

**FZR-456**

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
FZR-456 August 2006 ISSN 1437-322X

U. Hampel; A. Bieberle; G. Hessel;  
F. Zimmermann; C. Zippe

**Untersuchungen zum Flüssigkeits-Holdup  
und zur Flüssigkeitsverweilzeit in Schüttungen  
mittels Röntgenradiographie und Gamma-  
tomographie**

Abschlussbericht



**Forschungszentrum  
Rossendorf**

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
**FZR-456**  
August 2006

U. Hampel; A. Bieberle; G. Hessel;  
F. Zimmermann; C. Zippe

**Untersuchungen zum Flüssigkeits-Holdup  
und zur Flüssigkeitsverweilzeit in Schüttungen  
mittels Röntgenradiographie und Gamma-  
tomographie**

Abschlussbericht



Forschungszentrum  
Rossendorf



**Forschungszentrum  
Rossendorf**

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

**Untersuchungen zum Flüssigkeits-Holdup und  
zur Flüssigkeitsverweilzeit in Schüttungen mit-  
tels Röntgenradiographie und Gammatomomo-  
graphie**

Abschlussbericht

August 2006

Bearbeiter: U. Hampel, A. Bieberle, G. Hessel, F. Zimmermann, C. Zippe

# Inhalt

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>PRÄZISIERTE AUFGABENSTELLUNG .....</b>                    | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>METHODE UND EXPERIMENTAUFBAU .....</b>                    | <b>3</b>  |
| 2.1      | Experimentaufbau.....                                        | 4         |
| 2.2      | Leitfähigkeitsnadelsonde .....                               | 4         |
| 2.3      | Gammadurchstrahlung .....                                    | 4         |
| 2.4      | Gamma-Radiographie .....                                     | 4         |
| 2.5      | Gamma-Tomographie.....                                       | 5         |
| <b>3</b> | <b>EXPERIMENT 1 – VERWEILZEITMESSUNG .....</b>               | <b>6</b>  |
| 3.1      | Ablauf des Experiments.....                                  | 6         |
| 3.2      | Datenauswertung.....                                         | 7         |
| 3.3      | Ergebnisse .....                                             | 9         |
| 3.4      | Diskussion .....                                             | 11        |
| <b>4</b> | <b>EXPERIMENT 2 – VERTEILUNGSMESSUNG.....</b>                | <b>12</b> |
| 4.1      | Ablauf des Experiments.....                                  | 12        |
| 4.2      | Ergebnisse .....                                             | 13        |
| 4.3      | Diskussion .....                                             | 15        |
|          | <b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>                                 | <b>18</b> |
|          | <b>ANHANG 1 - DIAGRAMME ZU DEN VERWEILZEITMESSUNGEN.....</b> | <b>19</b> |

## **1 Präzisierte Aufgabenstellung**

Laut Angebot sollten Flüssigkeitsrückhalt, Verweilzeit und Flüssigkeitsverteilung in einer vom Auftraggeber bereitgestellten und mit Granulat befüllten Säule mittels Röntgenradiographie bzw. Gammatomographie untersucht werden.

In mündlicher Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden die Untersuchungen auf die Verfahren der Gammadiographie und Gammatomographie beschränkt, da die zur Untersuchung bereitgestellte Säule aufgrund ihres großen Durchmessers und Inhaltes mit Röntgenstrahlung nicht durchstrahlt werden konnte.

Nach ersten Voruntersuchungen wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber die Durchführung einer Verweilzeitmessung mittels  $\text{BaCl}_2$ -Tracer festgelegt. Weiterhin sollte die Gammatomographie zur Bestimmung hydraulischer Toträume der Flüssigphase eingesetzt werden.

## 2 Methode und Experimentaufbau

Die Untersuchungen wurden auf einem gammatomographischen Messplatz des FZR durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 skizziert.

