-Volumen in Abhängigkeit der Daten der Abweichungen zur empfohlenen Herstellerdichte dargestellt. Nur gerade 24 % der Messungen weisen eine Dichte und ein Volumen auf, welche über den Minimalwerten liegen (blaues Quadrat in Abbildung 14). Über Dreiviertel aller auswertbarer Messungen weist eine zu geringe Dichte, ein zu geringes Volumen oder beides zusammen auf. Dabei wird allerdings noch ausser Acht gelassen, ob die Messungen, welche in die 24 % fallen auch vollständige Messungen darstellen.

Betrachtet man diesen Aspekt zusätzlich, sind es knapp ein Fünftel der Messungen, welche eine komplette und den Kriterien entsprechend korrekte Hinterfüllung zeigen.

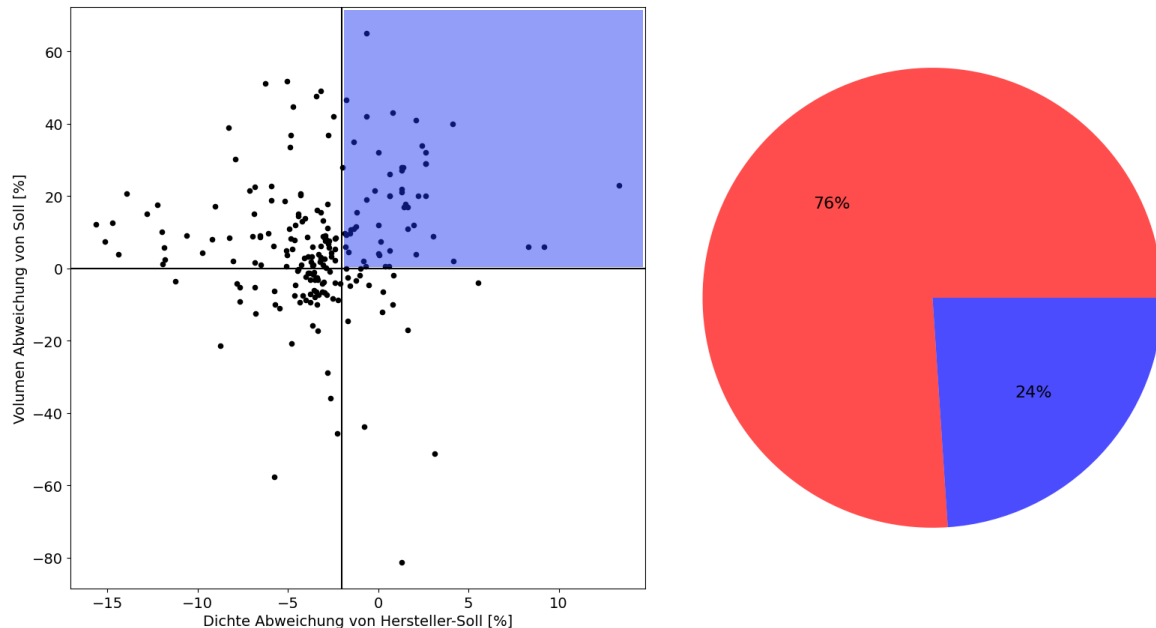


Abbildung 14: Abweichungen von der Soll-Dichte und des Soll-Volumens

Nur die Messungen im blauen Rechteck erfüllen beide Kriterien (24 %). Die restlichen 76 % haben entweder Werte unter der geforderten Herstellersolldichte oder unter dem benötigten Sollvolumen oder beides zusammen. Es wurden die 213 als «brauchbar» definierten Messprotokolle ausgewertet.

