

Pall Filtersystems GmbH
Institut für Angewandte Geowissenschaften

Entwicklung von ökologisch vorteilhaften, wartungsarmen Kunststoff (HDPE)-Filterelementen für oberflächennahe geothermische Brunnenanlagen

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 28789 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Steffen Heidenreich
Dipl.-Ing. Johanna Rüter, M.Sc.
Prof. Dr. Ingo Sass
Dipl.-Ing.(FH) Astrid Walch

Crailsheim, Darmstadt, Juni 2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|--|---|--|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Az | 28789 | Referat | 23 | Fördersumme | 219.850 € |
| Antragstitel | | Entwicklung von ökologisch vorteilhaften, wartungsarmen Kunststoff(HDPE)-Filterelementen für oberflächennahe geothermische Brunnenanlagen | | | |
| Stichworte | | | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | | |
| 3 Jahre | 01.10.2011 | 30.03.2015 | | | |
| Zwischenberichte | | | | | |
| Bewilligungsempfänger | Pall Filtersystems GmbH Werk Schumacher Zur Flügellau 70 74564 Crailsheim | | | Tel | 07951 302-172 |
| | | | | Fax | 07951 26511 |
| | | | | Projektleitung | Dr.-Ing. Steffen Heidenreich |
| | | | Bearbeiter | Dipl.-Ing.(FH) Astrid Walch | |
| Kooperationspartner | Technische Universität Darmstadt Institut für Angewandte Geowissenschaften Fachbereich Angewandte Geothermie Schnittspahnstr. 9 64287 Darmstadt | | | | |
| Zielsetzung und Anlass des Vorhabens | | | | | |
| <p>Hauptziel des Vorhabens ist es, ökologisch vorteilhafte und wartungsarme Kunststoff (HDPE) - Brunnenfilter für offene oberflächennahe geothermische Anlagen zu entwickeln. In dieser Studie werden unterschiedliche Filter und Filtersysteme auf ihre Tauglichkeit bezüglich geothermischer Fragestellungen überprüft. Schwerpunkt der Untersuchungen stellt die hydraulische Charakterisierung und Weiterentwicklung von porösen HDPE -Filtern dar. Neben den hydraulischen und geotechnischen Anforderungen an Brunnen und Filter stehen hier die Alterungsprozesse des Brunnens, die durch Temperaturunterschiede bei Heiz- und Kühlbetrieb auftreten, im Vordergrund.</p> | | | | | |
| Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden | | | | | |
| <p>Der Vorsatz des Projektes ist es, die unterschiedlichen Prozesse im Brunnen zu untersuchen und Empfehlungen für den Brunnenausbau zu geben mit dem Ziel die Lebensdauer und damit die Rentabilität von geothermischen Brunnenanlagen zu steigern. Gleichzeitig sollen für den speziellen Anwendungsfall optimierte Filter entwickelt werden und deren Tauglichkeit in Labor- und Feldtests nachgewiesen werden. Neben der Charakterisierung und Weiterentwicklung der Filterelemente sollen Empfehlungen zur Reinigung und Wartung von hochverdichteten, Polyethylen-Brunnenfiltern erarbeitet werden. Dazu ist es erforderlich, das Langzeitverhalten der Filterelemente abzuschätzen, in dem die hydrochemischen Prozesse, die in Brunnen stattfinden, untersucht und simuliert werden. Diese Prozesse werden durch Installation und Betrieb der Filterelemente im Feldtest sowie durch verschiedene Versuchsanordnungen im Labor analysiert und abgebildet. Die Eigenschaften der porösen Filter werden direkt mit konventionell eingesetzter PVC-U Schlitzfiltertypen verglichen.</p> | | | | | |
| Ergebnisse und Diskussion | | | | | |
| <p>Die Untersuchung der strukturellen Eigenschaften der Filterelemente zeigt, dass die porösen Filter durch hohe Porosität gekennzeichnet sind. Aufgrund des Herstellungsprozesses kommt es zur Variation der strukturellen Eigenschaften. Dies betrifft vor allem die Filtertypen mit großen Öffnungsweiten. Es kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Variation der strukturellen Eigenschaften mit mechanischen der</p> | | | | | |
| <small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small> | | | | | |

Brunnenfilter festgestellt werden. Die Untersuchungen zur Festigkeit der Brunnenfilter ergeben, dass die Filter der nominellen Porenweite 200 µm am stärksten mechanisch belastet werden können. Dies ist auf die im Vergleich zu den anderen porösen Filtertypen etwas geringere Porosität zurückzuführen. Zusätzlich kann das mechanische Verhalten auch der Qualität des verwendeten Polyethylens zugeordnet werden. Vor allem sind die Einsatzbereiche in der oberflächennahen geothermischen Anwendung durch die Temperaturabhängigkeit der Festigkeit des polymeren Werkstoffs vorgegeben. Hierbei zeigt sich eine Abnahme der Festigkeit mit steigender Temperatur. In einer großen hydraulischen Laborkampagne mit über 1000 Einzelmessungen konnte die Permeabilität bzw. Durchlässigkeit der Filter unter verschiedenen Temperaturbedingungen detailliert untersucht werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert der porösen Filterelemente steigt mit zunehmender Porenweite und nimmt mit steigender Temperatur geringfügig ab. Die Variation der strukturellen Eigenschaften sowie die Mineralisierung des durchströmenden Fluids haben keinen erheblichen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften der Filterelemente. Filterverstärkungen, wie z. B. innenliegende Stützgitter, welche die mechanischen Eigenschaften verbessern, aber die hydraulischen Eigenschaften nicht nachteilig beeinflussen, stellen eine vielversprechende Strategie zur Produktweiterentwicklung dar. Die Analyse des Alterungsverhaltens von Brunnenfiltern ist für die Beurteilung der praktischen Einsatzbereiche von Brunnenfiltern wesentlich. Neben Langzeituntersuchungen im Feld wurden neue, komplexe Versuchsstände im Labor entwickelt, an den Versinterungs- bzw. Verockerungserscheinungen an Brunnenfilterelementen abgebildet werden können. Die Daten aus dem Testfeld in Aschaffenburg belegen, dass nicht nur die porösen HDPE-Filterelemente für Verockerung anfällig sind, sondern dies in gleichem Maße auch für PVC-U Schlitzfilter zu trifft. Die hydraulischen Pumpentests deuten darauf hin, dass der Filtertyp mit nomineller Porenweite von 200 µm verglichen mit anderen Filtertypen resistenter gegenüber Alterungserscheinungen ist. Die Versinterung an porösen Brunnenfiltern im Labor macht deutlich, dass die feinporigen Filterelemente wesentlich anfälliger für kalkhaltige Inkrustationen sind, als grobporige Filterelemente. Außerdem nimmt die Ausfällung von CaCO₃ an und in den Filterelementen mit steigender Temperatur zu und setzt somit die Durchlässigkeit herab. Für Versuchsbedingungen bei typischen Grundwassertemperaturen (10°C) wurden weder Beeinflussung der Hydraulik noch vermehrte Kristallbildung im Brunnenfilter belegt. Der direkte Vergleich mit den geschlitzten PVC-U Filtertypen kommt zu dem Ergebnis, dass diese eine bis zu zehnfach geringere offene Fläche haben. Die Permeabilität geschlitzter Filter ist gleich groß wie die der porösen Filter. Die geschlitzten Filterelemente sind aufgrund ihres Werkstoffs durch eine hohe Festigkeit charakterisiert. Allerdings reduziert die Schlitzung der Filter wiederum die mechanische Festigkeit um ein Vielfaches.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Rüther & Sass: *Hydraulische Charakterisierung verschiedener Kunststoffbrunnenfiltertypen für oberflächen-nahe Anwendungsgebiete im Feld und Labor*. In: Grundwasser trifft Boden und Energie: Tagung der Fach-sektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG), 28.-31.05.2014, Bayreuth. In: Bayreuther Zentrum für Ökologie und Umweltforschung, Bayreuth [Konferenz -Beitrag], (2014)
- Rüther & Sass: *Entwicklung poröser Filterelemente aus hochdichtem Polyethylen für geotherm. Brunnenanlagen*. In: bbr - Fachmagazin für Wasser und Leitungstiefbau (04/2013) pp. 61-69. [Artikel], (2013)
- Rüther et al.: *Research and Development of porous, high density polyethylene screens for shallow geoth. well systems*. In: European Geothermal Congress, 03.-07.06.2013, Pisa. [Konferenz-Beitrag], (2013)
- Rüther et al.: *Entwicklung und Untersuchung poröser, hochdichter Polyethylen-Filterelemente für geothermale Brunnenanlagen*. In: GeoTHERM, 28.02.-01.03.2013, Offenburg. [Konferenz -Beitrag], (2013)
- Sass et al.: *Entwicklung und Untersuchung poröser, hochdichter Polyethylen -Filterelemente für Brunnenanlagen*. In: Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Tagung d. Fachsektion Hydrogeologie in der DGG (FH-DGG), 16.-20.05.2012, Dresden. In: Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften e.V. [Konferenz- Beitrag], (2012)
- Langer et al.: *Pl. und Erkundung für den Bau eines geoth. Brunnentestfelds zur Untersuchung poröser, hochdichter PE-Filterelemente im Festgestein*. In: Der Geothermiekongress 2012, 13.-15.11.2012, Karlsruhe. [Konferenz- oder Workshop-Beitrag], (2012)

Fazit

Nach Beurteilung der geotechnischen und hydraulischen Eigenschaften sowie dem Alterationsverhalten können alle porösen HDPE-Filtertypen (insbesondere Typ C mit 200 µm) für den oberflächennahen geothermischen Einsatz bei typischen Grundwasserbedingungen (10°C) empfohlen werden. Die speziell entwickelten Filtertypen stellen einen ökologisch wichtigen Beitrag zur Verbreitung von offenen energieeffizienten Systemen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden dar.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Projektkennblatt | 2 |
| Inhaltsverzeichnis..... | 4 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen | 8 |
| Zusammenfassung..... | 10 |
| Einleitung | 11 |
| Hauptteil | 15 |
| Strukturelle Eigenschaften..... | 15 |
| Einführung..... | 15 |
| Methodik | 16 |
| Ergebnisse | 17 |
| Mechanische Eigenschaften..... | 21 |
| Einführung..... | 21 |
| Methodik | 22 |
| Ergebnisse | 23 |
| Hydraulische Eigenschaften..... | 29 |
| Einführung..... | 29 |
| Methodik | 29 |
| Ergebnisse | 31 |
| Alterungsverhalten..... | 36 |
| Einführung..... | 36 |
| Feldversuche | 38 |
| Laborversuche | 47 |
| Diskussion der Ergebnisse..... | 55 |
| Fazit | 57 |
| Literaturverzeichnis | 58 |
| Anhänge..... | 63 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1a) Schematische Darstellung der Packungsdichte im kubisch flächenzentrierten System. Die kubischen Partikel berühren sich an den Kontaktpunkten. b) Schematische Darstellung der tatsächlichen Packungsdichte bei gesinterten kubischen Materialien. Die Partikel verschweißen an Kontaktflächen mit Länge x und Breite y (Verändert nach Zhang et al. (2012))..... | 15 |
| Abbildung 2: Schematische Darstellung des Transportmodells von Wasser a) im porösen b) im geschlitzten Filterelement. | 16 |
| Abbildung 3: Box Plot zur Porosität der Filtertypen in Abhängigkeit der nominellen Öffnungsweite | 18 |
| Abbildung 4: Verteilung der Porosität anhand von Weibulldiagrammen der Filtertypen A bis D | 19 |
| Abbildung 5: Box Plot zur Porosität der Filtertypen A bis D in Abhängigkeit der Filterwandstärke..... | 19 |
| Abbildung 6: Visualisierung des strukturellen Aufbaus der makroporösen Filter der Gruppen a) B, b) C und c) D anhand von Mikrocomputertomographie | 20 |
| Abbildung 7: Visualisierung des strukturellen Aufbaus der makroporösen Filter der Gruppen a) B und b) C anhand von Rasterelektronenmikroskopie | 20 |
| Abbildung 8: E-Modulkurven von PVC-U und PE im Temperaturbereich 0 bis 100°C (Verändert nach (Ehrenstein, 2011)) | 21 |
| Abbildung 9: Schematisches Deformationsverhalten von thermoplastischen Polymeren (Verändert nach Michler & Baltá-Calleja (2012))..... | 22 |
| Abbildung 10: Spannungs-Dehnungsdiagramm für einaxiale Druckversuche der Filtergruppe C bei 25°C | 23 |
| Abbildung 11: Verteilung der einaxialen Druckfestigkeit anhand des Weibulldiagramms für Filtertypen der Gruppe a) A, b) B, c) C und d) D | 24 |
| Abbildung 12: Einaxiale Druckfestigkeit bei 25°C für Filtertypen A bis G in Abhängigkeit der Porosität der Filterelemente..... | 25 |
| Abbildung 13: Deformation der porösen Filterelemente der Gruppen a) A, b) B, c) C und d) D nach einaxialen Druckversuchen bei 25°C | 27 |
| Abbildung 14: Einaxiale Druckfestigkeit der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur | 28 |
| Abbildung 15: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Untersuchung der Durchlässigkeit von Brunnenfiltern | 30 |
| Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k_{f,t}$ während eines hydraulischen Tests mit Filtertyp C bei 40°C | 32 |
| Abbildung 17: Permeabilität der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von a) der Porosität b) der relativen offenen Fläche der Filterelemente | 32 |
| Abbildung 18: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur für a) die porösen HDPE-Filtertypen A bis D b) die geschlitzten PVC-U-Filtertypen E bis G | 34 |
| Abbildung 19: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Fluidmineralisierung für a) die porösen HDPE- Filtertypen A bis D b) die geschlitzten PVC-U-Filtertypen E bis G | 34 |
| Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf a) der spezifischen Ergiebigkeit b) der relative spezifischen Ergiebigkeit der Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, F und D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg | 40 |
| Abbildung 21: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtertypen C, D und F a) vor und nach dem Brunnenbetrieb b) im oberen und unteren Filterbereich der Brunnen I, IV und V im Testfeld Aschaffenburg | 40 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf a) der Temperatur des Grundwassers b) der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg | 41 |
| Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf a) des Redoxpotentials des Grundwassers b) des Sauerstoffgehalts des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg | 41 |
| Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf a) der Trübung des Grundwassers b) des pHs des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg | 42 |
| Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf a) der Konzentration an Mn^{2+} im Grundwasser b) der Konzentration an Fe^{2+} im Grundwasser in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg | 42 |
| Abbildung 26: Mikroskopische Rasterelektronenaufnahme des Brunnenfilters Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Kleine Kristalle im Mikrometerbereich belegen die Partikeloberfläche des Filterelements aus HDPE | 43 |
| Abbildung 27: Spektrum der mikroskopischen Röntgenanalyse über die elementare Zusammensetzung der Beläge auf dem porösen HDPE-Filter Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen | 43 |
| Abbildung 28: Mikroskopische Rasterelektronenaufnahme der Brunnenfilterinnenseite Filtertyp C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Kleine Kristalle im Mikrometerbereich belegen die die Partikeloberfläche des Filterelements aus HDPE | 44 |
| Abbildung 29: Spektrum der mikroskopischen Röntgenanalyse über die elementare Zusammensetzung der Beläge auf der Filterinnenseite des porösen HDPE-Filter Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen | 44 |
| Abbildung 30: Spektrum der röntgendiffraktometrischen Analyse ohne Untergrundkorrektur zur Bestimmung der Mineralphasen in der Inkrustation an Filtertyp F installiert im Brunnen IV im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Der monotone Intensitätsabfall resultiert aus der Streuung der Röntgenstrahlung am amorphen Probenanteil. | 45 |
| Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit der Filtertypen B und C bezogen auf die initial bestimmte Durchlässigkeit während der Versinterungsversuche bei a) 10°C b) 25°C und c) 40°C. Durchgezogene Linie: hoch mineralisiertes Wasser, gestrichelte Linie: schwach mineralisiertes Wasser. | 49 |
| Abbildung 32: Spektren der Mikroröntgenanalyse nach Abschluss der Alterationsversuche mit chemisch elementarer Zusammensetzung a) der Partikeloberfläche der porösen Filterelemente b) der abgelagerten Inkrustationsbildungen in Form von Kristallen in den Filterporenräumen | 50 |
| Abbildung 33: Filterrückstand bezogen auf das Filterporenvolumen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur nach Abschluss der Versinterungsversuche..... | 51 |
| Abbildung 34: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verockerung von Brunnenfilterelementen | 52 |
| Abbildung 35: Zeitliche Veränderung der Differenz an Fe^{2+} -Konzentration im Wasser zwischen M3 und M1 während des Verockerungsversuchs | 54 |
| Abbildung 36: Filterrückstand bezogen auf das Filterporenvolumen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur nach Abschluss der Verockerungsversuche..... | 54 |
| Abbildung 37: Poröse Filterelemente der Gruppe D mit Verockerungserscheinungen nach Durchführung des Verockerungsversuchs über sechs Stunden bei a) 25°C und b) 40°C | 54 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Gruppierung der untersuchten porösen HDPE -Filterelemente aufgrund des nominellen Porendurchmessers..... | 14 |
| Tabelle 2: Gruppierung der untersuchten Filtertypen aufgrund von Filtermaterial, Filtertyp und nomineller Öffnungsweite..... | 14 |
| Tabelle 3: Berechnete Porendurchmesser der makroporösen Filterelemente basierend auf dem Partikeldurchmesser des Rohmaterials nach Gl. 1..... | 17 |
| Tabelle 4: Mittelwerte der strukturellen Kennwerte aller untersuchten Filterelemente. | 18 |
| Tabelle 5: Statistische Kennwerte der einaxialen Druckfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C..... | 26 |
| Tabelle 6: Statistische Kennwerte der einaxialen zyklische Druckfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C..... | 26 |
| Tabelle 7: Statistische Kennwerte der einaxialen Zugfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C..... | 26 |
| Tabelle 8: Analyse der einaxialen Druckfestigkeit der Filtertypen A bis G basierend auf dem Gesetz nach Arrhenius..... | 28 |
| Tabelle 9: Statistischen Kennwerte der Permeabilität der Filtergruppen A bis G..... | 31 |
| Tabelle 10: Statistischen Kennwerte zur Durchlässigkeit der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur..... | 33 |
| Tabelle 11: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtergruppen A bis D in Abhängigkeit von Einsatz von Filterverstärkungsmaterial bei 25°C..... | 34 |
| Tabelle 12: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtergruppen A bis D in Abhängigkeit von der Filterwandstärke bei 25°C..... | 35 |
| Tabelle 13 Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Inkrustation an Filtertyp F installiert im Brunnen IV im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen..... | 45 |
| Tabelle 14: Vergleich der hydrochemischen Parameter des Grundwassers in der Grundwassermessstelle im Testfeld Crailsheim mit den Richtwerten für oberflächennahe geothermale Brunnenanlagen nach Tholen & Walker-Hertkorn (2007)..... | 46 |
| Tabelle 15: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen des Grundwassers in der Grundwassermessstelle im Testfeld Crailsheim..... | 47 |
| Tabelle 16: Versuchsbedingungen der durchgeführten Tests zur Untersuchung des Versinterungsverhaltens an porösen HDPE-Filterelementen..... | 48 |
| Tabelle 17: Initiale Versuchsbedingungen zur Untersuchung der Verockerung an porösen HDPE-Filterelementen..... | 52 |
| Tabelle 18: Kennwerte unter vorherrschender Verockerung an porösen HDPE-Filterelementen..... | 53 |

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

| | |
|-------------------------------------|--|
| 2θ | Beugungswinkel am Kristall |
| Al ₂ O ₃ | Aluminiumoxid |
| B | Werkstoffkonstante [-] |
| B I | Brunnen I |
| B IV | Brunnen IV |
| B V | Brunnen V |
| BSE | Rückstreuелеktronen |
| CaCO ₃ | Kalziumkarbonat |
| CaMg(CO ₃) ₂ | Dolomit |
| CaO ₂ | Kalziumdioxid |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| Δh _{FR} | Druckverlust im Filterrohr [m] |
| ΔR | Veränderung des Partikelradius [m] |
| E _A | Aktivierungsenergie [kg m ² s ⁻² mol ⁻¹ =J mol ⁻¹] |
| E _c | Elektrische Leitfähigkeit [Sm ⁻¹] |
| EDX | energie-dispersive Röntgenmikroanalyse |
| ESEM | Hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop unter Niedrigvakuumbedingungen |
| FE | Entnahmepunkt zur Messung der Fe ²⁺ -Konzentration |
| FeCO ₃ | Eisenkarbonat |
| Gl. | Gleichung |
| GWM | Grundwassermessstelle [m] |
| h | Höhe des Filterelementes [m] |
| HCO ₃ ⁻ | Hydrogenkarbonat |
| HDPE | hochdichtes Polyethylen |
| k _f | Durchlässigkeitsbeiwert [ms ⁻¹] |
| L _b | tatsächlich durchströmte Bahnlänge [m] |
| L _k | theoretisch kürzeste Fließlänge [m] |
| m | Weibull-Faktor [-] |
| M | Mächtigkeit [m] |
| M1 | Messpunkt 1 |
| M2 | Messpunkt 2 |
| MnO ₂ | Mangandioxid |
| μXCT | Mikro-Röntgen-Computer Tomographie |
| n | Porosität [-] |
| n | Probenanzahl [-] |
| n _s | Anzahl der Schlitze pro Filterelement [-] |
| NTU | Nephelometrischer Trübungswert [-] |
| OA | Offene Filterfläche bei Schlitzfiltern [-] |
| Ø _{innen} | Innendurchmesser [m] |
| p ₁ | initialer Druck [kg m ⁻¹ s ⁻² = N m ⁻² =Pa] |
| p ₂ | finaler Druck [kg m ⁻¹ s ⁻² = N m ⁻² =Pa] |
| PE-HMW | Hochmolekulares Polyethylen |
| PE-UHMW | Ultrahochmolekulares Polyethylen |
| pH | negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-Aktivität [-] |
| PVC-U | hartes Polyvinylchlorid |
| Q | Förderrate [m ³ s ⁻¹] |
| r | Porenradius [m] |
| R ² | Bestimmtheitsmaß [-] |

| | |
|------------------|---|
| r_A | Außenradius des Filterelementes |
| ρ_B | Rohdichte [kg m^{-3}] |
| RFA | Röntgenfluoreszenzanalyse |
| R_i | initialer Partikelradius [m] |
| r_l | Innenradius des Filterelementes |
| σ | Festigkeit der porösen Mediums [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$] |
| s | Spezifischer Exponent [-] |
| $\sigma_{(T=0)}$ | Theoretische Festigkeit bei $T=0$ K [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$] |
| σ_0 | initiale Festigkeit des Materials [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$] |
| SE | Sekundärelektronen |
| SEM | Hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop |
| SiO_2 | Siliziumoxid |
| s_l | Schlitzlänge [m] |
| σ_m | mittlere Weibull-Festigkeit [$\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-2} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$] |
| s_w | Schlitzweite [m] |
| T | Tortuosität [-] |
| $T_{(\sigma=0)}$ | Theoretische Temperatur bei $\sigma=0$ MPa |
| T_G | Glasübergangstemperatur [K] |
| T_S | Schmelztemperatur [K] |
| u. GOK | unter Geländeoberkante [m] |
| UVC | Ultraviolettstrahlung |
| VE | Vollentionisiert |
| X | Verschweißungsfläche der versinterten Partikel [m] |
| XRD | Röntgendiffraktometrie |
| Z1 | Zugabepunkt 1 |
| Z2 | Zugabepunkt 2 |
| Z3 | Zugabepunkt 3 |

Zusammenfassung

Die Intention dieses Forschungsprojektes (AZ 28789) ist die Optimierung von geothermalen oberflächennahen Brunnenanlagen und damit verbundene Reduzierung von Wartungs- und Betriebskosten. Dabei sollen neuentwickelte Brunnenfilter in der direkten, oberflächennahen Geothermie zur breiteren, ökonomisch und ökologisch sinnvollen Nutzung dieser regenerativen Technik führen. In diesem Vorhaben wurden kooperativ von Pall Filtersystems GmbH und der Technischen Universität Darmstadt diverse Filter und Filtersysteme auf ihre Tauglichkeit bezüglich geothermischer Fragestellungen überprüft. Schwerpunkt der Untersuchungen sind die strukturelle, hydraulische und mechanische Charakterisierung von porösen HDPE - Filtern. Neben den Hauptanforderungen an Brunnenfiltern stehen außerdem die Alterungsprozesse des Brunnens im Vordergrund. Dafür wurden Brunnentestfelder errichtet und Langzeitversuche durchgeführt. Im Projekt stellte sich heraus, dass die Entwicklung eines komplexen Versuchsstandes zur Abbildung beschleunigter Alterungsprozesse eine notwendige Ergänzung der Feldkampagnen darstellt. Die Untersuchung der strukturellen Eigenschaften belegt, dass die porösen Filter durch hohe Porosität gekennzeichnet sind. Aufgrund des Herstellungsprozesses kommt es zur Variation der strukturellen Eigenschaften. Es konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der Variation der strukturellen mit mechanischen Eigenschaften festgestellt werden. Die Untersuchung zur Festigkeit zeigt, dass die Filter der nominellen Porenweite 200 μm am stärksten mechanisch belastet werden können. Dies ist auf verglichen zu den übrigen porösen Filtertypen etwas geringere Porosität zurückzuführen. Zusätzlich kann das mechanische Verhalten der Qualität des verwendeten PE's zugeordnet werden. Die Einsatzbereiche in der oberflächennahen geothermischen Anwendung werden durch die Temperaturabhängigkeit der Festigkeit des polymeren Werkstoffs vorgegeben. Die Durchlässigkeit der Filter unter verschiedenen Temperaturbedingungen wurde mit über 1000 Einzelmessungen detailliert untersucht. Der Durchlässigkeitsbeiwert steigt mit zunehmender Porenweite und nimmt mit steigender Temperatur geringfügig ab. Die Variation der strukturellen Eigenschaften sowie die Mineralisierung des durchströmenden Fluids haben keinen erheblichen Einfluss auf die Durchlässigkeit der Filterelemente. Filterverstärkungen, welche die hydraulischen Eigenschaften nicht nachteilig beeinflussen, stellen eine viel versprechende Strategie zur Produktweiterentwicklung dar. Die Analyse des Alterungsverhaltens von Brunnenfiltern ist für die Beurteilung der praktischen Einsatzbereiche von Brunnenfiltern wesentlich. Die Daten aus dem Feld machen deutlich, dass nicht nur die HDPE-Filterelemente für Verockerung anfällig sind, sondern dies in gleichem Maße für PVC-U Schlitzfilter gilt. Die Leistungspumptests ergeben, dass der Filtertyp mit Porenweite von 200 μm verglichen mit anderen Filtertypen länger resistent gegenüber Alterungerscheinungen ist. Die Abbildung von Versinterung im Labor weist nach, dass feinporeige Filterelemente wesentlich anfälliger für Inkrustationen sind als grobporige. Außerdem nimmt die Ausfällung von CaCO_3 an und in den Filterelementen mit steigender Temperatur zu. Bei typischen Grundwassertemperaturen (10°C) konnten weder Beeinflussung der Hydraulik noch vermehrte Kristallbildung mittels ESEM belegt werden. Nach Beurteilung der geotechnischen und hydraulischen Eigenschaften sowie dem Alterungsverhalten können alle porösen HDPE-Filtertypen (besonders Typ C mit 200 μm) für den oberflächennahen geothermischen Einsatz bei typischen Grundwasserbedingungen (10°) empfohlen werden. Die HDPE-Filtertypen stellen einen ökologisch wichtigen Beitrag zur Verbreitung von offenen energieeffizienten Systemen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden dar.

Einleitung

Die grundlastfähige Energiequelle Geothermie hat in den vergangenen Jahren enorme Zuwächse erfahren. In der Zukunft wird der Anteil von Erdwärmennutzung im Bereich regenerativer Energien weiterhin ansteigen (Bertani, 2012). In den letzten zwei Jahrzehnten stieg vor allem die Anzahl oberflächennaher Anwendungen zur Wärmeversorgung von Haushalten und kleinen bis mittleren Industrieanlagen (Huttrer, 2001; Lund et al., 2005; Lund et al., 2011). Die Nutzung oberflächennaher geothermaler Systeme zur Wärmebereitstellung stellt einen wichtigen Beitrag hinsichtlich der Reduzierung von CO₂-Emissionen dar (Dowlatabadi & Hanova, 2007; Blum et al., 2010).

Bei oberflächennahen geothermalen Anlagen werden hauptsächlich geschlossene Systeme wie Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren oder Energiepfähle eingesetzt (Self et al., 2013). Die Leistungsfähigkeit einer oberflächennahen geothermalen Installation hängt stark von den hydrogeologischen und geothermischen Eigenschaften des Untergrundes ab (Stober, 2012). Diese Eigenschaften sind nur gering optimierungsfähig. Die Auslegung der Installation, die auf den Untergrund und die baulichen Gegebenheiten angepasst werden kann, hat auch Einfluss auf die Leistung der Anlage. In vielen geologischen Situationen gewährleisten offene Systeme eine größere Effektivität im Gegensatz zu geschlossenen Systemen (Omer, 2008; Dowlatabadi & Hanova, 2007). Der maximale Wirkungsgrad wird mit Anlagen erreicht, die sowohl im Winter zum Heizen, als auch im Sommer zum Kühlen des Gebäudes eingesetzt werden können.

Ein leistungslimitierender Faktor für die direkte Nutzung geothermaler Energie ist der Wärmetransport vom Untergrund zum Wärmeträgermedium. Die direkte geothermale Nutzung des Grundwassers wird nur über Brunnenanlagen realisiert. Daher erreichen offene Systeme aufgrund der größeren Oberfläche, an der Wärmetransport stattfinden kann, eine größere Leistung bzw. einen höheren Wirkungsgrad. Folglich können oberflächennahe geothermale Brunnenanlagen mit weniger Bohrlöchern, kürzeren Bohrlöchern oder kleineren Durchmessern auskommen, um den Energiebedarf eines Gebäudes zu decken (Self et al., 2013).

Die Nachfrage von geothermischen Brunnenanlagen steigt aktuell nicht so stark wie sie könnte, da für diese Anlagen Planung, Bemessung und Genehmigungsaufwand groß sind und darum eher Erdwärmesondensysteme eingesetzt werden, wo Brunnenanlagen grundsätzlich eine Alternative darstellen (Sass et al., 2015). Vervollständigen geothermale Erkundungen und lokale Erfahrungen hinsichtlich der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten bei der Bemessung einer solchen Anlage, kann über die Verwendung geeigneter Filtersysteme eine vereinfachte und wirtschaftlichere Bemessung der Brunnenanlage vorgenommen werden (Ma & Chai, 2004). Um die Vorteile von offenen Systemen voll ausnutzen zu können, müssen die Brunnenfiltersysteme an die speziellen Anforderungen in geothermalen Systemen angepasst werden (Sass et al., 2015).

Die Optimierung von geothermalen oberflächennahen Brunnenanlagen und eine damit verbundene Reduzierung von Wartungs- und Betriebskosten dienen zur Verbesserung und breiteren Implementierung dieser regenerativen Technik. Die Nutzung neuentwickelter Brunnenfilter für den Einsatz in der direkten, oberflächennahen Geothermie kann unter entsprechenden Bedingungen zu einer verbesserten und vereinfachten Anwendung führen.

In diesem Projekt wurden unterschiedliche Filter und Filtersysteme auf ihre Tauglichkeit bezüglich geothermaler Fragestellungen überprüft. Schwerpunkt der Untersuchungen stellt die hydraulische und mechanische Charakterisierung und

Weiterentwicklung von porösen, hochdichten Polyethylen-Filterelementen (HDPE) dar. Neben den hydraulischen und geotechnischen Anforderungen an Brunnen und Filter stehen hier die Alterungsprozesse des Brunnens, die durch Temperaturunterschiede im Heiz- und Kühlbetrieb auftreten im Vordergrund. Die veränderlichen Druck- und Temperaturbedingungen im Brunnen beschleunigen verschiedene Fällungsreaktionen, die die Leistung des Brunnens herabsenken und bis zum Versagen des Brunnens führen können. Dieser Prozess kann durch diskontinuierliche Fluidförderung im Brunnen potenziert werden. Neben Inkrustationen von Karbonaten und Eisenoxiden werden in offenen geothermalen Systemen häufig Ausfällungen von Gips, Baryt, Strontianit, Eisensulfat, Silikate und verschiedene (Schwer-)Metallsulfide gefunden (Houben & Treskatis, 2003).

Ziel des Projektes war es darüber hinaus, die unterschiedlichen Prozesse zu untersuchen und Empfehlungen für den Brunnenausbau zu geben, um die Lebensdauer und damit die Rentabilität von geothermischen Brunnenanlagen zu steigern. Gleichzeitig sollten für den speziellen Anwendungsfall optimierte Filter entwickelt werden und deren Tauglichkeit im Labor- und Feld nachgewiesen werden. Um die genannten Projektziele zu erreichen, ist ein umfangreiches Labor- und Feldversuchskonzept zusammengestellt worden. Folgende Untersuchungsmethoden wurden genutzt:

- **Hydraulik:** Durchlässigkeitsversuche wurden unter realistischen geothermischen Betriebsbedingungen durchgeführt, um das Materialverhalten und damit die Durchlässigkeit unter erhöhter Temperaturbelastung zu untersuchen.
- **Mechanik:** Druck- und Zugversuche wurden unter realistischen geothermischen Betriebsbedingungen durchgeführt, um das Materialverhalten und damit die Festigkeit unter erhöhter Temperaturbelastung zu untersuchen.
- **Alteration:** Verschieden mineralisierte Wässer wurden in Alterationstest verwendet, um unter Extrembedingungen das Kolmations- und Cloggingverhalten der einzelnen Filterelemente zu bestimmen.
- **Struktur:** Mittels Mikro-Röntgen-Computer-Tomographie und hochauflösendes Rasterelektronenmikroskop mit energie-dispersiver Röntgenmikroanalyse wurde die interne Struktur der Filterelemente untersucht. Dies ermöglichte zusätzlich eine qualitative und quantitative Auswertung von Ablagerungen im Feinstpartikelbereich. Zur Analyse von Alterationserscheinungen kamen auch Röntgendiffraktometrie und Röntgenfluoreszenzanalytik zum Einsatz.
- **Feldversuche:** Das Alterungsverhalten der Filterelemente wurde in eigens für das Forschungsprojekt errichteten Testfeldern anhand von hydraulischen Pumpversuchen und hydrochemischen Untersuchungen der Wässer analysiert.

Die im Projekt untersuchten Fragenstellungen knüpfen an die allgemeinen Anforderungen an Brunnenfilter an. Die essentielle Aufgabe eines Brunnenfilters ist die technisch sandfreie Wasserförderung mit minimalem hydraulischem Filterwiderstand. Zusätzlich soll die Werkstoffkorrosion und Inkrustationsbildung am Filtermaterial durch Ausfällungen möglichst unterbunden werden. Hohe mechanische Eigenschaften schützen den Filter vor Überbeanspruchung bei der Brunnen-

instandsetzung und während des Betriebs. Diese Eigenschaften fördern die Langlebigkeit eines Brunnens und folglich die Wirtschaftlichkeit des Brunnenfilters. Die Kosten sind aber auch vom Werkstoff selbst und der flexiblen, raschen Installation der Filter abhängig (Bieske, 1997; Tholen, 2012; Nold, 1989; Sass, 1994; Sterrett, 2007).

Verglichen mit Stahlbrunnenfilter haben Brunnenfilter aus Kunststoff geringere mechanische Eigenschaften und werden deshalb vor allem im oberflächennahen Bereich eingesetzt (Tholen, 2012). Die Brunnenfilter können zusätzlich durch innenliegende Stützgitter verstärkt werden, um die mechanischen Eigenschaften der Brunnenfilter zu optimieren. Für oberflächennahe geothermische Anwendungen eignen sich Kunststofffilter aufgrund ihrer multifunktionalen Eigenschaften ausgezeichnet.

