

Schlussbericht, 1. Dezember 2015

Evaluation der Dichtheitsprüfung für Erdwärmesonden nach SIA 384/6



energieschweiz

Unser Engagement: unsere Zukunft.

Autoren

Thomas Mégel, Geowatt AG

Sarah Signorelli, Geowatt AG

Ernst Rohner, Geowatt AG

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Adresse

Geowatt AG, Dohlenweg 28, CH-8050 Zürich,

Tel. 044 242 14 54, Fax 044 242 14 58, info@geowatt.ch, www.geowatt.ch

Inhalt

1.	Einleitung	2
2.	Durchführung der Dichtheitsprüfung nach SIA 384/6	3
3.	Untersuchter Datensatz	4
3.1	Streuung nach Gerätenummer	6
3.2	Streuung nach Bohrmeister	7
4.	Auswertung von 475 elektronisch erfassten Dichtheitsmessungen	11
4.1	Auswertungsziele	11
4.2	Hinterfüllungsart	12
4.3	Sondenhersteller	13
4.4	Hinterfüllungsmenge	14
4.5	EWS-Länge	14
4.6	Zeitpunkt der Prüfung nach Hinterfüllung	15
4.7	Prüfdruck	16
4.8	Druckabfall während der Ruhephase	16
4.9	Abgelassene Wassermenge	17
4.10	Geografischer Standort der Bohrung	18
4.11	Zusammenfassung	19
5.	Empfehlungen	20
5.1	Empfehlung für die Durchführung von Dichtheitsprüfungen	20
5.2	Empfehlung für die Anpassung des Grenzwerts der Hauptprüfung	20
5.3	Durchführung weitergehender Untersuchungen	20
	Anhang: Autonomes Durchfluss- und Dichtheitsprüfgerät DPG-C3	21

1. Einleitung

Im Januar 2010 trat die SIA-Norm 384/6 "Erdwärmesonden" in Kraft. In dieser Norm ist u.a. festgelegt, wie die Dichtheit einer Erdwärmesonde zu prüfen ist, nämlich "Die Erdwärmesonde muss unmittelbar nach dem Einbringen der Hinterfüllung mit einem Kontraktionsverfahren in Anlehnung an SN EN 805 auf Dichtheit geprüft werden." Das anzuwendende Verfahren wird in der Norm ausführlich beschrieben.

Die Dichtheit einer Sonde wird anhand der sogenannten Hauptprüfung beurteilt. Während dieser letzten Phase der Prüfung darf der Druck nach heutiger SIA-Norm 384/6 nicht mehr als 0.1 bar abfallen. Die Praxis hat nun gezeigt, dass während dieser Beurteilungsphase der Druck auch um etwas mehr abfallen kann, obschon die Sonde dicht ist.

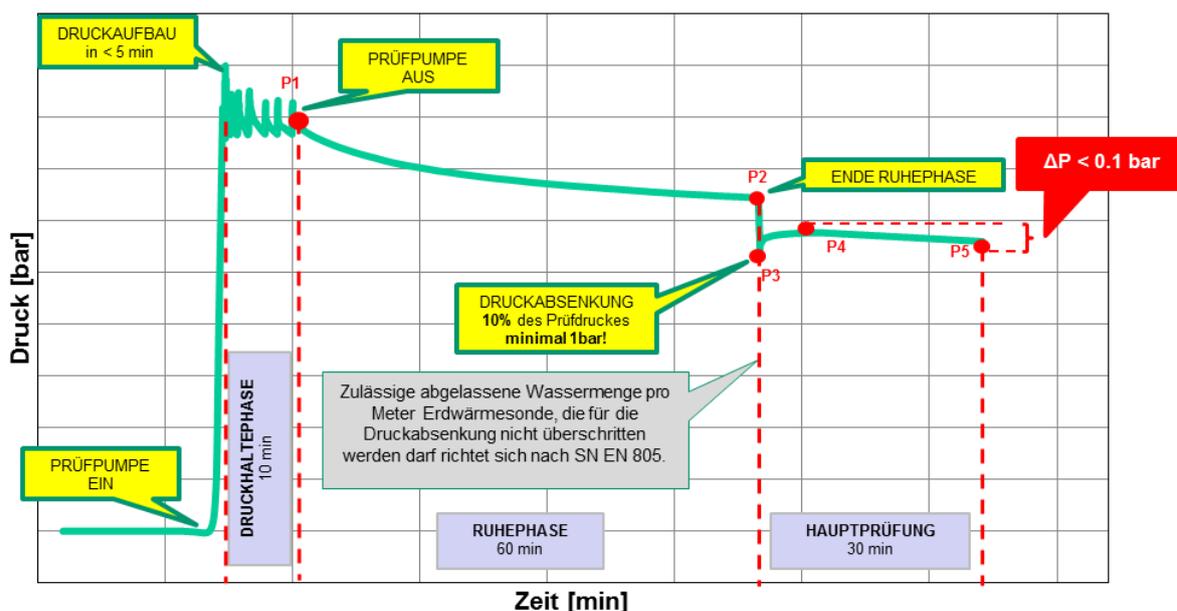
Es scheint so, dass die Druckkurve der Hauptprüfung, anhand derer die Dichtheit der Sonde evaluiert wird, gewisse Abhängigkeiten zu verschiedenen Randbedingungen aufweisen. Es wäre wünschenswert, die Eindeutigkeit der Dichtheitsprüfung zu verbessern. Dazu soll im Rahmen des vorliegenden Projekts ermittelt werden, ob die Druckkurve während der Hauptprüfung Abhängigkeiten zu gewissen Parametern des Bohrlochs oder Standorts aufweist. Ist dies der Fall, so müsste das Prüfkriterium eines maximalen Druckabfalls von 0.1 bar während der Hauptprüfung in Abhängigkeit der ermittelten sensitiven Parametern spezifischer definiert oder der Bereich des maximal zulässigen Druckabfalls erweitert werden.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll anhand von Messdaten als erstes ermittelt werden, ob es gewisse Abhängigkeiten des Prüfergebnisses mit andern Parametern gibt. Dazu sollen folgende Abklärungen durchgeführt werden:

1. Ermittlung der technischen Schwierigkeiten bei der Durchführung der in SIA 384/6 geforderten Dichtheitsprüfung,
2. Zusammenstellung von bestehenden, elektronisch erfassten Dichtheitsmessungen zur Feststellung von allfälligen Korrelationen zwischen Druckkurvenform und Sonden- und Bohrlochparametern.
3. Empfehlungen, Handlungsbedarf und Zielsetzungen für ein weiteres Vorgehen

2. Durchführung der Dichtheitsprüfung nach SIA 384/6

Sinn und Zweck der Dichtheitsprüfung nach SIA 384/6 ist ein verlässliches Prüfergebnis zur Dichtheit eines in einem Bohrloch eingebauten PE-U-Rohrs, das innerhalb einer verhältnismässig kurzen Prüfzeit gewonnen werden kann. So kann sichergestellt werden, dass bereits vor der Demobilisierung der Bohranlage die Qualitätsprüfung der Erdwärmesonden auf einer Baustelle vorliegt.



Figur 2-1: Vorgeschriebener Prüfablauf der Dichtheitsprüfung nach SIA 384/6. Das Prüfkriterium ist der Druckabfall während der Hauptphase, der 0.1 bar nicht überschreiten darf.

Die Durchführung der Dichtheitsprüfung hat verschiedene Herausforderungen:

- Die Prüfung dauert total 100 Minuten, während dem eine konzentrierte Durchführung der Prüfung erforderlich ist.
- Sie muss unmittelbar nach der Hinterfüllung der Sonde erfolgen, was oft gegen Abend geschieht.
- Die abgelassene Wassermenge nach der Ruhephase muss genau registriert werden.
- Die Druckmessung muss eine Auflösung von 0.01 bar aufweisen.
- Die Prüfgarnitur muss absolut druckdicht angeschlossen sein.