5 Diskussion

Die Studie hatte zum Ziel, die dem AWEL vorliegenden elektronischen Hinterfüllmessungen (240 Stück bis Ende 2024) systematisch auszuwerten. Daraus konnten Einblicke in die Praxis gewonnen werden, welche dazu dienen sollen, den Prozess qualitativ zu verbessern. Von den ausgewerteten Hinterfüllmessprotokollen waren 11 % nicht brauchbar und weitere 6 % nur bedingt brauchbar (Teilinformationen verwendbar, resp. händische Korrekturen nötig). Dies lag weitestgehend an unvollständigen und / oder unleserlichen Grafiken, fehlenden Angaben der Durchschnittswerte von Dichte oder Volumen oder Falschangaben.

Es wurden bei rund einem Drittel der Hinterfüllmessprotokolle die vom Hersteller empfohlene Mischvorgaben falsch eingetragen, was dann zu einem Fehler bei der berechneten Abweichung der Durchschnittsdichte von der Soll-Dichte führte. Die offensichtlich nicht korrekte Soll-Dichte der Hinterfüllmessprotokolle wurden für die Auswertung mit den empfohlenen Werten der Herstellerdatenblätter angepasst. Weitere Beispiele für offensichtliche Eingabefehler waren auch bei den korrekten Einbau- und Verrohrungstiefen zu finden. Solche Fehler bei der manuellen Eingabe vor Ort können zum Teil zu verfälschten Werten und erheblichen Abweichungen vom Soll führen.

Solche Eingabefehler sollten vermieden werden, z.B. indem man den Eingabeprozess für den Geräteführer vereinfacht, respektive automatisiert (Auswahl Zementtyp füllt automatisch die Solldichte ein) oder ausserhalb der Baustelle veranlasst (Eingabe durch Projektleiter statt Bohrmeister). Es gab ein Messgerät im Datensatz, welches keine verwendbaren Protokolle lieferte.

Dies war jedoch lediglich zweimal im Einsatz, deren Messungen wurden für die vorliegenden Auswertungen nicht betrachtet.

73 % der Messungen waren unvollständig, das heisst es war keine Nachzementation nach Ziehen der Schutzverrohrung erkennbar. Dies spielt vor allem bei grossen Verrohrungstiefen eine Rolle, wo die Nachinjektion einen erheblichen prozentualen Anteil ausmachen kann. In der Praxis werden nach dem Abteufen aller Bohrungen einer Baustelle oftmals die Bohrlöcher noch mit Zement von oben her nachinjiziert. Dies sieht dann zwar an der Oberfläche nach einer vollständigen Zementation aus, bedeutet aber nicht, dass jedes Bohrloch auch vollständig hinterfüllt wurde. Die Nachinjektion müsste also direkt im Anschluss an das Ziehen der temporären Verrohrung stattfinden und ebenfalls mittels eines Messgerätes erfasst werden. Der Bediener vor Ort müsste dazu das Hinterfüllmessgerät eingeschaltet lassen und erst nach der Nachinjektion die Messung beenden oder alternativ für die Nachinjektion ein zweites Messprotokoll erstellen. Hier sind dringend Verbesserungen nötig, da ansonsten die Protokolle keine umfassende Darstellung über Abweichungen in Bezug auf das injizierte Volumen liefern können.

Bei den Dichtemessungen wurde eine statistische Abhängigkeit vom eingesetzten Messgerät erkannt. Bei dem mehrheitlich eingesetzten Messgerät (MG 1) wurde bei rund 19 % der Messungen die von der SIA 384/6:2021 geforderten Mindestdichten (innerhalb der Toleranz von -2 %) nicht erreicht und bei allen eingesetzten Baustoffen im Mittel eine zu geringe Dichte gemessen. Eine «Dichte-Nullmessung» (Messung der Dichte von Wasser) zum Start oder am Ende der Aufzeichnung würde Vertrauen schaffen, ob die tatsächliche Messung die korrekte Dichte wiedergibt oder ob ein messtechnischer Fehler vorliegt. Alternativ könnten Vergleichsmessungen mit mehreren Gerätetypen systematisch erfolgen, um einen Vergleich zu schaffen und dem Problem eindeutig auf den Grund zu gehen.