Generell wurden in dieser Studie zwei unterschiedliche Kunststofftypen analysiert. Hauptfokus liegt auf den hochdichten makroporösen Polyethylenfilterelementen (HDPE). Zum Vergleich werden Untersuchungen an konventionellen geschlitzten Hart-Polyvinylchloridfilter (PVC-U-Filter) nach DIN 4925-1 (2014) herangezogen.

Der Bedarf am Werkstoff HDPE in Europa lag im Jahr 2013 bei etwa 12,1 % von 57 Mio t. Die Marktentwicklung der letzten Jahre ist steigend. Der Preis für ein Kilogramm HDPE variiert zwischen 0,50 und 1,75 €·kg⁻¹ weltweit (PlasticsEurope, 2015). Aus ökologischer Betrachtung ist das Monomer Ethylen ungiftig und es ergeben sich folglich für den Verbraucher keine gesundheitlichen Probleme durch Polyethylen. Toxikologisch bedenklich können je nach Einsatz die dem Polyethylen zugesetzten Additive sein. Im Vergleich zu beispielsweise PVC ist der Anteil an Additiven in Polyethylen mit durchschnittlich etwa fünf Prozent jedoch gering. Polyethylen ist im ökologischen Vergleich mit anderen Kunststoffen ein unbedenkliches Material (Bahadir et al., 2000).

HDPE als ein thermoplastischer Kunststoff ist hydrophob, resistent gegenüber Verschleiß, selbstschmierend, chemisch hochstabil und nichttoxisch (Turell & Bellare, 2004; Okumbo & Matsumoto, 1982; Bozena, 2013; Hellerich et al., 2010; Edidin & Kurtz, 2000; Ehrenstein, 2011). Dieses teilkristalline Polymer ist durch eine Schmelztemperatur T_m von 130 bis 135°C und eine Glasübergangstemperatur T_g von -110°C charakterisiert. Poröse PE Körper werden konventionell durch einen Sinterprozess hergestellt. Dafür wird das Polymergranulat in eine Form gefüllt. Anschließend wird bei losem Sintern die Form für eine bestimmte Zeit bei bestimmter Temperatur erhitzt. Die Oberfläche der Kunststoffpartikel erwärmt sich und die einzelnen Körner verschweißen an den Berührungspunkten miteinander. Der Raum zwischen den Partikeln formt die Porenräume (Hambir & Jog, 2000). Dieser Prozess wird genutzt, um poröse HDPE Brunnenfilter herzustellen.

Die untersuchten porösen Filtertypen differenzieren sich nicht nur durch variierende Partikelgrößen und folglich unterschiedliche Porenweiten, sondern auch durch verschiedenes Polyethylen mit variierender Dichte und Molekulargewicht (Tab. 1).

Geschlitzte PVC-Filter werden durch Strangextrusion des Polymergranulats zu Vollrohren gefertigt. Anschließend werden Schlitze in die Rohre hineingesägt. Hart-PVC ist ein amorpher Thermoplast. Es kennzeichnet sich durch hohe mechanische Festigkeit, Steifheit und Härte sowie hohe chemische Beständigkeit und ist schlagempfindlich bei Kälte (Domininghaus, 2008). Des Weiteren ist es schwer entflammbar und selbstverlöschend. Die thermischen Eigenschaften lassen eine Nutzung von -5°C bis +60°C zu (Hellerich et al., 2010). Die in dieser Studie untersuchten PVC-U Filter weisen eine Reindichte von 1.40 g cm⁻³ auf.

Generell gleichen die physikalischen und chemischen Eigenschaften von hochdich-

Tabelle 1: Gruppierung der untersuchten porösen HDPE -Filterelemente aufgrund des nominellen Porendurchmessers









| Gruppe | Nomineller Porendurchmesser [µm] | Mittlerer Partikeldurchmesser [µm] | Mittlere Partikeldichte [gcm ⁻³] | Mittleres Molekulargewicht [g mol ⁻¹] | Technische Bezeichnung |
|--------|----------------------------------|------------------------------------|--|---|------------------------|
| A | 20 | 205 | 0.925 | 8·10 ⁶ | PE-UHMW |
| B | 40 | 330 | 0.930 | 5·10 ⁶ | PE-UHMW |
| C | 200 | 900 | 0.954 | 4·10 ⁵ | HDPE |
| D | 500 | 3000 | 0.945 | 1·10 ⁶ | PE-HMW |

tem PE denen von harten PVC. Wichtig ist jedoch die unterschiedliche molekulare Struktur der beiden Thermoplaste. Das amorphe PVC-U ändert seine physikalischen Eigenschaften sprunghaft bei der Glasübergangstemperatur T_G , wohingegen das teilkristalline PE seinen Charakter erst bei der Schmelztemperatur T_s verändert. So kann PVC-U bei $T < T_G$ genutzt werden. PE wird aber im Temperaturbereich T_G bis T_s eingesetzt (Bozena, 2013).

Die analysierten Filtertypen unterteilen sich neben dem Werkstoff und der Herstellungsart allerdings auch in Wandstärke und Öffnungs- bzw. Porenweite. In Tabelle 2 sind die untersuchten Filtertypen bezüglich ihrer Maße dargestellt.

Die ökonomische Gegenüberstellung der Werkstoffe HDPE und PVC-U belegt einen gleichrangigen Stellenwert. Der Preis pro Kilogramm für PVC-U beträgt etwa 0,55-1,4 €·kg⁻¹ und der europäische Bedarf liegt bei 10,4 % des Kunststoffmarktanteils (PlasticsEurope, 2015). Die ökologische Betrachtung zeigt, dass das Edukt für PVC (Vinylchlorid) beim Menschen Krebs erzeugen kann und wirkt erbgutverändernd. Auch andere Ausgangsstoffe der PVC-Herstellung sind gesundheitlich bedenklich. Die im PVC enthaltenen Additive wie z.B. Stabilisatoren und Farbstoffe können schwermetallhaltig sein. Es ist möglich, dass diese Schwermetalle in Müllverbrennungsanlagen freigesetzt werden. Außerdem können bei diesem Prozess Chlorwasserstoffe und Dioxine ausgeschieden werden. Daher ist PVC als ein gesundheitlich bedenkliches Material einzustufen (Bahadir et al., 2000).

Tabelle 2: Gruppierung der untersuchten Filtertypen aufgrund von Filtermaterial, Filtertyp und nomineller Öffnungsweite

| Gruppe | Farbcode | Filtermaterial | Filtertyp | Nominelle Öffnungsweite [µm] | Nominelle Wandstärken [mm] | Nomineller Außendurchmesser [mm] |
|--------|---|----------------|------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| A |  | PE-UHMW | porös | 20 | 7/5/12.5 | 30/50/125 |
| B |  | PE-UHMW | porös | 40 | 7/5/7.5/12.5/15 | 30/50/75/125/180 |
| B* |  | PE-UHMW | porös | 80 | 7.5/12.5/15 | 75/125/180 |
| C |  | HDPE | porös | 200 | 7.5/12.5/15/50 | 75/125/180/355 |
| D |  | PE-HMW | porös | 500 | 7.5/12.5/15 | 75/125/180 |
| E |  | PVC (hart) | geschlitzt | 300 | 13 | 113 |
| F |  | PVC (hart) | geschlitzt | 500 | 13 | 113 |
| G |  | PVC (hart) | geschlitzt | 750 | 13 | 113 |

Hauptteil

Strukturelle Eigenschaften

Einführung

Die unterschiedliche Struktur der beiden untersuchten Filtertypen basiert auf deren Herstellungsart. Die offenen Flächen der makroporösen PE-Filter hängen primär von den Polymergranulatkörnern ab. Es kann angenommen werden, dass die Form der HDPE-Partikel kubisch ist (Zhang et al., 2012). Unter idealen Bedingungen verschweißen die Partikel punktuell. Folglich repräsentiert die kubisch flächenzentrierte Kristallstruktur die Anordnung der Polymerkörner am besten. Da die Korngröße des Kunststoffpuders aber nicht homogen ist und die Partikel nicht vollständig kubisch sind, kann die Struktur in den porösen Filterelementen als annähernd flächenzentriert beschrieben werden (Salmang & Scholze, 2007) (Hornbogen, 2006). Der Porenradius r im kubisch flächenzentrierten System ist gegeben durch den Raum zwischen drei Partikeln (Abb. 1a)). Es entsteht ein gleichseitiges Dreieck.

$$r = 0,155 * R_i \quad \text{Gl.1}$$

Abbildung 1b) zeigt die tatsächliche Verbindung der Granulatkörner mit flächenhafter Verschweißung. Es wird deutlich, dass in diesem Modell der Radius des Porenraumes r kleiner ist als in dem Modell mit punktueller Verschweißung. Berücksichtigt man, dass die Veränderung des Partikelradius $\Delta R = R_i - R$ nach dem Sintern wesentlich geringer ist als der ursprüngliche Partikelradius R_i und die Verschweißungsfläche X vernachlässigbar klein ist im Vergleich zu R , kann der Porenradius r unter Annahme der Idealbedingungen berechnet werden (Zhang et al., 2012).

$$r = \frac{\sqrt{3}}{3} \left(2R_i - \frac{x^2}{2R} \right) - R \quad \text{Gl.2}$$

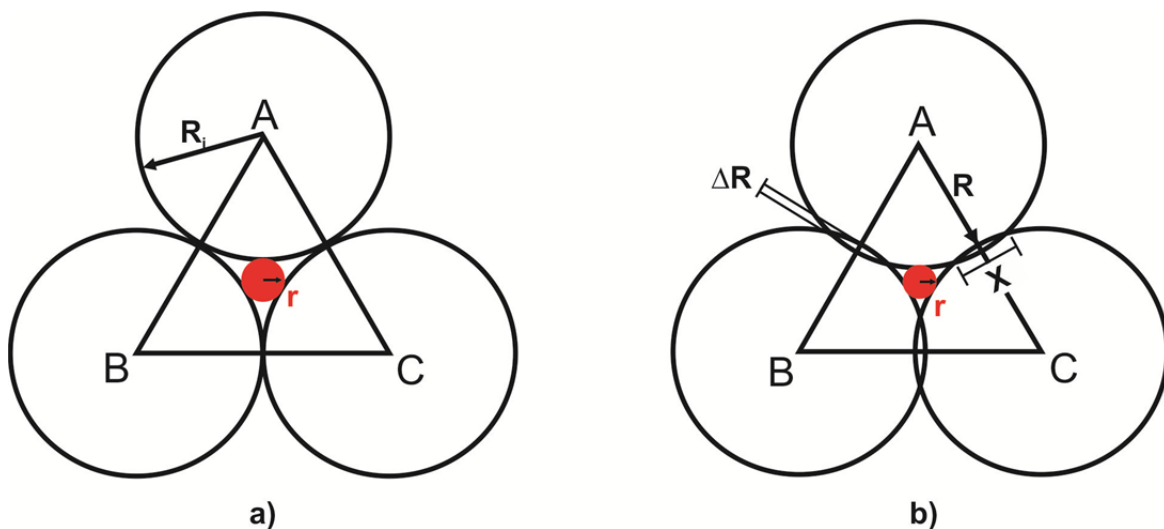


Abbildung 1a) Schematische Darstellung der Packungsdichte im kubisch flächenzentrierten System. Die kubischen Partikel berühren sich an den Kontaktpunkten. b) Schematische Darstellung der tatsächlichen Packungsdichte bei gesinterten kubischen Materialien. Die Partikel verschweißen an Kontaktflächen mit Länge x und Breite y (Verändert nach Zhang et al. (2012))

Die Öffnungsweite der Schlitzfilter ist gegeben durch die Schlitzlänge, Schlitzweite, Anzahl der Schlitze und Filteraußenradius und Filterhöhe (Sterrett, 2007).

$$OA = \frac{n_s \cdot s_l \cdot s_w}{2\pi r_A \cdot h} \quad \text{Gl.3}$$

Die beiden Filtertypen unterscheiden sich aber nicht nur in der Art offenen Fläche, sondern auch durch die geschaffene Tortuosität T (Abb. 2). Der geometrische Faktor, der die Gewundenheit der Transportwege in porösen Medien beschreibt, variiert maßgeblich. Während nach (Bear, 1972) das Verhältnis aus zwischen der theoretisch kürzesten Länge L_k und der tatsächlich durchströmten Bahnlänge L_b beim Schlitzfilter $T=1$ ist, kann die Tortuosität beim porösen Medium nur über die Porosität abgeschätzt werden (Liu et al., 1996). Da die Porosität eines porösen Mediums immer kleiner eins ist, folgt $T < 1$ für die porösen Filterelemente.

$$T = \sqrt{n} \quad \text{Gl. 4}$$

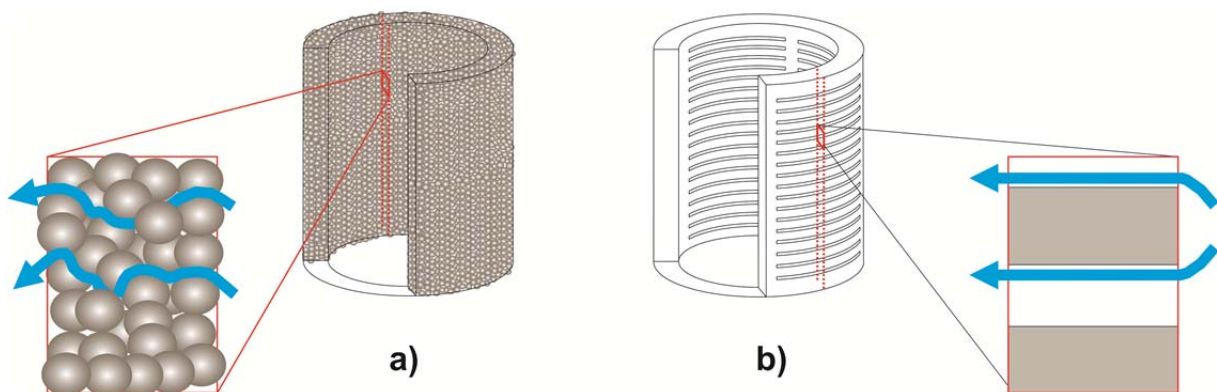


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Transportmodells von Wasser a) im porösen b) im geschlitzten Filterelement.

Methodik

Die Reindichte von Festkörpern kann über die Gasverdrängungspyknometrie (AccuPyc 1330, Fa. Micromeritics) bestimmt werden. Für die Messung wird ein Probenkörper, dessen Gewicht vorher bestimmt wurde, in die Probenkammer des Instrumentes eingegeben und verschlossen. Während der Messung wird die Probenkammer wieder mit Heliumgas befüllt bis der Druck p_1 erreicht ist. Anschließend wird ein Expansionsventil geöffnet, so dass sich in der expandierten Kammer der Druck p_2 einstellt. Unter Annahme des idealen Gasgesetzes kann mithilfe der beiden Drücke und Volumina das Kornvolumen des Probenkörpers bestimmt werden. Die Reindichte wird aus dem Verhältnis der Probenmasse zum Kornvolumen errechnet (Webb, 2001). Mithilfe der ermittelten Reindichte kann die Rohdichte φ_B und Porosität n durch Messung des Gewichts und Erfassung der Maße bestimmt werden.

Mikro-Röntgen-Computer Tomographie (μ XCT) kann als dreidimensionale zerstörungsfreie Untersuchungsmethode des Porenraums helfen die Eigenschaften von porösen Medien besser zu charakterisieren. Die Untersuchung und Modellierung von Porenräumen und Porennetzwerken kann einen detaillierten Einblick in die Entwicklung von Permeabilität und Porosität ermöglichen (Taud et al., 2005; Ketcham & Carlson, 2001). Die Mikrotomographie wurde mithilfe des Procon X-Ray CT-Alpha am Institut für Geowissenschaften, Johannes Gutenberg Universität Mainz realisiert. Das Instrument operierte unter 100 kV Beschleunigungsspannung und

Strom von 120 μA . Der Strahl wurde anhand einer 1 mm mächtigen Aluminiumfolie vorgefiltert. Die bestrahlten Proben waren in einem Abstand von 250 mm zur Röntgenröhre auf einen Drehversteller zur optimalen Vergrößerung und Auflösung befestigt. Es wurden 800 Projektionen über einen 360° Winkel mit durchschnittlich 10 Bildern pro Projektion und einer Akquisitionszeit von 1,5 sec pro Bild aufgenommen. Das resultierte in einen Datensatz mit 22.4 μm pro Volumenpixel räumlicher Auflösung.

Hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie (SEM) mit energie-dispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) macht es möglich, Oberflächen von Materialien im Nanobereich mit einer maximalen Auflösung von $10^6:1$ abzubilden (Zhou & Wang, 2007). Die besondere Methode des Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) unter Niedrigvakuumbedingungen eignet sich dafür nichtleitende Werkstoffe wie Polymere ohne weitere Präparation ebenfalls zu untersuchen. Genau wie bei einem konventionellen Rasterelektronenmikroskop wird die Probe von einem fokussierten Elektronenstrahl gerastert und das bei der Wechselwirkung mit der Probe entstehende Signal zur Bilderzeugung verwendet. Im ESEM werden Rückstreuелеktronen (BSE) für ein materialspezifisches Signal und Sekundärelektronen (SE) für ein topographisches Signal genutzt (Optics, 1996). Die porösen Filterelemente wurden anhand des kommerziellen Quanta 200 F (Fa. FEI) Rasterelektronenmikroskop unter Niedrigvakuumbedingungen bei einem Wasserdampfdruck von 1,2 mbar für materialspezifische BSE-Aufnahmen untersucht. Der Elektronenstrahl mit einem Durchmesser von 10 nm mit 15 kV beschleunigt. So wird die visuelle Darstellung von Materialien mittels ESEM im Nanobereich durch qualitative Aussagen über die elementaren Bestandteile des betrachteten Materials mit Hilfe von EDX ergänzt.

Ergebnisse

Zur Abschätzung des Porendurchmessers kann nach Gl. 1 der mittlere Partikeldurchmesser berechnet werden. Die Daten in Tabelle 3 ergeben, dass die Filter der Porengruppe D mit dem kubisch flächenzentrierten System annähernd beschrieben wird. Der berechnete Porendurchmesser von Gruppe A und B ist größer als der nominelle und für Gruppe C gilt das Gegenteil.

Tabelle 3: Berechnete Porendurchmesser der makroporösen Filterelemente basierend auf dem Partikeldurchmesser des Rohmaterials nach Gl. 1

| Gruppe | Nomineller Porendurchmesser [μm] | Mittlerer Partikel Durchmesser [μm] | Mittlerer berechneter Porendurchmesser [μm] |
|--------|---|--|--|
| A | 20 | 205 | 32 |
| B | 40 | 330 | 51 |
| C | 200 | 900 | 140 |
| D | 500 | 3000 | 465 |

Mit den in dieser Studie beprobten Filterelemente wurde eine Datenbank ($n = 666$) erstellt, die eine statistische Analyse von Rohdichte, Porosität und offener Fläche der Filtertypen ermöglichte. In Tabelle 4 sind die arithmetischen Mittel der strukturellen Kennwerte für die einzelnen Gruppen aufgelistet. Rohdichte und Porosität antiproportional hängen voneinander ab und folglich ergibt sich für diese beiden

Parameter folgendes Bild: Gruppe B und B* hat die höchste Porosität gefolgt von Gruppe D, A und C. Die Porosität variiert von 33 bis 41 %. Bei den geschlitzten Filter (Gruppe E, F, G) nimmt die Porosität mit steigender Öffnungsweite von 5 auf 10 % zu. Diese Analogie zur Öffnungsweite kann für die porösen Filterelemente nicht festgestellt. Es ist aber ein direkter Zusammenhang von Reindichte des Polyethylens mit der Rohdichte bzw. Porosität erkennbar. Die offene Fläche der Filtergruppen verhält sich gemäß der Porosität der Filterelemente. Die porösen Filter haben eine mittlere offene Fläche von 27 bis 34 %. Die offene Fläche der geschlitzten Filter reicht von vier bis 7 %.

Tabelle 4: Mittelwerte der strukturellen Kennwerte aller untersuchten Filterelemente

| Gruppe | n | Nominelle | Mittlere | Mittlere | Mittlere | Mittlere |
|--------|-----|-------------------|----------------------------|----------------------------|-----------|---------------|
| | | Öffnungsweite | Reindichte | Rohdichte | Porosität | Offene Fläche |
| | | [μm] | [kg/m^3] | [kg/m^3] | [-] | [-] |
| A | 109 | 20 | 933 | 596 | 0.36 | 0.30 |
| B | 104 | 40 | 931 | 547 | 0.40 | 0.34 |
| B* | 14 | 80 | 931 | 549 | 0.41 | 0.34 |
| C | 127 | 200 | 939 | 631 | 0.33 | 0.27 |
| D | 104 | 500 | 935 | 571 | 0.39 | 0.32 |
| E | 59 | 300 | 1400 | 1331 | 0.05 | 0.04 |
| F | 73 | 500 | 1400 | 1315 | 0.06 | 0.05 |
| G | 74 | 750 | 1400 | 1261 | 0.10 | 0.07 |

Die Datenreihen zur Porosität in Form von Box Plots sind in Abbildung 3 dargestellt. Alle Gruppen zeigen eine heterogene Verteilung der Porosität, wobei die größte Variation der Kenngröße für Gruppe C festgestellt werden kann.

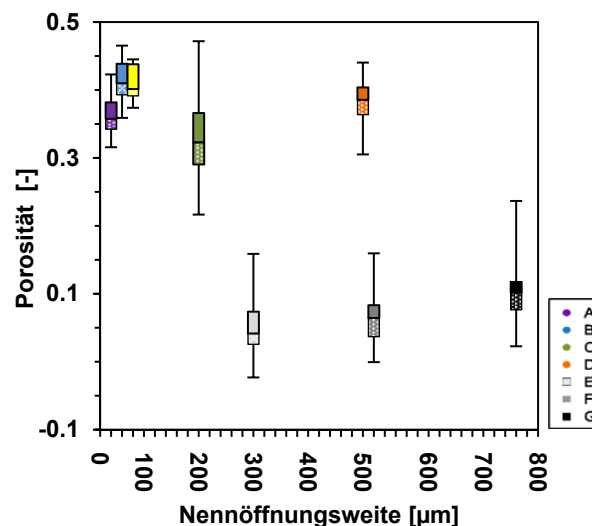


Abbildung 3: Box Plot zur Porosität der Filtertypen in Abhängigkeit der nominellen Öffnungsweite

Diese Aussage kann durch die statistische Untersuchung nach Weibull (1939) gestützt werden. In Abbildung 4 ist die Porosität für die Gruppen A, B, C und D im Weibulldiagramm dargestellt. Die Steigung m ist ein Indiz für die Streuung des analysierten Parameters. Gruppe A, B und D mit $m \geq 26$ sind relativ homogen,

wohingegen der Weibullwert für Gruppe C mit $m = 7$ auf eine größere Streuung der Daten hinweist.

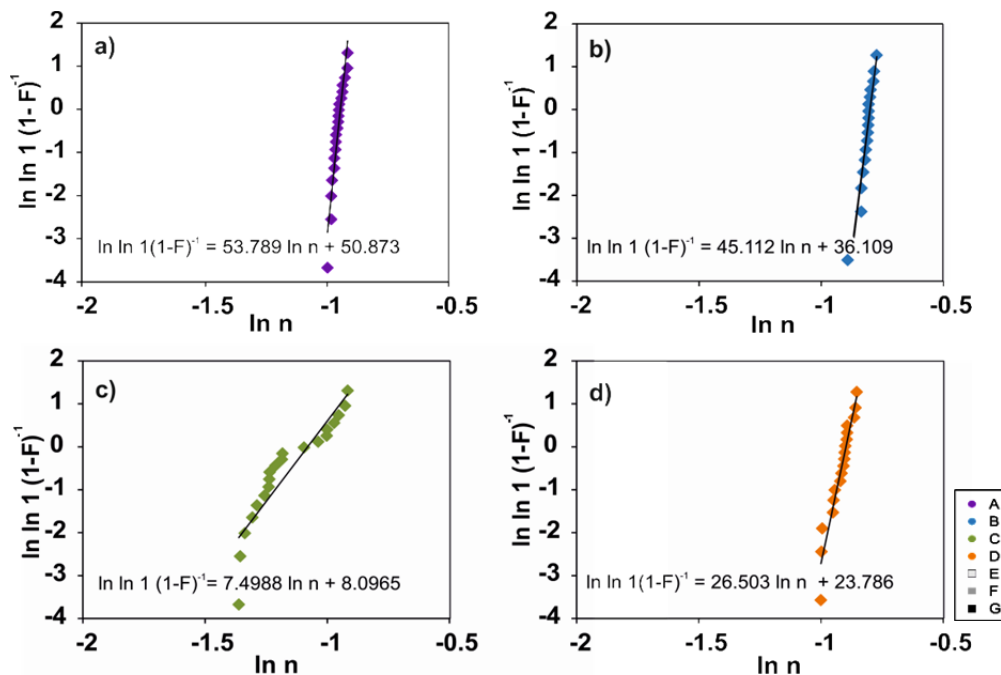


Abbildung 4: Verteilung der Porosität anhand von Weibulldiagrammen der Filtertypen A bis D

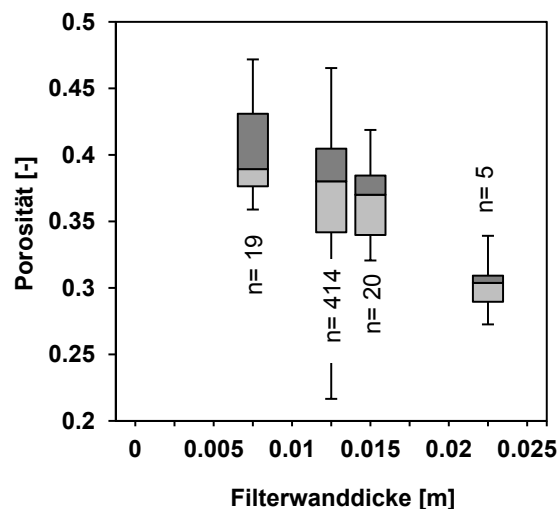


Abbildung 5: Box Plot zur Porosität der Filtertypen A bis D in Abhängigkeit der Filterwandstärke

In Abbildung 5 ist die Verteilung der Porosität der porösen PE-Filterelemente in Abhängigkeit von Filterwanddicke dargestellt. Obwohl die Anzahl der einzelnen Datenreihen stark variiert, wird deutlich, dass mit Zunahme der Wandstärke die Porosität abnimmt. Für die Filterelemente mit nomineller Wandstärke 22.5 mm sinkt die mittlere Porosität sogar unter 30 %. Es kann angenommen werden, dass hier beim Herstellungsprozess die Partikel miteinander verschmelzen und somit die Porosität der Filterelemente herabgesetzt wird.

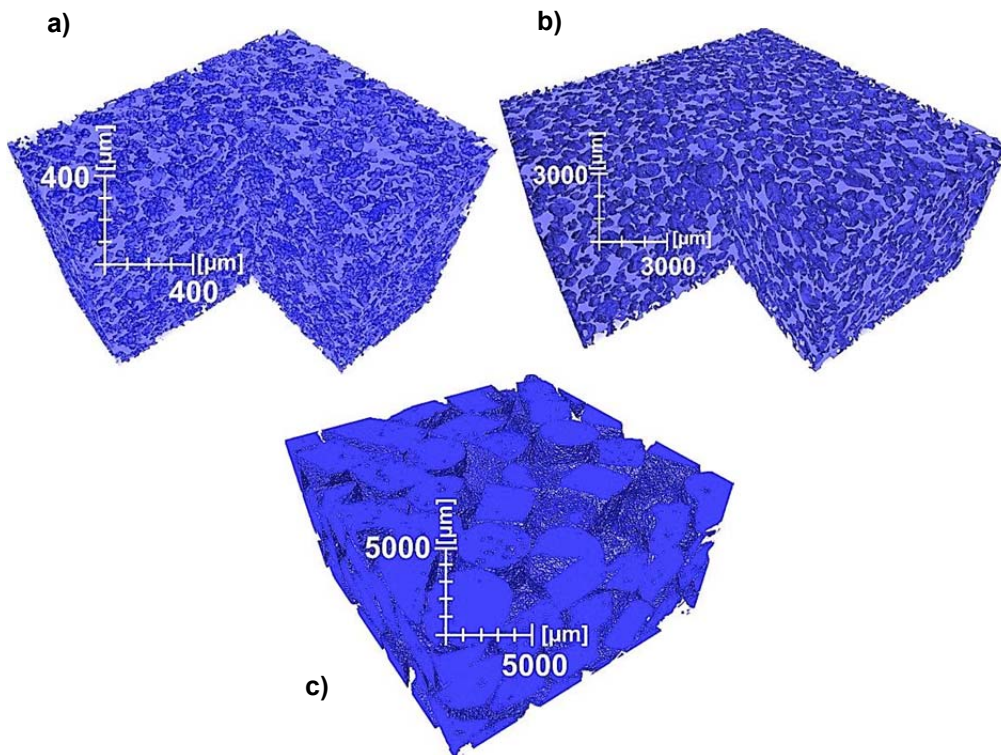


Abbildung 6: Visualisierung des strukturellen Aufbaus der makroporösen Filter der Gruppen a) B, b) C und c) D anhand von Mikrocomputertomographie

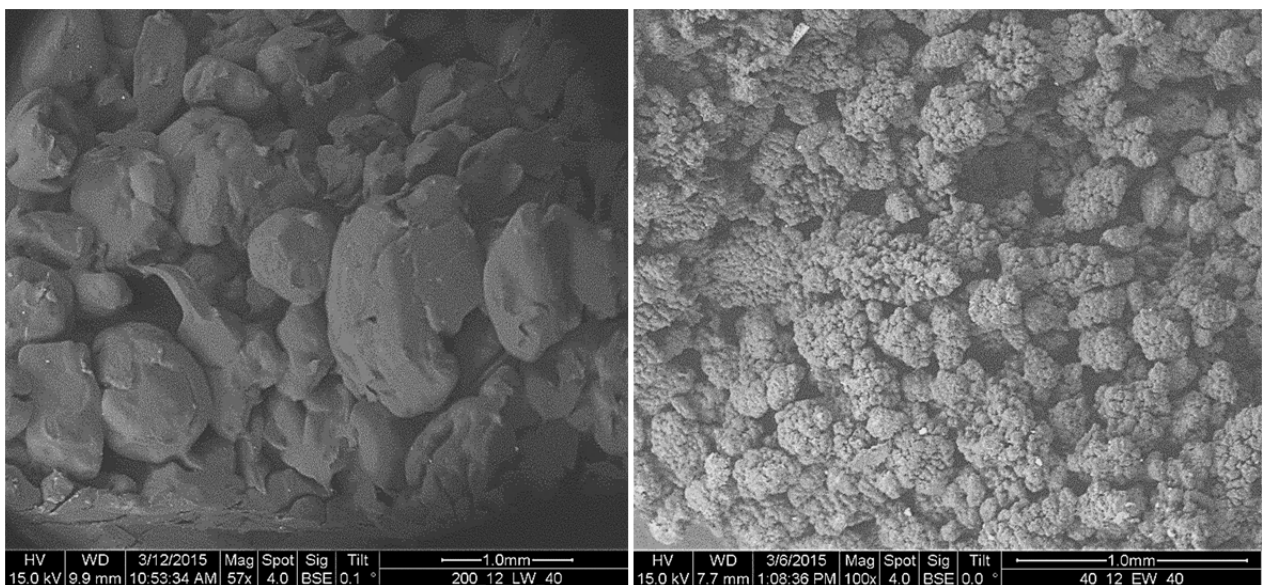


Abbildung 7: Visualisierung des strukturellen Aufbaus der makroporösen Filter der Gruppen a) B und b) C anhand von Rasterelektronenmikroskopie

Der strukturelle Aufbau der porösen Filterelemente kann mittels μ XCT (Abb. 6) und ESEM (Abb. 7) dargestellt werden. Die rasterelektronischen Aufnahmen bilden zweidimensionale Aufsichten auf die Filtermatrix ab, wohingegen bei den dreidimensionalen computertomographischen Abbildungen für Gruppe B und C die Hohlräume zwischen den Partikeln und für Gruppe D die Partikelmatrix dargestellt sind. Beide Visualisierungen belegen, dass die Polymerpartikel während des Sinterprozess nicht vollkommen zerschmelzen. Die einzelnen Partikel sind an den Partikelhälsen miteinander verbunden und bilden in den Zwischenräumen die Porenvolumen.

Mechanische Eigenschaften

Einführung

Brunnenfilter sind unterschiedlichsten mechanischen Beanspruchungen während der Installation und des Betriebs ausgesetzt. Es kommt zu Druck- und Zugbelastung vor allem beim Einbau der Filterrohre (Nold, 1989). Außerdem sind die Brunnenfilter dem mechanischen Zylinderdruck im Betrieb ausgesetzt.

Das mechanische Verhalten von Brunnenfilterelementen kann durch einaxiale Druck- und Zugversuche bestimmt werden (Rüther et al., 2015). Für die Anwendung im geothermalen Brunnenbau ist zu beachten, dass die Druckfestigkeit eine temperaturabhängige Größe ist. Für diese technische Anwendung im oberflächennahen geothermalen Brunnenbau ist es daher wichtig zu wissen, in welchem Temperaturbereich die Brunnenfilter aus mechanischen Gründen eingesetzt werden können. In Abbildung 8 sind exemplarisch die E-Module von PVC-U und Polyethylen in Abhängigkeit von der Temperatur visualisiert. Diese Abbildung verdeutlicht die exponentielle Reduktion der mechanischen Eigenschaften von PVC über 60°C. Die Abnahme der mechanischen Eigenschaften von PE von 0 bis 130°C verhält sich dahingegen beinahe linear. Neben der Festigkeit ist auch das Deformationsverhalten der thermoplastischen Körper temperaturbedingt. Wenn die Deformationstemperatur zwischen Schmelz- und Glasübergangstemperatur ist, zeigen teilkristalline Polymere duktile bis semiduktile Deformation. Bei $T < T_G$ entstehen typische Risse als Form des Bruchverhaltens (Michler, 1992).

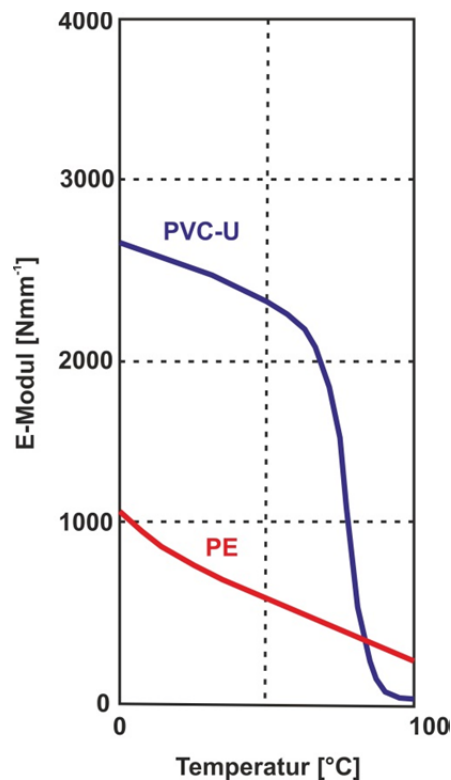


Abbildung 8: E-Modulkurven von PVC-U und PE im Temperaturbereich 0 bis 100°C (Verändert nach (Ehrenstein, 2011))

Abbildung 9 veranschaulicht idealisiertes Deformationsverhalten verschiedener Polymertypen. Typ (a) weist ein (halb)sprödes Bruchverhalten von Polymeren im amorphen Zustand. Typ (b) zeigt duktilen Verhalten mit Einschnüren und Fließen. Mit Typ (c) ist Kaltziehen eines Polymers dargestellt. Schließlich ist Typ (d) ein Beispiel

für homogene Deformation eine Thermoplasten mit $T > T_G$ (Michler & Baltá-Calleja, 2012).