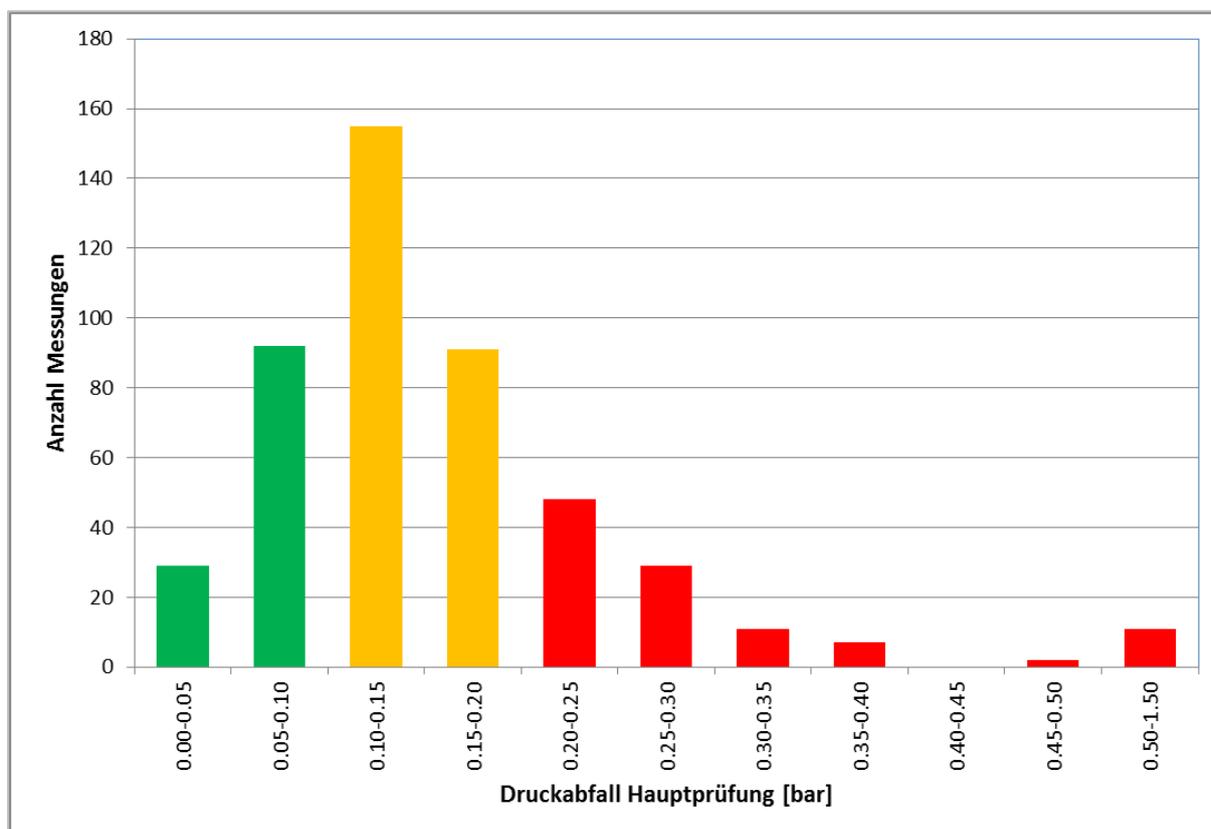
Trotz dieser hohen Anforderungen hat sich die Dichtheitsprüfung in der Praxis gut bewährt. Die Alternative zu dieser Dichtheitsprüfung wäre nur ein Langzeitdrucktest, der an jeder Erdwärmesonde über mindestens eine Woche dauern muss.

3. Untersuchter Datensatz

Für die Ermittlung von allfälligen Korrelationen zwischen dem Prüfkriterium und den Prüfparametern muss sichergestellt sein, dass der Datensatz aus möglichst gleichartig gemessenen Druck- und Durchflussdaten besteht. Als Hersteller des Prüfgeräts für Erdwärmesonden DPG-C3 (vgl. Anhang) verfügt die Geowatt AG über einen grossen Bestand an Messungen von Kunden, die die Dichtheitsprüfungen mit diesem Gerät durchführen. Das Prüfgerät DPG-C3 führt die Spülung, Durchflussprüfung und Dichtheitsprüfung vollautomatisch in dieser Reihenfolge durch. Dadurch ist sichergestellt, dass alle Prüfungen gleichartig und mit derselben Qualität entsprechend der Normvorgabe durchgeführt sind.

Nach Rücksprache mit den Kunden dürfen diese Daten anonymisiert für die vorliegende Studie verwendet werden. Es konnten 475 Druckprüfungen ausgewertet werden, die mit 15 verschiedenen Prüfgeräten zwischen dem Mai 2013 und dem September 2015 durchgeführt wurden.

Gemäss Bohrfirmen ist von keiner der 475 ausgemessenen Erdwärmesonden bekannt, dass sie leckt. Es kann somit angenommen werden, dass alle Messungen dichte Erdwärmesonden repräsentieren. Wie die statistische Verteilung aller 475 Prüfungen zeigt, liegen 25% aller Prüfungen unterhalb des Druckabfalls von 0.1 bar, 77% aller Prüfungen liegen unterhalb von 0.2 bar.



Figur 3-1: Verteilung des Druckabfalls während der Hauptprüfung von 475 Messungen mit 15 verschiedenen Prüfgeräten. Grün: Anzahl Prüfungen unter 0.1 bar Druckabfall; Gelb: zwischen 0.1 und 0.2 bar; Rot: über 0.2 bar

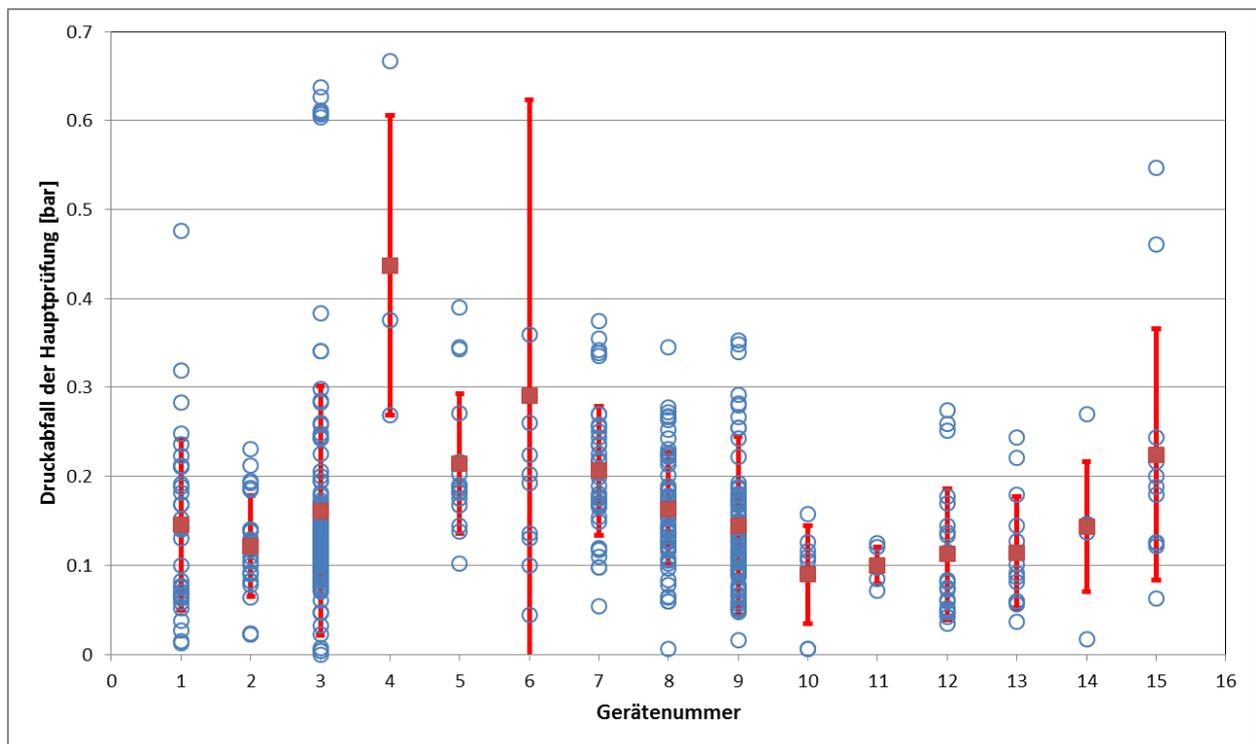
Zuerst wird analysiert, ob der vorliegende Datensatz für die Untersuchung repräsentative Messungen enthält. Dazu wird untersucht, ob es eine Abhängigkeit des Prüfergebnisses vom verwendeten Gerät (Gerätenummer) oder vom Bohrmeister gibt.



Figur 3-2: An eine EWS angeschlossenes Prüfgerät DPG-C3

3.1 Streuung nach Gerätenummer

Die vorhandenen Messungen wurden mit 15 Geräten durchgeführt, die je zwischen 3 und 135 Messungen zum Datensatz beitragen. Es fällt auf, dass grosse Druckabfälle durch Geräte gemessen wurden, mit denen nur eine geringe Zahl von Messungen durchgeführt wurden. Dieser Umstand scheint auf eine Erfahrungskomponente des Bohrpersonals hinzudeuten. Allgemein kann aber festgehalten werden, dass es keine Korrelation zwischen den Messgeräten und dem Druckabfall während der Hauptprüfung gibt. Alle Messgeräte steuern gleich gute Messungen zum Datensatz bei.