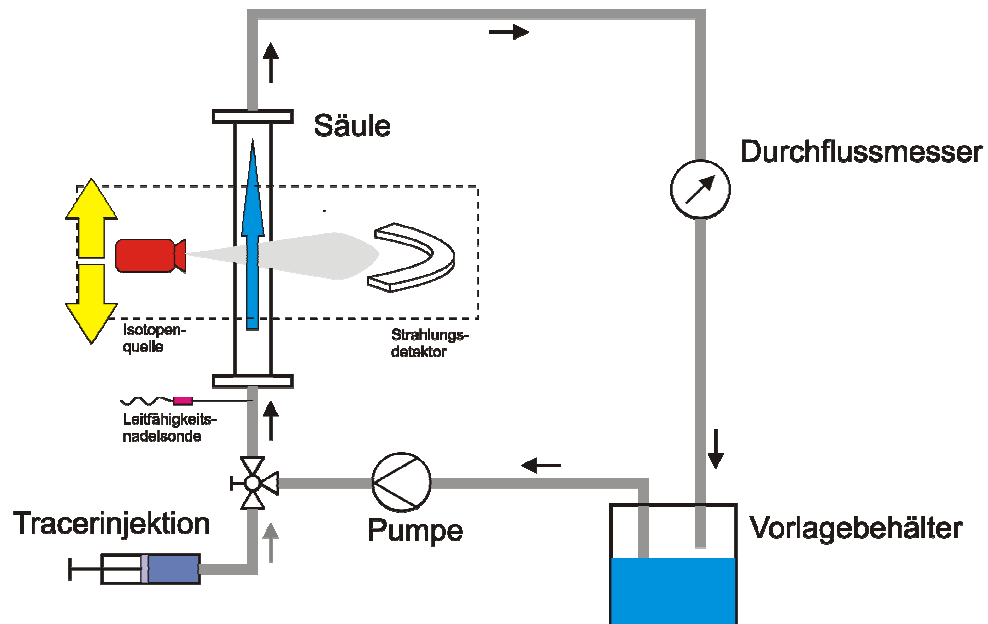


Abbildung 1: Skizze des Versuchsaufbaus.

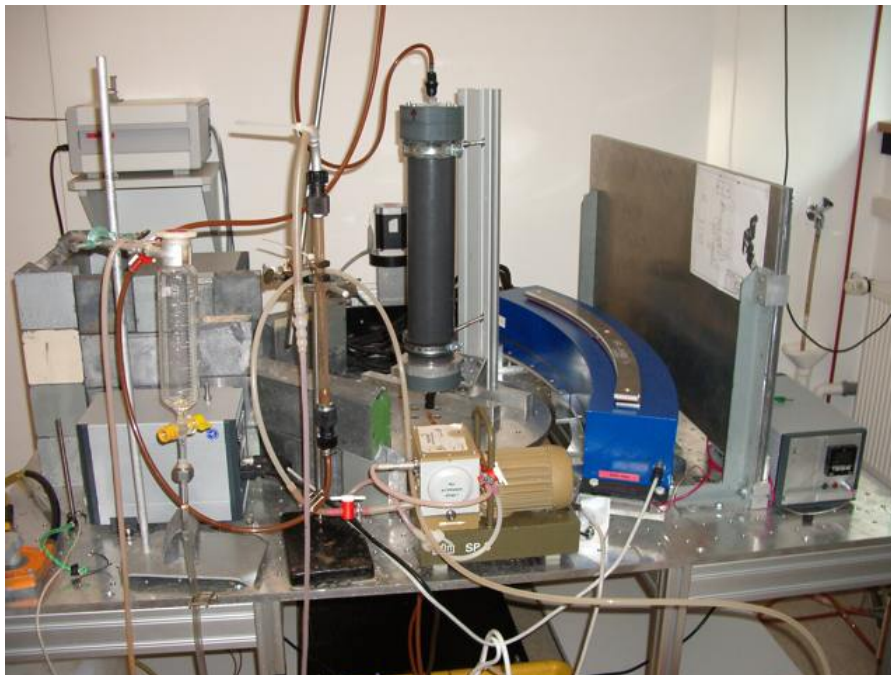


Abbildung 2: Photographie des Versuchsaufbaus.

## *2.1 Experimentaufbau*

Mittels der Pumpe wird die Flüssigkeit (Wasser) aus dem Vorratsbehälter durch die Säule gefördert. Der Durchfluss wurde in allen Experimenten mit Hilfe eines Bypasses und einer Drossel eingestellt. Die Säule wurde auf einer Dreh-Hub-Einheit des Gammatomographie-Messplatzes montiert und konnte so senkrecht verfahren und horizontal rotiert werden. Mittels des Gammadurchstrahlungssystems wurde die Säule in der jeweils ausgewählten Ebene durchstrahlt. Am Einlass der Säule wurde eine Leitfähigkeitsnadelsonde angebracht.