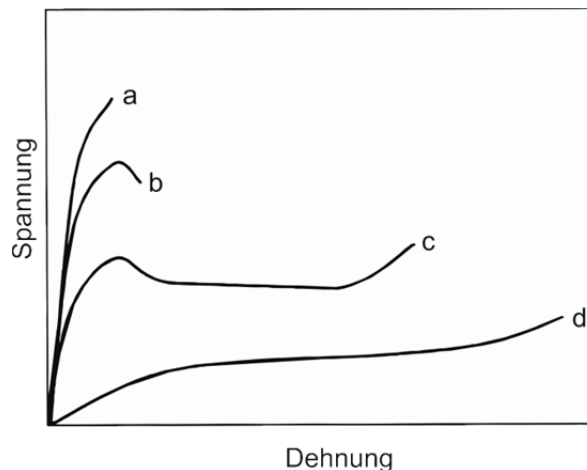


Abbildung 9: Schematisches Deformationsverhalten von thermoplastischen Polymeren (Verändert nach Michler & Baltá-Calleja (2012))

Generell ist die Festigkeit von thermoplastischen Brunnenfiltern aber vor allem mit dem Werkstoff verknüpft. Zhang et al., (2012) wiesen nach, dass die mechanischen Eigenschaften von mikroporösen HDPE-UHMW-Filtern von der Reindichte bzw. dem Molekulargewicht des Materials abhängen. Außerdem wirken sich die Partikelgröße und folglich die Porengröße auf die Festigkeit von den gesinterten Körpern aus. Die Reduktion der Festigkeit aufgrund von porösen Strukturen wird von (Duckworth, 1953) beschrieben:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-b \cdot n) \quad \text{Gl. 5}$$

Folglich hängt die Festigkeit eines porösen Mediums von der Festigkeit des dichten Materials, einer Werkstoffkonstante b ($3 \geq b \geq 9$) und der Porosität des Materials n ab. Reines PVC-U ist nach DIN EN ISO 527-1 (2012) durch eine Zugfestigkeit von 50 bis 75 MPa charakterisiert. Hochdichtes Polyethylen dahingegen hat eine verhältnismäßig geringere Zugfestigkeit von 18 bis 35 MPa (Abts, 2014).

Basierend auf diese theoretischen Annahmen kann zum einen ein direkter Vergleich zwischen den porösen Filtervarianten, aber auch zu den geschlitzten PVC-Schlitzfiltern gezogen werden.

Methodik

Druck- und Zugfestigkeit sowie die dazugehörigen E-Moduli wurden mit der universalen mechanischen Druckpresse Type 102/1000S (Form+Test, Germany) bestimmt. Die Versuche sind kraft geregelt gesteuert. Die Kraft nimmt mit 250 Ns^{-1} zu. Es wurden unterschiedliche Versuche bei verschiedenen Temperaturen gefahren (10, 25 und 40°C), um diverse Bedingungen über der Glasübergangstemperatur abzubilden.

Die Daten von Festigkeitsanalysen können enorm streuen. Mithilfe der Weibull-Verteilung ist es möglich einen mittleren Kennwert σ_m abzuschätzen. Diese Kenngröße entspricht mit einer Wahrscheinlichkeit von 63.2 % der Festigkeit aller untersuchten Proben. Der mit dieser Methode bestimmte Indikator m lässt eine Aussage über die Verlässlichkeit der Datenreihe zu. Umso größer m , umso geringer ist die Streuung der Daten.

$$\ln \ln \frac{1}{1-F} = m \cdot \ln \sigma - m \cdot \ln \sigma_m$$

Gl.6

Ergebnisse

In Abbildung 10 ist exemplarisch das Spannungs-Dehnungsdiagramm der einaxialen Druckversuche von Gruppe C bei 25°C dargestellt. Das mechanische Verhalten der hier analysierten Brunnenfilter variiert stark. Das Diagramm verdeutlicht, dass die elastische und plastische Deformation sowie Dehnung bei der Kompression heterogen ist. Die einaxiale Druckfestigkeit variiert von 7 bis 12 MPa.

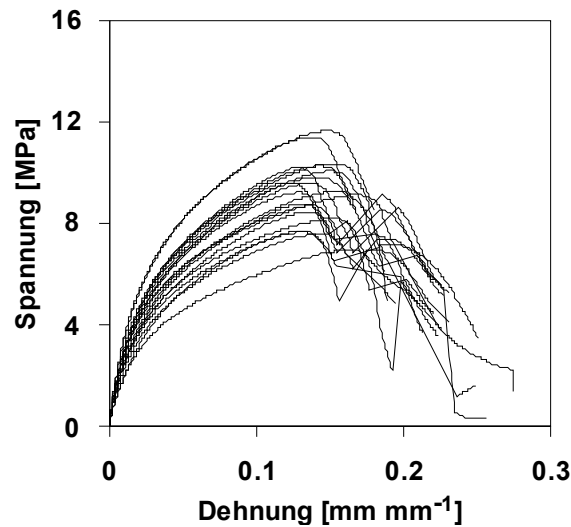


Abbildung 10: Spannungs-Dehnungsdiagramm für einaxiale Druckversuche der Filtergruppe C bei 25°C

Die Datenreihen der Druckfestigkeit σ_u sind in Abbildung 11 für Gruppe A, B, C und D bei 25°C in Weibulldiagrammen dargestellt (Rüther et al., 2015). Die Steigung der Funktionen in Abbildung 11 a) und b) gleicht sich, wohingegen die Weibullanalyse der Gruppe C (Abb. 11c)) einen Datensatz mit höheren logarithmischen Festigkeiten und breitere Variation ausweist. Gruppe D ist durch einen relativ geringen Streuungsindikator m charakterisiert und die logarithmische Druckfestigkeit der Filterelemente ist niedrig (Abb. 11d)).

Zur Erläuterung der mechanischen Eigenschaften bietet es sich an, die Variation durch Vergleich mit den strukturellen Eigenschaften zu erklären (Abb. 4). Die Weibullverteilungen bestätigen einen Zusammenhang zur einaxialen Druckfestigkeit. Die Datenreihen A, B und C sind homogen. Die Porosität der Gruppe C ist durch weite Streuung charakterisiert. Die strukturellen Eigenschaften können die Streuung der Druckfestigkeit von Gruppe C erklären. Diese HDPE -Filterelemente werden mit einer großen Variation an Porosität gefertigt, die eine direkte Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften hat. Außerdem werden die Filter der Gruppe A und B mit einer homogenen Porosität hergestellt, die in einer einheitlichen einaxialen Druckfestigkeit resultiert. Indes kann die Streuung der mechanischen Eigenschaften aus Gruppe D nicht anhand der Porosität erläutert werden.

Wie vorher erwähnt, ist die mechanische Eigenschaft von porösen Polymerfiltern von unterschiedlichen Parametern abhängig. Abbildung 12 veranschaulicht die Relation von Porosität und einaxialer Druckfestigkeit der porösen Kunststoffkörper. Jede einzelne Datenreihe ist durch einen linearen Abfall der Druckfestigkeit mit steigender

Porosität charakterisiert. Zhang et al. (2012) bewiesen ein Wachstum der Druckfestigkeit mit steigendem Molekulargewicht bei mikroporösen HDPE-Filterelementen. Folglich ist auch bei Gruppe D, dessen Werkstoff durch ein geringes Molekulargewicht charakterisiert ist, die Druckfestigkeit am geringsten. Die mechanische Belastbarkeit der Gruppen A und B korrespondiert ebenfalls zu diesem Prinzip. Die untersuchten Filter der Gruppe C haben die günstigste mechanische Eigenschaft trotz geringstem Molekulargewicht aller getesteten Filtertypen. Folglich kann angenommen werden, dass, basierend auf Abbildung 12, die Porosität, die hier geringer ist, makroporöser HDPE-Filter einen größeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften als das Molekulargewicht des Filtermaterials hat.

Zum Vergleich ist in Abbildung 12 außerdem die einaxiale Druckfestigkeit der geschlitzten Filterelemente aufgetragen. Die Druckfestigkeit der Gruppe E, F und G ist geringfügig höher als die der porösen Filterelemente. Dies ist bemerkenswert, da die Porosität der geschlitzten Filter wesentlich niedriger ist als die der HDPE-Filter (**Kap. Strukturelle Eigenschaften**). Nach Berechnung der Druckfestigkeit mit Gl. 5 sollte die der geschlitzten Filterelemente etwa bei 40 MPa und die der porösen Filterelemente bei etwa 5 MPa liegen, was für die porösen Filter die ermittelten Daten widerspiegelt. Folglich kann die Reduktion der mechanischen Eigenschaften aufgrund von porösen Strukturen für die Gruppen A bis D sehr gut mit der Gl. 5 nach (Duckworth, 1953) beschrieben werden. Andererseits minimiert die Schlitzung der PVC-U-Filterelemente die Festigkeit der Brunnenfilter auf 10 bis 20 % der mechanischen Eigenschaften des dichten Materials. Dabei wird auch deutlich, dass bei größter Schlitzweite, also bei Gruppe F, die Festigkeit am geringsten ist.

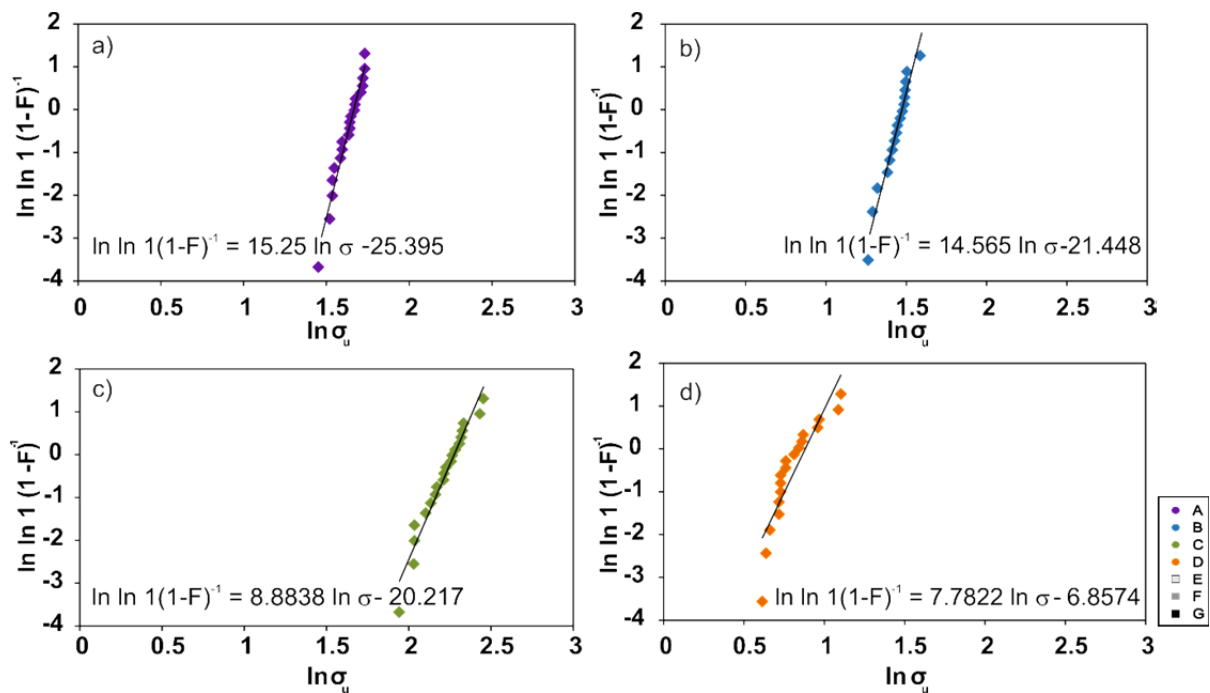


Abbildung 11: Verteilung der einaxialen Druckfestigkeit anhand des Weibull-diagramms für Filtertypen der Gruppe a) A, b) B, c) C und d) D

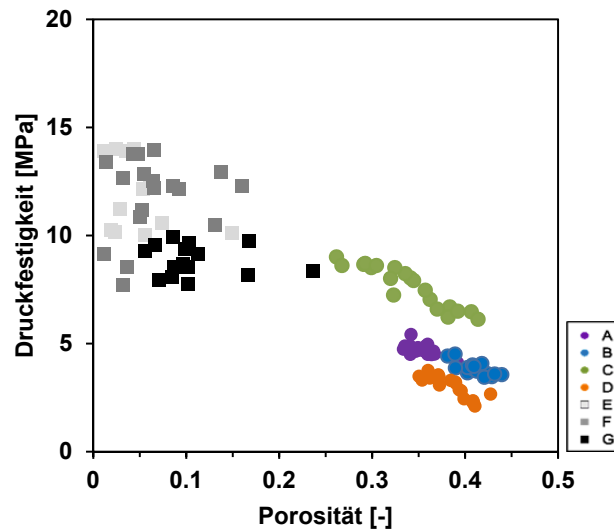


Abbildung 12: Einaxiale Druckfestigkeit bei 25°C für Filtertypen A bis G in Abhängigkeit der Porosität der Filterelemente

Die Tabelle 5, 6 und 7 geben eine Übersicht über die weiteren mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Filterelemente aus Gruppe A bis G bei Raumtemperatur. Angegeben sind der Mittelwert, der Weibullwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient der Festigkeit und des dazugehörigen E-Moduls. Die Daten in Tabelle 5 bestätigen die vorangestellten Daten in Abbildung 12. Die Druckfestigkeit in Gruppe A und B sind mittelklassig. Gruppe C hat die höchste und Gruppe D die geringste Druckfestigkeit der porösen Filterelemente. Die geschlitzten PVC-Filter haben eine einaxiale Druckfestigkeit von etwa 15 MPa und überbieten damit mehrfach die Leistungsfähigkeit der porösen HDPE-Filter. Die höchste mechanische Belastbarkeit hat die Filtergruppe F, gefolgt von Gruppe G und E. Die relative Abweichung der mechanischen Kenngröße reicht von 4 bis 26 %. Das dazugehörige E-Modul spiegelt dieselbe Ordnung wieder und hier liegt die relative Streuung bei 5 bis 20 %. Die zyklischen Druckversuche bei Raumtemperatur (Tab. 6) ergeben dasselbe Bild wie die der einfachen Druckversuche aus Tabelle 5. Hier liegt der relative Fehler mit 11 bis 29 % höher. Auch für die Zugfestigkeit der porösen HDPE-Filterelemente ist die Rangordnung der Filtertypen gleich (Rüther et al., 2013) (Tab. 7): Gruppe C ist mechanisch am höchsten belastbar, gefolgt von Gruppe A und B. Die Zugfestigkeit von Gruppe D ist halb so groß wie Gruppe C. Auffällig ist auch hier die Streuung der Daten mit Variationskoeffizienten von 0.15 bis 0.36.

Tabelle 5: Statistische Kennwerte der einaxialen Druckfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C

| Gruppe | n | Druckfestigkeit | | | | E-Modul | | | |
|--------|----|-----------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------|--------------------|-----------------------|
| | | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient |
| | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] |
| A | 20 | 5.2 | 5.1 | 0.4 | 0.08 | 99.9 | 99.7 | 13.2 | 0.13 |
| B | 17 | 4.4 | 4.2 | 0.3 | 0.08 | 89.4 | 83.5 | 14.2 | 0.17 |
| C | 20 | 9.7 | 9.2 | 1.3 | 0.14 | 275.1 | 265.9 | 53.1 | 0.20 |
| D | 18 | 2.4 | 2.3 | 0.3 | 0.15 | 84.5 | 82.6 | 12.5 | 0.15 |
| E | 8 | 14.2 | 13.9 | 0.6 | 0.04 | 727.8 | 713.2 | 31.8 | 0.05 |
| F | 14 | 15.6 | 13.9 | 3.6 | 0.26 | 756.8 | 726.0 | 105.7 | 0.15 |
| G | 18 | 14.7 | 13.2 | 2.6 | 0.20 | 733.5 | 718.7 | 74.7 | 0.10 |

Tabelle 6: Statistische Kennwerte der einaxialen zyklische Druckfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C

| Gruppe | n | Zyklische Druckfestigkeit | | | | E-Modul | | | |
|--------|----|---------------------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------|--------------------|-----------------------|
| | | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient |
| | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] |
| A | 10 | 6 | 5.3 | 1.5 | 0.28 | 122.4 | 108.2 | 31.6 | 0.29 |
| B | 10 | 4.9 | 4.4 | 1.1 | 0.25 | 93.6 | 85.9 | 20.3 | 0.24 |
| C | 11 | 10.3 | 9.7 | 1.5 | 0.15 | 282.1 | 266.6 | 37.7 | 0.14 |
| D | 10 | 4.5 | 4.3 | 0.5 | 0.11 | 129.1 | 120.2 | 21.8 | 0.18 |

Tabelle 7: Statistische Kennwerte der einaxialen Zugfestigkeit und des E-Moduls bei 25°C

| Gruppe | n | Zugfestigkeit | | | | E-Modul | | | |
|--------|----|---------------|------------|--------------------|-----------------------|-------------|------------|--------------------|-----------------------|
| | | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient | Weibullwert | Mittelwert | Standardabweichung | Variationskoeffizient |
| | | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] |
| A | 23 | 3.2 | 3 | 1.1 | 0.36 | 119.2 | 113.9 | 21.1 | 0.18 |
| B | 15 | 3.3 | 3 | 0.6 | 0.18 | 126.2 | 118.9 | 22.1 | 0.19 |
| B* | 13 | 2.7 | 2.6 | 0.2 | 0.09 | 102.8 | 95.7 | 16.4 | 0.17 |
| C | 15 | 5.9 | 5.2 | 1.2 | 0.22 | 233.6 | 239 | 50.5 | 0.21 |
| D | 11 | 2.5 | 2.5 | 0.4 | 0.15 | 138.8 | 140.7 | 27.6 | 0.19 |

Die Illustrationen in Abbildung 13 verdeutlichen beispielhaft das Deformationsverhalten der porösen HDPE-Filterelemente. Es ist offensichtlich, dass die Elemente der Gruppe A, B und C eine duktile Deformation mit Einschnüren erfahren. Bei den Filtern der Gruppe D kann individuelle Rissbildung beobachtet werden. Dies indiziert eine schwächere Bindung der Partikel an den Versinterungsbereich im Vergleich zu den anderen porösen Filterelementen. Folglich sind die Filter der Gruppe D durch eine geringere Druckfestigkeit charakterisiert (Abb. 11d)). Die heterogene Deformation dieser porösen Filter erklärt außerdem die weite Streuung der mechanischen Kennwerte.

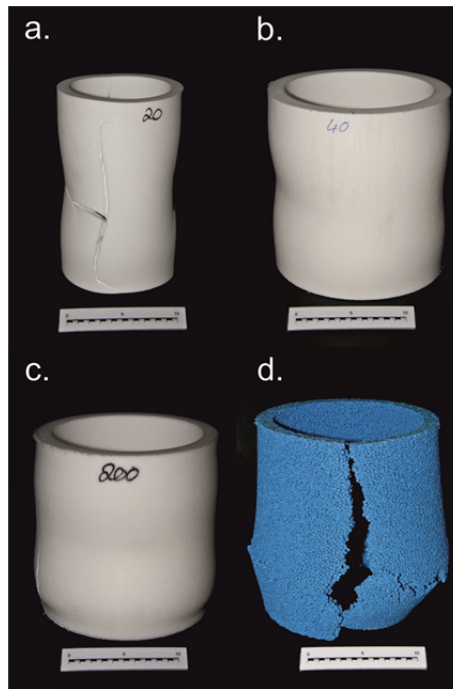


Abbildung 13: Deformation der porösen Filterelemente der Gruppen a) A, b) B, c) C und d) D nach einaxialen Druckversuchen bei 25°C

Der Versuch zur einaxialen Kompression ist bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen durchgeführt worden. Abbildung 14 zeigt die Druckfestigkeit der Filterelemente in Abhängigkeit von der Temperatur in Form eines Arrheniusgraphs. Alle Datenreihen dokumentieren einen tendenziellen Anstieg der Druckfestigkeit mit sinkender Temperatur. Die graphische Darstellung ermöglicht es, die Aktivierungsenergie E_A und die dazugehörigen $\sigma_{(T=0)}$ und $T_{(\sigma=0)}$ zu bestimmen. Die Daten sind in Tabelle 8 abgebildet. Die Datenreihen der Gruppen folgen annähernd dem Gesetz nach Arrhenius, wobei Gruppe D am meisten abweicht. Die berechnete Aktivierungsenergie kann als ein Indikator für den Gradienten der Druckfestigkeit bei variierender Temperatur interpretiert werden. Folglich ist die Druckfestigkeit der Gruppen A und B am meisten von der Temperatur beeinflusst. Für Gruppe D gilt das Gegenteil. Die Daten für das theoretische $\sigma_{(T=0)}$ bestätigen die Resultate aus Abbildung 12. Der Werkstoff der Gruppe C hat hier die höchste mechanische Leistungsfähigkeit der porösen Filterelemente und $\sigma_{(T=0)}$ der Gruppen A und B ist geringer als von Gruppe D. Diese Rangordnung basiert auf der großen Aktivierungsenergie von Gruppe A und B. Der theoretische Wert von $T_{(\sigma=0)}$ drückt das Verhältnis von $\sigma_{(T=0)}$ zu E_A aus. Daher stimmen die Daten dieses Kennwertes mit den vorher erläuterten Resultaten überein.

Die mechanischen Eigenschaften der geschlitzten PVC-Filterelemente aus Gruppe E, F und G bei variierender Temperatur verhalten sich ähnlich wie die der porösen HDPE-Filterelemente. Die Abweichung der dargestellten Funktionen von Arrhenius-Gesetz ist auch wie bei Gruppe D hoch. Beispielfhaft sind bei Gruppe D die mechanischen Eigenschaften bei 25°C minimal und bei Gruppe G maximal. Die Aktivierungsenergie, also die mechanische Abhängigkeit von der Temperatur, scheint sich bei den Gruppen E, F und G mit zunehmender Schlitzweite zu reduzieren.

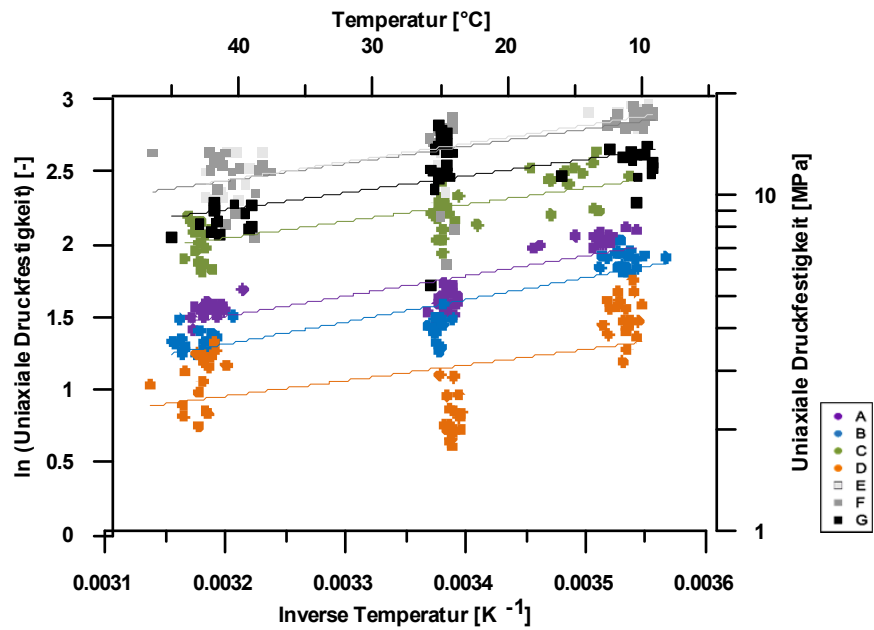


Abbildung 14: Einaxiale Druckfestigkeit der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Tabelle 8: Analyse der einaxialen Druckfestigkeit der Filtertypen A bis G basierend auf dem Gesetz nach Arrhenius

| Gruppe | Druckfestigkeit $\sigma_{(T=0)}$ [MPa] | Temperatur $T_{(\sigma=0)}$ [°C] | Aktivierungs- energie E_A [kJ mol ⁻¹] | R ² [-] |
|--------|--|--|---|-----------------------|
| A | 0.054 | 200 | -11.52 | 0.69 |
| B | 0.029 | 155 | -12.63 | 0.77 |
| C | 0.193 | 427 | -9.59 | 0.54 |
| D | 0.084 | 160 | -8.92 | 0.23 |
| E | 0.202 | 515 | -10.50 | 0.76 |
| F | 0.259 | 602 | -9.85 | 0.43 |
| G | 0.234 | 521 | -9.59 | 0.42 |

Hydraulische Eigenschaften

Einführung

Das zu fördernde Fluid aus dem Grundwasserleiter wird im Brunneninnenraum gesammelt. Im Übergang von Grundwasserleiter und Brunnen durchströmt das Grundwasser das Filterrohr. Aufgrund der verringerten offenen Filterfläche wird das Wasser einem Widerstand ausgesetzt und es stellt sich ein Energieverlust ein. Folglich nimmt die Druckhöhe von außen nach innen ab. Der Druckverlust steigt für die unterschiedlichsten Filtertypen mit steigender Eintrittsgeschwindigkeit an. Im Vergleich zu Wickeldraht- und Schlitzbrückenfiltern sind die Druckverluste von Schlitzfiltern geringfügig. Generell nimmt der Druckverlust mit der Vergrößerung der Filterwandstärke zu (Klauder, 2010). Die Abhängigkeit des Eintrittswiderstands von Schlitzweite und Filterradius für Schlitzfilter wurde von Klammler et al. (2014) analytisch bestimmt. Es zeigt sich, dass der Eintrittswiderstand mit zunehmender Schlitzweite und Filterradius wächst. Clark & Turner (1983) vollzogen weitere hydraulische Untersuchungen an verschiedenen Brunnenfilterelementen. Die Ergebnisse der Studie belegen, dass der Druckverlust mit zunehmender Filtereintrittsgeschwindigkeit linear logarithmisch steigt. Außerdem kann eine Abnahme des Druckverlustes mit wachsender Schlitzweite quantifiziert werden. Jedoch kann keine einheitliche Aussage bezüglich des Druckverlustes in Abhängigkeit von der offenen Fläche getroffen werden.

Unter der Annahme, der Brunnenfilter sei ein poröses Medium, charakterisiert sich das Filterelement durch eine bestimmte Filterdurchlässigkeit k_f . Hierbei stellen die Filteröffnungen kurze Kapillare dar. Sing & Shakya (1989) greifen dieses Modell für Untersuchungen an Kiesbelagfilterelementen auf. Sie entwickelten eine Gleichung zur Bestimmung des Druckverlustes in Abhängigkeit vom Durchfluss und der Filtergeometrie.

$$\Delta h_{FR} = \frac{r_A - r_I}{(2\pi r_I k_f M)^s} Q^s \quad \text{Gl. 7}$$

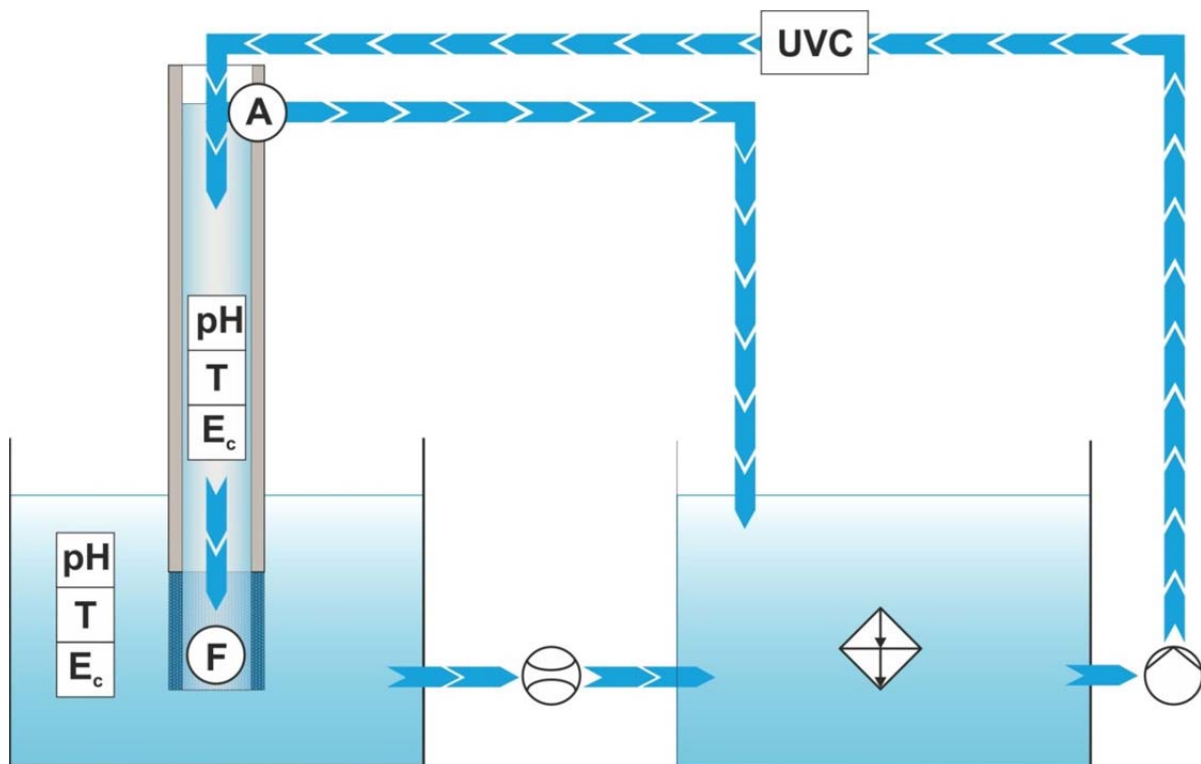
Die Regression der Daten aus den Permeationsversuche ($n = 47$) bestimmt den Exponent s mit 1.911. Diese annähernd quadratische Form der Gleichung nach Jacob (1947) entspricht Strömung in turbulentem Regime (Gl. 7). Zusätzlich ergeben die Versuche eine tendenzielle Zunahme der Filterdurchlässigkeit mit steigender offener Filterfläche.

Die hydraulischen Versuche ($n = 300$) nach Klotz (1975) beschreiben dahingegen die Filterdurchlässigkeit mit dem Gesetz von Darcy (laminare Bedingungen). Demnach können folgende Annahmen getroffen werden: Die Durchlässigkeit ist einerseits unabhängig von der Fließgeschwindigkeit des Wassers und von der Einbaumgebung. Der Kennwert hängt andererseits von der Viskosität des durchströmenden Fluids ab. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist Funktion von Perforation, Schlitzgestalt und Schlitzordnung. Die Daten spiegeln ein Wachstum der Durchlässigkeit mit steigender Schlitzweite für PVC-Schlitzfilter wider (Klotz, 1997; Nold, 1989).

Methodik

Für die geständliche Studie wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, um die hydraulischen Eigenschaften von Filterelementen unter variierenden thermo-

physikalischen und hydrochemischen Bedingungen zu untersuchen (Rüther et al., 2013). Das Messprinzip basiert auf dem Darcy-Versuch nach DIN 18130-1 (1998) zur Bestimmung der Permeabilität poröser Medien. Das Experiment entspricht einem geschlossenen Kreislauf mit einem Volumen von etwa einem Kubikmeter. Im Kreislauf ist vor und hinter das getestete Filterelement Messtechnik geschaltet, um die Temperatur, Leitfähigkeit und pH des Fluids zu überprüfen (Abb. 15). Das untersuchte Filterelement wird während des Versuchs von innen nach außen durchströmt. Bei der Durchströmung des Filters sind stationäre Druckverhältnisse durch eine konstante Standrohrspiegelhöhe während des Versuchs gewährleistet. Das durchströmte Medium ist über die Filterwandstärke (r_A-r_I), den Filterradius r und die Filterhöhe h definiert. Mit diesen Charakteristika kann die hydraulische Durchlässigkeit k_f für die einzelnen Filterelemente volumetrisch bestimmt werden.



(A) Ablauf (F) Filterelement pH T E_c Messung des pH-Wertes, der Temperatur und der elektr. Leitfähigkeit
UVC Sterilisation (UV-Strahlung) | Durchflussmessung ○ Kreiselpumpe ⊠ Temperierung (Heiz- bzw. Kühlelement)

Abbildung 15: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Untersuchung der Durchlässigkeit von Brunnenfiltern

Zur Untersuchung der Durchlässigkeit von Kunststoffbrunnenfilterelementen wurden über 1400 Versuche durchgeführt (Anhang 1). Bei diesen Tests wurden die initialen hydraulischen Eigenschaften der verschiedenen Brunnenfilterelemente unter variierenden Bedingungen analysiert. Zum einem ist die Durchlässigkeit der Filterelemente bei unterschiedlichen Fluidtemperaturen bestimmt worden. Zusätzlich wurden die Experimente mit Fluiden starker und schwacher Mineralisierung durchgeführt worden, um den Einfluss der Grundwasserbeschaffenheit auf das hydraulische System zu untersuchen. Ergänzend sind die Einflüsse von Filterwandstärken und Filterverstärkungen auf die hydraulische Leitfähigkeit der porösen HDPE-Filterelemente analysiert worden.

Ergebnisse

Tabelle 9 fasst die statistischen Kennwerte zur Permeabilität der Kunststoffbrunnenfilterelemente zusammen. Für Gruppe A bis D steigt die hydraulische Kenngröße mit zunehmender Porengröße an (Sass et al., 2012). Die Permeabilität der geschlitzten Filter (Gruppe E, F und G) hängt nicht direkt von der Schlitzweite ab. Die einzelnen Datenreihen sind durch mäßige Streuung und einem relativen Fehler von etwa 20 bis 40% charakterisiert. Der direkte Vergleich der porösen Filter mit nomineller Porenweite 500 µm (Gruppe D) mit den geschlitzten Filtern (Gruppe E, F und G) weist nach, dass die porös gefertigten HDPE-Filterelemente hydraulisch effektiver sind als die geschlitzten Filterelemente der Gruppen E, F und G.

Tabelle 9: Statistischen Kennwerte der Permeabilität der Filtergruppen A bis G

| Gruppe | n | Mittelwert | Permeabilität | |
|--------|-----|------------|--------------------|-----------------------|
| | | | Standardabweichung | Variationskoeffizient |
| A | 174 | 3.2E-11 | 1.1E-11 | 0.35 |
| B | 163 | 6.3E-11 | 1.7E-11 | 0.27 |
| C | 205 | 1.0E-10 | 3.7E-11 | 0.36 |
| D | 135 | 1.9E-10 | 8.1E-11 | 0.42 |
| E | 51 | 1.2E-10 | 3.2E-11 | 0.27 |
| F | 51 | 1.2E-10 | 4.0E-11 | 0.32 |
| G | 51 | 1.2E-10 | 2.8E-11 | 0.23 |

Die angewandte Messtechnik und ihre Genauigkeit sind aufgrund der Streuung der Datenmenge zu hinterfragen. Der physikalische Messfehler liegt bei maximal sieben Prozent. Dieser Wert lässt sich exemplarisch durch Abbildung 16 belegen. Dargestellt ist ein Durchlässigkeitsversuch mit hochmineralisiertem Wasser bei 40°C an einem Filter der Gruppe C. Die temporäre Durchlässigkeit variiert in den ersten sieben Stunden um etwa $\pm 5\%$ der initialen Durchlässigkeit. So kann die Annahme getroffen werden, dass die Variation der ermittelten hydraulischen Kennwerte von über 40% nicht durch die Messtechnik begründet ist. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die Heterogenität der strukturellen Eigenschaften der einzelnen Filterelemente zur Variation der Durchlässigkeit bzw. Permeabilität führt (**Kap. Strukturelle Eigenschaften**).