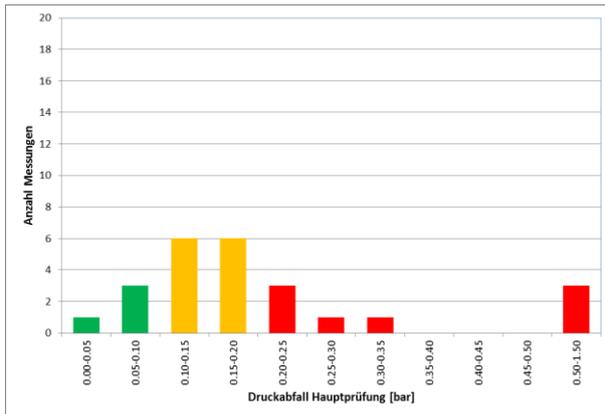


Figur 3-3: Druckabfälle während der Hauptprüfung für jedes Prüfgerät, rot: Mittelwert mit Standardabweichung

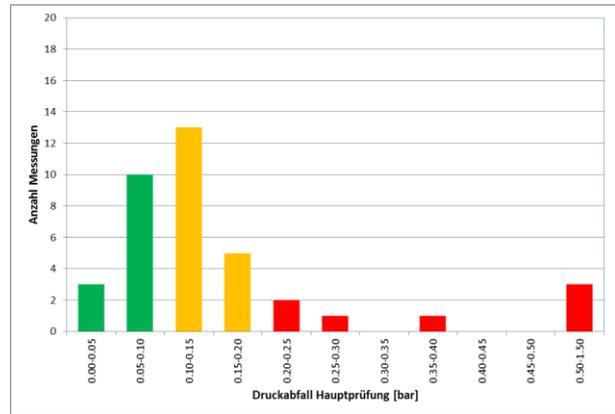
3.2 Streuung nach Bohrmeister

Weiter wird untersucht, ob es eine Korrelation zwischen guten Prüfergebnissen und dem ausführenden Bohrmeister gibt. Es zeigt sich, dass die Druckabfälle eine Standardverteilung aufweisen, analog der Verteilung aller Messungen in Figur 3-1. Diese Verteilung stellt sich umso eher ein, je mehr Messungen ein Bohrmeister durchgeführt hat.

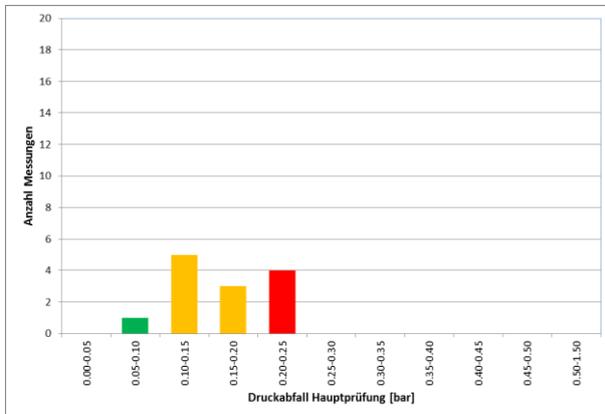
Bohrmeister 1:



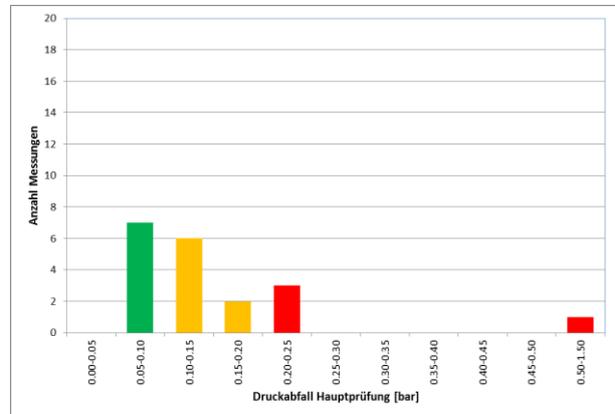
Bohrmeister 3:



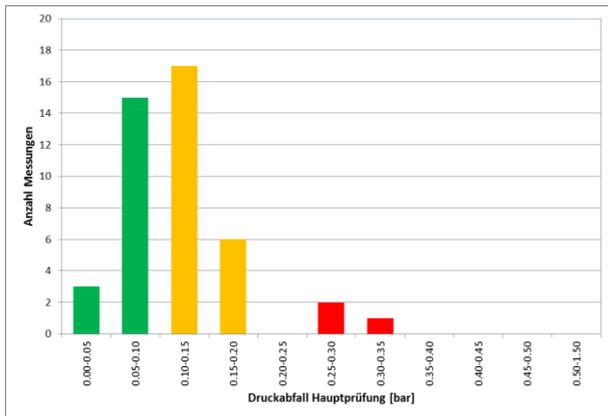
Bohrmeister 5:



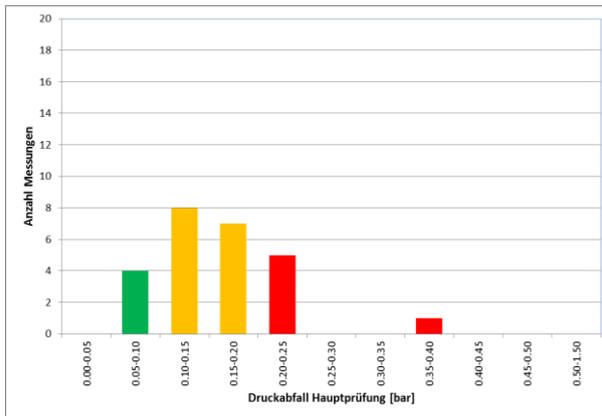
Bohrmeister 6:



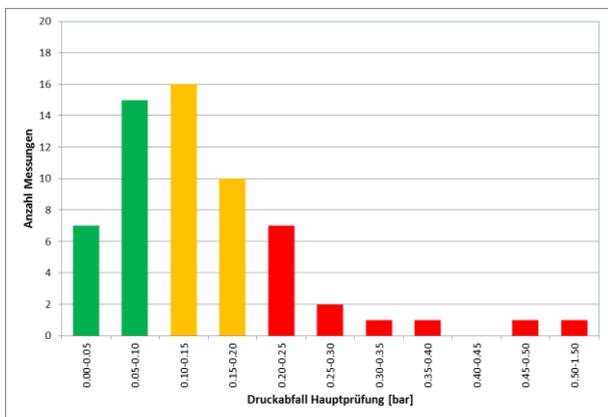
Bohrmeister 8:



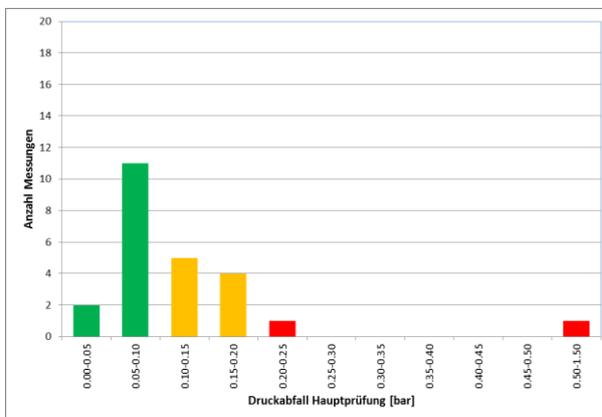
Bohrmeister 10:



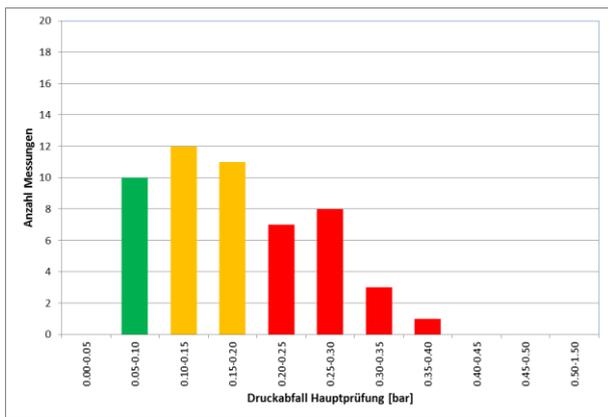
Bohrmeister 11:



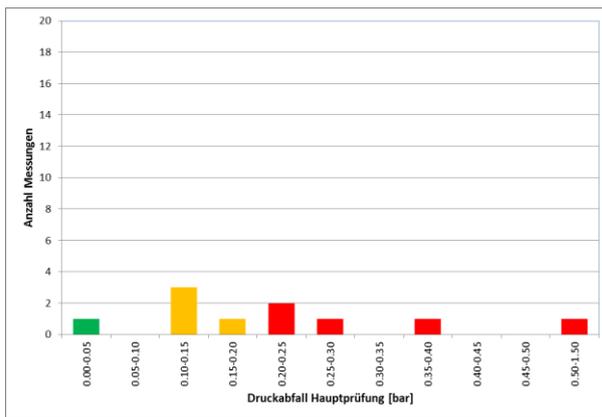
Bohrmeister 14:



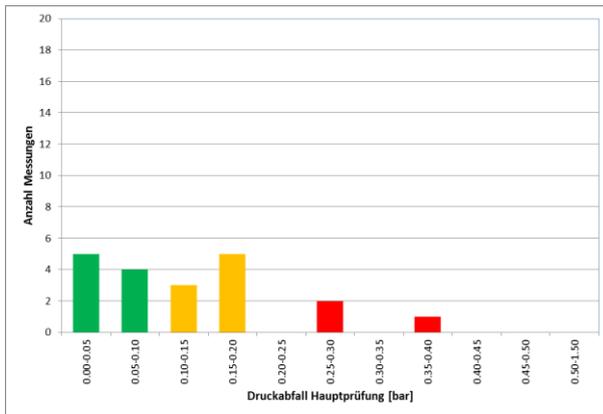
Bohrmeister 16:



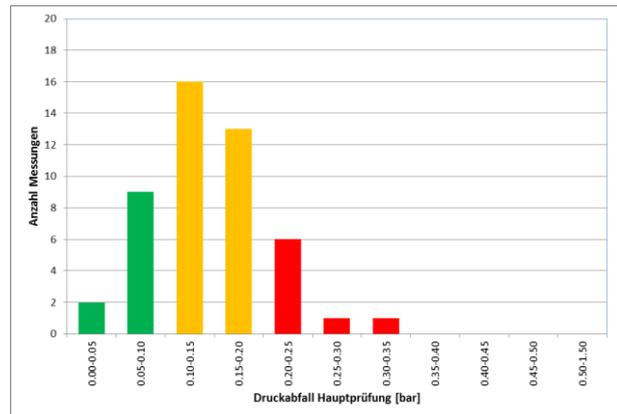
Bohrmeister 17:



Bohrmeister 21:

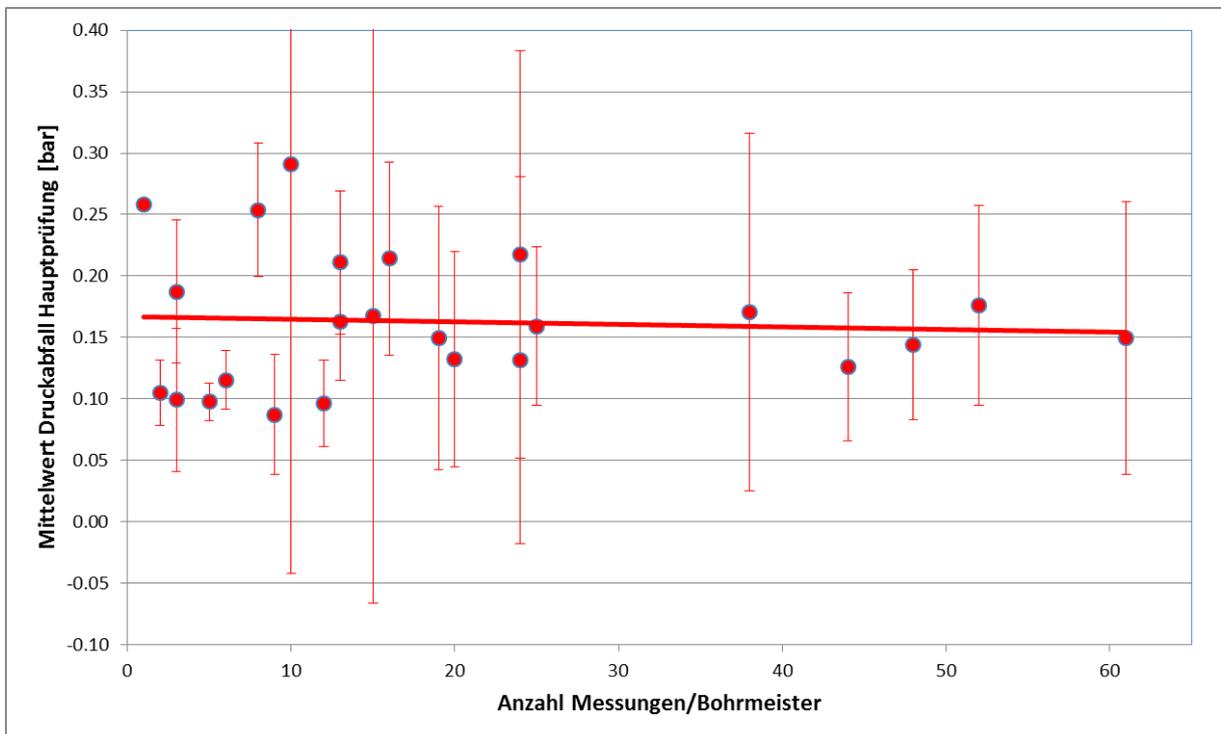


Bohrmeister 23:



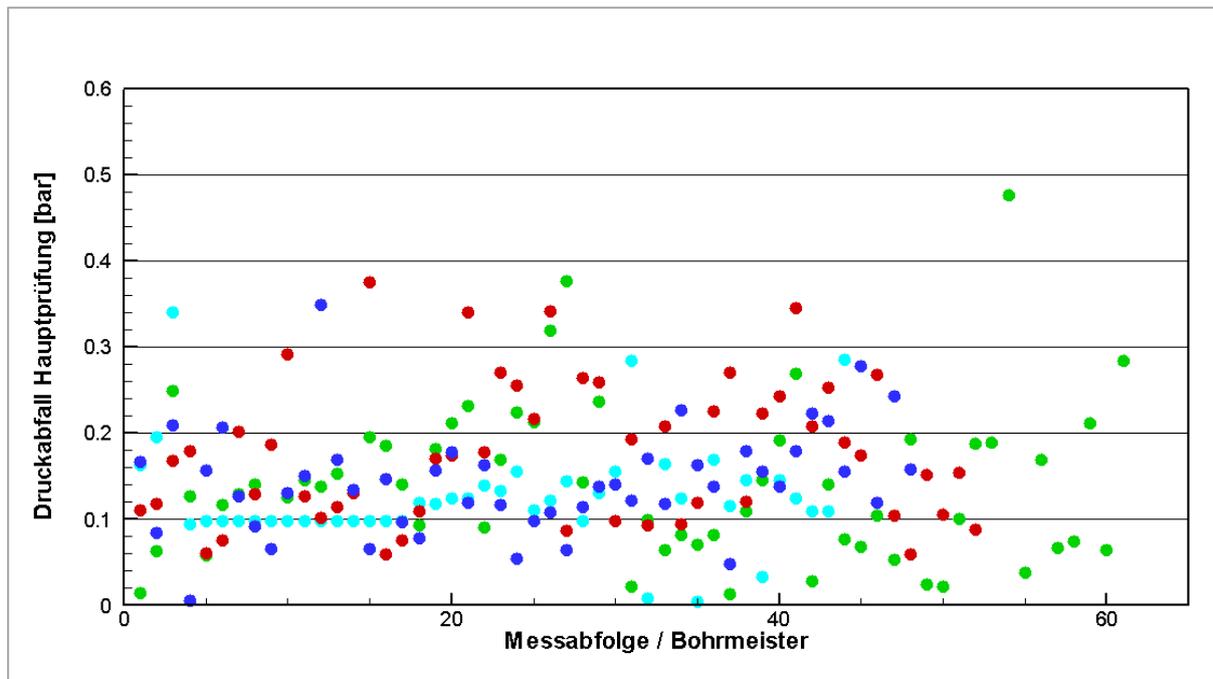
Figur 3-4: Druckabfälle während der Hauptprüfung für 12 verschiedene Bohrmeister

Die nachstehende Figur mit dem Mittelwert der Druckabfälle als Funktion der Anzahl durchgeführter Messungen pro Bohrmeister zeigt, dass sich der Mittelwert des Druckabfalls bei einer grossen Anzahl an Messungen bei 0.15 bar einstellt.



Figur 3-5: Mittelwert der Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der Anzahl durchgeführter Messungen pro Bohrmeister

Es zeigt sich weiter, dass die Druckabfallwerte über die gesamte Abfolge von Messungen eines Bohrmeisters ähnlich variieren. Es tritt mit der Zeit weder eine Verschlechterung noch eine Verbesserung der Druckabfallwerte ein.