## *2.2 Leitfähigkeitsnadelsonde*

An der Spitze dieser Sonde wird mittels einer Punktelektrode der Stromfluss zur Masselektrode (Sondenrohr) und damit die elektrische Leitfähigkeit des Fluides gemessen. Die Sonde wurde ca. 4 cm vor dem Einlassstutzen am Boden der Säule in die Schlauchzuleitung eingebracht. Die Abtastrate des Leitfähigkeitssignals liegt bei 10 kHz. Die Sonde wurde für die Verweilzeituntersuchungen genutzt, um das Ankunftszeitpunkt des  $\text{BaCl}_2$ -Tracerbolus am Säuleneinlass zu erfassen.

## *2.3 Gammadurchstrahlung*

Die Gammadurchstrahlung wurde mit einer Isotopenstrahlungsquelle ( $\text{Cs-137}$ , 165 Bq,  $E_\gamma = 662 \text{ keV}$ ) und einem ortsauflösenden Bogendetektor (320 Elemente, Elementgröße 2 mm x 8 mm) realisiert. Das Strahlungsbündel der Quelle ist mittels Wolframkollimator auf den Detektor ausgerichtet. Quelle und Detektor befinden sich in einer Ebene. Damit kann bei geeigneter Kalibrierung die Strahlungsschwächung entlang der durch die Säule verlaufenden Strahlen mit 2 mm lateraler Auflösung gemessen werden. Der Querschnitt eines Messstrahls beträgt im Inneren der Säule ca. 3 mm (Breite) x 4 mm (Höhe).

## *2.4 Gamma-Radiographie*

Durch vertikales Verfahren der Säule kann die Strahlschwächung bildhaft erfasst werden. Das Radiogramm stellt, wie ein Röntgenbild, ein Überlagerungsbild der Strahlschwächungsanteile des Untersuchungsobjektes dar.

## *2.5 Gamma-Tomographie*

Durch Rotation der Säule bei feststehender vertikaler Position kann ein tomographischer Datensatz aufgenommen werden. Dazu wurde die Strahlschwächung an allen Detektorelementen für jeweils 500 gleich verteilte Winkelschritte des Vollkreises aufgezeichnet. Aus einem solchen Datensatz können dann mittels computertomographischer Bildrekonstruktionsverfahren Schnittbilder des linearen Strahlschwächungskoeffizientens des Objektes berechnet werden.



### 3 Experiment 1 – Verweilzeitmessung

#### 3.1 Ablauf des Experiments

Die Messungen erfolgten in zwei Messkampagnen. In der ersten Messkampagne wurden Verweilzeitmessungen für 25 l/h Förderrate durchgeführt. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde zusätzlich eine zweite Messkampagne mit dem Ziel der Verweilzeitmessung bei einer niedrigeren Förderrate durchgeführt. Bei dieser Messkampagne wurden die Förderraten 10 l/h und 20 l/h untersucht. Zwischen den beiden Messkampagnen wurde die Säule neu befüllt.

Vor Beginn der Messungen wurde zunächst der Strömungskreislauf für jeweils mindestens 6 Stunden betrieben, um einen stationären Strömungsbetrieb zu gewährleisten. Anschließend wurden gammadradiographische Übersichtsaufnahmen durchgeführt (Abbildung 3). Anhand dieser Aufnahmen wurden Messebenen ausgewählt. Diese befinden sich einmal jeweils direkt unter und über den Eisengranulatschichten sowie in der Mitte zwischen jeweils zwei Schichten. Die Anzahl der Ebenen beträgt jeweils 12. Die zur Bezeichnung der Messebenen eingeführten Maße sind durch die Höhe des Hubtisches über seinem vertikalen Referenzpunkt gegeben.

Bei den Untersuchungen wurde jeweils ein Tracerbolus von ca. 60 ml  $\text{BaCl}_2$ -Lösung ( $342 \text{ g/l} = 1,4 \text{ mol/l}$ ) in die Zuleitung zur Säule injiziert. Der Bolus wurde mittels der Leitfähigkeitsmessung am Einlass der Säule nachgewiesen. In zeitlicher Synchronisation erfolgte die Gammadurchstrahlung. Diese Experimente wurden für die jeweiligen Durchstrahlungsebenen nacheinander durchgeführt.