In einigen Fällen mit aufgezeichneter Nullmessung wurde zum Teil das Volumen des Wassers zum Totalvolumen hinzuaddiert. In wenigen Fällen in dieser Studie war dieses Volumen erheblich und hatte einen grossen Einfluss auf die Abweichung zum Soll-Volumen. Da Wasser die Kriterien einer Hinterfüllung nicht entspricht, sollte dies entsprechend nicht zum Hinterfüllvolumen hinzugerechnet werden.

Positiv war die Erkenntnis, dass der Grossteil der Messungen mit konstantem Durchfluss und konstanter Dichte, sowie einem kontinuierlichen Anstieg des Drucks im Injektionsrohr stattfand. Dies sind Indizien für konstante Hinterfüllprozesse und Injektionen, welche von der Bohrlochsohle zur Oberfläche verlaufen. Es gibt ein paar wenige Messungen, bei denen ein vermutetes Unterdruckproblem als Ursache für einen nicht konstanten Durchfluss und Dichte verantwortlich gemacht werden kann.

Da es teilweise schwierig bis unmöglich war, die verschiedenen Messgrössen aus den Grafiken zu lesen, besteht Verbesserungsbedarf in der graphischen Darstellung bei einer Mehrheit der Messgeräte. Die Grafiken sollten so skalierte Achsen haben, dass andere Parameter nicht unnötig gestaucht und somit praktisch unleserlich gemacht werden. Zudem gehören die Angaben der Durchschnittswerte (Dichte und Volumen) auf die Protokolle, was ebenfalls nicht überall der Fall war und solche Protokolle somit als "nicht verwendbar" klassifiziert werden mussten.

Es besteht ein erhärteter Verdacht, dass einige Hinterfüllprozesse nach Erreichen des Soll-Volumens (100 %) abgebrochen werden, egal ob die Suspension an der Oberfläche erscheint oder nicht. Dies wurde auch bei vereinzelt Beobachtungen vor Ort festgestellt. Wird der Injektionsprozess frühzeitig abgebrochen, also ohne, dass die Suspension am Bohrloch austritt, bedeutet dies, dass das Bohrloch nicht vollständig hinterfüllt ist. Anhand einzelner Beispiele (s.

Tabelle 1) wurde bei einigen Messprotokollen mit Mehrvolumen ein Zementabfluss im Untergrund als wahrscheinlich identifiziert. Betrachtet man den gesamten Datensatz analog den Beispielen, d.h. grössere Injektionsmengen (über 10 % vom Soll-Volumen) deuten auf Zementabflüsse im Untergrund hin, könnten ca. 40 % aller betrachteter Hinterfüllungen im Untergrund Abflüsse aufweisen (vergleiche Abbildung 10 «unvollständige Messungen» mit positiven Abweichungen ab ca. 5 % und «vollständige Messungen» mit positiven Abweichungen ab ca. 10 %).

Da es sowohl für den Grundwasserschutz als auch für die energetische Anbindung der Sonden an das Erdreich wichtig ist, dass die Hinterfüllung lückenlos und vollständig eingebracht wird, ist es essenziell, dass Bohrmeister darauf geschult werden, die Injektionen nicht frühzeitig abubrechen (gem. SIA 384/6:2021 sind bis zu 200 % des Soll-Volumens vertretbar). Sollte jedoch während dem Hinterfüllvorgang klar ersichtlich sein, dass die Hinterfüllung vollständig abfließt und im Bohrloch nicht mehr ansteigt, wird dennoch empfohlen die Hinterfüllung auch vor Erreichung von 200 % abubrechen und auf Ersatzmassnahmen zu wechseln (z.B. Stufenzementation, Verwendung von Zusatzstoffen in der Suspension). Bei den weiteren Sonden sind entsprechende Massnahmen zu treffen. Das Soll-Volumen sollte aber in jedem Fall mindestens hinterfüllt werden.