Figur 3-6: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der zeitlichen Messabfolge für 4 verschiedene Bohrmeister, die je mehr als 40 Messungen durchgeführt haben

Der Datensatz zeigt weder eine Korrelation der Hauptprüfung mit dem eingesetzten Messgerät, noch mit dem ausführenden Bohrmeister. Der Datensatz weist somit keine systematischen Fehler auf, die auf das Prüfgerät oder den Anwender zurückzuführen sind. Er kann deshalb als für die Untersuchung repräsentativ angesehen werden.

4. Auswertung von 475 elektronisch erfassten Dichtheitsmessungen

4.1 Auswertungsziele

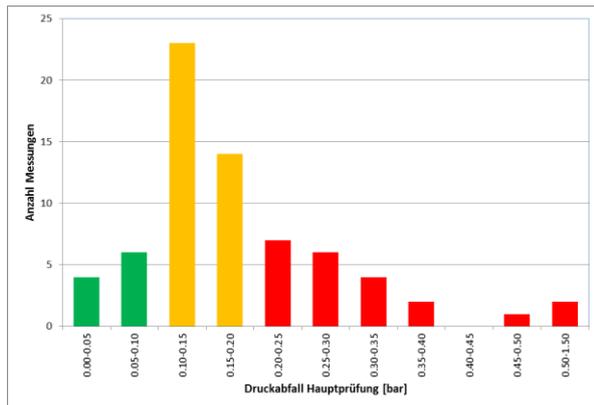
Im Folgenden werden die 475 Datensätze in Bezug auf eine Korrelation des Druckabfalls der Hauptprüfung mit einer der nachstehenden Grössen statistisch ausgewertet:

- Hinterfüllungsart
- Sondenhersteller
- Hinterfüllungsmenge
- EWS-Länge
- Zeitpunkt der Prüfung nach Hinterfüllung
- Angewandter Prüfdruck
- Druckabfall in der Ruhephase
- Abgelassene Wassermenge
- Geographie

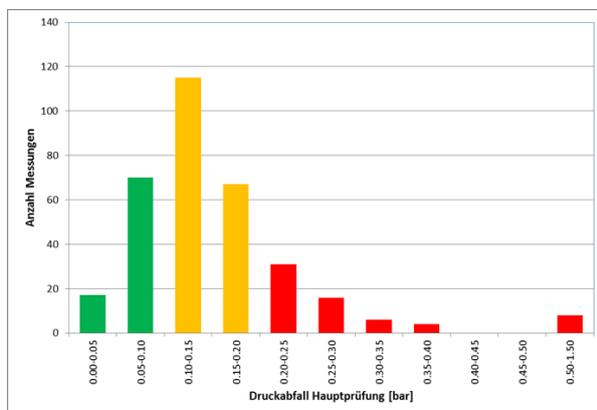
4.2 Hinterfüllungsart

Die meisten Messungen wurden mit verbesserter Hinterfüllung Produkt 1 durchgeführt, gefolgt von der klassischen „Standardhinterfüllung“. Es ist keine Abhängigkeit der Prüfergebnisse von den Hinterfüllungsmaterialien erkennbar.

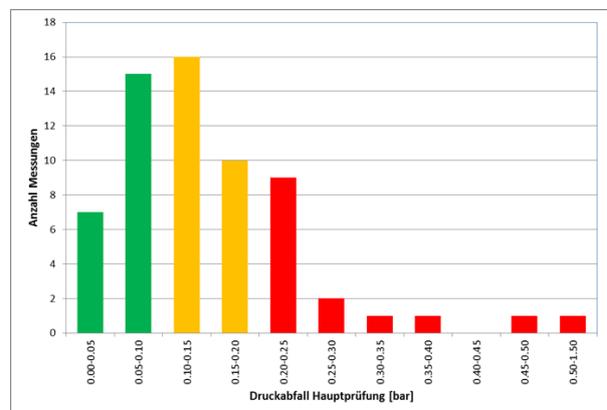
Standard-Hinterfüllung:



Verbesserte Hinterfüllung, Produkt 1:



Verbesserte Hinterfüllung, Produkt 2:

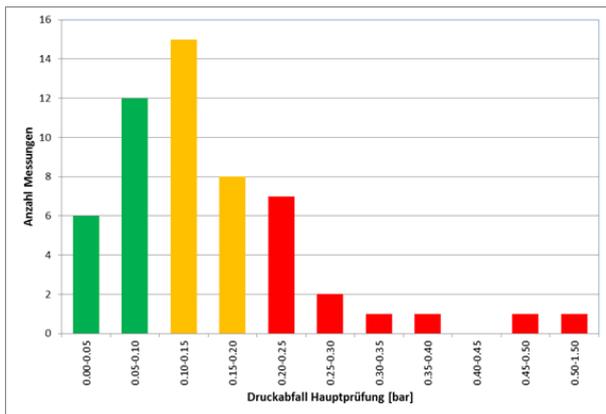


Figur 4-1: Druckabfälle während der Hauptprüfung für 3 verschiedene Hinterfüllungsmaterialien

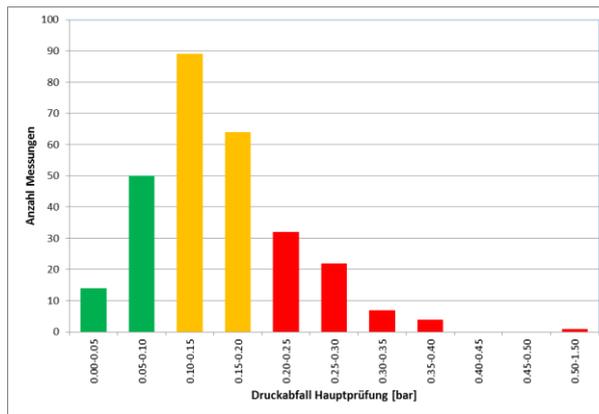
4.3 Sondenhersteller

Die verschiedenen Hersteller der PE Rohre verwenden PE-Granulat von unterschiedlichen Produzenten. Das Material fühlt sich nicht immer gleich an, obwohl es von der Spezifikation PE-100 RC SDR 11 ist. Dennoch ist kein signifikanter Zusammenhang zwischen den Prüfergebnissen und den Herstellern erkennbar.

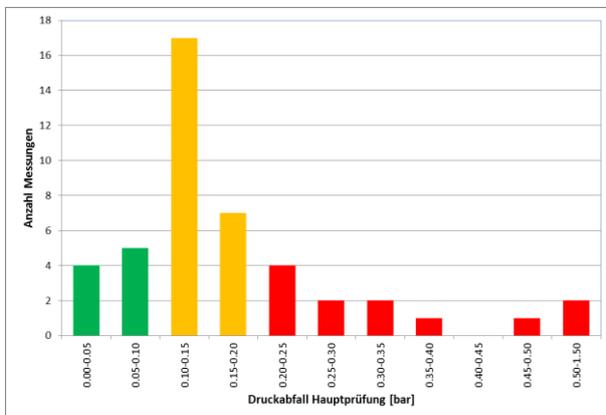
Sondenrohr Hersteller 1:



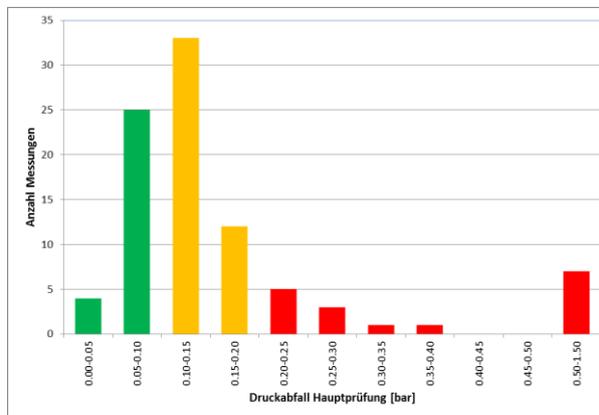
Sondenrohr Hersteller 2:



Sondenrohr Hersteller 3:



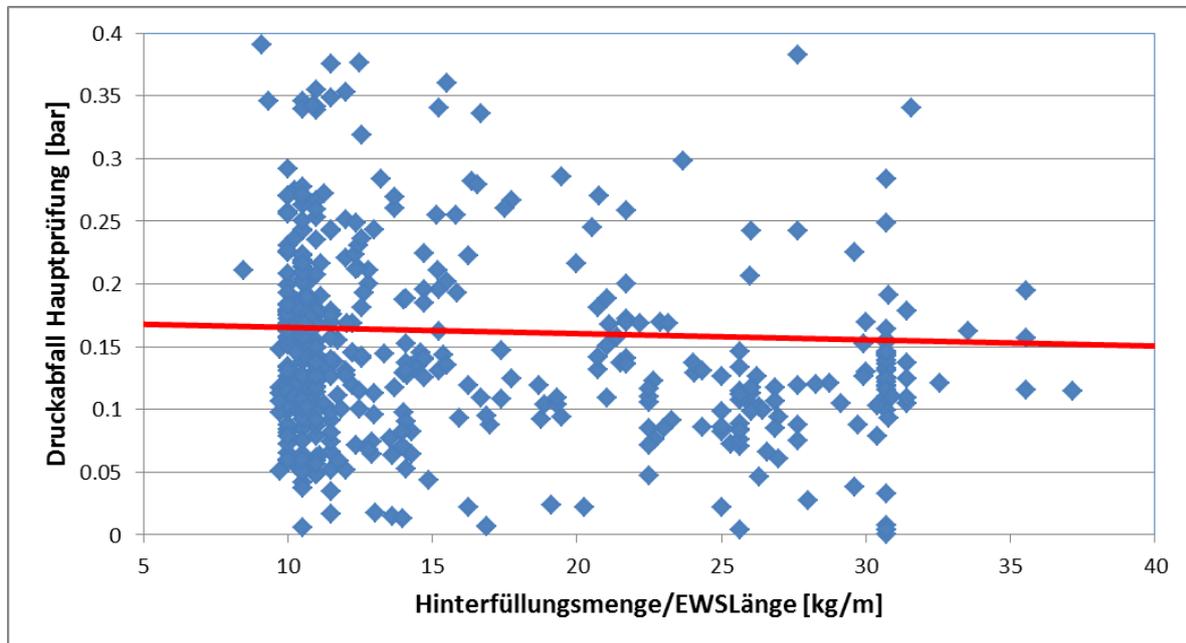
Sondenrohr Hersteller 4:



Figur 4-2: Druckabfälle während der Hauptprüfung für 4 verschiedene Sondenhersteller

4.4 Hinterfüllungsmenge

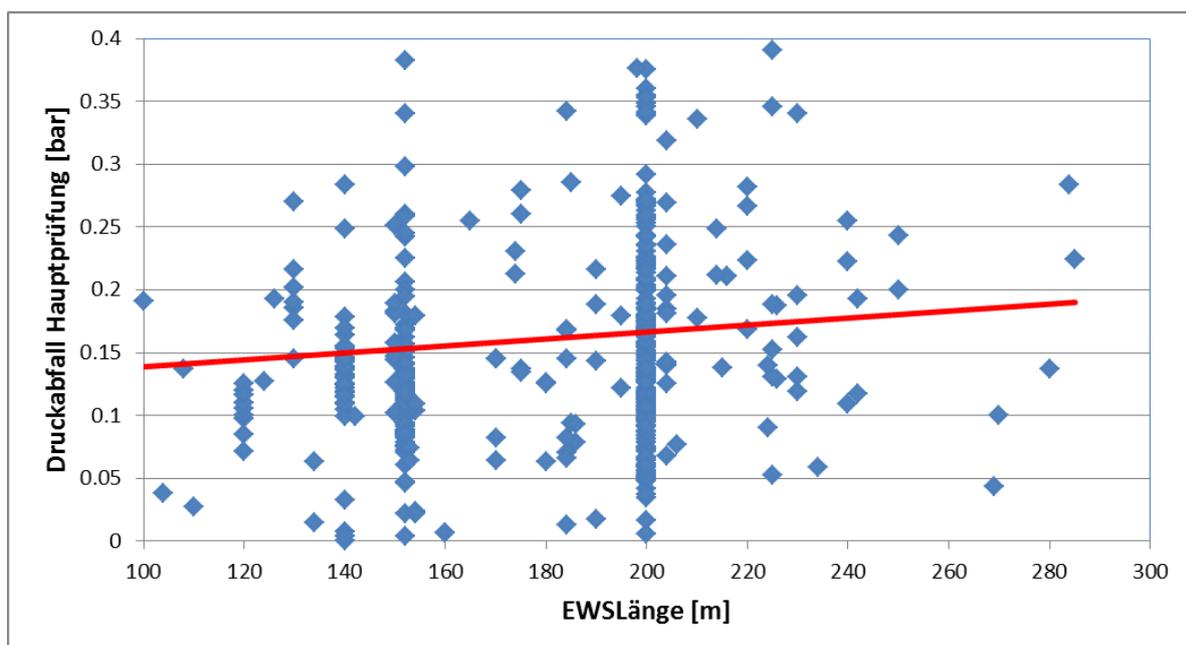
Pro Bohrmeter kann je nach Bohrkaliber eine grössere oder kleinere Menge an Hinterfüllungsmaterial eingebracht werden. Die Messungen zeigen keinen Zusammenhang zwischen der Hinterfüllungsmenge und dem Druckabfall während der Hauptprüfung.



Figur 4-3: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der Hinterfüllungsmenge pro EWS-Länge

4.5 EWS-Länge

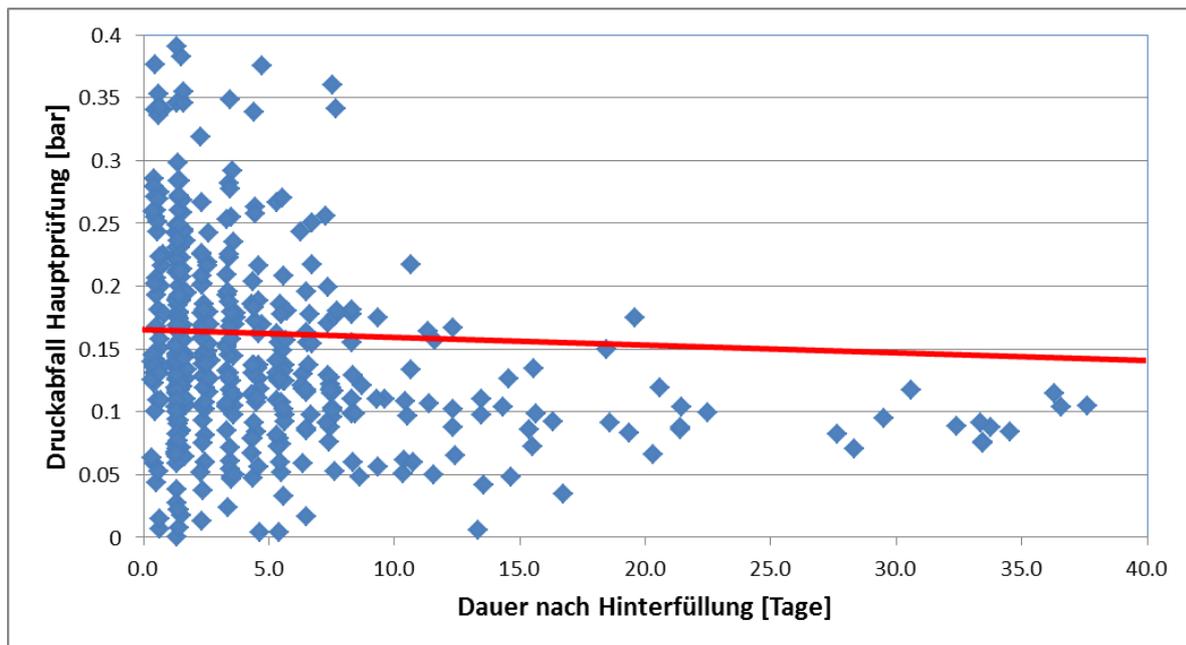
Es gibt eine nur sehr schwache Korrelation zwischen der EWS-Länge und dem Druckabfall der Hauptprüfung. Bei tieferen EWS tendiert der Druckabfall zu etwas grösseren Werten.