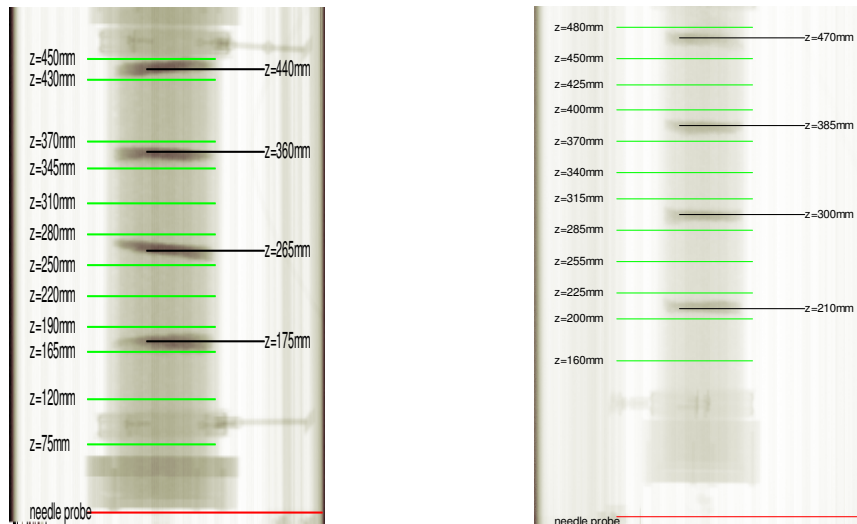


Abbildung 3: Radiographie der zwei Säulen mit Messebenen des Verweilzeitexperiments (grün). Links: Säule der ersten Messkampagne (25 l/h Förderrate), rechts: Säule der zweiten Messkampagne (10 l/h und 20 l/h Förderrate).

### 3.2 Datenauswertung

Der  $\text{BaCl}_2$ -Tracerbolus liefert ein densitometrisches Signal von  $<3\%$  Zählratenänderung (siehe Anhang 1). Zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wurden die Zählraten über jeweils 1 s sowie einen räumlichen Bereich von 50 Detektoren (entspricht einem Gebiet von ca. 50 mm Durchmesser im Zentrum der Säule) summiert. Die Signale der Nadelsonde besitzen ein sehr gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, allerdings zeigt sich in diesen Daten bereits auch deutlich, dass der injizierte Bolus bereits in der ca. 50 cm langen Zuleitung stark verbreitert wird. Allerdings ist die Anstiegsflanke immer noch recht steil.

Zur Bestimmung der Ankunftszeit des Bolus aus dem Nadelsondensignal wird ein Schwellwert verwendet. Wird dieser in der Anstiegsflanke überschritten, wird der entsprechende Zeitpunkt gespeichert. Aus den Gammadurchstrahlungsdaten werden zwei Zeitpunkte ermittelt. Einmal der Startzeitpunkt der sichtbaren Intensitätsabnahme, der ein erstmaliges Ansteigen der Tracerkonzentration in der Messebene anzeigt (Bezeichnung: *Frontzeitpunkt*, *Frontgeschwindigkeit*) sowie der Zeitpunkt der maximalen Tracerkonzentration in der Messebene (Bezeichnung: *Boluszeitpunkt*, *Bolusgeschwindigkeit*). Während der Frontzeitpunkt manuell bestimmt wird, wird der Boluszeitpunkt wie folgt automatisch berechnet. Aus den Messdaten wird das Strahlungsintensitätsminimum im Bereich des Bolusdurchtritts durch die Messebene be-

rechnet. Dazu wird im Gebiet um das Minimum der Zählratenverteilung ein Polynom 7ter Ordnung angefitet und die Lage des lokalen Minimums automatisch ermittelt.

Die oben genannten Zeitpunkte wurden direkt aus den Zählratenkurven der Gamma-durchstrahlung abgelesen. Die Zählratenverteilung kann auch in ein Verweilzeit-spektrum umgerechnet werden. Zunächst wird angenommen, dass die Zählrate  $N_0$  vor Passage des Bolus die Nullzählrate darstellt. Für die Tracerkonzentration  $c_T$  gilt das exponentielle Schwächungsgesetz

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp(-\bar{d}\mu c_T(t))$$

$$c_T(t) \sim -\log \frac{N(t)}{N_0}$$
(1)

mit der mittleren Weglänge  $\bar{d}$  und dem Schwächungskoeffizienten  $\mu$ . Entsprechend Gl. 1 lässt sich der Zeitverlauf der Tracerkonzentration berechnen. Durch Normierung der Konzentrationskurve

$$w(t) = \frac{c_T(t)}{\int_0^{t_{\max}} c_T(t) dt} = \frac{\log(N_0 / N(t))}{\int_0^{t_{\max}} \log(N_0 / N(t)) dt}$$
(2)

erhält man das Verweilzeitspektrum  $w(t)$ . Beispielhaft wird in Abbildung 4 das Verweilzeitspektrum für Ebene 200, Förderrate 10 l/h dargestellt.