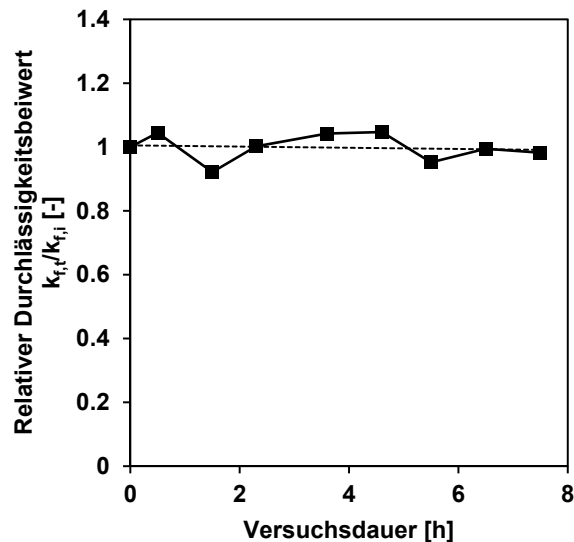


Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k_{f,t}$ während eines hydraulischen Tests mit Filtertyp C bei 40°C

Die Permeabilität der Brunnenfiltertypen in Abhängigkeit von der Porosität und der relativen offenen Filterfläche werden in Abbildung 17 a) und b) dargestellt. Beide Darstellungen verdeutlichen, dass, obgleich des geringeren Porenvolumens bzw. der geringeren offenen Fläche der geschlitzten Filterelemente der Gruppen E, F und G, die Permeabilität aller Filtertypen in derselben Größenordnung von 10^{-10} m^2 ist. Für die untersuchten Filterelemente ist keine Relation zwischen Porosität und Permeabilität erkennbar. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die angegebene Porosität nicht der durchflusswirksamen, sondern der gesamten Porosität entspricht. Wie in **Kap. Strukturelle Eigenschaften** erläutert, basiert die angegebene Porosität und offenen Fläche rein mathematisch auf Filtergeometrie und Reindichte des Filtermaterials.

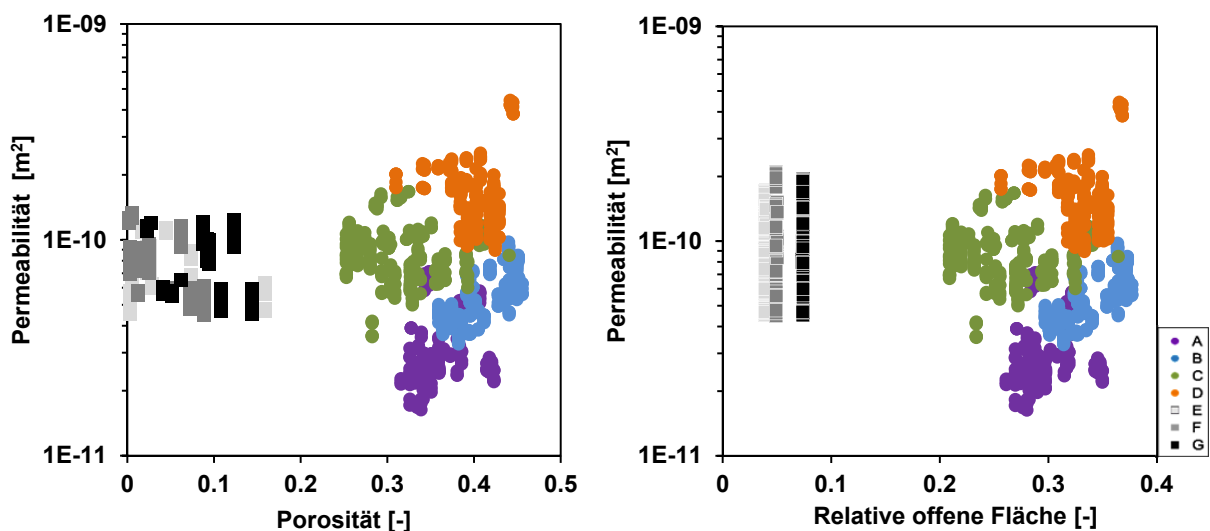


Abbildung 17: Permeabilität der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von a) der Porosität b) der relativen offenen Fläche der Filterelemente

Die statistischen Kennwerte des Durchlässigkeitsbeiwertes in (Tab. 10) veranschaulichen die hydraulischen Eigenschaften der untersuchten Brunnen-

filterelemente bei variierenden Fluidtemperaturen. Es treten relative Abweichungen von 15 bis 45% vom Mittelwert auf. Für die Gruppen A, B, C und D gilt erwartungsgemäß wie bei der Permeabilität: Je größer die Porenweite, desto größer die Durchlässigkeit. Jedoch steigt die Durchlässigkeit der mesoporösen Filtertypen A und B mit der Wassertemperatur an. Dies spricht dafür, dass sich in den Mesoporen (2 bis 50 µm) die Reduktion der Viskosität des strömenden Fluids bei Temperaturanstieg auf die hydraulischen Eigenschaften auswirkt. Die Durchlässigkeit der Gruppen E, F und G nimmt mit steigender Temperatur ab. Die Durchlässigkeit von Gruppe D ist nicht temperatursensitiv für den Temperaturbereich 10 bis 40°C. Diese getroffenen Aussagen sind generell zu bewerten, da die Messwerte durch Streuung von 15 bis 45 % gekennzeichnet sind. Die Durchlässigkeit der geschlitzten Filterelemente entspricht derselben Größenordnung wie bei Gruppe D.

Tabelle 10: Statistischen Kennwerte zur Durchlässigkeit der Filtertypen A bis G in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur

| Gr. | k _f -Wert bei 10-15°C | | | | k _f -Wert bei 20-25°C | | | | k _f -Wert bei 30-40°C | | | |
|-----|----------------------------------|------------|--------------|---------|----------------------------------|------------|--------------|---------|----------------------------------|------------|--------------|---------|
| | n | Mittelwert | Standardabw. | Varianz | n | Mittelwert | Standardabw. | Varianz | n | Mittelwert | Standardabw. | Varianz |
| A | 61 | 4.4E-05 | 1.7E-05 | 0.39 | 65 | 5.2E-05 | 1.7E-05 | 0.34 | 56 | 7.0E-05 | 2.2E-05 | 0.31 |
| B | 57 | 9.5E-05 | 2.4E-05 | 0.25 | 57 | 1.1E-04 | 3.0E-05 | 0.29 | 49 | 1.2E-04 | 3.2E-05 | 0.28 |
| C | 54 | 1.7E-04 | 7.5E-05 | 0.44 | 102 | 1.9E-04 | 4.8E-05 | 0.25 | 48 | 1.4E-04 | 3.4E-05 | 0.25 |
| D | 36 | 2.8E-04 | 6.7E-05 | 0.24 | 57 | 3.8E-04 | 1.7E-04 | 0.46 | 42 | 2.8E-04 | 7.7E-05 | 0.27 |
| E | 9 | 2.4E-04 | 4.0E-05 | 0.16 | 15 | 2.2E-04 | 4.1E-05 | 0.19 | 27 | 1.8E-04 | 3.9E-05 | 0.22 |
| F | 9 | 2.6E-04 | 5.9E-05 | 0.23 | 15 | 2.4E-04 | 5.7E-05 | 0.23 | 27 | 1.8E-04 | 5.5E-05 | 0.30 |
| G | 9 | 2.5E-04 | 4.8E-05 | 0.19 | 15 | 2.2E-04 | 3.7E-05 | 0.17 | 27 | 2.0E-04 | 3.4E-05 | 0.16 |

In den Abbildung 18a) und b) ist der Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Temperatur des durchströmenden Fluids für die verschiedenen Filtertypen abgebildet. Diese Darstellungen ergänzen die Daten aus Tabelle 10.

In Abbildung 19a) und b) ist die Durchlässigkeit der untersuchten Filterelemente gegen die Leitfähigkeit des durchströmenden Fluids aufgetragen. Es ist eine geringe Abhängigkeit der initialen hydraulischen Eigenschaften von der Mineralisierung des durchströmenden Wassers feststellbar.

Diese Ergebnisse stützen die theoretische Annahme, dass der Durchlässigkeitsbeiwert ein Parameter ist, der im Gegensatz zur Permeabilität, von den Eigenschaften des durchströmenden Fluids abhängt. Jedoch wird deutlich, dass die Variation des Durchlässigkeitsbeiwertes aufgrund von Veränderung der Temperatur, der Mineralisierung, der Dichte und der dynamischen Viskosität des Wassers nun in geringem Maße beeinflusst.

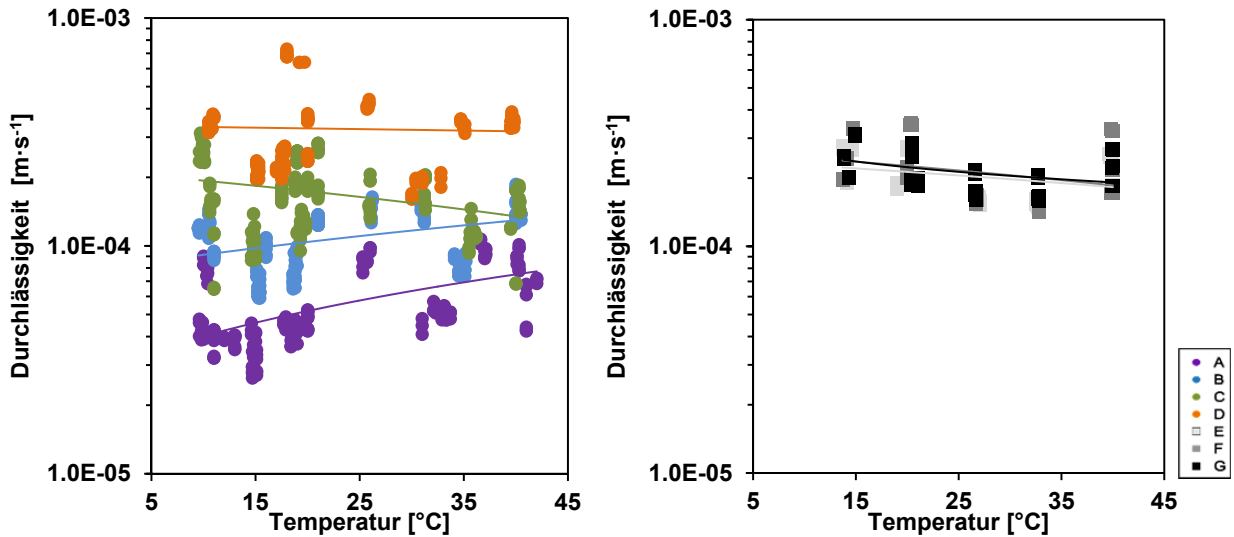


Abbildung 18: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur für a) die porösen HDPE-Filertypen A bis D b) die geschlitzten PVC-U-Filertypen E bis G

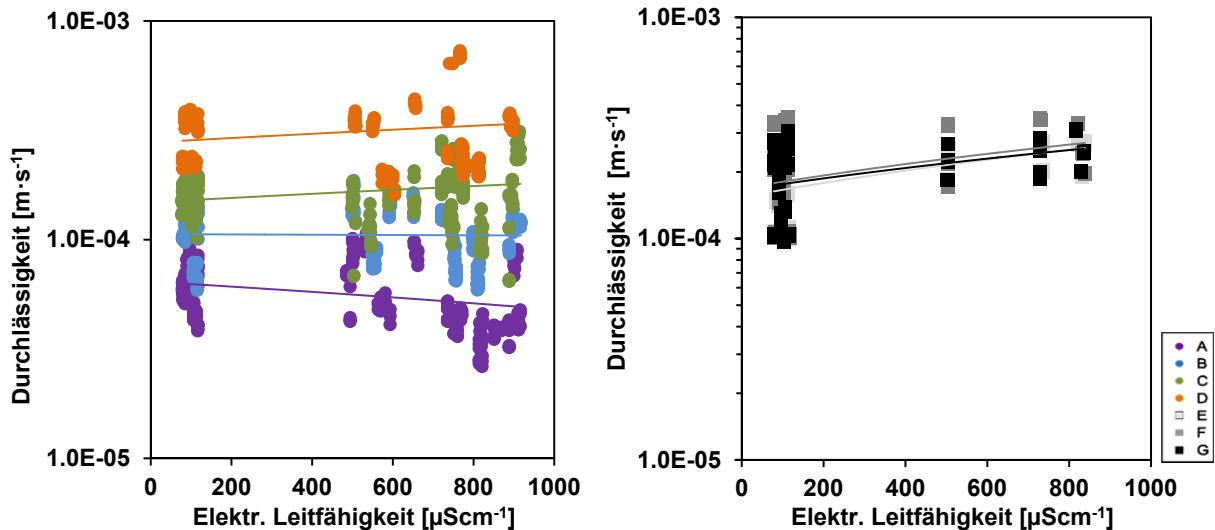


Abbildung 19: Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit von der Fluidmineralisierung für a) die porösen HDPE- Filertypen A bis D b) die geschlitzten PVC-U-Filertypen E bis G

In Tabelle 11 ist die Durchlässigkeit von porösen Filterelementen mit variierender Ausbaumform abgebildet. Für alle Filtertypen gilt, dass der Einbau von Verstärkungen keinen Einfluss auf die Durchlässigkeit der Brunnenfilter hat.

Tabelle 11: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtergruppen A bis D in Abhängigkeit von Einsatz von Filterverstärkungsmaterial bei 25°C

| Gruppe | Durchlässigkeitsbeiwert bei 25°C | | |
|--------|----------------------------------|---------------------|--------------------|
| | ohne Verstärkung | mit PVC-Verstärkung | mit PE-Verstärkung |
| A | 4.4E-05 | 4.2E-05 | |
| B | 9.0E-05 | 8.9E-05 | |
| B* | 9.9E-05 | 9.5E-05 | 9.4E-05 |
| C | 1.9E-04 | 1.5E-05 | |
| D | 6.4E-04 | 6.6E-05 | |

Ein weiterer Teil der Studie befasst sich mit der Auswirkung der Filterwandstärke bzw. der Filterdimension auf die hydraulischen Eigenschaften. Tabelle 12 fasst die Durchlässigkeit der porösen Filtertypen der Gruppen A, B, B*, C und D bei 25°C in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Filterelementes zusammen. Für Gruppe A kann eindeutig eine Zunahme der Durchlässigkeit mit steigendem Durchmesser festgestellt werden. Für Gruppe B und B* ist keine klare Beziehung zwischen Dimension des Filters und der Durchlässigkeit erkennbar. Das gleiche gilt für die grobporigen Filtertypen C und D. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die untersuchte Probenanzahl gering ist. Es kann trotzdem geschlossen werden, dass sich die produktionsbedingte Abnahme der Porosität bei zunehmender Wandstärke (**Kap. Strukturelle Eigenschaften**) auch auf die Permeabilität der Filterelemente auswirkt.

Tabelle 12: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtergruppen A bis D in Abhängigkeit von der Filterwandstärke bei 25°C

| Gruppe | Nomineller Filteraußendurchmesser [mm] | | | | | |
|--------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 30 | 50 | 75 | 125 | 180 | 355 |
| A | 2.9E-05 | 3.6E-05 | | 4.4E-05 | 9.4E-05 | |
| B | 1.1E-04 | 6.7E-05 | 9.0E-05 | 9.4E-05 | 1.1E-04 | |
| B* | | | 9.8E-05 | 1.1E-04 | 3.6E-05 | |
| C | | | 2.6E-04 | 1.8E-04 | 3.5E-04 | 1.8E-04 |
| D | | | 7.6E-04 | 3.4E-04 | 6.4E-04 | |

Alterungsverhalten

Einführung

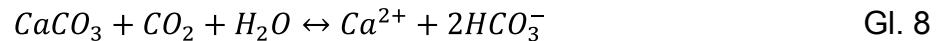
Alterungserscheinungen führen mit zunehmender Betriebsdauer zu Leistungsrückgängen von Brunnen (DVGW, 2007). Die Ursachen von Brunnenalterung basieren auf physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen, die den durchflusswirksamen Porenraum vermindern. Es wird zwischen folgenden Ursachen unterschieden: Verockerung, Versandung, Korrosion, Versinterung, Verschleimung und Aluminiumausfällungen. In geothermischen Brunnenanlagen können außerdem noch Ausfällungen von Gips, Baryt, Strontianit, Eisensulfat, amorphem Quarz und Metallsulfiden auftreten (Sass, et al., 2015; Houben & Treskatis, 2003).

Die Thematik der Versandung an den porösen HDPE-Filterelementen wurde von Sass (1994), Mielke (2007) und Sass & Arndt (2008) aufgegriffen und analysiert (Rüther et al., 2013). Die rein chemische Korrosion an den Kunststofffiltern kann aus materialspezifischen Gründen vernachlässigt werden (Turell & Bellare, 2004; Hellerich et al., 2010; Ehrenstein, 2011; Bozena, 2013). Als größtes Risiko für Leistungsrückgänge am Brunnen (neben der Versandung) verbleiben die durch Inkrustationen entstandenen Alterationserscheinungen. In Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden Testfelder angelegt um das Alterationsverhalten der Brunnenfiltertypen im Locker- und Festgestein zu untersuchen. Ergänzend wurden komplexe Versuchsstände im Labor entwickelt, um die chemischen Prozesse abzubilden, die zu Verockerung und Versinterung von Filterelementen führen können.

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten beschäftigen sich mit der Regenerierung von Brunnen zur Entfernung von Alteration, wohingegen die Entstehung der Verkrustungen noch nicht vollständig verstanden wird (Houben et al., 1999). Die Ursachen zur Bildung von Inkrustationen sind sehr heterogen und können parallel ablaufen (Bieske, 1997). Zum einen entstehen Beläge, wenn Sauerstoff überschüssig im Brunnenwasser gelöst wird und es so zur Oxidation von beispielsweise zweiwertigem Eisen oder Mangan kommt (Houben, 2003A; Houben, 2003B). Die Inkrustation kann aber auch biologischen Ursprungs sein aufgrund von Ausscheidungen von unlöslichen Eisen- und Manganverbindungen durch Mikroorganismen (DVGW, 2007). Ein weiterer Faktor für die Bildung von Inkrustationen ist das Strömungsregime. Turbulente Strömung beschleunigt die Ausfällung gelöster Stoffe in Wässern und begünstigt den Eintrag von Sauerstoff im System (Bieske, 1997). Andererseits kann auch Kohlenstoffdioxidgasung des Systems durch Absenkung der Grundwasserdruckoberfläche zur Störung des empfindlichen Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts führen. So können Bikarbonate im Grundwasser ausgeschieden werden, die zur Versinterung des Brunnenraums führen (DVGW, 2007). Die häufigste Ursache für die Entstehung von Inkrustation ist allerdings die Durchmischung verschiedener Wässer im Brunneninnenraum (Houben, 2003).

Es sei darauf hinzuweisen, dass Inkrustationen meist punktuell auftreten, und zwar dort, wo der Sauerstoffeintrag am höchsten ist und oder erhöhte Fließgeschwindigkeit zu einem hohen Nährstoffangebot für Inkrustationen führen (Houben, 2006). Die räumliche Verteilung der Inkrustation und die zeitliche Entwicklung der Brunnenbeläge ist von (Larroque & Francesci, 2011) für Entwässerungsbrunnen modelliert worden.

Die Bildung von kalziumkarbonatischen Ausfällungen hängt primär vom vorherrschenden Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers ab. Versinterungen können daher nicht durch die Mischung verschiedener Wässer im Brunnen entstehen. Dieser Vorgang führt nämlich zur Untersättigung des Fluids, so dass der auftretende Prozess eine Mischungskorrosion ist (Tillmans & Heblein, 1912). Das Gleichgewicht mit Gl. 8 ist übersättigt, wenn dem System gelöste Kohlensäure entzogen wird (Hölting & Coldewey, 2012).



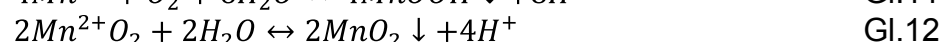
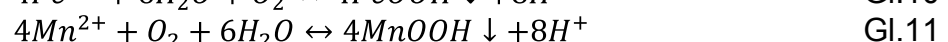
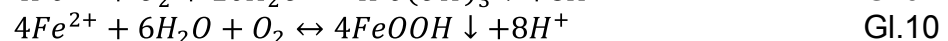
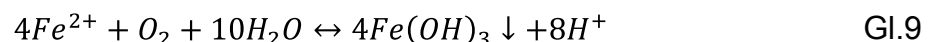
Dies geschieht begünstigt bei hohen Temperaturen, geringem Druck und starker mechanischer Agitation des Fluids. Im Brunneninnenraum treten diese physikalischen Bedingungen auf, da das Wasser durch den Pumpenbetrieb erwärmt wird, einströmendes Tiefenwasser sich hier entspannt und das Strömungsregime in Pumpennähe turbulent ist (Houben & Treskatis, 2003).

Die sich ablagernden Mineralphasen sind Kalzit und Aragonit (CaCO_3) sowie Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Ist zweiwertiges Eisen im System gelöst, können auch Eisenkarbonate (FeCO_3) ausfallen.

Neben Brunnen kann es auch zu Versinterungserscheinungen in Tunneldrainagen (Rinder et al., 2013) und CO_2 -Abscheidungs bzw. -Speicherungssystemen (Jung & Um, 2013) kommen.

Verockerungen sind die am häufigsten auftretenden Inkrustationsformen in Brunnen (Houben & Treskatis, 2003; Niehues, (1999)). Unter diesem Begriff werden alle Ablagerungen von Eisen und-Manganverbindungen basierend auf physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen zusammengefasst (Huisman, 1972; Hünerberg, 1966; Krems, 1980; Henkel, et al., 2012). Die Genese, Mineralogie und Geochemie sowie die Prozesse, die zur Eisenoxidinkrustation führen, werden von (Houben, 2003A; Houben, 2003B) detailliert behandelt. Verockerung und die resultierende Verstopfung des Aquifers wurde außerdem modellhaft im Labor abgebildet (Rinck-Pfeiffer et al., 2000; Holländer et al., 2005). Dahingegen beschäftigen sich (Henkel, et al., 2012; Weidner et al., 2011; Weidner et al., 2012) explizit mit der Darstellung und Analyse von Verockerung im Filterkiesbereich von Brunnen. Außerdem ist die karbonatische und eisenhaltige Inkrustation von reaktiven Wänden von (Li et al., 2006) im Detail modelliert worden.

Rein chemisch entsteht Verockerung im Wasser in Form von Eisen- und Manganoxiden oder -hydroxiden durch die Oxidation von zweiwertigem Eisen und Mangan (Gl. 9 bis 12).



Zusätzlich können bei pH = 6-8 auch neutrophile Mikroorganismen in schwach oxischem Milieu zweiwertige Kationen aufnehmen und als dreiwertiges, oxidiertes Eisen oder Mangan ausscheiden (Houben & Treskatis, 2003). Diese mikrobiologisch indizierte Verockerung ist weitestgehend untersucht (Beger, 1937; Hässelbarth & Lüdemann, 1974; Wetzel, 1969; Ivarson & Sojak, 1978; Chapelle, 1993; Tyrrel et al., 1997; Tuhela et al., 1997; Konhauser, 1998; Cullimore, 1999; Thullner et al., 2004). Diese Form von Inkrustation bleibt jedoch quantitativ hinter den chemischen Prozessen zurück, wenn das Brunnenwasser in hoch oxischem Milieu ist (Hancke,

1998). Für die Kinetik der chemischen Reaktionen ist der pH von größter Bedeutung (Sung & Morgan, 1980; Davison & Seed, 1983; Houben, 2004; Morgan & Lahav, 2007). Die ablaufenden Prozesse werden außerdem durch die Zugabe von Eisenoxiden autokatalytisch beschleunigt (Houben & Treskatis, 2003). Die einzelnen Reaktionen der Oxidation, Hydrolyse und Aggregation von gelöstem Fe(II)-Kationen hin zu Eisen(III)-Oxi-Hydriden und deren Metamorphose zu Fe(III)Oxiden werden von (Cornell & Schwertmann, 2003) zusammengefasst.

Die Abhängigkeit von Kristallwachstum von den Fließgeschwindigkeiten, der Fluidtemperatur und dem Oberflächenmaterial unter übersättigten Bedingungen ist für dichte Medien untersucht (Vendel & Rasmuson, 2000; Steinberg & Hasson, 1979; Chandler, 1964). Für poröse Medien gibt es allerdings keine Analysen zu diesen Fragestellungen. Das gegenständliche Projekt befasst sich mit dieser Thematik im Detail.

Feldversuche

Testfeld Aschaffenburg

Das Testfeld bei Aschaffenburg dient zum direkten Vergleich der hydraulischen Ergiebigkeit von fünf Brunnen, die mit unterschiedlichem Filterausbaumaterial ausgestattet sind. Zwei der Brunnen dienen als Grundwassermessstellen. Die übrigen drei Brunnen sind 4 m tief, wobei die Filterstrecke mit 2 m Länge installiert worden ist. Die Brunnen ($\varnothing_{\text{innen}} = 4''$) sind ausgestattet mit Filtertyp C (B I), F (B IV) und D (B V). Der laterale Abstand zwischen den Brunnen liegt bei 1,9 m. Der Grundwasserleiter ist halbgespannt (Hölting & Coldewey, 2012). Die Grundwasserdruckfläche liegt etwa 1 m unter Geländeoberkante. Der Aquifer besteht aus gut sortiertem Mittelsand, charakterisiert durch einen Durchlässigkeitsbeiwert von $3,2 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$. Im Hangenden des Grundwasserleiters schließt eine Schicht anthropogenen Ursprungs mit einer Mächtigkeit von 1,2 m an. Die Korngrößenverteilung dieser Auffüllung ist vergleichbar mit schlecht sortiertem Sand. Die durchschnittliche hydraulische Leitfähigkeit liegt bei $6,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Rybak, 2012). Der Aufbau und Ausbauplan des Testfeldes ist dem Anhang 3 zu entnehmen.

Die Brunnen im Testfeld wurden nach Einbau planmäßig nicht normgerecht entwickelt, um Alterung der Brunnen zu beschleunigen. Folglich war es innerhalb von zwei Jahren möglich eine umfassende Analyse des Alterationsverhaltens in den installierten Brunnen durchzuführen.

Die Brunnen wurden für hydraulische und hydrochemische Untersuchungen genutzt. Im Jahr 2011, 2012 und 2013 wurden an diesen Brunnen Leistungspumpversuche mit drei und fünf Pumpstufen durchgeführt. So kann die Leistungscharakteristik der einzelnen Filtertypen direkt quantifiziert und am Standort unter gleichen Bedingungen mit den jeweils anderen Brunnen verglichen werden (Rüther & Sass, 2014). Zusätzlich wurde der Durchlässigkeitsbeiwert der Filterelemente nach Deinstallation des Brunnentestfeldes im Labor (**Kap. Hydraulische Eigenschaften**) ermittelt. Im Feld sind die hydrochemischen und thermophysikalischen Feldparameter des Grundwassers analysiert worden. Ergänzend sind An- und Kationengehalte des Grundwassers im Labor mittels Ionenchromatographie und Atomabsorptionsspektroskopie untersucht worden. Zur qualitativen Analyse der Brunnenbelege sind röntgenfluoreszenzanalytische (RFA) sowie rasterelektronen-mikroskopische (ESEM) Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Leistungspumpversuche der drei untersuchten Brunnen kommen zu dem Ergebnis, dass B IV, ausgebaut mit Filtertyp F, die höchste initiale Ergiebigkeit

aufweist (Abb. 20 a)). Die B I und V mit porösen Filtertypen C und D sind durch eine initiale Ergiebigkeit von etwa $3 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ charakterisiert. In allen drei Brunnen wurde ein Leistungsrückgang in den Jahren 2012 und 2013 bestimmt. Im Vergleich der relativen Leistungsabnahme der einzelnen Brunnenfiltertypen miteinander ergibt sich folgendes Bild (Abb. 20 b)): Die relative Abnahme der Ergiebigkeit für Gruppe C beträgt nach einem Jahr vier Prozent; die Leistung der anderen beiden Brunnen nimmt um 20 % ab. Nach einem weiteren halben Jahr fördern alle drei Brunnen nur noch 75 % der initial gemessenen Wassermenge.

Die Abnahme der spezifischen Brunnenergiebigkeit lag im Gelände bei über 20%. Dieses Ergebnis lässt sich nur teilweise anhand der im Labor ermittelten hydraulischen Daten bestätigen (Abb. 21 a)), weil schon der Messfehler bei der Bestimmung der Durchlässigkeit von Brunnenfilterelementen bei 15% liegt (**Kap. Hydraulische Eigenschaften**). Tendenziell kann eine Reduktion des Durchlässigkeitsbeiwertes aufgrund der Alteration der Filterelemente Gruppe D und F festgestellt werden.

Die Untersuchungen der wiederausgebauten Filterelemente im Labor belegen außerdem, dass die Inkrustation nicht punktuell auftreten und somit eine örtliche Minderung der hydraulischen Eigenschaften der Filterelemente im oberen oder unteren Filterbereich hervorruft (Abb. 21b)).

Die Veränderung der hydrochemischen und thermophysikalischen Eigenschaften der Filter im Testfeld können mit Alterungserscheinungen in den Brunnen erläutert werden. Dargestellt sind in den Abbildung 22 bis 25 die In Situ- Eigenschaften des Wassers jeweils vor Beginn der Leistungspumpversuche im Verlauf der Zeit. Die zeitliche Entwicklung der Grundwassertemperatur kann auf die jeweiligen jahreszeitlichen Bedingungen des oberflächennahen Wassers zurückgeführt werden (Abb. 22a)). Daher ist es bemerkenswert, dass die elektrische Leitfähigkeit des Wassers (Abb. 22b), welche ein Indikator für die Mineralisierung des Fluids ist, im Laufe der Zeit abnimmt, obwohl die Temperatur sinkt. D.h. trotz des antiproportionalen Verhältnisses von Temperatur und Leitfähigkeit verringert sich die Mineralisierung um etwa 50%. Das Redoxpotential und der Sauerstoffgehalt des Grundwassers in allen drei Brunnen belegen, dass die oxischen Verhältnisse seit der Brunneninstallation stetig ansteigen (Abb. 23). Der pH des Wassers ist in allen drei Brunnen konstant neutral (Abb. 24). Die Trübung des Grundwassers bei Stillstand der Brunnen mit Filtertyp D und F reduziert sich über den Zeitraum von zwei Jahren auf etwa 10 NTU. In B I hingegen steigt die Trübung im ersten Jahr immens an, nimmt anschließend aber auch wieder ab. Die An- und Kationengehalte weisen nach, dass es sich bei dem Grundwasser um ein erdalkalisches Wasser mit höherem Alkaligehalt handelt, wobei es überwiegend chloritisch-sulfatisch ist. Auffällig ist vor allem die Konzentration an zweiwertigem Mangan an (Abb. 25). Die initialen Konzentrationen der Brunnenwässer liegen weit über dem Richtwert (nach TrinkwV 2001). In B I mit Filtertyp C steigt der Gehalt an zweiwertigem Mangan- und Eisen im Jahr 2012 sogar auf über 7 mg l^{-1} an. Diese Daten spiegeln sich auch in den Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit und Trübung des Brunnenwassers wider (Abb. 24). Die Abnahme der Konzentration an gelöstem Eisen und Mangan im darauffolgenden Zeitabschnitt lässt auf eine Ausfällung an dreiwertigen Kationen schließen. Diese Annahme kann durch die verzögerte Reduktion der Ergiebigkeit in B I bestätigt werden. Alle untersuchten Parameter entsprechen Bedingungen, die chemische, aber auch biologische Verockerung hervorrufen.