Im Gegenzug zu den beobachteten Mehrvolumen wurden auch einige Messungen mit Mindervolumen verzeichnet. Die Analysen einiger ausgewählter Fallbeispiele zeigen, dass ein nicht vollständiger Einbau der Sonde in Zusammenhang mit grossen Mindervolumen stand. Zu einem kleineren Teil waren auch Fehleingaben dafür verantwortlich. Können Sonden nicht bis zur Endteufe eingebaut werden, steht auch das Ende des Injektionsschlauches nicht auf Endteufe. Allfälliges Grund- und Bohrwasser in der offenen Bohrstrecke ohne Erdwärmesonde wird dabei durch die Hinterfüllung nicht verdrängt. Das Problem von nicht erreichten Einbautiefen kann nicht generell gelöst werden. Jedoch sollte in solchen Fällen die Eingabe am Messgerät für die Bohrloch- und Einbautiefe der Realität angepasst werden (d.h. anstatt der tatsächlich gebohrten Meter ist die Bohrlochtiefe auf die Einbautiefe zu korrigieren). Damit ergibt sich ein akkurateres Bild über die lückenlose Hinterfüllung der Sonde, auch wenn der untere (offene) Teil des Bohrloches so ignoriert wird.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass kein Zusammenhang zwischen Bohrtiefen und Abweichungen der Dichte oder des Volumens vom Soll besteht. Dabei ging ebenfalls hervor, dass die empfohlenen Herstellerdichten eher nicht eingehalten wurden (ob dies am Messgerät liegt oder tatsächlich an der Anmischung der Hinterfüllung konnte nicht abschliessend beurteilt werden), hingegen wurde das Soll-Volumen beim Grossteil der Messungen erreicht oder übertroffen. Trotzdem erfüllten nur knapp ein Viertel der Messungen beide Kriterien. Und nur ca. ein Fünftel dieser Messungen war gemäss den hier definierten Kriterien auch vollständig. Da somit nur ca. 20 % aller auswertbaren Messprotokolle eine Bewertung als «korrekte» Hinterfüllung zeigen, besteht noch einiges an Raum für Verbesserungen. Bei tatsächlich auch durchgeführter Nachinjektion wären die Volumina höher als das, was tatsächlich aufgezeichnet wurde.

6 Schlussfolgerungen

Die Studie konnte einen Einblick in die Praxis seit Einführung zur digitalen Hinterfüllmessung bei Erdwärmesondenbohrungen gewähren. Abschliessend können die nachträglich aufgeführten Schlussfolgerungen aus dieser Arbeit zusammengefasst werden:

- Die Auflagen wurden grundsätzlich akzeptiert und von den Bohrfirmen umgesetzt, auch wenn der Rücklauf der Protokolle noch nicht reibungslos funktioniert. Von den Bohrfirmen wurden lediglich 38 % der geforderten Messprotokolle selbstständig eingereicht.

- Sämtliche eingegangenen Protokolle beinhalten die Dichte- und Volumenmessung, d.h. von der "Rückfalloption" mit der Volumenmessung zusammen mit einer Probennahme / Dichtemessung per Waage wurde nicht Gebrauch gemacht. Im Sinne einer Übergangslösung für den Einsatz reiner Volumenmessgeräte kann diese Option aus den Nebenbestimmungen gestrichen werden.
- Ein einheitlicher Vergleich und ein abschliessendes Fazit zur Hinterfüllqualität ist momentan nicht möglich. Rein formell können nur 20 % der auswertbaren Protokolle als gemäss den in dieser Studie definierten Kriterien als korrekt eingestuft werden. Jedoch besteht der Verdacht, dass die Hinterfüllarbeiten sich anhand der Messprotokolle schlechter darstellen, als sie wirklich wären. D.h. schon mit geringem Aufwand wären grosse Verbesserungen möglich.

Der Handlungsbedarf zielt hauptsächlich auf die **Verbesserung der Qualität der Messungen und Protokollierung**. D.h. Aussagen zur Verbesserung der Handhabung des Baustoffs selbst (insbesondere die Eignung einzelner Fertigmischungen und Mischungsverhältnisse) können anhand dieser Studie nicht abgeleitet werden.