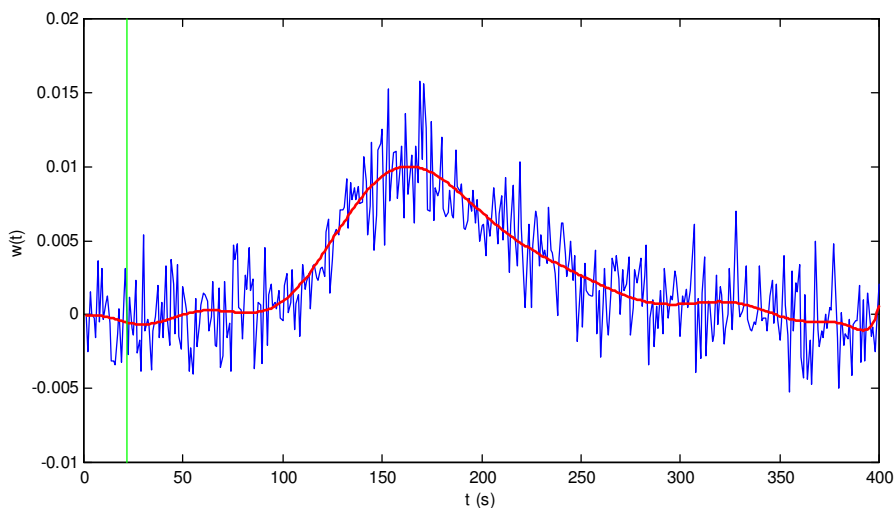


Abbildung 4: Verweilzeitspektrum für Ebene 200, Förderrate 10 l/h.

### 3.3 Ergebnisse

Die Plots zu den Einzelmessungen sind im Anhang 1 zusammengefasst. In Abbildung 5 sind die Auswertungen in graphischer Form für die verschiedenen Förderraten dargestellt.

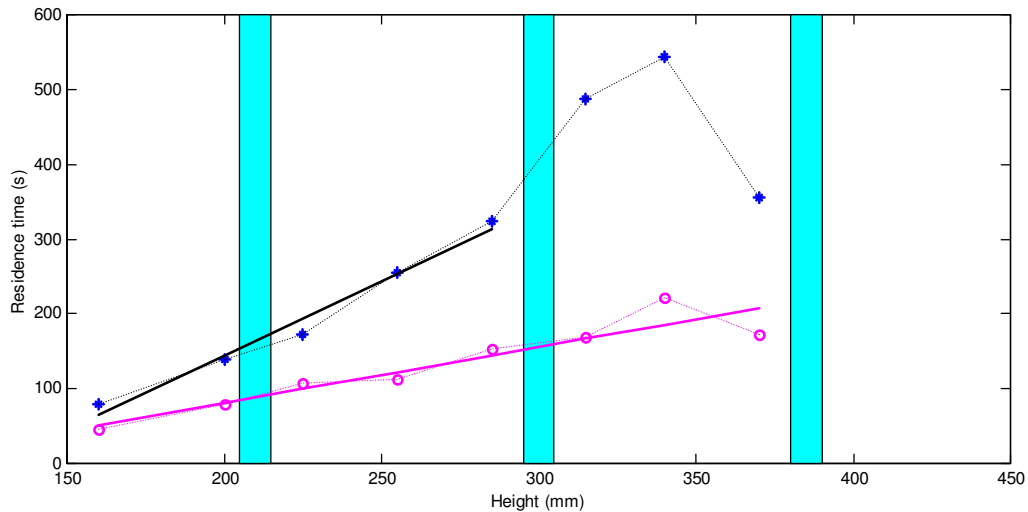


Abbildung 5a: Ankunftszeitpunkte Bolus (\*) und Front (o) relativ zum Nachweiszeitpunkt an der Nadelsonde bei 10 l/h Förderrate.