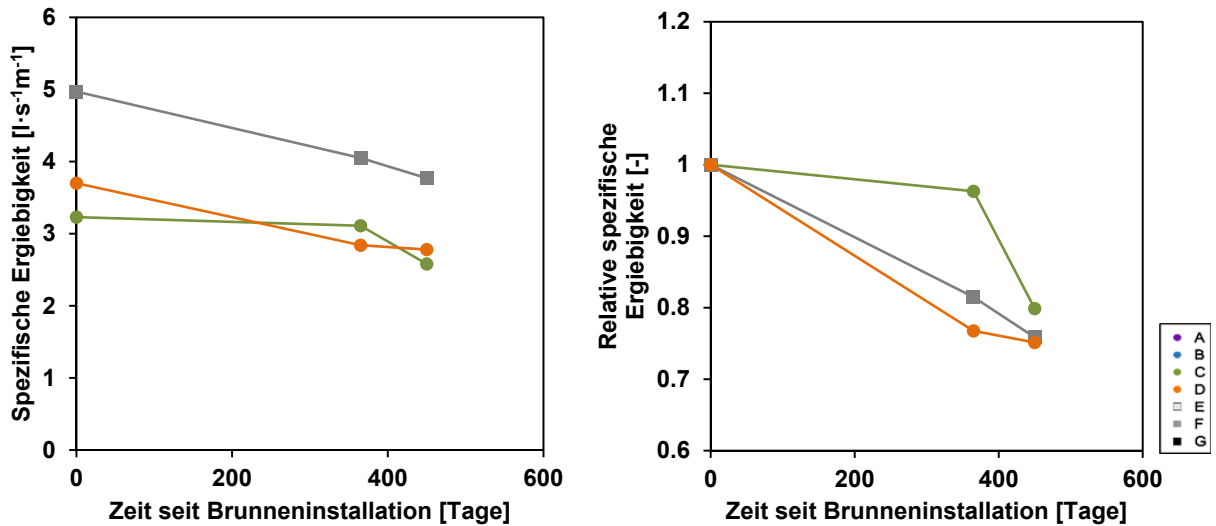


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf a) der spezifischen Ergiebigkeit b) der relative spezifischen Ergiebigkeit der Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, F und D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg

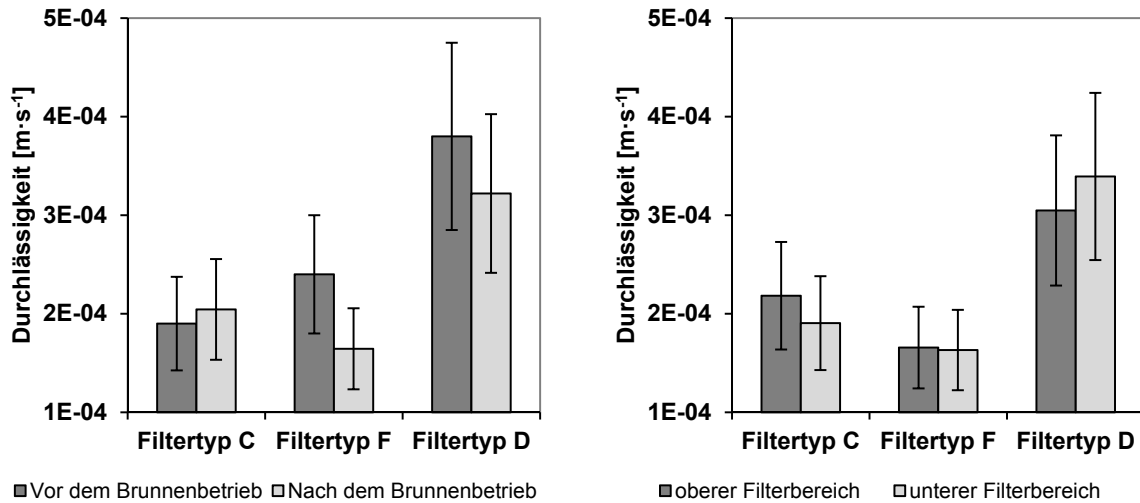


Abbildung 21: Durchlässigkeitsbeiwert der Filtertypen C, D und F a) vor und nach dem Brunnenbetrieb b) im oberen und unteren Filterbereich der Brunnen I, IV und V im Testfeld Aschaffenburg

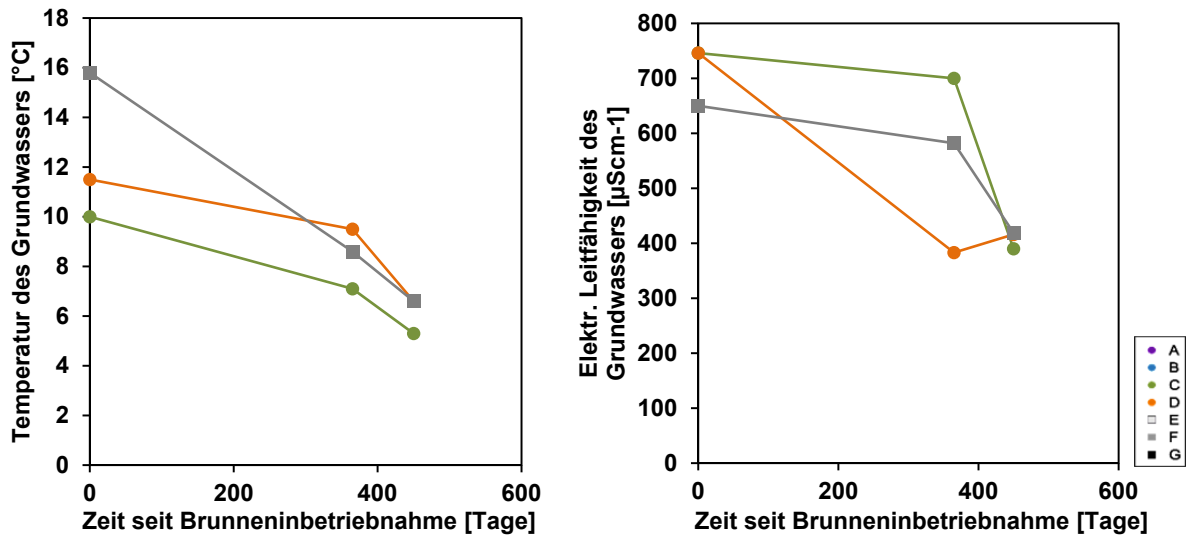


Abbildung 22: Zeitlicher Verlauf a) der Temperatur des Grundwassers b) der elektrischen Leitfähigkeit des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg

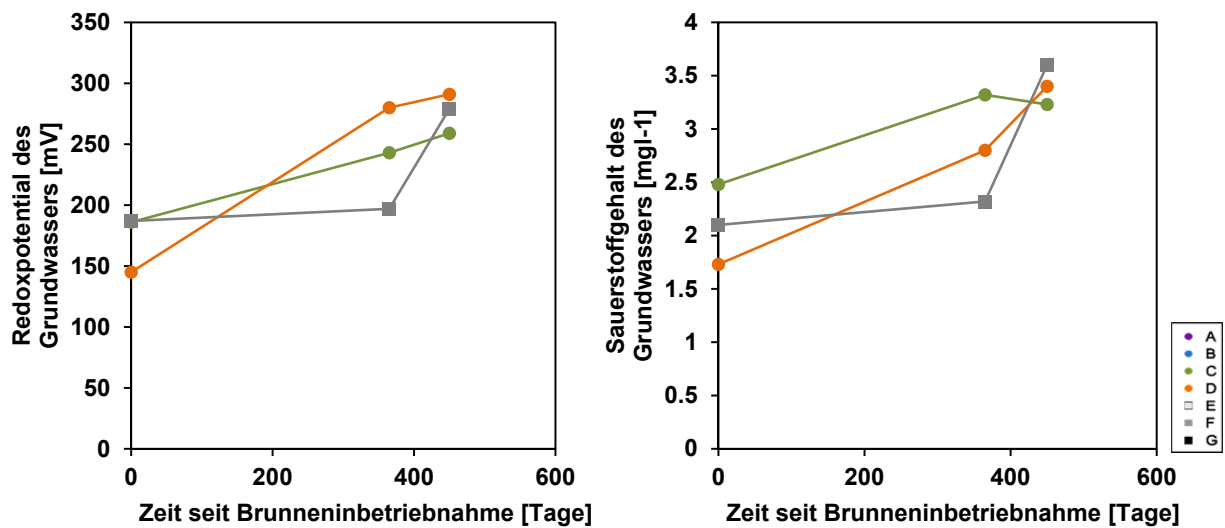


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf a) des Redoxpotentials des Grundwassers b) des Sauerstoffgehalts des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg

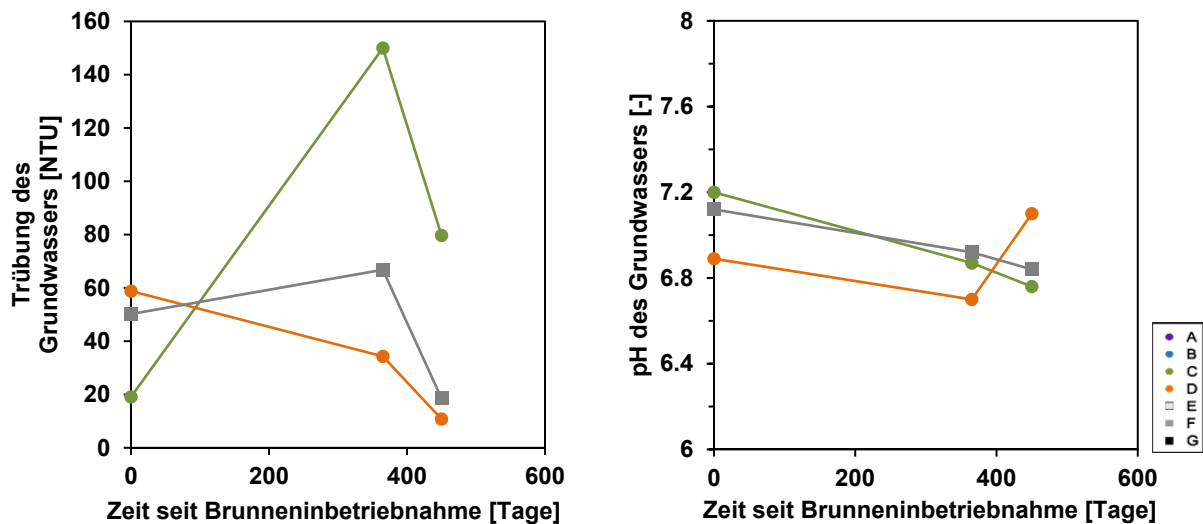


Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf a) der Trübung des Grundwassers b) des pHs des Grundwassers in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg

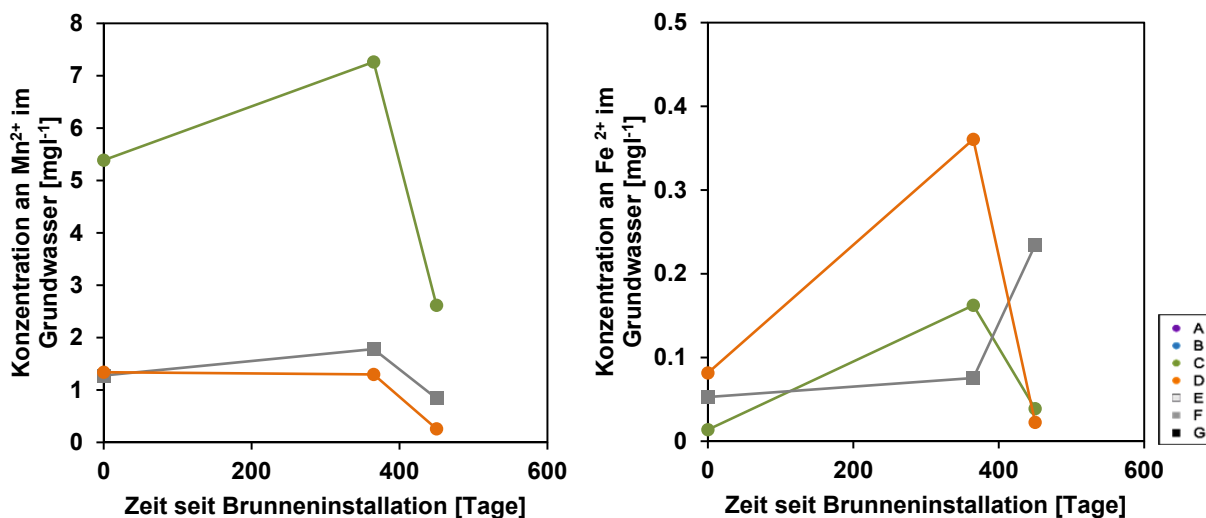


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf a) der Konzentration an Mn^{2+} im Grundwasser b) der Konzentration an Fe^{2+} im Grundwasser in den Brunnen I, IV und V mit installierten Filtertypen C, Fund D seit Brunneninbetriebnahme im Testfeld Aschaffenburg

Die ESEM-Darstellung visualisiert für den Filtertyp C aus Brunnen I im Filtermedium selbst flächige Beläge aus Kristallen im Mikrometerbereich auf den gesinterten Kunststoffpartikeln (Abb. 26). Das EDX ergibt, dass es sich bei den Kristallen vor allem um eisenhaltige Inkrustationen handelt (Abb. 27). Bei der Betrachtung der Brunnenfilterinnenwand ergibt sich ein anderes Bild (Abb. 28): Die Partikel aus hochdichtem Polyethylen sind vollständig mit Kristallen im Nanobereich belegt. Diese Beläge bestehen im Gegensatz zum Innern der Filtermatrix aus Mangan (Abb. 29). Die chemische Zusammensetzung der Filterbeläge wurde auch anhand von RFA (Tabelle 13) und XRD (Abb. 30) bestimmt. Mittels RFA konnte nachgewiesen werden, dass die Inkrustationen sich hauptsächlich aus Oxiden oder Hydroxiden von Mangan, Silizium, Kalzium und Aluminium zusammensetzen. Es können auch

Spuren von oxidiertem Eisen und Kalium gefunden werden. Die Röntgendiffraktometrie gibt Aufschluss über die kristalline Phase des Minerale: So entsprechen die analysierten Beugungswinkel denen von hexagonalem Birnessite (MnO_2) mit maximaler Intensität bei $2\theta = 16,7^\circ$. Die Untersuchung kommt auch zu dem Ergebnis, dass CaO_2 , SiO_2 und Al_2O_3 vorliegen.

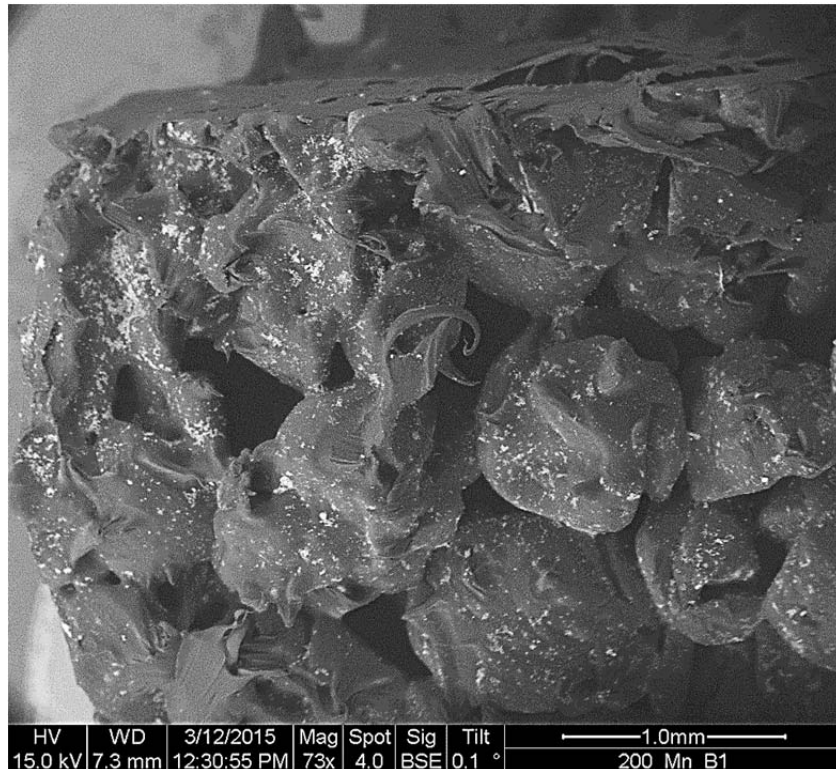


Abbildung 26: Mikroskopische Rasterelektronenaufnahme des Brunnenfilters Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Kleine Kristalle im Mikrometerbereich belegen die Partikeloberfläche des Filterelements aus HDPE

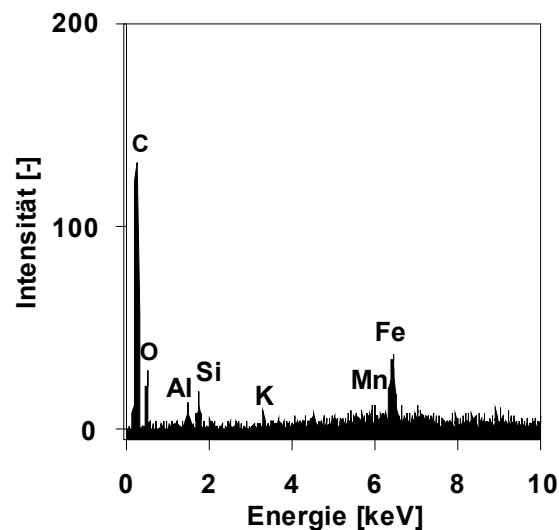


Abbildung 27: Spektrum der mikroskopischen Röntgenanalyse über die elementare Zusammensetzung der Beläge auf dem porösen HDPE-Filter Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen

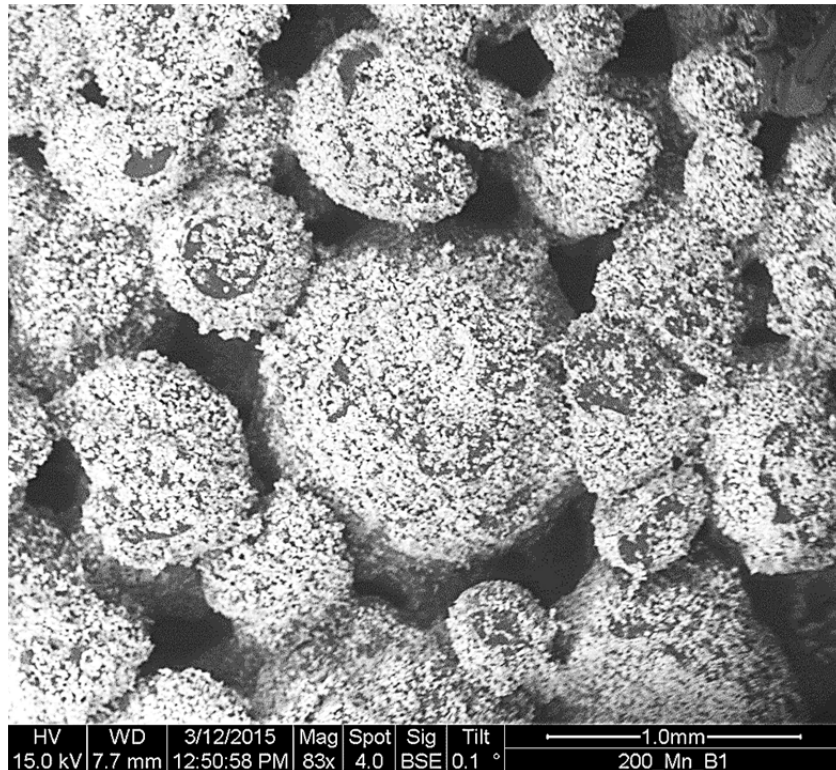


Abbildung 28: Mikroskopische Rasterelektronenaufnahme der Brunnenfilterinnenseite Filtertyp C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Kleine Kristalle im Mikrometerbereich belegen die die Partikeloberfläche des Filterelements aus HDPE

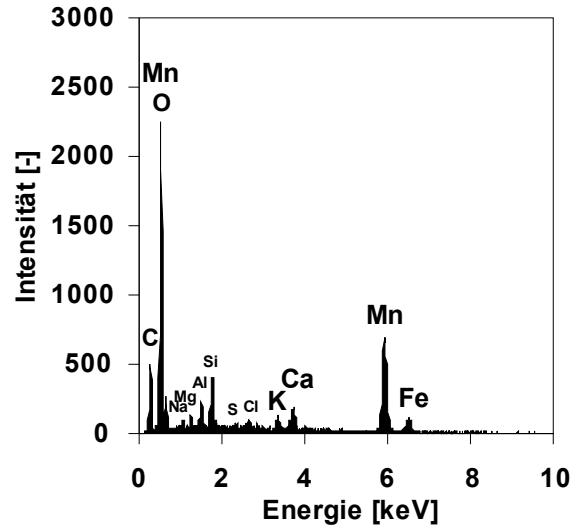


Abbildung 29: Spektrum der mikroskopischen Röntgenanalyse über die elementare Zusammensetzung der Beläge auf der Filterinnenseite des porösen HDPE-Filter Typ C aus Brunnen I im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen

Tabelle 13 Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung der Inkrustation an Filtertyp F installiert im Brunnen IV im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen

| Elementare Zusammensetzung | Gewichtsanteil [%] | Mittl. Messfehler [%] |
|----------------------------|--------------------|-----------------------|
| Si | 12.53 | 2.6 |
| Ti | 0.27 | 7.1 |
| Al | 4.2 | 5 |
| Fe | 2.8 | 1.3 |
| Mn | 67.94 | 0.3 |
| Mg | 0.93 | 11.6 |
| Ca | 6.35 | 1.4 |
| K | 2.1 | 2.3 |
| P | 0.65 | 10.5 |
| Cl | 0.39 | 7.7 |
| Co | 0.07 | 11.2 |
| Ni | 0.18 | 5.7 |
| Cu | 0.3 | 3.9 |
| Zn | 0.21 | 4.3 |
| Sr | 0.03 | 7.2 |
| Ba | 1.01 | 5 |

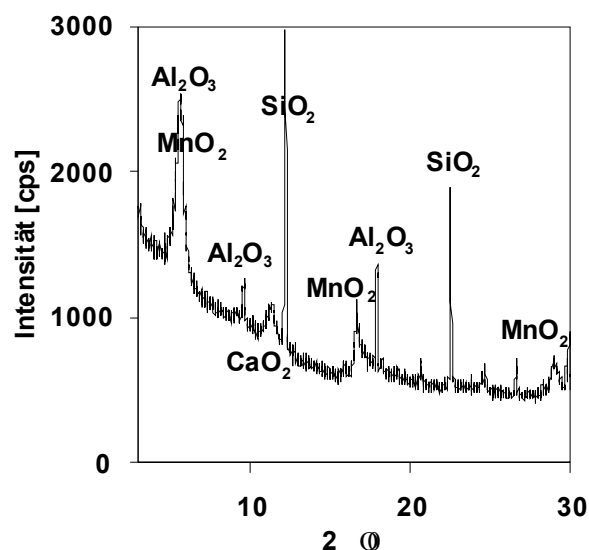


Abbildung 30: Spektrum der röntgendiffraktometrischen Analyse ohne Untergrundkorrektur zur Bestimmung der Mineralphasen in der Inkrustation an Filtertyp F installiert im Brunnen IV im Testfeld Aschaffenburg nach Rückbau der Brunnen. Der monotone Intensitätsabfall resultiert aus der Streuung der Röntgenstrahlung am amorphen Probenanteil.

Testfeld Crailsheim

Im Zuge des Forschungsprojekts ist ein weiteres Langzeittestfeld in Crailsheim mit porösen HDPE-Brunnenfilterelementen für einen Standort im Festgestein geplant und vorbereitet worden. Ziel dabei war es, Filter in einer geothermalen Brunnenanlage, bestehend aus Förder- und Schluckbrunnen, zur Beobachtung des

Alterationsverhaltens zu verbauen. Zu Erkundungszwecken wurde am Standort eine 35 m tiefe Kernbohrung abgeteuft und anschließend mit Filtertyp C verrohrt zur Grundwassermessstelle ausgebaut. Die bautechnischen Details sowie ein detaillierte Schilderung der lithologischen Abfolgen mit Bohrprofil sind dem Anhang 4 zu entnehmen.

Die Grundwassermessstelle durchteuft zwei unterschiedliche Grundwasserleiter im Lettenkeuper und im Oberen Muschelkalk. Durch den technischen Ausbau wurde nur der obere Grundwasserleiter im Lettenkeuper erschlossen. Hierbei handelt es sich um einen ca. 15 m mächtigen Kluftgrundwasserleiter. Der Flurabstand beträgt etwa 6 m u GOK.

Bei einer Kamerabefahrung wurde beobachtet, dass eine Karstkluft Wasser im Bohrloch schluckt und somit den Wasserspiegel kontrolliert. Die erwartete Schüttung von 0,5 l/s konnte in einem orientierenden Zwischenpumpversuch nicht erreicht werden. Aufgrund des Wasserabflusses durch eine Kluft in 23,17 m u. GOK und der Tatsache, dass im Oberen Muschelkalk keine Wasserzutritte erkannt werden konnten, wurde dieser Bereich brunnenbaulich nicht erschlossen. Die Entscheidung, nur den oberen Grundwasserleiter im Lettenkeuper zu nutzen, hat die Verfüllung des Bohrloches mit Tonpellets bis 22,00 m u. GOK zur Folge. Ab dieser Tiefe wird das Bohrloch zum zur Grundwassermessstelle GWM Pall ausgebaut.

Hydraulische Tests sowie hydrochemische und mikrobiologische Untersuchung von 2012 bis 2015 lieferten Daten zur Charakterisierung des Aquifers. Eine zusätzliche Kamerabefahrung im Frühjahr 2015 ermöglichte eine Visualisierung der Alterungserscheinung in der Grundwassermessstelle. Anhand von Slug -und Bailtests im Brunnen konnte der hydraulische Charakter des Untergrundes untersucht werden (Langer, 2012). Das direkte Umfeld der Grundwassermessstelle besitzt eine Durchlässigkeit zwischen 1 und $9 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. Die Transmissivität des Aquifers liegt dem entsprechend zwischen $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ und $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Weitere Pumpversuche in den Jahren 2013 und 2015 ergeben eine Abnahme der Fördermenge bei steigender Absenkung. Die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts mit den Modellen nach Barker (1988), Moench (1984) und Gringarten (1973) ergeben eine hydraulische Durchlässigkeit von 1 bis $2 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$.

Tabelle 14: Vergleich der hydrochemischen Parameter des Grundwassers in der Grundwassermessstelle im Testfeld Crailsheim mit den Richtwerten für oberflächennahe geothermale Brunnenanlagen nach Tholen & Walker-Hertkorn (2007)

| Hydrochemische Parameter | | Richtwerte nach Tholen und Walker-Hertkorn(2007) | 2012 | 2013 |
|-----------------------------------|-------|--|------|------|
| Temperatur | °C | | 14.5 | 9 |
| pH-Wert | | 7.5-9 | 6.5 | 6.92 |
| elektrische Leitfähigkeit | mS/cm | 0.010-0.5 | 2.54 | 1.61 |
| c(Fe ²⁺) | mg/l | ≤0.5 | 0.3 | 0.92 |
| c(Mn ²⁺) | mg/l | ≤0.5 | 0.01 | 0.01 |
| c(O ₂) | mg/l | 2 | 2.9 | 3.05 |
| c(HCO ₃ ⁻) | mg/l | 70 - 300 | 388 | 412 |
| c(SO ₄ ²⁻) | mg/l | ≤70 | 1668 | 1430 |
| c(Cl ⁻) | mg/l | ≤300 | 62 | 35 |
| c(NO ₃ ⁻) | mg/l | ≤100 | 2.2 | 1.4 |

Es handelt sich um erdalkalisch karbonatisches Wasser, das in mehreren Punkten die Richtwerte für geothermale Brunnenanlagen nach Tholen & Walker-Hertkorn (2007) überschreitet (Tabelle 14). Bei mikrobiologischer Untersuchung des Wassers ist ein erhöhter Wert an Eisenbakterien nach TrinkwV 2001 festgestellt worden (Tabelle 15).

Tabelle 15: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen des Grundwassers in der Grundwassermessstelle im Testfeld Crailsheim

| | Messwert | | Maßstab |
|-------------------------------------|----------|------------------------------|----------|
| | Keime/ml | Kategorie | Keime/ml |
| Eisenbakterien | ~ 500 | mittel | 25-500 |
| Sulfatreduzierende Bakterien | ~ 200 | mittel | 200-1200 |
| Schleimbildende Bakterien | < 500 | gering bis nicht nachweisbar | < 500 |

Bei der Kamerabefahrung im März 2015 in der Grundwassermessstelle konnte festgestellt werden, dass der Trübungswert im Brunnenwasser erhöht ist. Visuell war jedoch keine Veränderung des porösen HDPE-Filterelements erkennbar.

Laborversuche

Versinterung

Der Versuch zur Versinterung von porösen Filterelementen entspricht dem Versuchsaufbau für die Untersuchung der hydraulischen Eigenschaften (**Kap. Hydraulische Eigenschaften**). Für die Untersuchung kommen kalzitisch hochmineralisierte Wässer zum Einsatz. Der Versuchsaufbau stellt besonders günstige Bedingungen für die Versinterung, wie sie in der Natur nicht anzutreffen sind, dar.

In zehn Langzeittests von durchschnittlich 72 Stunden wurde das Versinterungsverhalten der porösen HDPE-Filterelemente im Labor abgebildet. Hierbei wurden drei thermische Szenarien von 10, 25 und 40°C mit karbonatisch niedrig- und hochmineralisierten Wässern durchgeführt. Zur Veranschaulichung der verschiedenen Versuchsbedingungen sind zusätzlich die elektrische Leitfähigkeit des Fluids, die initiale Konzentration an Hydrogenkarbonat und die Fracht an löslichem HCO_3^- , welche potenziell während des Versuchs im Filter abgelagert werden könnte, in Tabelle 16 zusammengefasst. Untersucht sind Filtertypen der Gruppe B und C.

In Abbildung 31a), b) und c) ist die zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit in den Versuchen zur Versinterung für die drei thermischen Szenarien von 10, 25 und 40°C abgebildet. Die temporäre Durchlässigkeit ist relativ zur initialen Durchlässigkeit dargestellt. Die Filterelemente des Typs B sind in Rot und die des Typs C in Blau veranschaulicht. Der Linientyp unterscheidet zwischen Durchströmung mit schwach (gestrichelt) und hoch (durchgezogen) mineralisiertem Fluid. Es lässt sich erkennen, dass die Durchlässigkeit der Filterelemente Gruppe B und C während der ersten 72 Stunden bei 10°C nicht abnimmt (Abb. 20a)). Die Versuche bei 25°C mit schwach mineralisiertem Wasser weisen ebenfalls keine Abnahme der Durchlässigkeit mit der Zeit nach. Dahingegen kann für den Typ B bei diesem Versuch mit hoch

mineralisiertem Wasser eine Verminderung der hydraulischen Eigenschaft nach 24 Stunden festgestellt werden. Bei Typ C ist über die Dauer von 72 Stunden kein eindeutiger Einfluss des 25°C temperierten hochmineralisierten Wassers auf die initiale Hydraulik bestimmbar. Die markantesten hydraulischen Daten ergeben die Versuche bei 40°C Fluidtemperatur. Hier zeigt sich bei allen Filter- und Wassertypen eine Abnahme der Durchlässigkeit nach kürzester Zeit. Die feinporigen Filter der Gruppe B werden bei beiden Wassertypen soweit alteriert, dass sie unter zehn Prozent der initialen Durchlässigkeit aufweisen.

Tabelle 16: Versuchsbedingungen der durchgeführten Tests zur Untersuchung des Versinterungsverhaltens an porösen HDPE-Filterelementen

| Gruppe | Fluid-temperatur | Initiale elektr. Leitfähigkeit des Fluids bez. auf 25°C | Initiale Konzentration an Hydrogenkarbonat | Fracht an Hydrogenkarbonat im durchströmten Fluid über die gesamte Versuchsdauer |
|--------|------------------|---|--|--|
| | [°C] | [$\mu\text{S cm}^{-1}$] | [mg l^{-1}] | [kg] |
| B | 10 | 645 | 242 | 8,7 |
| | 25 | 42 | 41 | 1,5 |
| | 25 | 660 | 251 | 9,0 |
| | 40 | 50 | 48 | 1,7 |
| | 40 | 570 | 260 | 9,4 |
| C | 10 | 675 | 242 | 8,7 |
| | 25 | 38 | 41 | 1,5 |
| | 25 | 675 | 251 | 9,0 |
| | 40 | 70 | 48 | 1,7 |
| | 40 | 555 | 260 | 9,4 |

Bei hoch mineralisiertem Wasser verursacht die Alteration des Filters Gruppe C bei 40°C nach 24 Stunden eine Verringerung um 70 % der hydraulischen Eigenschaft. Das niedrig mineralisierte Wasser führt nach 72 Stunden zur Verstopfung der Porenräume bei Gruppe C bei 40°C. Die relative Durchlässigkeit nach 72 Stunden ist um 5% reduziert.

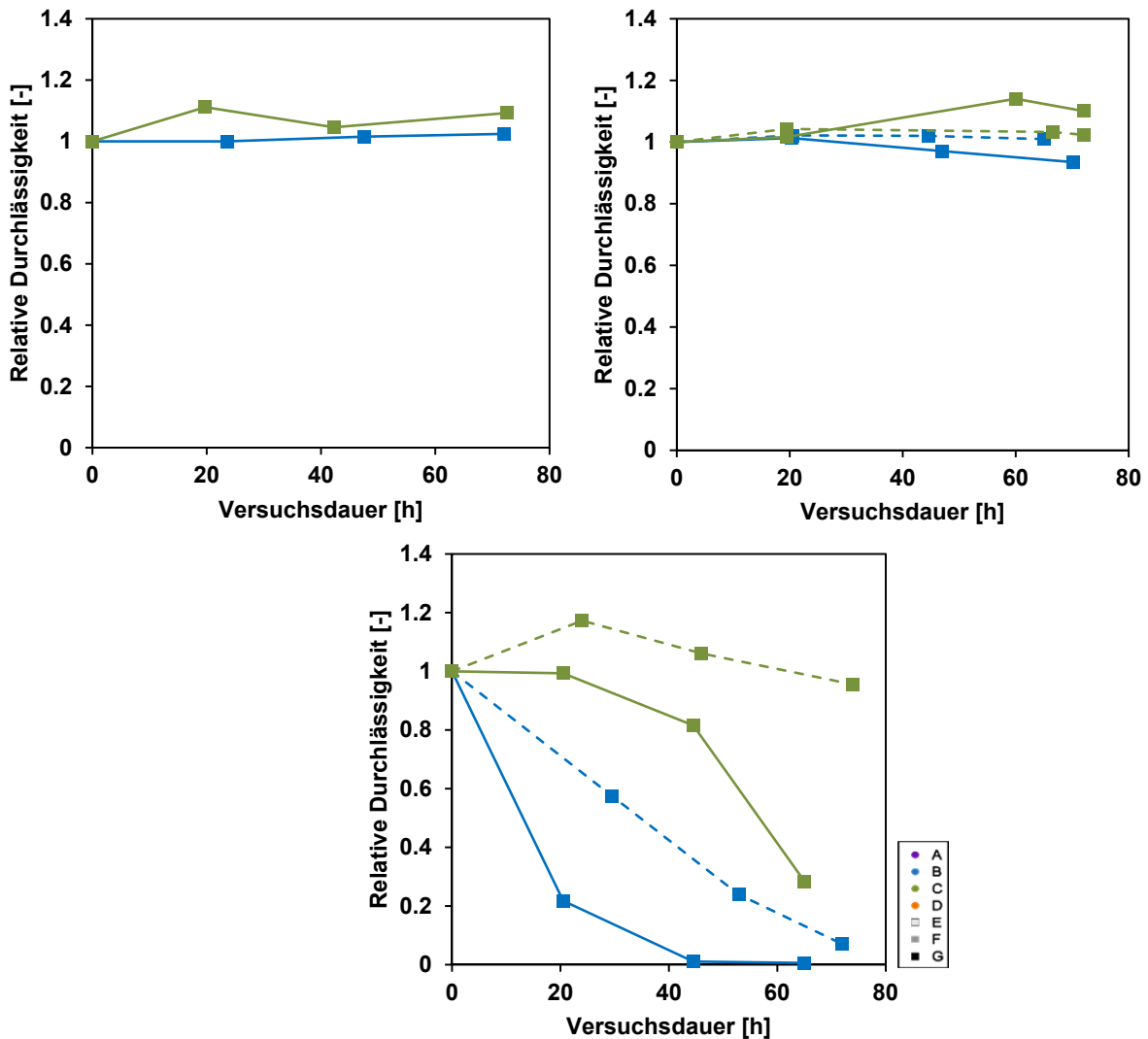


Abbildung 31: Zeitliche Entwicklung der Durchlässigkeit der Filtertypen B und C bezogen auf die initial bestimmte Durchlässigkeit während der Versinterungsversuche bei a) 10°C b) 25°C und c) 40°C. Durchgezogene Linie: hoch mineralisiertes Wasser, gestrichelte Linie: schwach mineralisiertes Wasser.

Mittels EDX konnte nachgewiesen werden, dass es sich bei den Partikeln, die sich in den Porenräumen der Filterelemente ablagern, um CaCO_3 handelt. Abbildung 21 zeigt, dass die Partikel nur aus den Elementen von Kalzium, Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen. Die Oberflächen der porösen HDPE-Filter sind frei von Kalziumkarbonat und charakterisieren sich rein physikalisch durch die Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff. Diese Ergebnisse werden durch die Aufnahmen des ESEM bestätigt (Anhang 2). So können für die Versuche beider Filtertypen bei 10°C vereinzelte Kristalle mit Durchmesser kleiner 10 μm gefunden werden. Die Versinterungsversuche bei Durchströmung mit schwach mineralisiertem, auf 25°C temperiertem Wasser spiegeln ähnliche Bilder wider. Nach 72 Stunden Durchströmung von hoch mineralisiertem Wasser bei 25°C sind in den Filtertypen beider Gruppen viele Kristalle im Mikrometerbereich wieder zu finden. Anhand der ESEM-Aufzeichnungen der Filterelemente, die mit 40°C warmen Fluid durchströmt wurden, müssen die Versinterungseigenschaften der beiden Filtertypen B und C allerdings differenziert werden. Der feinporige Filtertyp B neigt bei diesem Temperaturniveau tendenziell mehr zur Anlagerung von Kristallisationskeimen, wohingegen der grobporige Filtertyp C genau wie bei 10°C nur vereinzelt Kristalle

vorfinden lässt. Es ist auffällig, dass bei schwach ionisiertem Wasser der Filtertyp B an der Filterinnenseite, aber dort vollständig versintert. Die ESEM-Aufnahmen veranschaulichen, dass die initiale Versinterungen im porösen HDPE-Filterelement sich durch Kristallisation einzelner Keime in den Porenräumen, nicht aber durch flächenhafte Beläge der versinterten Polymer-Granulatkörner gestaltet.

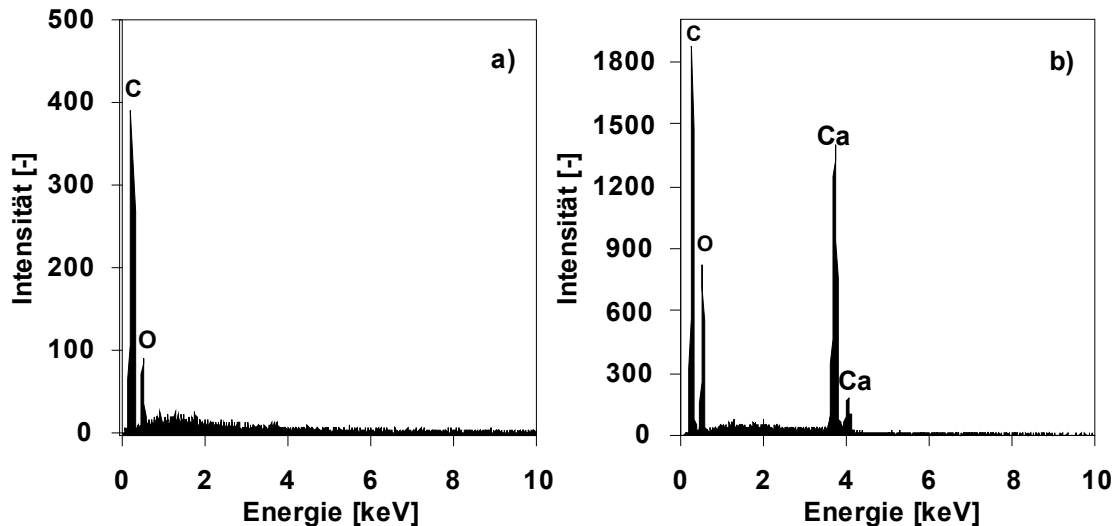


Abbildung 32: Spektren der Mikroröntgenanalyse nach Abschluss der Alterationsversuche mit chemisch elementarer Zusammensetzung a) der Partikeloberfläche der porösen Filterelemente b) der abgelagerten Inkrustationsbildungen in Form von Kristallen in den Filterporenräumen

Beim Vergleich zwischen Kristallbildung bei hochmineralisierter Wasserdurchströmung bei 25 und 40°C, so scheint nach visueller Beurteilung bei 25°C am meisten Kalziumkarbonat auszufallen. Die gravimetrischen Untersuchungen der Filterrückstände (Abb. 33) beweisen, dass die massivsten Verkrustungen aufgrund der Durchströmung bei 40°C auftreten. Die Masse der Filterrückstände bezogen auf das zu inkrustierende Porenvolumen bei niedrigtemperierter Fluiddurchströmung von 25°C und 10°C liegt im Messfehlerbereich von $\pm 0,003 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. In Filtertyp B lagert sich das höchste Gewicht an Filterrückständen ab. Bei Filtertyp C ist nur die 72 stündige Durchströmung von hochmineralisiertem, 40°C warmen Fluids von gravimetrischer Bedeutung. So bilden zwar die ESEM-Aufnahmen nach der Durchströmung bei 25°C die stärkste Keimbildung ab. Jedoch haben diese Karbonatkristalle in den Porenräumen der HDPE-Filterelemente nach der Dauer von 72 Stunden noch keine maßgeblichen Einflüsse auf die gravimetrischen und hydraulischen Eigenschaften der Brunnenfilter.