Die Verbesserung der Qualität der Messprotokolle bedingt in erster Linie **operationelle Anpassungen** auf der Bohrstelle:

- Messung des gesamten Hinterfüllvorgangs, inkl. Nachverfüllung
- Korrekte Eingabe der Parameter und «ad-hoc» Anpassen der Parameter bei Abweichungen (Bohrtiefe/Einbautiefe nicht erreicht, unterschiedliche Rohrtiefen im gleichen Auftrag etc.)
- Handhabung der Messgeräte und richtige Interpretation der Anzeigen

Diese Anpassungen erfolgen vorzugsweise über eine Sensibilisierung der Geräteführer, z.B. über gezielte Schulungen und in der fortlaufenden Weiterbildung.

Zusätzlich sollten auch seitens Messtechnik folgende Anpassungen zur Qualitätssteigerung führen:

- Standardisierung des Inhalts und der Darstellung der Messprotokolle
- Definition eines Standardvorgehens, insbesondere soll geprüft werden, ob eine «Dichte-Nullmessung» (Wasser) pro Messvorgang eingeführt werden soll.
- Vereinfachung der Eingaben (z.B. Auswahl Baustoff füllt automatisch die empfohlene Dichte aus)
- Vergleichsmessungen mit verschiedenen Geräten, um das Vertrauen in die Messtechnik selbst zu stärken (wie dies z.B. auch für Bohrlochverlaufsmessungen und Thermal Response Tests in der Vergangenheit gemacht wurde (Badoux et al. 2017))

Obiger Handlungsbedarf bezüglich Standardisierung soll als Verbundsaufgabe zwischen den Messfirmen, Bohrfirmen, Branchenvertreter und Kantonen angegangen werden.

Die elektronische Aufzeichnung des Hinterfüllvorgangs ist Teil des Trends zur vermehrten messtechnischen Dokumentation des «Werkes» Erdwärmesonde. Dieses ist nach Fertigstellung im Untergrund nicht mehr zugänglich, so dass eine möglichst vollständige Dokumentation der «Werkerstellung» vermehrt von der Bauherrschaft und Planer gefordert wird. Bezüglich Grundwasserschutz liegt der behördliche Fokus bei der Dokumentation der Hinterfüllarbeiten in Grund- und Quellwassergebieten. Eine saubere Dokumentation dient somit dem Vertrauen in das Werk und die Technologie im Allgemeinen. Das Erkennen von Unregelmässigkeiten soll als Chance erkannt werden, wo nötig Anpassungen vornehmen zu können und soll nicht als Fehler gewertet werden.

Literaturverzeichnis

BAFU, 2009: *Wärmenutzung aus dem Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung*. Umwelt-Vollzug Nr. 0910. Bundesamt für Umwelt, Bern. 51 S.

Badoux, V., Ritter, U., Fischer, H. & Soom, M., 2017: *Qualitätssicherung Erdwärmesonden. Temperatur-, Verlaufsmessungen und Thermal Response Tests in Erdwärmesonden*. Schlussbericht Nr. 1316084.2a. EnergieSchweiz / GEOTEST AG, Zollikofen. 36 S.

Ebert, A., 2018: *Bericht "Hinterfüllbaustoffe von Erdwärmesonden". Analyse und Statistik vom Markt, Anforderungen, Merkmalen und Qualität der in der Schweiz eingesetzten Hinterfüllbaustoffen*. Schlussbericht. EnergieSchweiz, Ittigen. 52 S.

Personenkreis Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde der Ad-hoc Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie, 2015. *Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde*. Bund/Länderarbeitsgruppe der Staatlichen geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer, 64 S.

SIA 384/6:2021, 2021: *Erdwärmesonden*. Schweizer Norm 546 384/6 Bauwesen gültig ab 01.05.2021, SIA Zürich. 104 S.