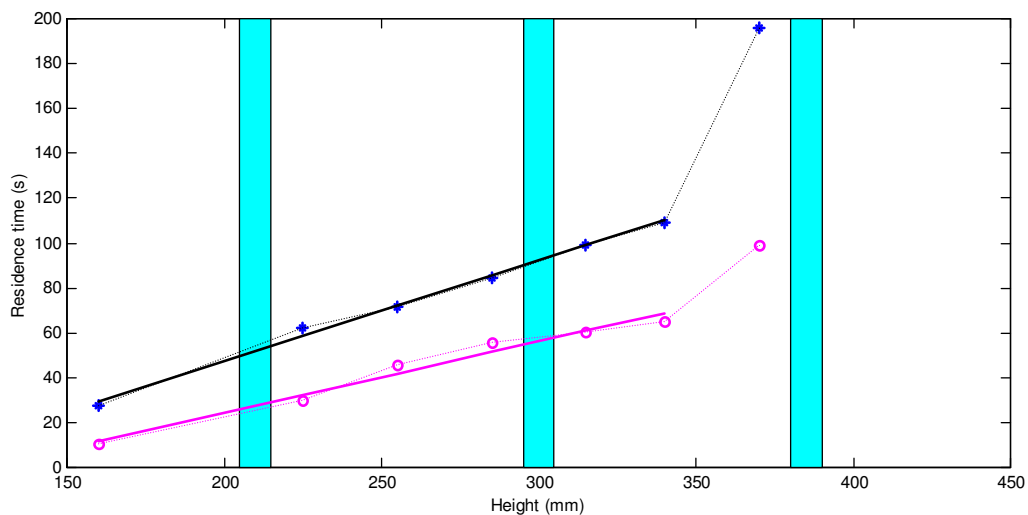


Abbildung 5b: Ankunftszeitpunkte Bolus (\*) und Front (o) relativ zum Nachweiszeitpunkt an der Nadelsonde bei 20 l/h Förderrate.

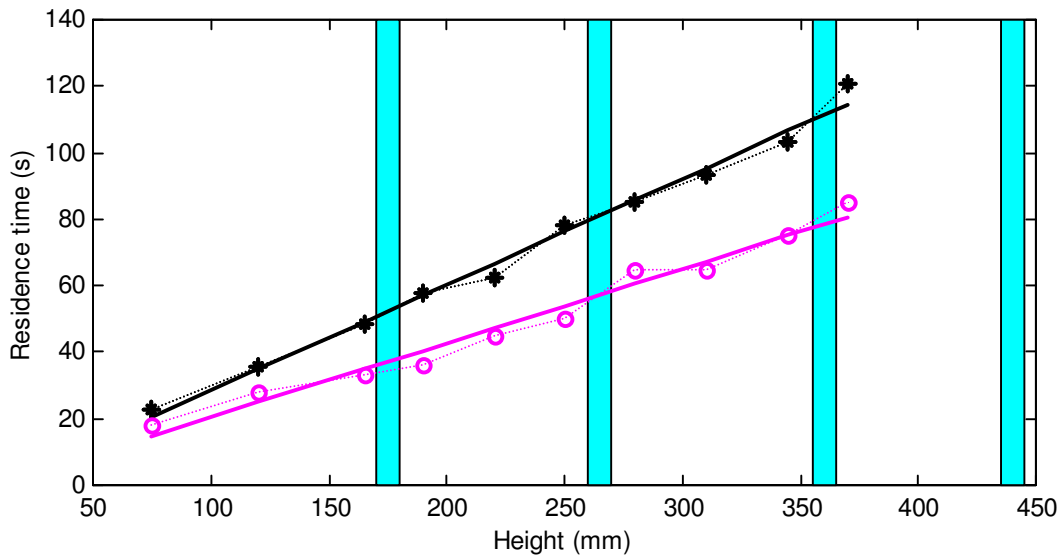


Abbildung 5c: Ankunftszeitpunkte Bolus (\*) und Front (o) relativ zum Nachweiszeitpunkt an der Nadelsonde bei 25 l/h Förderrate.

Wie in den Abbildungen zu erkennen ist, konnten nicht alle Messebenen für die Auswertung herangezogen werden. Durch die axiale Dispersion des Tracerbolus wird die sichere Erkennung des Bolus mit zunehmender Höhe in der Säule bzw. abnehmendem Volumenstrom immer schwieriger. Die Bestimmung der Verweilzeit bzw. der Strömungsgeschwindigkeit wurde daher auf die in Tabelle angegebenen Messebenen begrenzt.