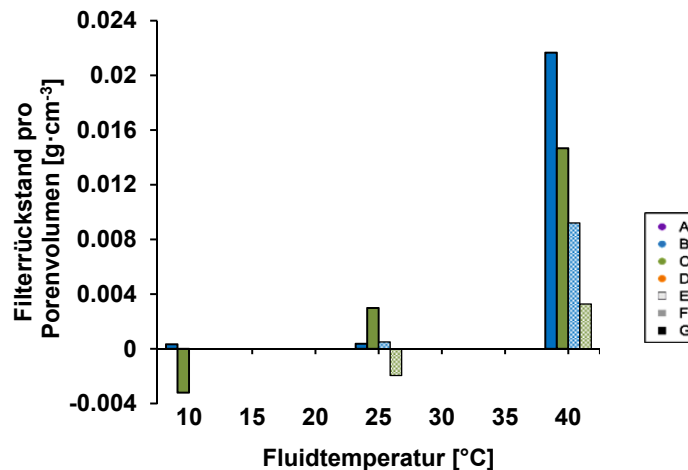


Abbildung 33: Filtrerrückstand bezogen auf das Filterporenvolumen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur nach Abschluss der Versinterungsversuche. Volle Fläche: hoch mineralisiertes Wasser, gemusterte Fläche: schwach mineralisiertes Wasser.

Verockerung

Im Rahmen des Forschungsprojektes ist ein weiterer Versuch zur chemischen Verockerung an Kunststoffbrunnenfilterelementen konzipiert worden. Dabei sind im Labor die In-Situ-Bedingungen eines Vertikalfilterbrunnens während des Betriebes realitätsnah unter hoch oxidischen Bedingungen nachgebildet worden. Das Versuchskonzept dieser Arbeit ist stark an die Untersuchungen von Henkel et al. (2012) angelehnt. Die qualitative und quantitative Analyse von Eisenablagerungen auf den verschiedenen Brunnenfiltertypen dient, um Aussagen über den Einfluss struktureller und materieller Unterschiede der Filtertypen auf die Verockerung treffen zu können.

Abbildung 34 veranschaulicht den Aufbau des Versuchs. Der Reaktionstank repräsentiert einen Vertikalfilterbrunnen im Grundwasserleiter. Die hydraulischen Druckverhältnisse im Reaktionstank entsprechen einem freien Grundwasserleiter. Die Instrumente außerhalb des Reaktionstanks dienen zur Aufbereitung, Regulierung und Kontrolle des Systemwassers. Der Versuch wurde in Form eines geschlossenen Kreislaufs aufgebaut. Insgesamt fasst der Versuch ein Volumen von etwa 95 l.

Die kontrollierte Zufuhr der Eisen(II)chlorid-Lösung am Zugabepunkt 3 (Z3) ermöglicht eine konstante Eisen(II)konzentration im Reaktionstank. Durch die Zugabe an Eisen(II) in das System wird aufgrund der sauerstoffzehrenden Verockerungsreaktion der Restsauerstoff aus dem Systemwasser entzogen. Zur Überprüfung der Eisen(II)-konzentration werden am Punkt FE Wasserproben entnommen und anschließend mit der Spektralphotometrie die Konzentration bestimmt. Der pH-Wert ist im Reaktionstank auf neutrale Bedingungen einzustellen. Dies gelingt durch die Zugabe von schwach konzentrierter Natronlauge an den Zugabepunkten Z1 und Z3. Die Dosiermenge der Natronlauge wird über die permanente Messung des pH-Wertes in M1 und M2 sowie durch die Änderung der Fließrate der Natronlauge am Punkt Z3 reguliert. Zur Indizierung der Verockerungsreaktion erfolgt eine druckluftbasierende Sauerstoffzufuhr. In M1 werden der pH-Wert, die Sauerstoffkonzentration und die Temperatur mittels fest installierten Messelektroden aufgezeichnet und permanent digital angezeigt. Zur Kontrolle des Durchflusses ist ein Ultraschalldurchflussmessgerät direkt nach M1

installiert worden. Zur Beseitigung mikrobiologischer Organismen wird das Systemwasser mit ultraviolettem Licht (UV) bestrahlt.

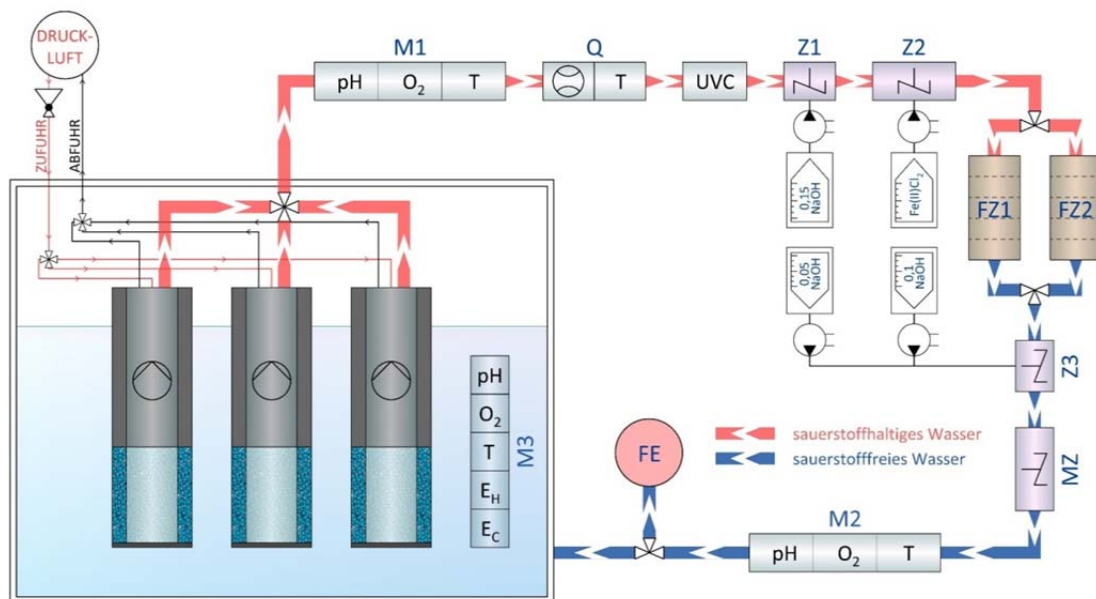


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Verockerung von Brunnenfilterelementen

Die chemische Verockerungsreaktion im Filternahbereich führt zur Bildung von geringlöslichen Eisen(III)hydroxiden. Diese oxidierten Eisenhydroxide werden in dahinter positionierten Filterzellen (FZ1, FZ2) zurückgehalten. Diese Aufbereitungsmaßnahmen führen zum mechanischen Entzug des gesamten Sauerstoffs des Systemwassers vor dem Wiedereintritt in den Reaktionstank. Innerhalb des Reaktionstanks ist M3 installiert. Dort werden die Sauerstoffkonzentration, der pH-Wert, die Systemwassertemperatur, die elektrische Leitfähigkeit und das Redoxpotential aufgezeichnet.

Die karbonatischen und eisenoxidierten Filterrückstände in den Filterelementen werden nach Versuchsende gravimetrisch erfasst. Des Weiteren werden die Ablagerungen mittels ESEM-EDX qualitativ und quantitativ untersucht. Die initialen Versuchsbedingungen neben Fluidtemperatur, Versuchsdauer und Durchfluss im System sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Initiale Versuchsbedingungen zur Untersuchung der Verockerung an porösen HDPE-Filterelementen

| Gruppe | Temperatur [°C] | Dauer [h] | Durchfluss im System [l·h ⁻¹] | Fe ²⁺ Konzentration [mg l ⁻¹] | O ₂ - Gehalt [mg l ⁻¹] | Redox- potential [mV] | pH- Wert [-] | Elektr. Leitfähigkeit [µS·cm ⁻¹] |
|--------|--------------------|--------------|--|--|---|-----------------------------|--------------------|--|
| D | 25 | 6 | 154 | 32 | 0.0 | -36 | 6.17 | 215 |
| D | 25 | 12 | 146 | 78 | 0.0 | -54 | 6.01 | 340 |
| D | 25 | 24 | 156 | 37 | 0.0 | -133 | 6.48 | 221 |
| D | 40 | 6 | 163 | 32 | 0.0 | -130 | 6.10 | 239 |
| D | 40 | 24 | 159 | 43 | 0.0 | -117 | 6.09 | 263 |

Zu Beginn der Versuche liegt die Fe^{2+} -Konzentration etwa zwischen 30 und 40 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ und der Sauerstoffgehalt im Wasser ist gleich null. Das Redoxpotential im Reaktionstank deutet auf schwach reduzierendes Milieu hin. Der pH-Wert ist leicht sauer. Die elektrische Leitfähigkeit mit Werten von 215 bis 340 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ korrespondiert mit der Konzentration an gelöstem Eisen im Wasser. Der Versuch über 12 h bei 25°C weicht mit seiner erhöhten Eisenkonzentration geringfügig von den initialen Bedingungen der anderen Versuchsszenarien ab.

In Tabelle 18 sind arithmetische Mittelwerte der Kennwerte während des Verockerungsversuchs zusammengefasst. Neben der gesteigerten Konzentration gelöstem Eisen im Wasser ist auch Gesamtmenge an Fe^{2+} angegeben, die während des gesamten Versuchs dem System zugeführt wird. Diese steigt aufgrund konstanter Zugaberaten an Fe^{2+} mit zunehmender Testdauer. Ausnahme ist der Versuch über 12 h bei 25°C, da bei diesem Test die Ausgangskonzentration an gelöstem Eisen relativ hoch ist (Tab. 17). Außerdem ist der Restsauerstoffgehalt des Wassers, nachdem es aus dem Brunnenfilterelement gefördert wird, dargestellt. D.h. je geringer der Restsauerstoffgehalt im Wasser, desto umfangreicher die Oxidation an Eisen im Brunnenfilterelement. Die Ergebnisse belegen somit, dass die gemittelten Oxidationsraten in den Versuchen bei 40°C größer sind als in den Versuchen bei 25°C. Die Differenz des pH-Wertes vor und nach dem Reaktionstank dient als zusätzlicher Indikator für die Stärke der stattfindenden Oxidation. Je größer die Differenz, desto saurer verlässt das Wasser den Brunnen und desto heftiger ist die Oxidation an Eisen. Die angegebenen pH-Differenzen deuten im Gegensatz zum Restsauerstoffgehalt darauf hin, dass bei 25°C eine stärkere Oxidation stattfindet.

Tabelle 18: Kennwerte unter vorherrschender Verockerung an porösen HDPE-Filterelementen

| Gruppe | Temperatur [°C] | Dauer [h] | Fe^{2+} - Konzentration [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] | Gesamtmenge an Fe^{2+} im System [g] | Rest- O_2 - Gehalt [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$] | Redox- potential [mV] | ΔpH - Wert [-] |
|--------|--------------------|--------------|--|--|--|-----------------------------|------------------------------------|
| D | 25 | 6 | 41 | 3.5 | 0.17 | -97 | -1.08 |
| D | 25 | 12 | 68 | 1.8 | 0.14 | -122 | -1.01 |
| D | 25 | 24 | 58 | 11.7 | 0.17 | -169 | -0.77 |
| D | 40 | 6 | 75 | 10.2 | 0.03 | -193 | -0.89 |
| D | 40 | 24 | 68 | 35.7 | 0.01 | -220 | -0.64 |

Die Differenz der Konzentration an gelöstem Eisen vor und nach dem Reaktionstank stellt ein weiteres Indiz über die Oxidation im Brunnenfilterelement dar. Da sich diese Konzentration während des Versuchs zeitlich veränderlich ist, wird sie in Abbildung 35 für die durchgeführten Versuche visualisiert. Es lässt sich erkennen, dass die Oxidationsrate bei 40°C zu Beginn der Versuche sehr hoch ist, im Laufe der Zeit aber gegen null geht. Die tendenzielle Abnahme der Differenz an gelöstem Eisen vor und nach dem Reaktionstank ist auch für die Versuche 25°C feststellbar. Es ist jedoch ersichtlich, dass die Oxidation weiterhin stattfindet.

Diese Ergebnisse bestätigen die ermittelten Filtrerrückstände in den Filterelemente nach Versuchsende (Abb. 36). Hier zeigt sich, dass nach 24 h die Rückstände beim 25°C-Versuch größer sind als die 40°C-Versuch. Die Darstellung weist nach, dass mit zunehmender Versuchsdauer die Masse an Filtrerrückstand steigt. Nach sechs Stunden sind die Rückstände beim 40°C-Versuch in den Filterelementen größer als die beim 25°C-Versuch. Dies lässt sich auch visuell durch Fotos in Abbildung 37 belegen.

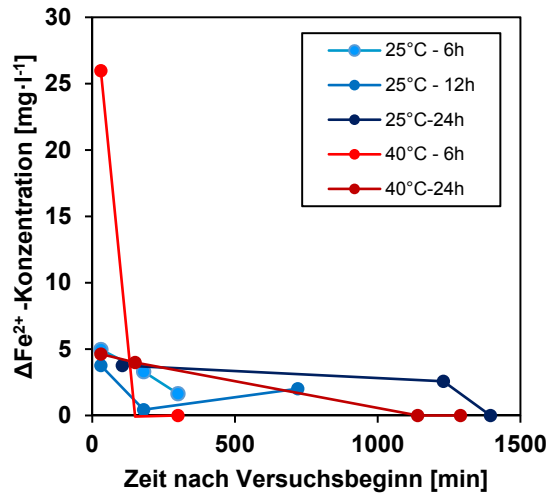


Abbildung 35: Zeitliche Veränderung der Differenz an Fe²⁺-Konzentration im Wasser zwischen M3 und M1 während des Verockerungsversuchs

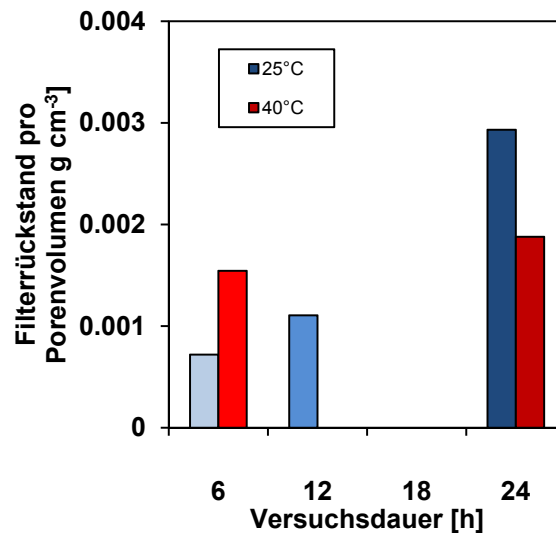


Abbildung 36: Filterrückstand bezogen auf das Filterporenvolumen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur nach Abschluss der Verockerungsversuche

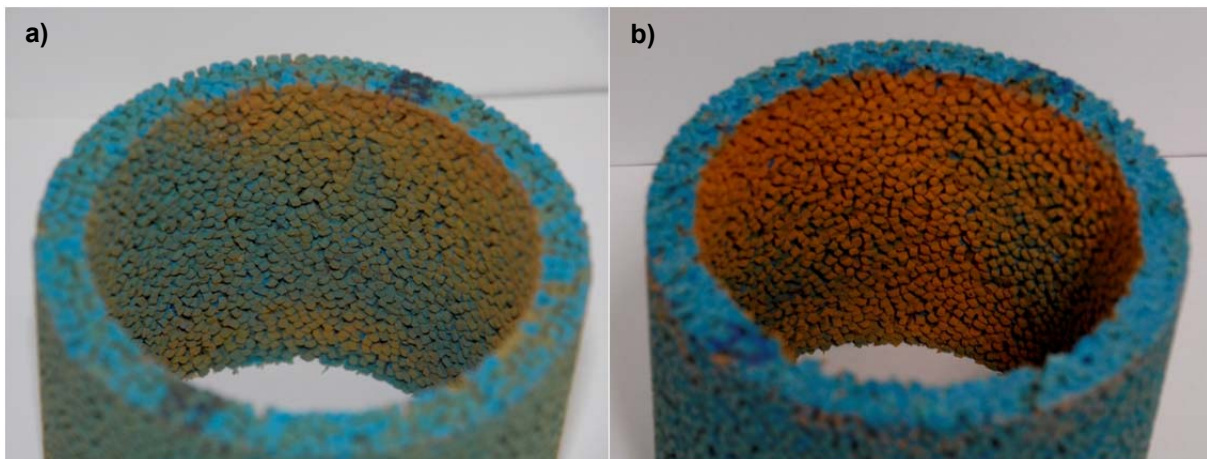


Abbildung 37: Poröse Filterelemente der Gruppe D mit Verockerungserscheinungen nach Durchführung des Verockerungsversuchs über sechs Stunden bei a) 25°C und b) 40°C

Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung der strukturellen Eigenschaften der Filterelemente kommt zu dem Ergebnis, dass sich die HDPE-Filter der Gruppe A bis D durch hohe Porosität von 30 bis 40 % auszeichnen. Die zum Vergleich herangezogenen PVC-U Schlitzfilter charakterisieren sich durch eine bis zu zehnfach geringere offene Fläche, woraus eine deutlich geringere Porosität von 5 bis 10% resultiert.

Die strukturellen Daten der untersuchten Filter weichen zwischen 20 bis 60% vom arithmetischen Mittel ab. Dies betrifft vor allem die Filtertypen mit großen Öffnungsweiten (Gruppe C bis G). Diese hohe Streuung ist dem heterogenen Herstellungsprozess zuzuordnen.

Es zeigt sich anhand von Mikrocomputertomographie (μ CT) und rasterelektronischen Aufnahmen (ESEM-EDX), dass die Polymer-Granulate an Versinterungsgebieten an den Granulathälsen miteinander verschweißt sind und die kubische Struktur der PE-Körner während der Versinterung nicht verloren geht. Diese Befunde validieren die Qualität des Herstellungsprozesses.

Mit zunehmender Filterwandstärke der porösen Filterelemente nimmt jedoch die Porosität und folglich die Qualität des Herstellungsprozesses ab. So nimmt für feinwandige Filter (Wandstärke $d = 0.0075$ m) im Vergleich zu dickwandigen Filtern ($d = 0.0225$ m) die Porosität von 32 % auf 38 % zu.

Aus der Auswertung der uniaxialen Druck- und Zugversuche wird deutlich, dass die Filter der Gruppe C die höchste mechanische Belastbarkeit aufweisen. Dies ist zum einen auf die relativ geringe Porosität zurückzuführen. Zusätzlich kann die mechanische Belastbarkeit aber auch direkt mit dem Molekulargewicht des verwendeten Polyethylens korreliert werden. Es kann für die Gruppen A, B und D gezeigt werden, dass die mechanische Stabilität des Polymers mit dem Molekulargewicht zunimmt.

Da die mechanischen Eigenschaften der porösen Filtertypen direkt vom strukturellen Charakter abhängen, variieren diese Kennwerte im gleichen Umfang wie die Porosität der Filter.

Die geschlitzten Filterelemente sind aufgrund ihres Werkstoffs durch eine hohe Festigkeit charakterisiert, allerdings reduziert die Schlitzung der Filter die mechanischen Eigenschaften.

Für alle Filtertypen gilt: Die Einsatzbereiche in der oberflächennahen geothermischen Anwendung sind durch die Temperaturabhängigkeit der Festigkeit des polymeren Werkstoffs vorgegeben. Hierbei lässt sich eine Abnahme der Festigkeit mit steigender Temperatur erkennen. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der Filter kann als obere Grenze für eine Anwendung eine Temperatur von 25°C empfohlen werden.

Die detaillierte hydraulische Laborkampagne mit etwa 1400 Einzelmessungen untersucht die Permeabilität bzw. Durchlässigkeit der Filter unter verschiedenen Temperaturbedingungen. Die Daten belegen, dass die Permeabilität der porösen Filterelemente mit zunehmender Porenweite steigt (von $3.2 \cdot 10^{-11}$ auf $1.9 \cdot 10^{-10}$ m²). Die Durchlässigkeit nimmt mit steigender Wassertemperatur geringfügig ab.

Die Permeabilität geschlitzter Filter E, F und G sowie poröser Filter der Gruppe C und D ist etwa gleich groß und nimmt einen Wert von ca. $1.5 \cdot 10^{-10}$ m² an.

Die Variation der strukturellen Eigenschaften sowie die Mineralisierung des durchströmenden Wassers haben keinen erheblichen Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften der porösen Filterelemente. Filterverstärkungen, wie z. B.

innenliegende Stützgitter, welche die mechanischen Eigenschaften verbessern, aber die hydraulischen Eigenschaften nicht nachteilig beeinflussen, stellen eine vielversprechende Strategie zur Produktweiterentwicklung dar.

Die Analyse des Alterungsverhaltens von Brunnenfiltern ist für die Beurteilung der praktischen Einsatzbereiche der Filterelemente wesentlich. Neben Langzeituntersuchungen im Feld wurden neue, komplexe Versuchsstände im Labor entwickelt, an denen Versinterungs- sowie Verockerungserscheinungen an Brunnenfilterelementen abgebildet werden können. Die Daten aus dem Testfeld bei Aschaffenburg ergeben, dass nicht nur die porösen HDPE-Filterelemente für Verockerung anfällig sind, sondern dies in gleichem Maße auch für PVC-U Schlitzfilter zutrifft.

Die hydraulischen Pumptests deuten darauf hin, dass der Filtertyp mit nomineller Porenweite von 200 µm verglichen mit anderen Filtertypen resistenter gegenüber Alterungserscheinungen ist. Die Versinterungsversuche an porösen Brunnenfiltern im Labor macht deutlich, dass die feinporigen Filterelemente wesentlich anfälliger für kalkhaltige Inkrustationen sind als grobporige Filterelemente.

Weiterhin nimmt die Ausfällung von CaCO_3 an und in den Filterelementen mit steigender Temperatur zu und setzt somit die hydraulischen Eigenschaften herab. Für Versuchsbedingungen bei typischen Grundwassertemperaturen ($\sim 10^\circ\text{C}$) wurden weder Beeinflussung der Hydraulik noch vermehrte Kristallbildung im Brunnenfilter belegt.

Die Tests zur Verockerung belegen, dass die Oxidation von gelöstem Eisen bei 40°C zu Versuchsbeginn heftiger ausfällt als bei 25°C . Jedoch sinkt die Oxidationsrate mit zunehmender Versuchsdauer und bei 40°C kommt die Oxidation schließlich vollständig zum Erliegen. So lagern sich nach 24 Stunden bei 25°C mehr Eisenoxide und -hydroxide ab als bei 40°C . Dieses Verhalten kann bisher nicht erklärt werden, da es sich bei der Fällung von FeOOH und $\text{Fe}(\text{OH})_3$ zum einen um eine autokatalytische Reaktion handelt, und zum anderen bei steigenden Temperaturen auch erhöhte Reaktionsraten verzeichnet werden sollten.

Fazit

In diesem Projekt (AZ 28789) wurden unterschiedliche Filter und Filtersysteme auf ihre Tauglichkeit bezüglich oberflächennaher geothermischer Fragestellungen überprüft. Schwerpunkt der Untersuchungen stellt die hydraulische und mechanische Charakterisierung und Weiterentwicklung von porösen, hochdichten Polyethylen-Filterelementen (HDPE) dar. Neben den hydraulischen und geotechnischen Anforderungen an Brunnen und Filter stehen hier die Alterungsprozesse des Brunnens, die durch Temperaturunterschiede im Heiz- und Kühlbetrieb auftreten im Vordergrund.

Nach Beurteilung der geotechnischen und hydraulischen Eigenschaften sowie dem Alterationsverhalten können alle makroporösen HDPE-Filtertypen (insbesondere Typ C mit Porengröße $d = 200 \mu\text{m}$) in Schluck- bzw. Entnahmeburgen für den oberflächennahen geothermischen Einsatz bei typischen Grundwasserbedingungen ($T \sim 10^\circ\text{C}$) empfohlen werden. Die feinporigen Filtergruppen A und B sind durch sehr homogene strukturelle und mechanische Eigenschaften charakterisiert. Aufgrund der verringerten Permeabilität und erhöhten Sensitivität gegenüber Alterungserscheinungen dieser Filtertypen, kann ein Einsatz nur in niedrigmineralisierten Grundwasserleitern mit geringer Durchlässigkeit empfohlen werden.

Die strukturellen Eigenschaften der HDPE-Filtertypen können durch Optimierung des Herstellungsprozesses zur Homogenität der Filtereigenschaften beitragen.

Im Rahmen des Projektes konnte nicht geklärt werden, warum die hydrophobischen, porösen Kunststofffilterelemente anfällig gegenüber chemischer Alteration sind. Neben einer qualitativen Analyse der Alterationsgenese ist eine Studie zur Instandhaltung bzw. Regenerierung der Brunnenfilter wünschenswert. Diese Maßnahmen sind bei den zwangsläufig entstehenden Alterungserscheinungen in und an den Brunnenfiltern notwendig.

Die speziell entwickelten Filtertypen stellen einen ökologisch und ökonomisch wichtigen Beitrag zur Verbreitung von offenen energieeffizienten Systemen zum Heizen und Kühlen von Gebäuden dar. Dies liegt zum einen an der Verwendung des gesundheitlich unbedenklichen Werkstoff Polyethylen. Andererseits ermöglicht die poröse Struktur der HDPE-Filter den Verzicht von Einbaumaterialien wie z.B. Filterkies oder Glaskugeln bei der Installation von Brunnen und reduziert somit die Baukosten erheblich. Der direkte Vergleich mit den derzeit konventionell eingesetzten PVC-U Schlitzfilter lässt erkennen, dass die speziell entwickelten porösen HDPE-Filtern weder in mechanischen noch hydraulischen Eigenschaften unterlegen sind.

Folglich ist es in Rahmen dieses Projekt erfolgreich gelungen, einen Beitrag zur Optimierung von geothermalen oberflächennahen Brunnenanlagen und damit verbundene Reduzierung von Wartungs- und Betriebskosten zu leisten. Die neuentwickelten Brunnenfilter können dabei in der direkten, oberflächennahen Geothermie zur breiteren, ökonomisch und ökologisch sinnvollen Nutzung dieser regenerativen Technik führen.

Literaturverzeichnis

- Abts, G. (2014). *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. München: Carl Hanser.
- Bahadir, M., Parlar, H., & Spiteller, M. (2000). *Springer Umweltlexikon*. Heidelberg Berlin New York: Springer.
- Barker, J. (1988). A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Res. Research*, 24(10), 1796-1804.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover.
- Beger, H. (1937). Die Eisenbakterien in Wasserversorgungsanlagen und ihre praktische Bedeutung. *gwf Gas und Wasserfach*, 80(50), 886-889.
- Bertani, R. (2012). Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. *Geothermics*(1-29).
- Bieske, E. (1997). *Bohrbrunnen* (8. Ausg.). Deutscher Industrieverlag.
- Blum, P., Camillo, G., Munch, M., & Kolbel, T. (2010). CO2 savings of ground source heat pump systems - a regional analysis. *Renewable Energy*, S. 122-127.
- Bozena, A. (2013). *Polymere*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Chandler, J. (1964). The effect of superstauration and flow conditions on the initiation of scale formation. *Trans IChemE*, 42, 24.
- Chapelle, F. (1993). *Groundwater microbiology and geochemistry*. New York: Wiley.
- Clark, L., & Turner, P. (1983). Experiments to Assess the Hydraulic Efficiency of Well Screens. *Groundwater*, 21(3), 270-281.
- Cornell, R., & Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Cullimore, R. (1999). *Microbiology of well biofouling*. Boca Raton: CRC Press.
- Davison, W., & Seed, G. (1983). The kinetics of the oxidation of ferrous iron in synthetic and natural waters. *Geochemica et Cosmochimica*, 47, 67-79.
- Domininghaus, H. (2008). *Kunststoffe*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dowlatabadi, H., & Hanova, J. (2007). Strategic GHG reduction through the use of ground. *Environ Res Lett*, S. 1-8.
- Duckworth, W. (1953). Discussion of Ryshkewitch Paper. *Journal of the American Ceramic Society*, 36(2).
- DVGW, R. (2007). Arbeitsblatt W 130: Brunnenregenerierung.
- Eddin, A., & Kurtz, S. (2000). Influence of Mechanical Behavior on the Wear of 4 Clinically Relevant Polymeric Biomaterials in a Hip Simulator. *Journal of Anthroplasty*, 15(3), 321-331.
- Ehrenstein, G. (2011). *Polymer Werkstoffe*. München: Carl Hanser.
- Gringarten, A. (1973). Extraction of heat multiple-fractured dry hot rock. *Geothermics*, 2(3-4), 119-122.
- Hambir, S., & Jog, J. (2000). Sintering of ultra high molecular weight polyethylene. *Bull. Mater. Sci.*, 23(3), 221-226.
- Hancke, K. (1998). *Wasseraufbereitung - Chemie und chemische Verfahrenstechnik*. Trier: Springer-Verlag.
- Hässelbarth, U., & Lüdemann, D. (1974). Die biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien. *bbr*, 18(10/11).
- Hellerich, W., Harsch, G., & Baur, E. (2010). *Werkstoffführer Kunststoffe*. München: Carl Hanser.
- Henkel, S., Weidner, C., Roger, S. S., Rude, T., Klauer, W., & Vinzelberg, G. (2012). Untersuchung der Verockerungsneigung von Vertikalfilterbrunnen im Modelversuch. *Grundwasser*, 17, 157-169.
- Holländer, H., Boochs, P., Billib, M., & Panda, S. (2005). Labor-Säulenversuche zur Untersuchung von Clogging-Effekten im Grundwasserleiter - Einfluss von

- physikalischen An- und Ablagerungen, Gasblasen und biologischer Aktivität. *Grundwasser*, 4, 205-215.
- Hölting, B., & Coldewey, W. (2012). *Hydrogeologie*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Hornbogen, E. W. (2006). *Metalle*. Heidelberg, Berlin, New York: Springer.
- Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in wells. Part 1: genesis, mineralog, and geochemistry. *Applied Geochemistry*, 18, 927-939.
- Houben, G. (2003). Iron oxide incrustations in wells. Part 2: chemical dissolution and modelling. *Applied Geochemistry*, 18, 941-954.
- Houben, G. (2004). Modeling the Buildup of Iron Oxide Encrustations in Wells. *Groundwater*, 42(1), 78-82.
- Houben, G. (2006). The Influence of Well Hydraulics on the Spatial Distribution of Well Incrustations. *Groundwater*, 44(5), 668-675.
- Houben, G., & Treskatis, C. (2003). *Regenerierung und Sanierung von Brunnen*. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Houben, G., Merten, S., & Treskatis, C. (1999). Entstehung, Aufbau und Alterung von Brunneninkrustationen. *bbr, Wasser und Rohrbau*, 50(10), 29-35.
- Huisman, L. (1972). *Groundwater Recovery and recharge (Civil Engineering Hydraulics)*. London: Macmillan Interactive Publishing.
- Hünerberg, K. (1966). Brunnenalterung und ihre Bekämpfung. *bbr- Fachmagazin Wasser Leitungstiefbau*, 11, 455-461.
- Huttrer, G. W. (2001). The status of world geothermal power. *Geothermics* 30, S. 1-27.
- Ivarson, K., & Sojak, M. (1978). Microorganisms and ochre deposition in field drains of Ontario. *Can.J.Soil. Sci.*, 58(1), 1-17.
- Jacob, C. (1947). Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Transactions of the ASCE*, 1047-1064.
- Jung, H., & Um, W. (2013). Experimental study of potential wellbore cement carbonation by various phases of carbon dioxide during geologic carbon sequestration. *Applied Geochemistry*, 35, 161-172.
- Ketcham, R. A., & Carlson, W. D. (2001). Acquisition, optimization and interpretation of x-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27, 381-400.
- Klammler, H., Nemer, B., & Hatfield, K. (2014). Effect of injection screen slot geometry on hydraulic conductivity tests. *Journal of Hydrology*, 511, 190-198.
- Klauder, W. S. (2010). Experimentelle Untersuchung der Anströmung von Vertikalfilterbrunnen. Aachen: RWTH Aachen.
- Klotz, D. (1975). Hydraulische Eigenschaften handelsüblicher Brunnenfilterrohre. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 126, 411-421.
- Klotz, D. (1997). Hydraulische Eigenschaften ausgebaute Bohrungen-Teil 1: Durchlässigkeit handelsüblicher Brunnenfilterrohre. *bbr, Wasser und Rohrbau*, 48(4), 37-39.
- Konhauser, K. (1998). Diversity of bacterial iron biomineralization. *Earth-Sci. Rev.*, 43, 91-121.
- Krems, G. (1980). Brunnenalterung und Regenerierung. *Brunnenalterung: Theorie und Praxis, Regenerierungsmöglichkeiten. Schriftenreihe WAR, TU Darmstadt*, 119 S.
- Langer, L. (2012). Planung und Erkundung für den Baudes oberflächennahen geothermalen Brunnentestfeldes Crailsheim. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Larroque, F., & Francesci, M. (2011). Impact och chemical clogging on de-watering well productivity: numerical assessment. *Environ Earth Sci*, 64, 119-131.