Figur 4-4: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der EWS-Länge

4.6 Zeitpunkt der Prüfung nach Hinterfüllung

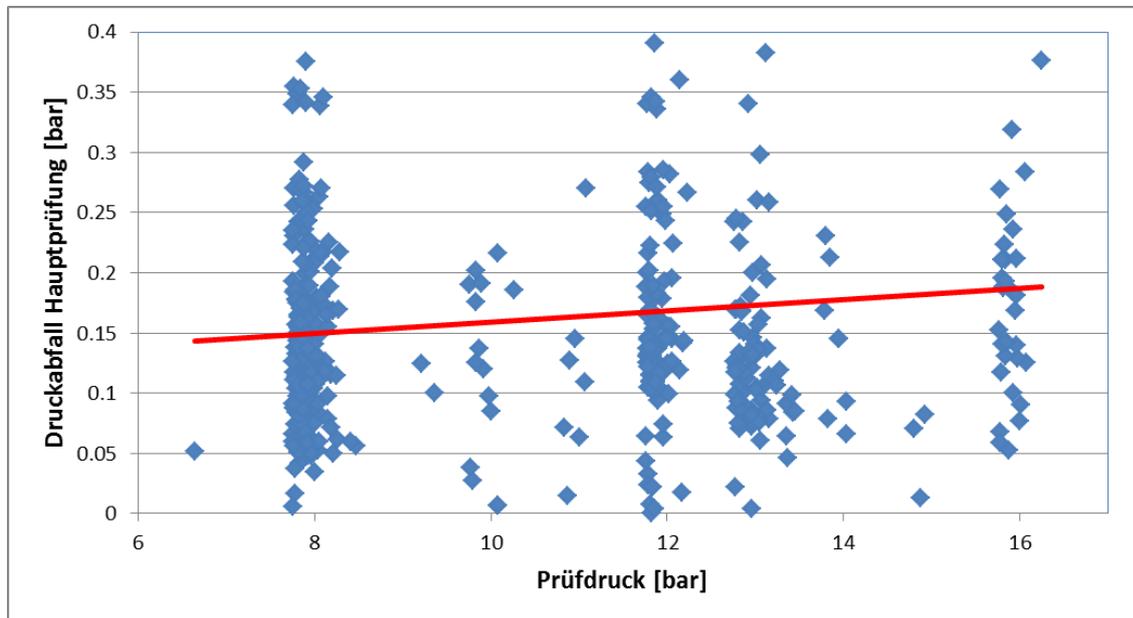
Bei Prüfungen, die mehrere Tage nach der Hinterfüllung durchgeführt wurden, handelt es sich in der Regel um Wiederholungen, wenn die erste Prüfung ungenügend war. Diese Messungen wurden wahrscheinlich sehr sorgfältig durchgeführt und zeigen bessere Resultate als der Durchschnitt. Zudem sind nach SIA 384/6 nur Prüfungen zulässig, solange die Hinterfüllung plastisch ist.



Figur 4-5: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der verstrichenen Zeit zwischen Hinterfüllung und Druckprüfung

4.7 Prüfdruck

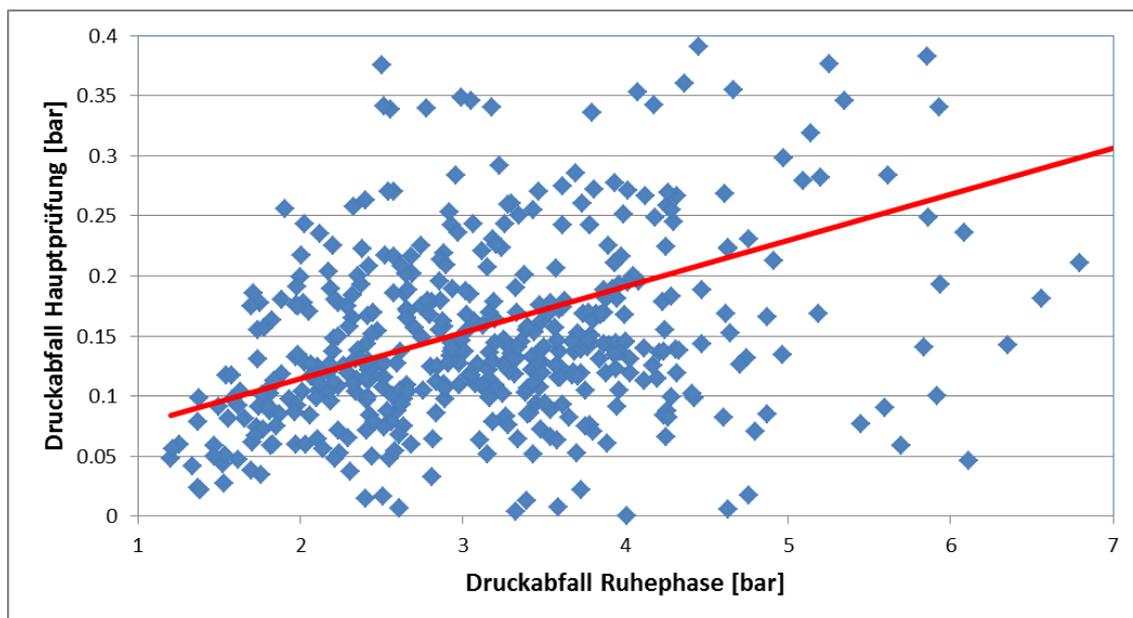
Es gibt nur eine sehr schwache Korrelation zwischen dem angelegten Prüfdruck und dem Druckabfall während der Hauptprüfung. Je tiefer die EWS, desto höher ist üblicherweise der Prüfdruck (siehe auch 4.5).



Figur 4-6: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der Prüfdrucks

4.8 Druckabfall während der Ruhephase

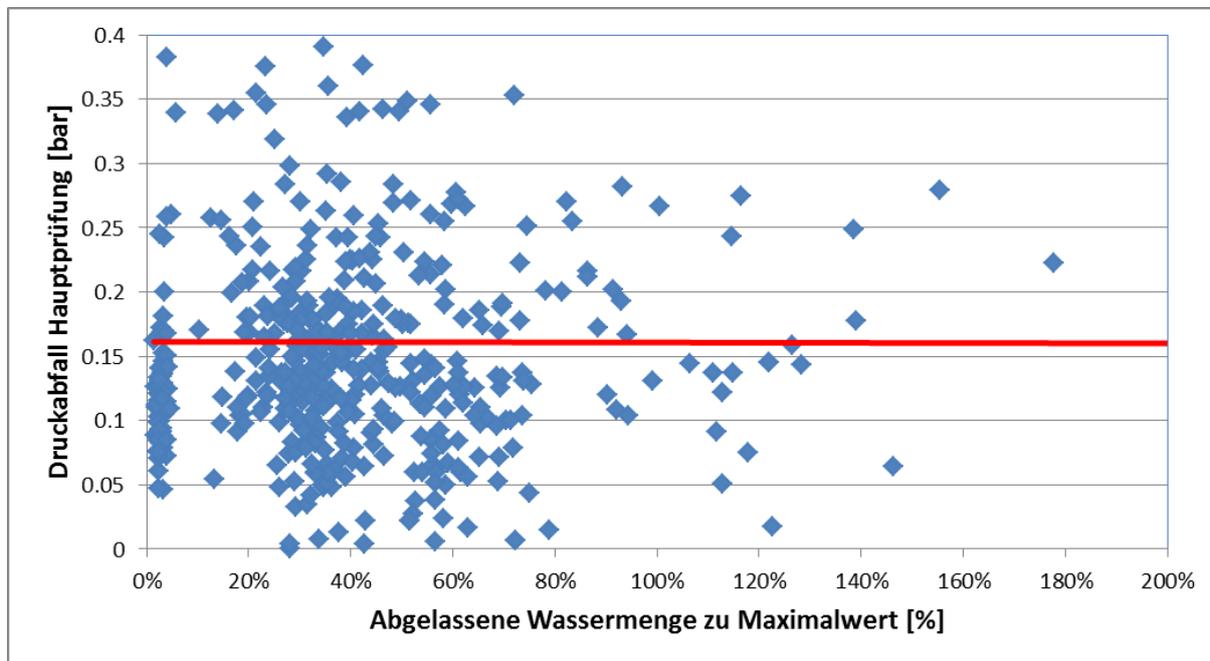
Es gibt eine deutliche Korrelation zwischen dem Druckabfall nach der Ruhephase und dem Druckabfall während der Hauptprüfung.