Tabelle 1: Für die Verweilzeitmessung ausgewählte Messebenen

| Förderrate | 10 l/h      | 20 l/h      | 25 l/h     |
|------------|-------------|-------------|------------|
| Messebenen | 160 bis 285 | 160 bis 340 | 75 bis 370 |

Die Abbildungen 5 zeigen die Differenzwerte zwischen dem gammadensitometrischen Boluszeitpunkt und dem Nachweiszeitpunkt an der Nadelsonde. Dabei wurde eine Unterscheidung zwischen der Front des Bolus (Startzeitpunkt der Intensitätsänderung) und dem zeitlichen Hauptwert des Bolus (Minimum der Intensität nach Eintreffen des Bolus) vorgenommen. Zur Bestimmung der repräsentativen Strömungsgeschwindigkeit wurde eine Regressionsgerade angefitet. Die aus den Regressionsgeraden ablesbaren Werte für die Strömungsgeschwindigkeiten sind in Tabelle 2

zusammengefasst und werden den rechnerischen Werten gegenüber gestellt. Für die Ermittlung der rechnerischen Werte gelten folgende Annahmen: Die Säule hat einen Innendurchmesser von 8 cm und damit 50,3 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche. Die Porosität der Schüttung ist 0,272 für den Kies und 0,4 für das Eisengranulat. Für den Kies bzw. das Eisengranulat ergeben sich die rechnerischen Strömungsgeschwindigkeiten zu

$$v = \frac{\dot{V}}{Ap} \quad (3)$$

mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$ , der Zylindergrundfläche A und der Porosität p.

*Tabelle 2: Rechnerisch und experimentell ermittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeiten*

|   | <b>Förderrate</b>                                   | <b>10 l/h</b> | <b>20 l/h</b> | <b>25 l/h</b> |
|---|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | rechnerische Strömungsgeschwindigkeit Kies          | 2,03 mm/s     | 4,06 mm/s     | 5,08 mm/s     |
| 2 | rechnerische Strömungsgeschwindigkeit Eisengranulat | 1,38 mm/s     | 2,76 mm/s     | 3,45 mm/s     |
| 3 | mittlere Frontgeschwindigkeit (experimentell)       | 1,34 mm/s     | 3,16 mm/s     | 4,47 mm/s     |
| 4 | Bolusgeschwindigkeit (experimentell)                | 0,51 mm/s     | 2,23 mm/s     | 3,14 mm/s     |
| 5 | Zeile 3 / Zeile 1                                   | 66%           | 77%           | 88%           |

### 3.4 Diskussion

Für den Bereich, in dem die gammadensitometrischen Daten als verlässlich angesehen werden können, lassen sich zwei Schlussfolgerungen ableiten. Erstens liegt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit unter dem theoretischen Wert, die Differenz wird jedoch mit zunehmender Förderrate kleiner. Man würde erwarten, dass mindestens die Frontgeschwindigkeit der rechnerischen Strömungsgeschwindigkeit für Kies nahe kommt. Dies legt zumindest erst einmal im Hinblick auf das Untersuchungsziel nahe, dass es keine zusätzlichen hydraulischen Toträume gibt, sonst müsste das Geschwindigkeitsverhältnis umgekehrt sein. Eine Erklärung ist die Rückvermischung innerhalb der Säule. Aus den Gammamesdaten ist deutlich eine Bolusverbreiterung zu erkennen. Durch die Rückvermischung legen immer mehr Tracerteilvolumina längere Wege in der Schüttung zurück. Die vertikale Front des Bolus wird immer mehr

verdünnt. Ein sicherer Nachweis des Schwächungssignals ist frühestens bei 10% Tracerkonzentration in der Flüssigkeit möglich. Dazu kommt noch der Effekt, dass die radiographische Messung integral über die Messebene erfolgt und damit der Bolusnachweis erst bei genügender „Belegung“ der Messebene mit Tracer möglich ist. Sollte die Tracerverteilung ein Maximum im Zentrum haben, wird der Bolus in der Messebene zu spät erfasst. Zweitens: Innerhalb des betrachteten vertikalen Messbereiches zeigen sich kaum bemerkenswerte Differenzen in der Strömungsgeschwindigkeit, so dass man von einer gleichmäßigen Strömungsstruktur mit konstanter Effektivgeschwindigkeit in der Säule ausgehen kann. Es ist entgegen der Annahme auch generell keine Verlangsamung der Strömung im Bereich den Eisengranulatschichten erkennbar. Allerdings muss man hier auch bedenken, dass der Abstand der Messebenen unter- und oberhalb der Eisengranulatschichten etwa der doppelten Schichtdicke des Eisengranulats entspricht und daher auch jeweils eine Menge Kies durchströmt wird.