- Li, L., Benson, C., & Lawson, E. (2006). Modeling porosity reductions caused by fouling in continuous-wall permeable reactive barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 83, 89-121.
- Liu, S., Masliyah, & J.H. (1996). Single fluid flow in porous soil. In *Chemical Engineering Communications* (S. 653-732).
- Lund, J. W., Freeston, D. H., & Boyd, T. L. (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 159-180.
- Lund, J., Freeston, D., & Boyd, T. (2005). Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review. 692-727.
- Ma, G., & Chai, Q. H. (2004). Characteristics of an improved heat-pump cycle for cold regions. *Applied Energy*, S. 235-247.
- Michler, G. (1992). *Kunststoff-Mikromechanik: Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen*. München, Wien: Carl Hanser.
- Michler, G., & Baltá-Calleja, F. (2012). *Nano-and Micromechanics of Polymers*. München: Carl Hanser.
- Mielke, P. (2007). Hydraulische Eigenschaften von PE-HD Brunnenfiltern. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Moench, A. (1984). Double-Porosity Models for a Fissures Groundwater Reservoir with Fracture Skin. *Water Res. Research*, 20(7), 831-846.
- Morgan, B., & Lahav, O. (2007). The effect of pH on the kinetics of spontaneous Fe(II) oxidation by O₂ in aqueous solution - basic principles and a simple heuristic description. *Chemosphere*, 68, 2080-2084.
- Niehues, B. (1999). DVGW- Umfrage Brunnenregenerierung. *Friedrichshafener Brunnenbautage*, 2, 171-185.
- Nold. (1989). *Nold- Brunnenfilterbuch* (2. Ausg.). Stockstadt: J.F.Nold GmbH&Co.KG.
- Normausschuss. (1998). DIN 18130-1: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Teil 1: Laborversuche. Berlin: Beuth Verlag.
- Normausschuss. (2012). DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften-Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth Verlag.
- Normausschuss. (2014). DIN 4925-1: Filter- und Vollwandrohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) für Brunnen- Teil 1: DN 35 bis DN mit Rohrgewinde. Berlin: Beuth Verlag.
- Okumbo, T., & Matsumoto, J. (1982). Biological Clogging of Sand and Changes of Organic Constituents During Artificial Recharge. *Water Res.*, 17(7), 813-821.
- Omer, A. M. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, S. 344-371.
- Optics, P. E. (1996). *Environmental Scanning Electron Microscopy*. Eindhoven: Robert Johnson Associates.
- PlasticsEurope, M. R. (2015). *Plastics- The Facts 2014/2015-An analysis of European plastic production, demand and waste data*. Brüssel: PlasticsEurope.
- Rinck-Pfeiffer, S., Ragusa, S., Sztajn bok, P., Vandvelde, & T. (2000). Interrelationships between biological, chemical, and physical processes as an analog to clogging in aquifer storage and recovery (ASR) wells. *Wat. Res.*, 34(7), 2110-2118.
- Rinder, T., Dietzel, M., & Leis, A. (2013). Calcium carbonate scaling under alkaline conditions - Case studies and hydrochemical modelling. *Applied Geochemistry*, 35, 132-141.
- Rüther, J., & Sass, I. (2014). Hydraulische Charakterisierung verschiedener Kunststoffbrunnenfiltertypen für oberflächennahe Anwendungsgebiete im Feld und Labor. *FH-DGG*. Bayreuth.

- Rüther, J., Heidenreich, S., Walch, A., & Sass, I. (2013). Entwicklung und Untersuchung poröser, hochdichter Polyethylen-Filterelemente für geothermale Brunnenanlagen. *Geotherm.* Offenburg.
- Rüther, J., Heidenreich, S., Walch, A., & Sass, I. (2013). Research and Development of porous, high-density polyethylene screens for shallow geothermal well systems. *European Geothermal Congress.* Pisa.
- Rüther, J., Lederer, S., Peth, C., & Sass, I. (2015). Mechanical Evaluation of Loose Sintered Macroporous High Density Polyethylene Filter Elements for Shallow Geothermal Application. *Porous Media* (in prep.).
- Rybak, T. (2012). Hydraulische und hydrogeologische Untersuchungen zum Vergleich von Brunnenfiltern bei Aschaffenburg-Obernau. Darmstadt: TU Darmstadt.
- Salmang, H., & Scholze, H. (2007). *Keramik.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Sass, I. (1994). Brunnen und Filter für die Sanierung von Untergrundkontaminationen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Sass, I., & Arndt, D. (2008). *Characterization and Improvement of porous Polyethylene Well Screen Filters.* Crailsheim: Pall Filtersystems GmbH.
- Sass, I., Brehm, D., Coldewey, W., Dietrich, J., Klein, R. T., Lehr, C., . . . Wederwardt, M. (2015). *Empfehlung Oberflächennaher Geothermie- Planung, Bau und Überwachung- EA Geothermie.* Berlin: Ernst & Sohn.
- Sass, I., Homuth, S., Heidenreich, S., & Rüther, J. W. (2012). Entwicklung und Untersuchung poröser, hochdichter Polyethylen-Filterelemente für Brunnenanlagen. *FH-DGG Tagung.* Dresden.
- Self, S. J., Bale, R. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other. *Applied Energy, 101,* S. 341-348.
- Sing, S., & Shakya, S. (1989). A Nonlinear Equation for Groundwater Entry into Well Screens. *Journal of Hydrology, 109,* 95-114.
- Steinberg, S., & Hasson, D. (1979). Analysis of the effect of brine retention time on the scaling potential. *Desalination, 31,* 267.
- Sterrett, R. J. (2007). *Groundwater and Wells.* New Brighton: Sterrett, Robert J.
- Stober, I. & (2012). *Geothermie.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag.
- Sung, W., & Morgan, J. (1980). Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous systems. *Environ. Sci. Technol., 14,* 561-568.
- Taud, H., Martinez-Angeles, R., Parrot, J., & Hernandez-Escobedo, L. (2005). Porosity estimation method by X-ray computed tomography. *Journal of Petroleum Science & Engineering, 47,* 209-217.
- Tholen, M. (2012). *Arbeitshilfen für den Brunnenbauer.* Bonn: wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft.
- Tholen, M., Walker-Hertkorn, & S. (2007). *Arbeitshilfen Geothermie, Grundlagen für oberflächennahe Erdwärmesondenbohrungen.* Bonn: wvgw.
- Thullner, M., Schroth, M., Zeyer, J., & Kinzelbach, W. (2004). Modeling of a microbial growth with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field. *Journal of Contaminant Hydrology, 70(1-2),* 37-62.
- Tillmans, J., & Heblein. (1912). Über die kohlensauren Kalk angreifende Kohlensäure der natürlichen Wässer. *Gesundh. Ing., 35,* 669-677.
- Tuhela, L., Carlson, L., & Tuovinen, O. (1997). Biogeochemical transformations of Fe and Mn in oxic groundwater and well water environments. *J. Environ.Sci.Health, Part A Environ.Sci. Eng., 32,* 407-426.
- Turell, M. B., & Bellare, A. (2004). A study of the nanostructure and tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene. *Biomaterials, 25,* 3389-3398.

- Tyrrel, S., Bloomfield, C., Kelso, W., & G., P. (1997). Aspects of the occurrences of iron bacteria in boreholes and aquifers. *Quarter.J. Engin.Geol.*, 30, 161-169.
- Vendel, M., & Rasmuson, A. (2000). Initiation of incrustation by crystal collision. *Trans IChemE*, 78(A), 750-755.
- Verbraucherschutz, B. d. (2001). Verordnung über Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch.
- Webb, P. (2001). Volume and Density Determinations for Particle Technologists. Micromeritics Instrument Corp.
- Weibull, W. (1939). *A Statistical Theory of the Strength of Materials*. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag.
- Weidner, C., Henkel, S., Lorke, S. T., Schüttrumpf, H., & Klauder, W. (2011). Investigation of Clogging Processes on Vertical Filter Wells Using an Experimental Model. *IMWA*. Aachen.
- Weidner, C., Henkel, S., Lorke, S., Rude, T., & Schüttrumpf, H. K. (2012). Experimental Modelling of Chemical Clogging Processes in Dewatering Wells. *Mine Water Environ*, 31, 242-251.
- Wetzel, A. (1969). *Technische Hydrobiologie - Trink-, Brauch-, Abwasser*. Leipzig: Akadem. Verlagsges.
- Zhang, Q., Jia, M., & Xue, P. (2012). Study on Molding Process of UHMWPE Microporous Filter Materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 126, 1406-1415.
- Zhou, W., & Wang, Z. (2007). *Scanning Microscopy for Nanotechnology*. Springer.

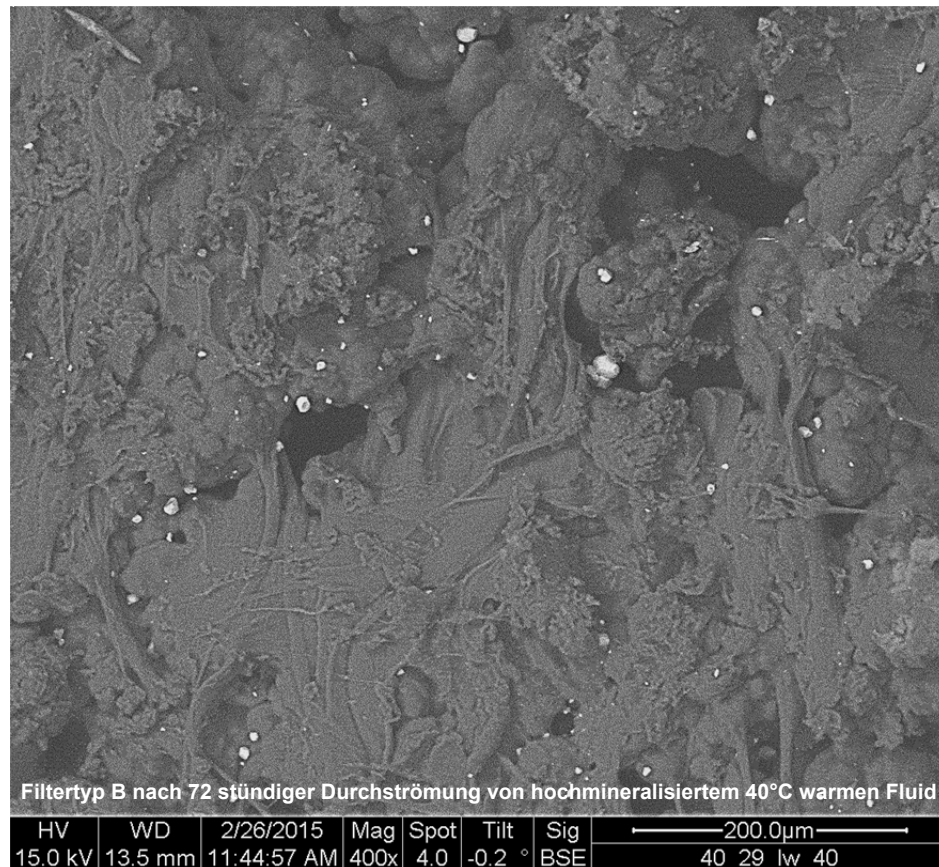
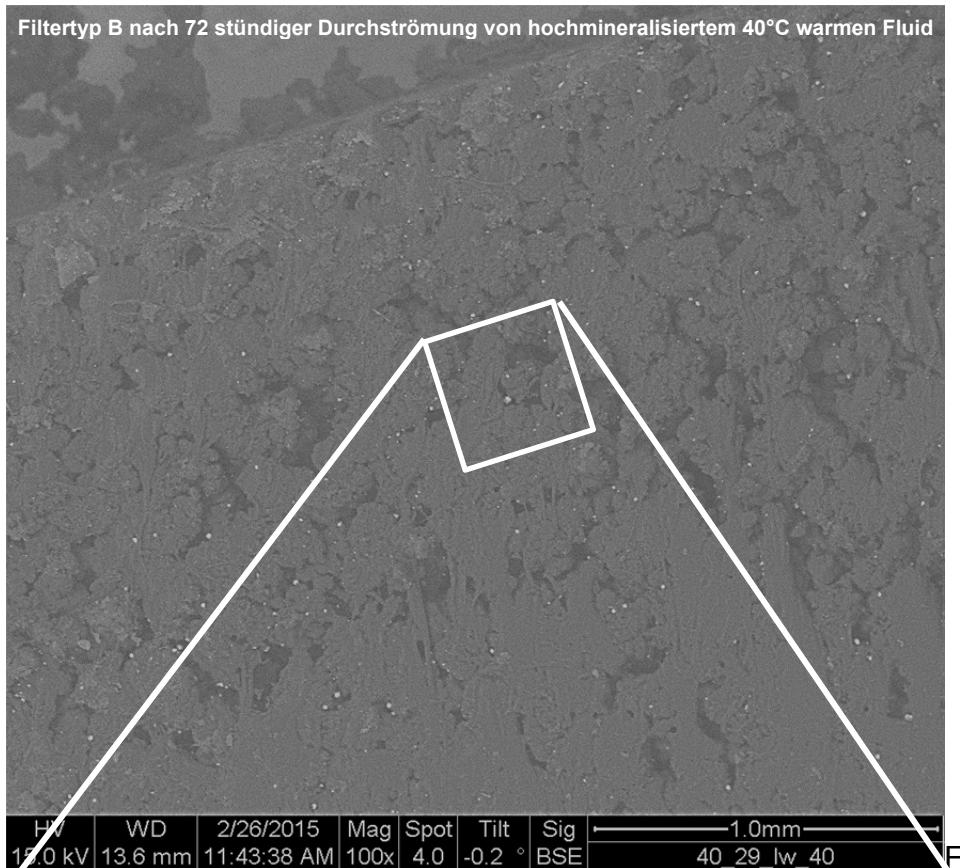
Anhänge

Anhang 1: Tabellarische Darstellung des Messprogramms zur Bestimmung der hydraulischen Kennwerte

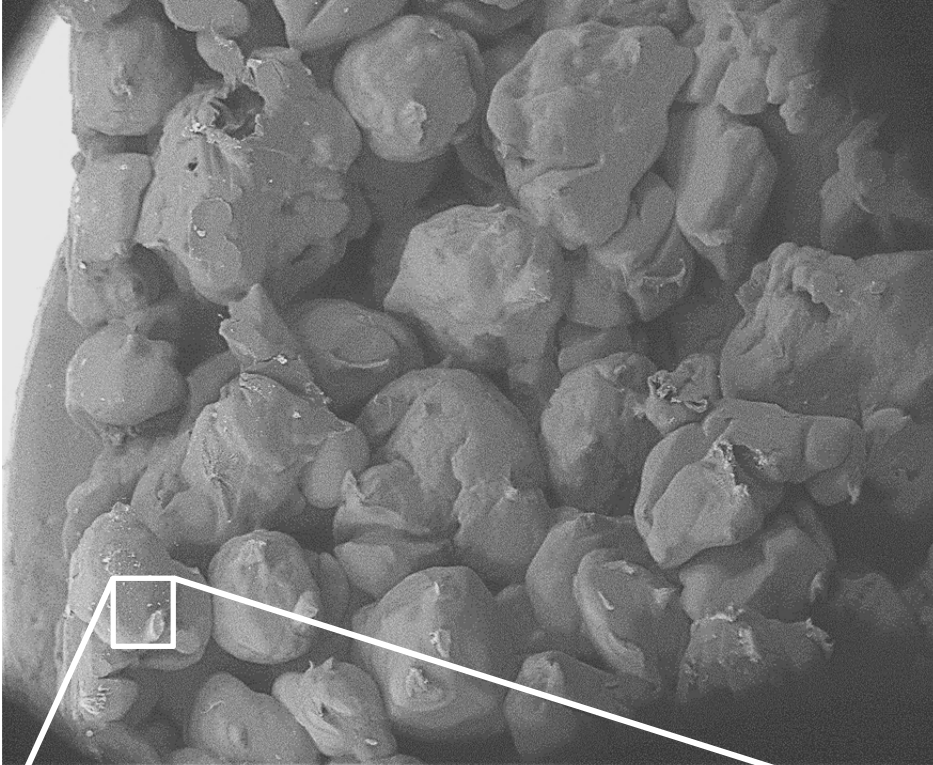
| Fluidtemperatur [°C] | Mineralisation des Fluids [-] | Filtertyp [-] | Poren- bzw. Schlitzweite [µm] | Anzahl der Messungen n [-] |
|-------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 10 | hoch | porös | 20 | 40 |
| 10 | hoch | porös | 40 | 27 |
| 10 | hoch | porös | 200 | 37 |
| 10 | hoch | porös | 500 | 18 |
| 15 | hoch | porös | 20 | 21 |
| 15 | hoch | porös | 40 | 30 |
| 15 | hoch | porös | 200 | 18 |
| 15 | hoch | porös | 500 | 18 |
| 20 | hoch | porös | 20 | 51 |
| 20 | hoch | porös | 40 | 48 |
| 20 | hoch | porös | 200 | 93 |
| 20 | hoch | porös | 500 | 57 |
| 25 | hoch | porös | 20 | 10 |
| 25 | hoch | porös | 40 | 9 |
| 25 | hoch | porös | 200 | 9 |
| 25 | hoch | porös | 500 | 9 |
| 35 | hoch | porös | 20 | 21 |
| 35 | hoch | porös | 40 | 30 |
| 35 | hoch | porös | 200 | 28 |
| 35 | hoch | porös | 500 | 24 |
| 40 | hoch | porös | 20 | 31 |
| 40 | hoch | porös | 40 | 19 |
| 40 | hoch | porös | 200 | 20 |
| 40 | hoch | porös | 500 | 18 |
| 15 | hoch | geschlitzt | 300 | 9 |
| 15 | hoch | geschlitzt | 500 | 9 |
| 15 | hoch | geschlitzt | 750 | 9 |
| 20 | hoch | geschlitzt | 300 | 15 |
| 20 | hoch | geschlitzt | 500 | 15 |
| 20 | hoch | geschlitzt | 750 | 15 |
| 25 | hoch | geschlitzt | 300 | 9 |
| 25 | hoch | geschlitzt | 500 | 9 |
| 25 | hoch | geschlitzt | 750 | 9 |
| 35 | hoch | geschlitzt | 300 | 9 |
| 35 | hoch | geschlitzt | 500 | 9 |
| 35 | hoch | geschlitzt | 750 | 9 |
| 40 | hoch | geschlitzt | 300 | 9 |
| 40 | hoch | geschlitzt | 500 | 9 |
| 40 | hoch | geschlitzt | 750 | 9 |
| Gesamt | | | | 839 |

| Fluid- temperatur [°C] | Mineralisation des Fluids [-] | Filtertyp [-] | Poren- bzw. Schlitzweite [µm] | Anzahl der Messungen n [-] |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 15 | gering | porös | 20 | 29 |
| 15 | gering | porös | 40 | 30 |
| 15 | gering | porös | 200 | 27 |
| 15 | gering | porös | 500 | 18 |
| 20 | gering | porös | 20 | 24 |
| 20 | gering | porös | 40 | 18 |
| 20 | gering | porös | 200 | 18 |
| 20 | gering | porös | 500 | 18 |
| 25 | gering | porös | 20 | 9 |
| 25 | gering | porös | 40 | 11 |
| 25 | gering | porös | 200 | 9 |
| 25 | gering | porös | 500 | 9 |
| 35 | gering | porös | 20 | 19 |
| 35 | gering | porös | 40 | 17 |
| 35 | gering | porös | 200 | 19 |
| 35 | gering | porös | 500 | 19 |
| 40 | gering | porös | 20 | 24 |
| 40 | gering | porös | 40 | 19 |
| 40 | gering | porös | 200 | 18 |
| 40 | gering | porös | 500 | 18 |
| 15 | gering | geschlitzt | 300 | 16 |
| 15 | gering | geschlitzt | 500 | 18 |
| 15 | gering | geschlitzt | 750 | 15 |
| 20 | gering | geschlitzt | 300 | 15 |
| 20 | gering | geschlitzt | 500 | 18 |
| 20 | gering | geschlitzt | 750 | 18 |
| 25 | gering | geschlitzt | 300 | 9 |
| 25 | gering | geschlitzt | 500 | 9 |
| 25 | gering | geschlitzt | 750 | 9 |
| 35 | gering | geschlitzt | 300 | 12 |
| 35 | gering | geschlitzt | 500 | 9 |
| 35 | gering | geschlitzt | 750 | 9 |
| 40 | gering | geschlitzt | 300 | 12 |
| 40 | gering | geschlitzt | 500 | 18 |
| 40 | gering | geschlitzt | 750 | 18 |
| Gesamt | | | | 578 |

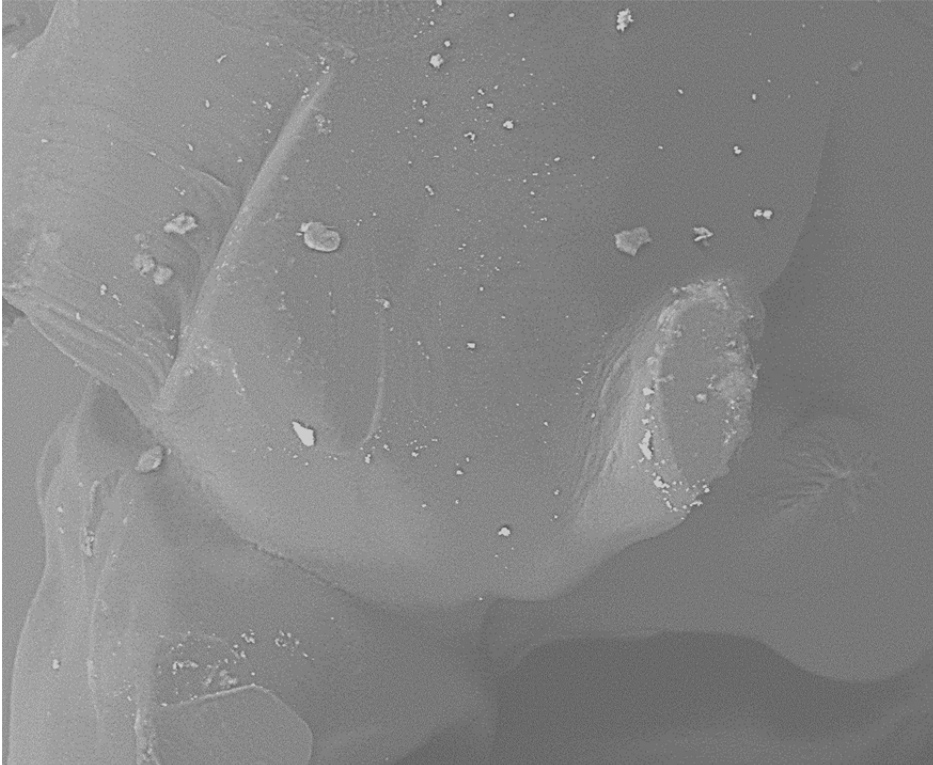
Anhang 2: Rasterelektronische Aufnahme der porösen Filterelemente nach Abschluss der Versinterungsversuche



Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 40°C warmen Fluid

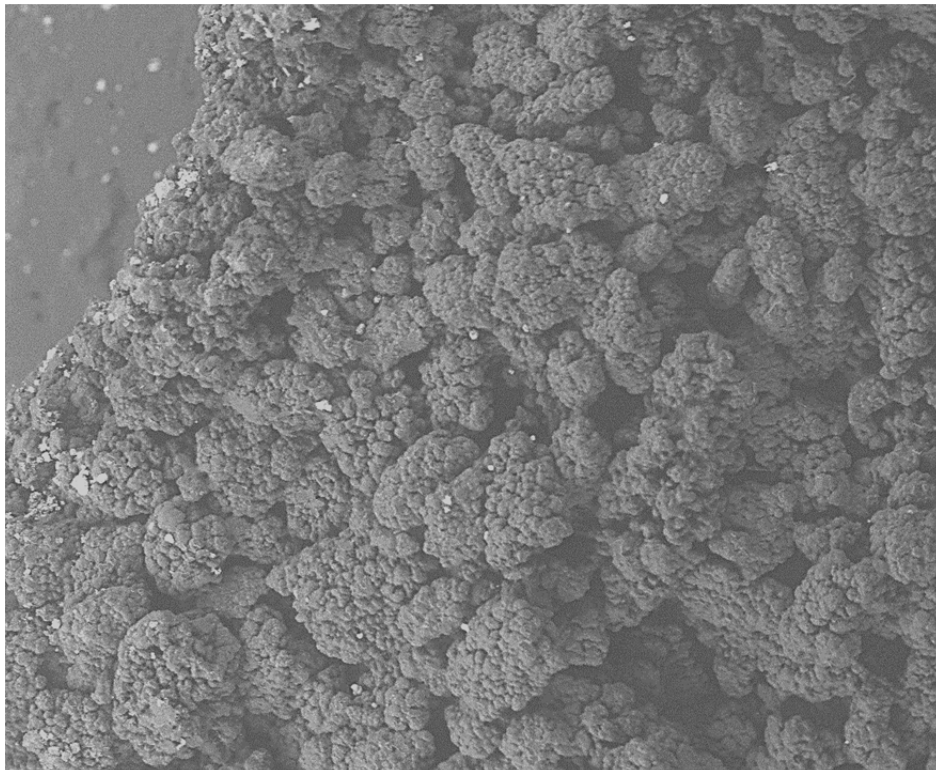


| | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|-----|------|-----|-------|-------------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm |
| 15.0 kV | 8.6 mm | 12:20:46 PM | 61x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200_12_LW40 |



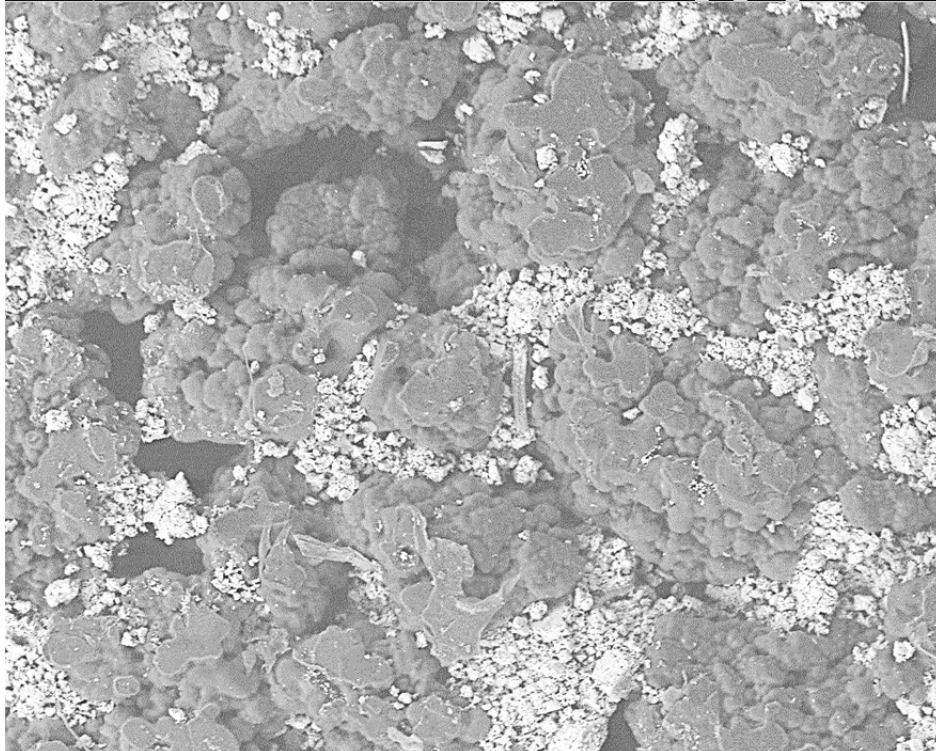
Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 40°C warmen Fluid

| | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|------|------|-----|-------|-------------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 200.0µm |
| 15.0 kV | 8.0 mm | 12:32:56 PM | 500x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 40_14_LW_25 |



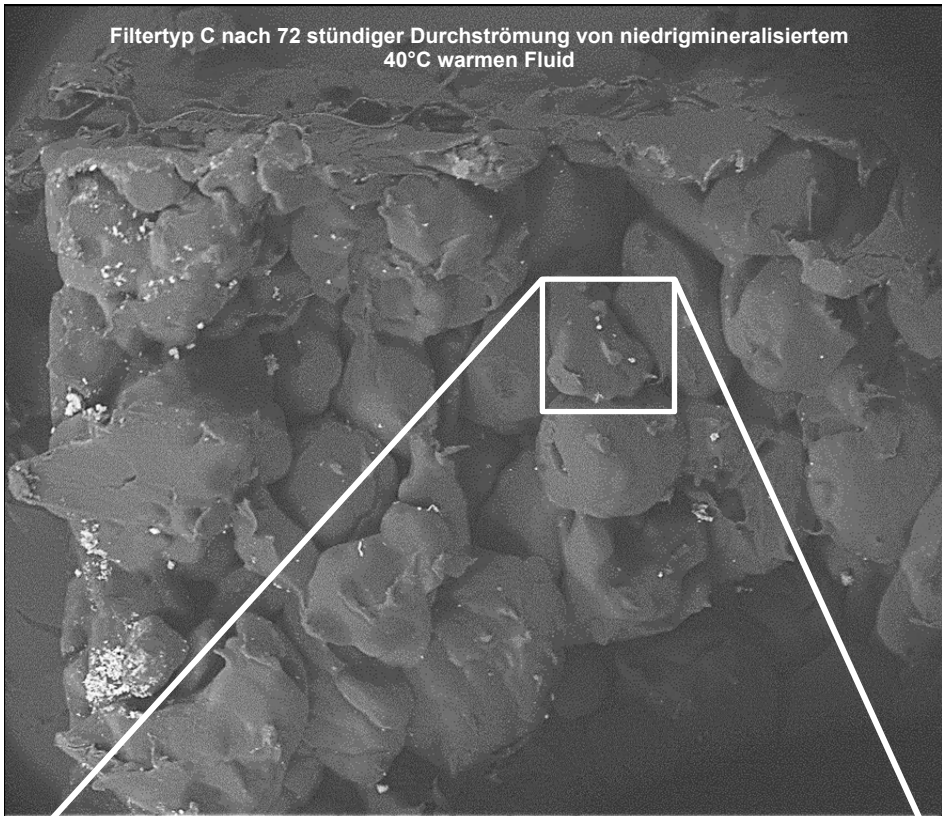
Filtermatrix des Typs B nach 72 stündiger Durchströmung von niedrigmineralisiertem 40°C warmen Fluid

| | | | | | | | | |
|---------|--------|------------|------|------|-----|-------|-------|----------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm | |
| 15.0 kV | 8.0 mm | 1:15:39 PM | 100x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 40 | 12 EW 40 |

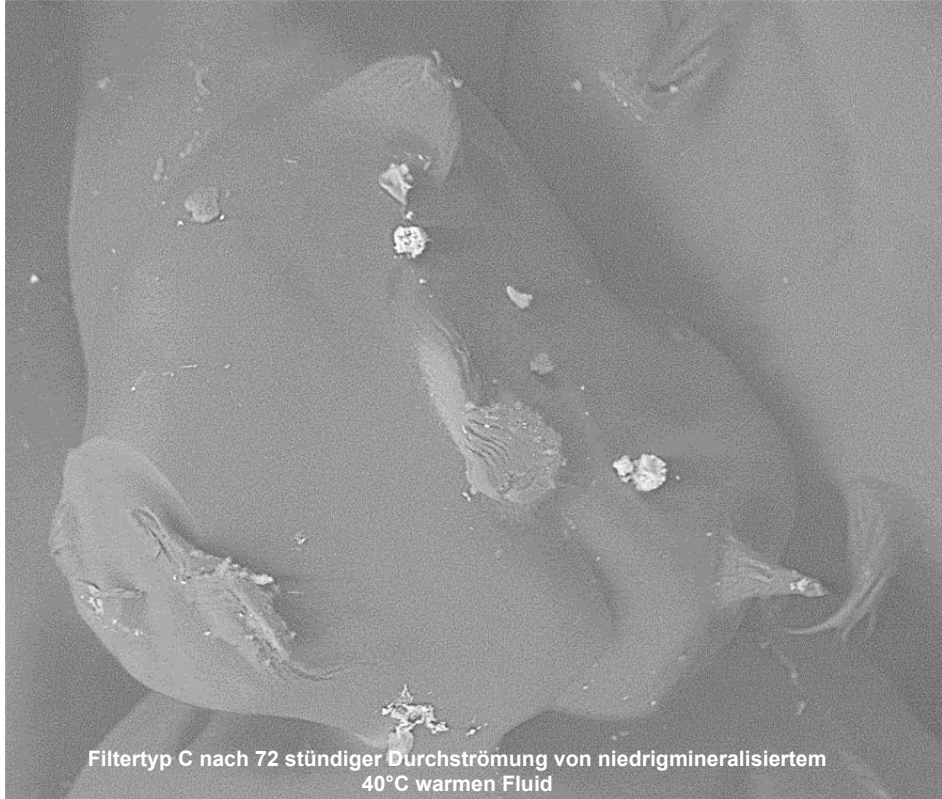


Filterinnenwand des Typs B nach 72 stündiger Durchströmung von niedrigmineralisiertem 25°C warmen Fluid

| | | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|------|------|-----|-------|---------|----------|
| HV | WD | 3/12/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 400.0µm | |
| 15.0 kV | 8.1 mm | 11:50:46 AM | 240x | 4.0 | BSE | 0.0 ° | 40 | 12 EW 40 |

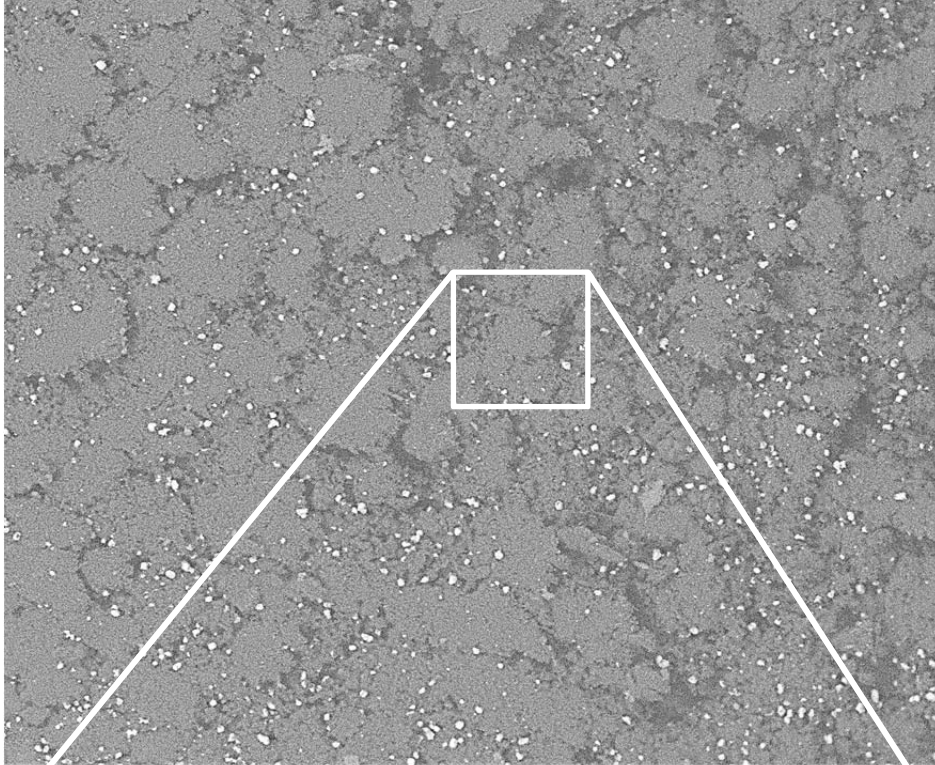


| | | | | | | | | |
|---------|---------|-------------|-----|------|-----|-------|-------|----------|
| HV | WD | 3/12/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm | |
| 15.0 kV | 10.6 mm | 10:19:25 AM | 55x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 10 EW 40 |

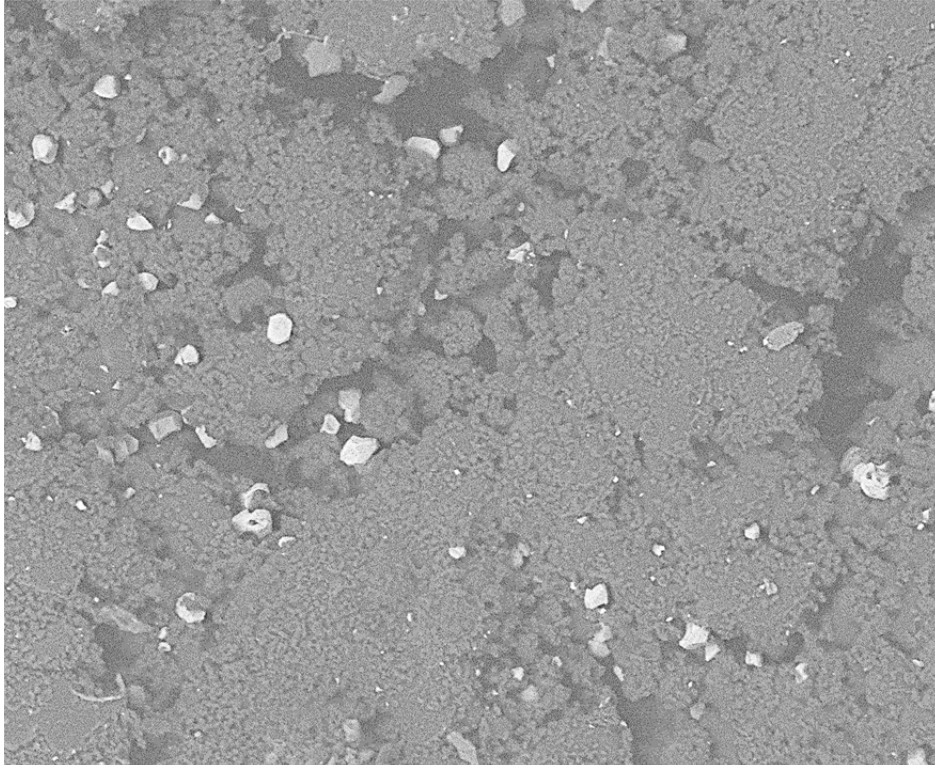


| | | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|------|------|-----|-------|---------|----------|
| HV | WD | 3/12/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 200.0µm | |
| 15.0 kV | 9.7 mm | 10:28:36 AM | 400x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 10 EW 40 |