Figur 4-7: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion des Druckabfalls während der Ruhephase

4.9 Abgelassene Wassermenge

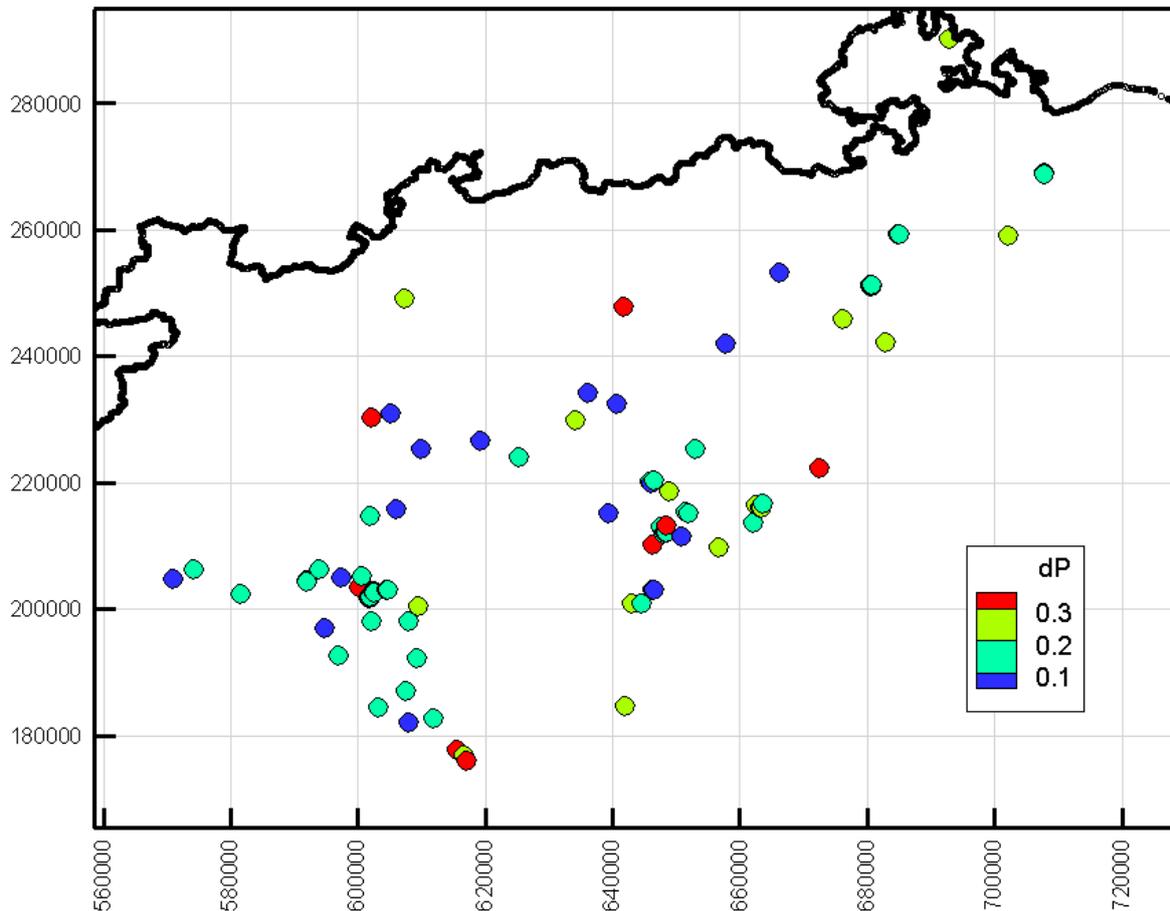
Es gibt keine Korrelation zwischen der abgelassenen Wassermenge und dem Druckabfall während der Hauptprüfung.



Figur 4-8: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion der abgelassenen Wassermenge

4.10 Geografischer Standort der Bohrung

Es gibt keine Korrelation zwischen der geografischen Lage der Bohrung und dem Druckabfall während der Hauptprüfung.



Figur 4-9: Druckabfälle während der Hauptprüfung als Funktion des geografischen Standortes (in bar)

4.11 Zusammenfassung

Für die Untersuchung zur Dichtigkeitsprüfung nach SIA 384/6 standen 475 Messungen zur Verfügung. Alle Messungen wurden mit dem vollautomatischen Prüfgerät DPG-C3 durchgeführt. Die Messungen stammen von dichten Sonden; es liegen keine Meldungen vor, dass einer der geprüften Sonden leck wäre. Die Analyse der Daten betreffend dem eingesetzten Prüfgerät und dem ausführenden Bohrmeister zeigt keine Korrelation mit dem Druckabfall während der Hauptmessung. Der Datensatz kann somit für die Untersuchung als repräsentativ betrachtet werden.

Die Auswertung der 475 automatisch erfassten Dichtheitsprüfungen ergibt bezüglich verschiedener Parameter die nachstehenden Korrelationen:

Korrelation mit ...	Bemerkung	Kapitel
Prüfgerätenummer	Geräte mit wenigen Messungen haben grössere Abweichungen bei der Hauptprüfung. Es scheint eine „Erfahrungskomponente“ zu geben	3.1
Bohrmeister	Erfahrung verbessert das Resultat geringfügig	3.2
Hinterfüllungsart	Keine Korrelation	4.2
Sondenhersteller	Keine Korrelation	4.3
Hinterfüllungsmenge	Keine Korrelation	4.4
EWS-Länge	Geringe Korrelation	4.5
Zeitpunkt der Prüfung nach Hinterfüllung	Nachmessungen haben bessere Resultate, dies ist aber nach SIA 384/6 nicht zulässig	4.6
Angewandter Prüfdruck	Geringe Korrelation	4.7
<u>Druckabfall in der Ruhephase</u>	<u>Deutliche Korrelation</u>	<u>4.8</u>
Abgelassene Wassermenge	Keine Korrelation	4.9
Geographie	Keine Korrelation	4.10

Der Druckabfall während der Hauptprüfung liegt über die Gesamtmenge der Messungen im Mittel bei 0.16 bar (± 0.12 bar Standardabweichung). Die einzige klare Korrelation zeigt sich zum Druckabfall während der Ruhephase der Prüfung. Eine Dichtheitsprüfung mit einem übermässigen Druckabfall während der Ruhephase zeigt in aller Regel auch einen starken Druckabfall während der Hauptprüfung. Erfahrungsgemäss weist dieses Verhalten auf eine nicht ganz druckdicht angeschlossene Prüfgarnitur hin.

5. Empfehlungen

Das in der Norm SIA 384/6 vorgeschlagene Vorgehen zur Prüfung der Dichtheit von Erdwärmesonden hat sich in der Praxis bewährt. Anhand von 475 elektronisch durchgeführten Messungen lässt sich ein Mittelwert für den Druckabfall während der Hauptprüfung von 0.16 bar bestimmen, mit einer Standardabweichung von ± 0.12 bar. Damit liegen 95% aller Messungen unterhalb von 0.4 bar.

5.1 Empfehlung für die Durchführung von Dichtheitsprüfungen

Die Analyse der Dichtheitsprüfungen hat keine Korrelation mit Parametern wie Hinterfüllungsart, Sondenhersteller, Hinterfüllungsmenge, EWS-Länge, angewandter Prüfdruck, abgelassene Wassermenge oder geographischer Ort ergeben. Die Analyse zeigt als einziges eine Korrelation zwischen Druckabfall während der Hauptmessung und dem Druckabfall während der Ruhephase. In aller Regel deutet ein unerwartet hoher Druckabfall während der Ruhephase auf eine nicht ganz dicht angeschlossene Prüfgarnitur hin. Es ist deshalb wichtig, dass der Anschluss der Erdwärmesonde an eine Prüfgarnitur mit entsprechendem Werkzeug und Sorgfalt erfolgt; die Dichtungen sind regelmässig auszuwechseln.

5.2 Empfehlung für die Anpassung des Grenzwerts der Hauptprüfung

Auf Baustellen herrschen teilweise erschwerte Bedingungen, bei denen die theoretisch erforderlichen Anforderungen an die Dichtigkeit der angeschlossenen Prüfgarnitur nur schwer eingehalten werden können. Wir schlagen daher vor, den Grenzwert für die Hauptprüfung von 0.1 bar auf 0.4 bar festzulegen. Da im untersuchten Datensatz von 475 Messungen keine Hinweise auf lecke Sonden sind, kann angenommen werden, dass die Dichtheit einer Sonde auch bei diesem Wert nachgewiesen ist. Wir empfehlen eine Anpassung des Grenzwerts in der Norm SIA 384/6 einzuleiten.

5.3 Durchführung weitergehender Untersuchungen

Es wäre wünschenswert, durch kontrollierte Versuche grundsätzlich zu prüfen, welchen Druckabfall bei der Hauptprüfung (bei nachweislich druckdicht angeschlossener Prüfgarnitur) definierte Leckagen in einer hinterfüllten Sonde erzeugen würden, und wie sich dies auf den Betrieb bezüglich Wasserverlust und Druckhaltung auswirken würde. Diese Versuche sollten unter kontrollierbaren (laborähnlichen) Bedingungen durchgeführt werden.

Anhang: Autonomes Durchfluss- und Dichtheitsprüfgerät DPG-C3

Das Prüfgerät DPG-C3 führt die Spülung, sowie die Durchfluss- und Dichtheitsprüfung exakt nach der SIA 384/6 vollständig autonom durch. Mitgespeichert werden ebenfalls die GPS-Koordinaten des Standorts. Das erzeugte Prüfprotokoll enthält alle wichtigen Parameter der Prüfung und der Sonde.