Filtertyp B nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 25°C warmen Fluid



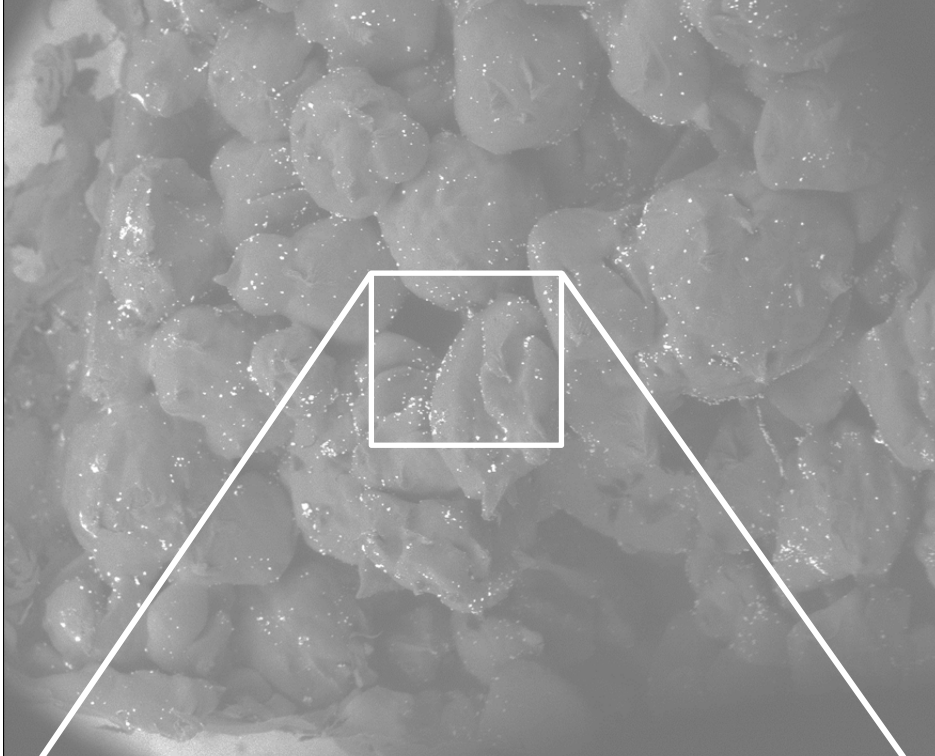
| | | | | | | | |
|---------|---------|------------|-----|------|--------|-----|-------------|
| HV | WD | 2/26/2015 | Mag | Spot | Tilt | Sig | 1.0mm |
| 15.0 kV | 14.6 mm | 2:19:18 PM | 90x | 4.0 | -0.2 ° | BSE | 40 14 LW 25 |



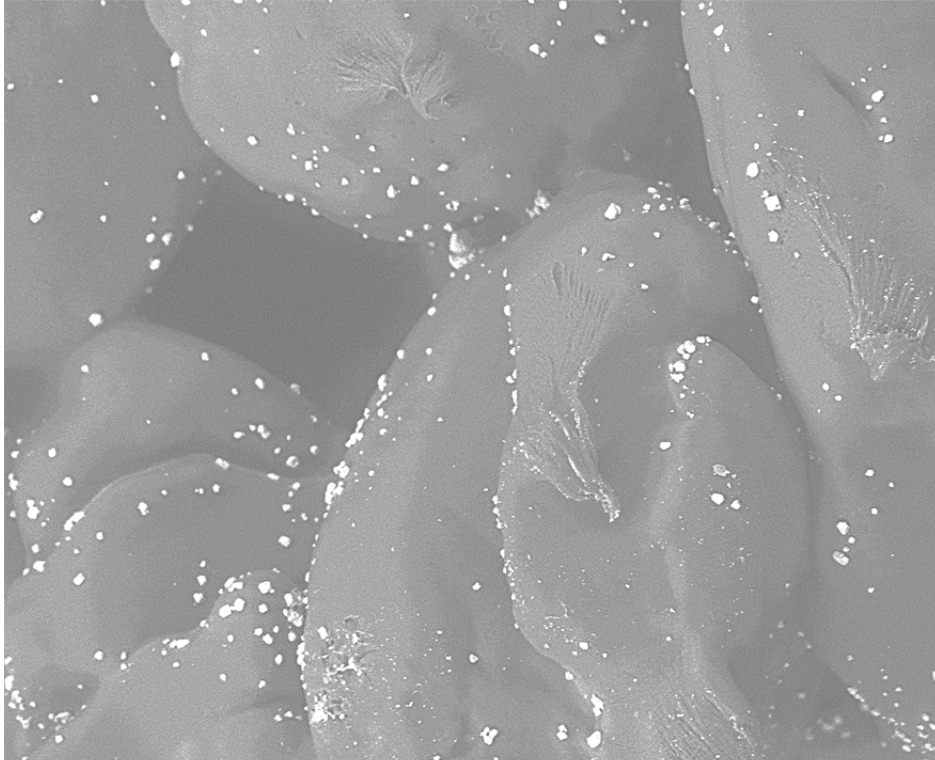
Filtertyp B nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 25°C warmen Fluid

| | | | | | | | |
|---------|---------|------------|------|------|--------|-----|-------------|
| HV | WD | 2/26/2015 | Mag | Spot | Tilt | Sig | 200.0µm |
| 15.0 kV | 14.6 mm | 2:21:20 PM | 400x | 4.0 | -0.2 ° | BSE | 40 14 LW 25 |

Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 25°C warmen Fluid

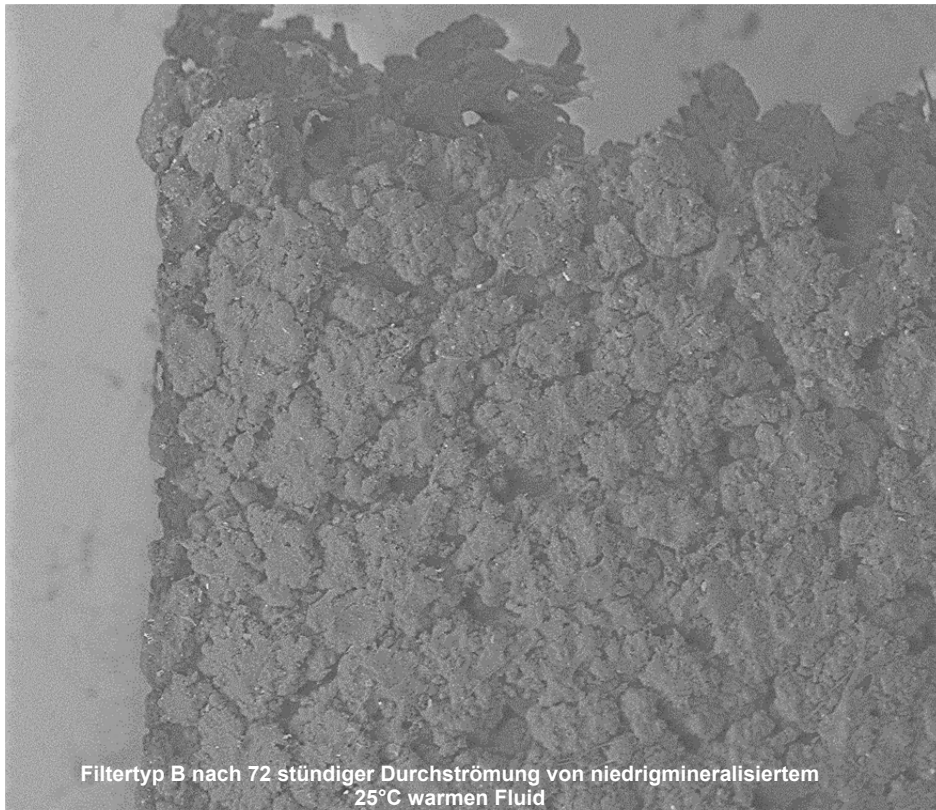


| | | | | | | | | |
|---------|--------|------------|-----|------|-----|-------|-------|----------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm | |
| 15.0 kV | 8.6 mm | 1:52:54 PM | 61x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 14 LW 25 |



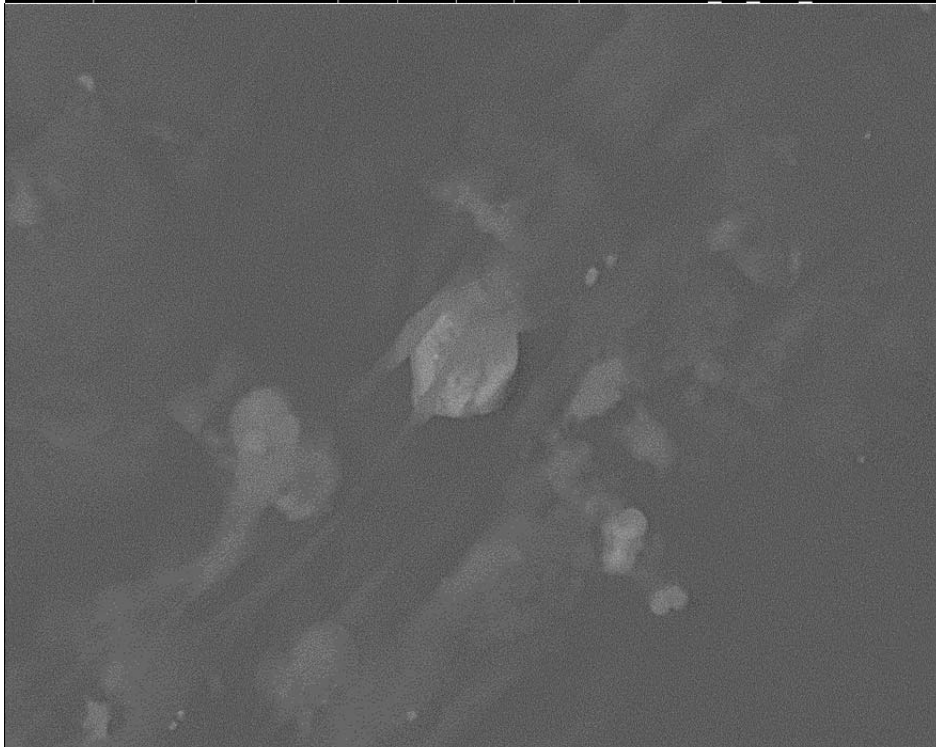
Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 25°C warmen Fluid

| | | | | | | | | |
|---------|--------|------------|------|------|-----|-------|---------|----------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 400.0µm | |
| 15.0 kV | 8.4 mm | 1:54:01 PM | 240x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 14 LW 25 |



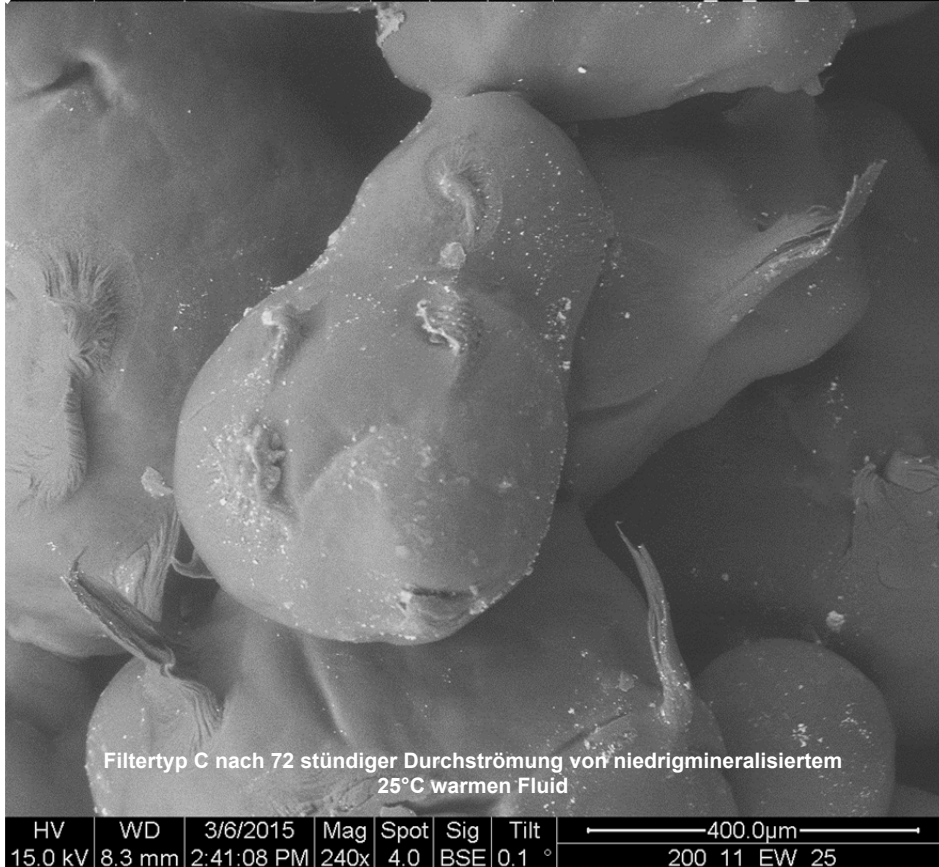
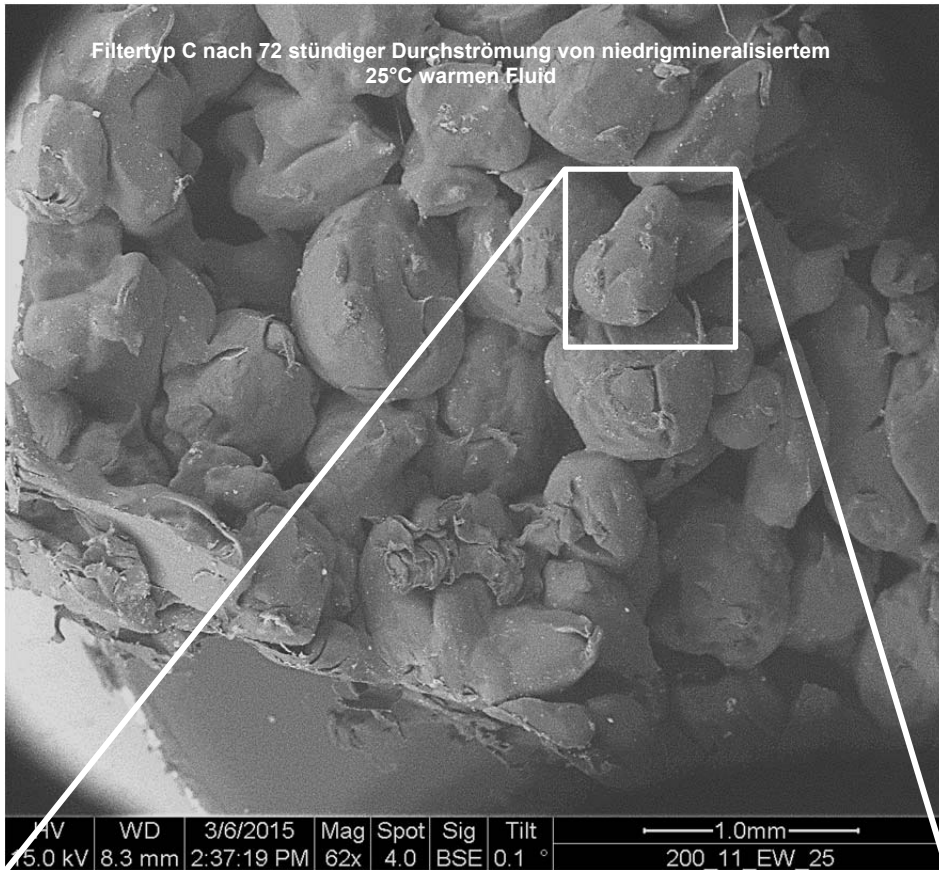
Filtertyp B nach 72 stündiger Durchströmung von niedrigmineralisiertem
25°C warmen Fluid

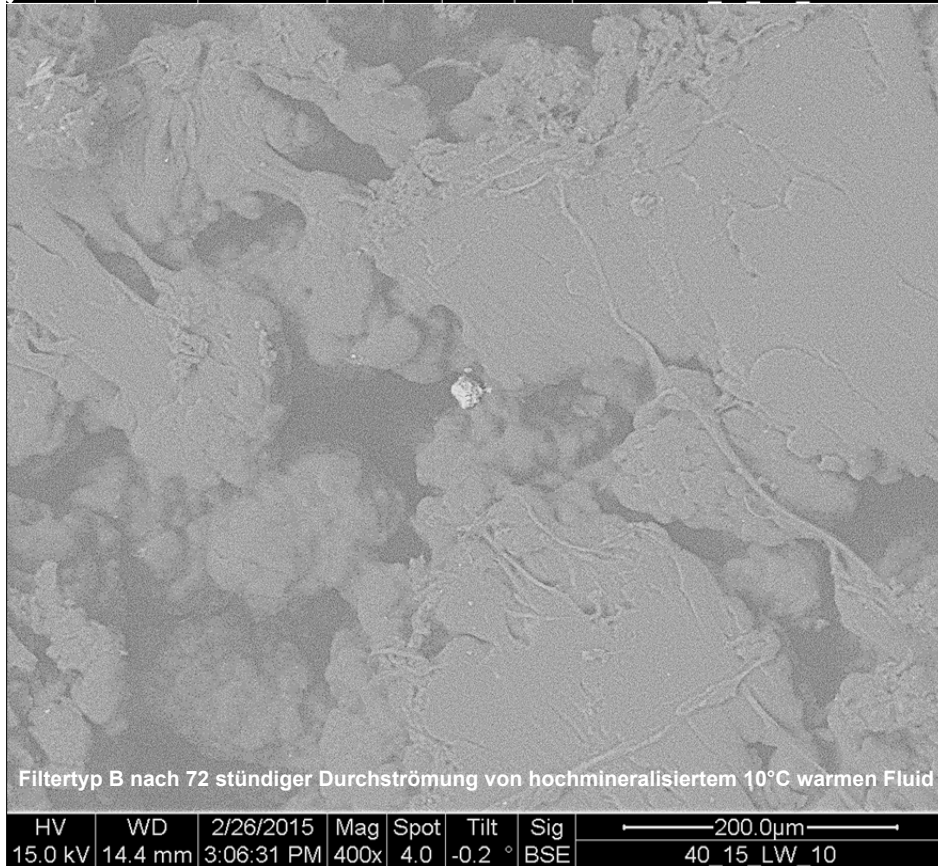
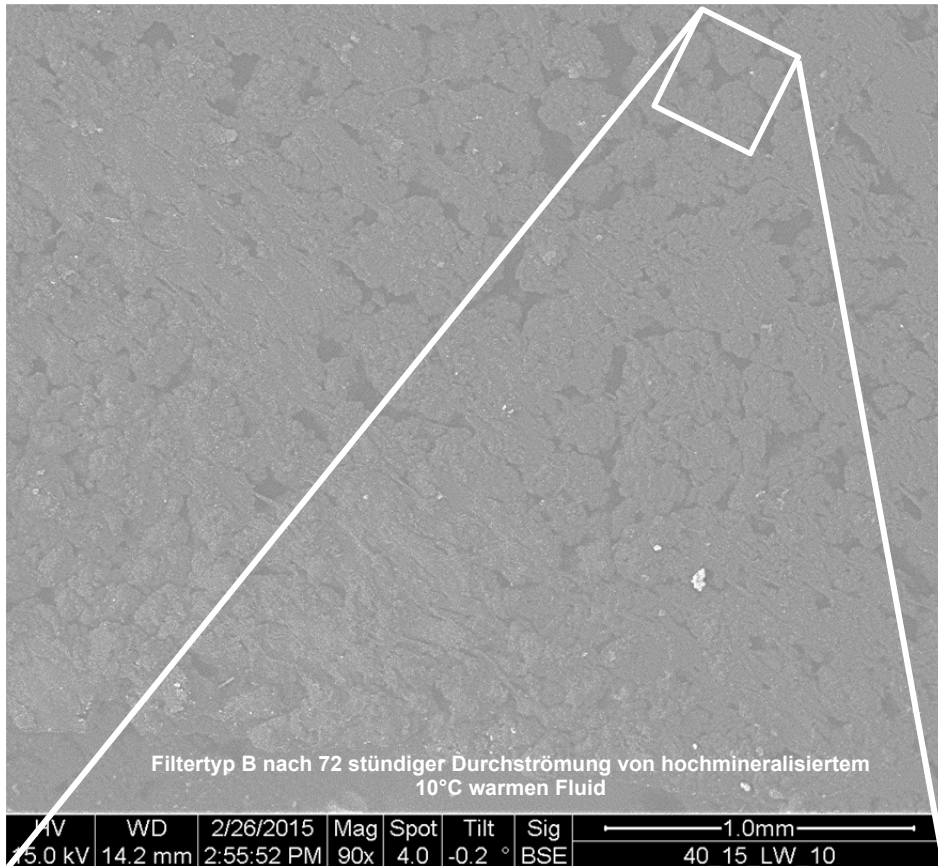
| | | | | | | | |
|---------|---------|-------------|------|------|-----|-------|-------------|
| HV | WD | 3/12/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm |
| 15.0 kV | 10.7 mm | 10:13:33 AM | 100x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 40 28 EW 25 |



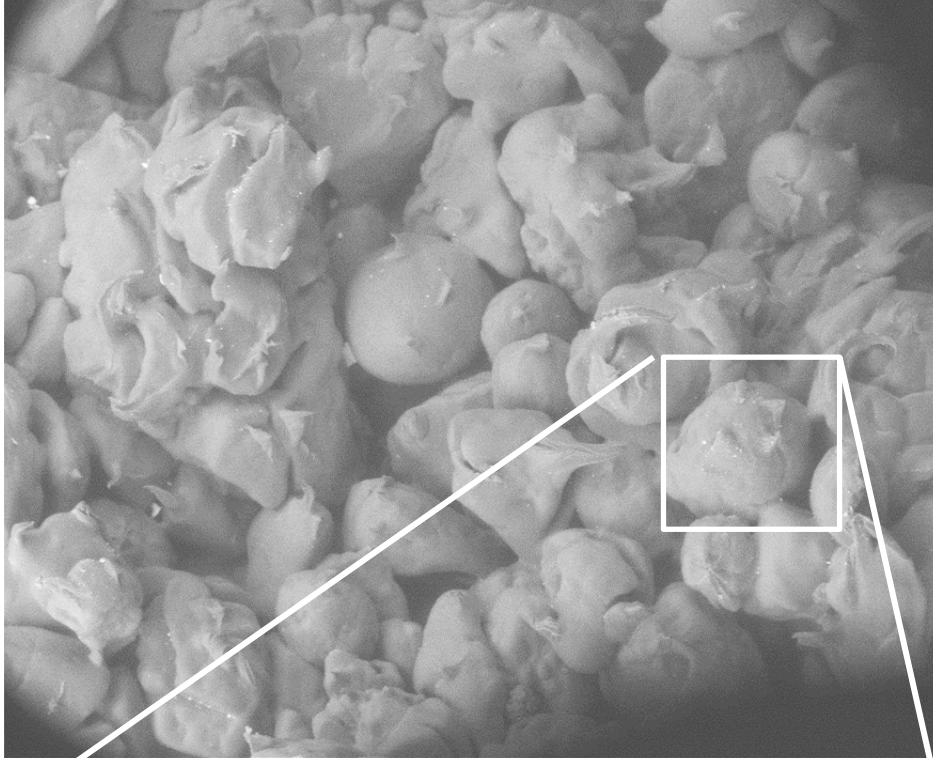
CaCO₃ -Partikel in Filtertyp B nach 72 stündiger Durchströmung von
niedrigmineralisiertem 25°C warmen Fluid

| | | | | | | | |
|---------|---------|------------|-------|------|-----|-------|-------------|
| HV | WD | 3/12/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 10.0µm |
| 15.0 kV | 11.1 mm | 9:55:55 AM | 6000x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 40 28 EW 25 |





Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 10°C warmen Fluid



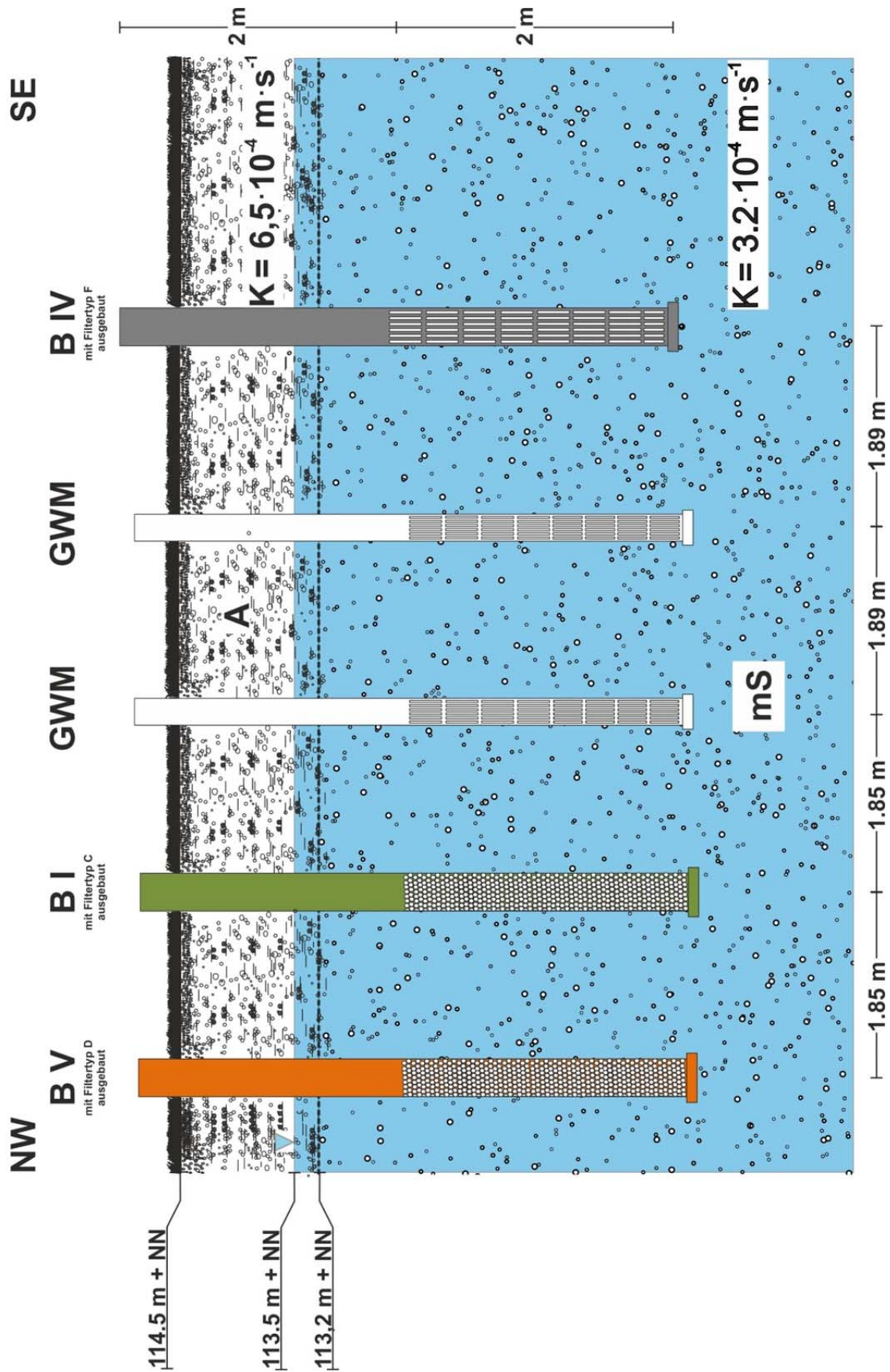
| | | | | | | | | |
|---------|--------|------------|-----|------|-----|-------|-------|----------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 1.0mm | |
| 15.0 kV | 8.9 mm | 2:22:39 PM | 60x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 15 LW 10 |



Filtertyp C nach 72 stündiger Durchströmung von hochmineralisiertem 10°C warmen Fluid

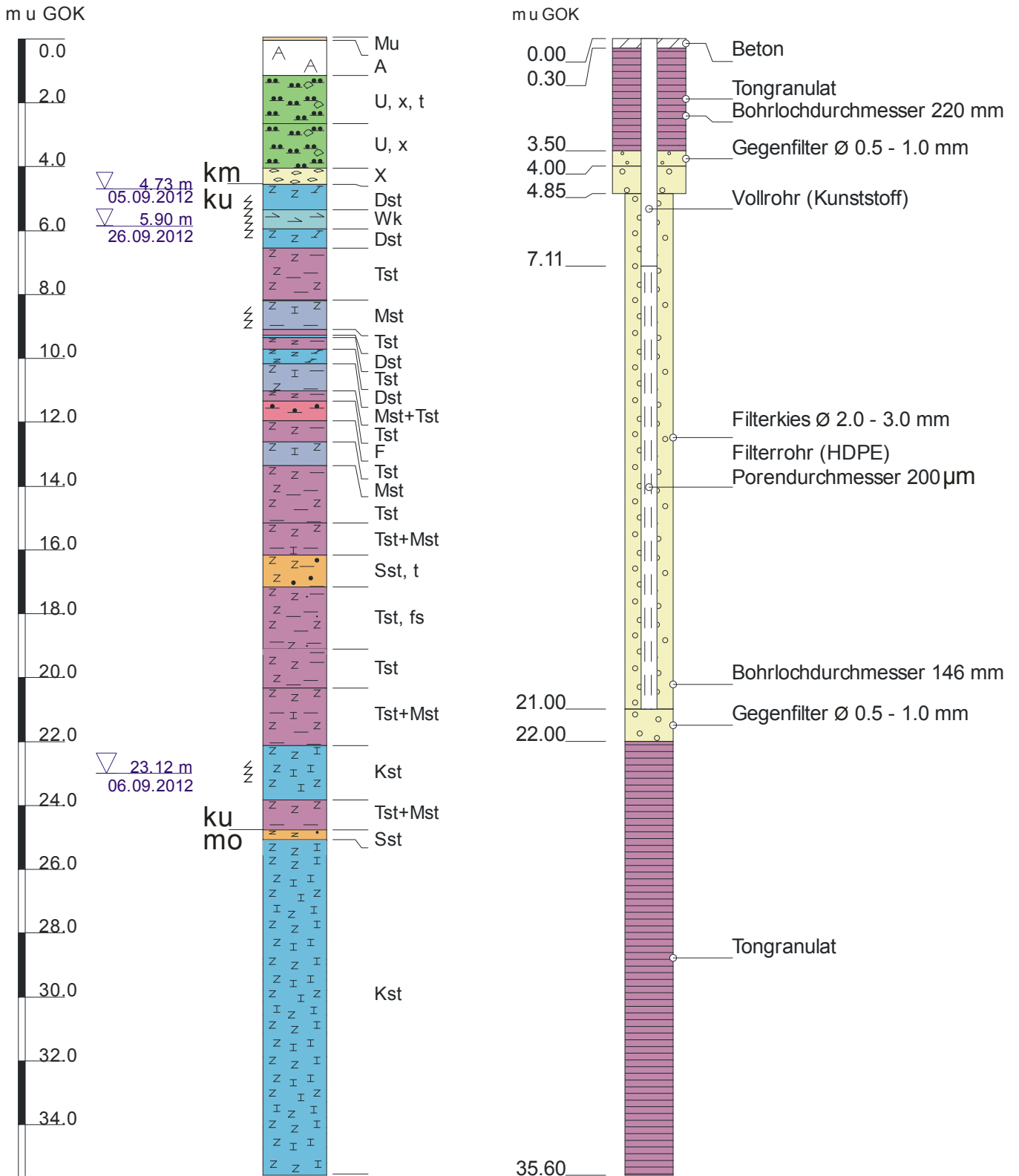
| | | | | | | | | |
|---------|---------|------------|------|------|-----|-------|---------|----------|
| HV | WD | 3/6/2015 | Mag | Spot | Sig | Tilt | 400.0μm | |
| 15.0 kV | 10.6 mm | 2:13:34 PM | 240x | 4.0 | BSE | 0.1 ° | 200 | 15 LW 10 |

Anhang 3: Schematische Darstellung des Testfeldes bei Aschaffenburg mit hydrogeologischen Bedingungen



Anhang 4: Geologisches Bohrprofil mit Ausbauprofil der Grundwassermessstelle im Testfeld Crailsheim

GWM Pall
423,55 m ü NN



Die GWM Pall in Crailsheim setzt im Gipskeuper an. Nach humosem Oberboden und Auffüllung liegt eine ca. 2 m mächtige Lockergesteinsschicht aus Kalksteinen vor. Es folgt ein Schluff, der häufig Kalkknollen enthält. Zwischen 4,60 m u. GOK und 5,40 m u. GOK liegt als gelb-beiger Dolomitstein der Grenzdolomit vor, der das Hangende des Lettenkeupers darstellt. Dieser besteht vorwiegend aus dunkelgrauen Ton- und Mergelsteinen, unterbrochen von Dolomit- und Kalkstein-bänken. Die Kalksteinbänke zeigen Verkarstungserscheinungen, so z.B. eine grau-weiße Kalksteinbank in 6,00 m u. GOK. Zwischen 6,00 m und 6,60 m führt eine Dolomitsteinbank bis zu 5 cm große Gipsknollen. In einer Tiefe von 8,24 m u. GOK bis 9,13 m u. GOK treten auch im Mergelstein solche Gipsknollen auf. Bis 11,06 m u. GOK wechseln sich Tonsteine mit grauen Dolomit- und Mergelsteinbänken ab. Im Liegenden bis 16,19 m u. GOK befindet sich eine Mergelstein–Tonstein–Kalkstein-Wechselfolge. Es folgt der 1 m mächtige Hauptsandstein als kalkig gebundene Sandsteinbank. Bis 19,50 m u. GOK nimmt der Feinsandgehalt ab, bis ein Tonstein vorliegt. In 22,15 m Teufe endet eine schwarz-graue Tonstein-Mergelstein-Wechselfolge, in deren Liegendem eine 1,70 m stark verwitterte Kalksteinbank folgt. Bei den bis zu 4 cm großen Hohlräumen handelt es sich um Verkarstungs-erscheinungen. Bis 24,80 m u. GOK geht der Tonstein in Mergelstein über. Es folgt das 30 cm mächtige Grenzbonebed in Form von Feinsandstein, das die Grenze zum Oberen Muschelkalk markiert. Der Kalkstein des Oberen Muschelkalks steht ab 25,40 m u. GOK bis zur Endtiefe von 25,30 m u. GOK an. Bis 29,25 m u. GOK wechseln sich Mudstone- und Packstone-Bereiche ab. Auch Wackestone-Kalksteinlagen sind bis 30,61 m u. GOK mehrfach vertreten. Es folgt ein ca. 50 cm mächtiger Grainstone-Kalkstein, der, bevor er wieder auftritt, von Mud- und Packstonebereichen unterbrochen wird. Bis 34,73 m u. GOK nimmt der Fossilgehalt zu, so dass vorwiegend Pack- und Grainstone-Kalksteine vorliegen. Im Liegenden folgt eine ca. 50 cm mächtige Mudstone-Schicht mit Tonlagen bis 4 mm. Der Bohrkern wird bei 35,30 m von einem Wackestone-Kalkstein abgeschlossen.