Berücksichtigt werden muss bei der Bewertung der Ergebnisse fernerhin, dass die als Tracer verwendete  $\text{BaCl}_2$ -Lösung eine ca. 1,3-fache Dichte von Wasser hat und damit die Gravitationskraft einen Einfluss auf die Rückvermischung hat. Es wird jedoch angenommen, dass dieser Einfluss nur für sehr kleine Förderraten von Bedeutung ist.

## **4 Experiment 2 – Verteilungsmessung**

### *4.1 Ablauf des Experiments*

Zunächst wurde der Kreislauf bei 10 l/h Förderrate in Betrieb genommen und die Säule für ca. 6 h mit Wasser betrieben. Für tomographische Messungen wurden die Ebenen 160 mm, 255 mm, 340 mm und 425 mm ausgewählt (siehe Abbildung 3 rechts). Diese Messebenen liegen jeweils in der Mitte zwischen zwei aufeinander folgenden Eisengranulatschichten.

Im Experiment wurde wie folgt weiter verfahren:

1. Tomographische Messung in den vier ausgewählten Ebenen für Wasserdurchströmung, beginnend mit 160 mm.
2. Einstellen von 20 l/h Förderrate.

3. Wiederholung von 1.
4. Umstellen der Säule auf Durchströmung mit  $\text{BaCl}_2$ -Lösung (1,4 mol/l). Dazu wurde zunächst der saugseitige Schlauch in den  $\text{BaCl}_2$ -Tank eingelassen und die Lösung für ca. 10 Minuten im offenen Kreislauf gefördert. Danach wurde der Kreislauf durch Einsetzen des Auslassschlauches in den  $\text{BaCl}_2$ -Tank geschlossen.
5. Wiederholung von 1.
6. Einstellen von 10 l/h Förderrate.
7. Wiederholung von 1.

#### 4.2 Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt die Radiogramme bzw. das Differenzradiogramm für die Wasser und  $\text{BaCl}_2$ -Lösung.

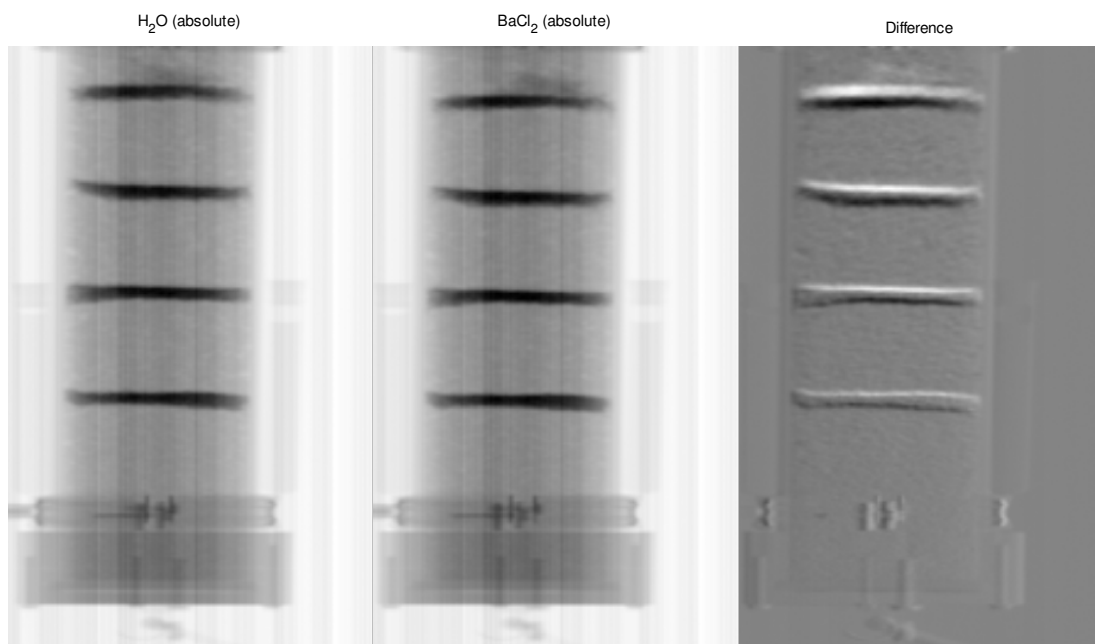


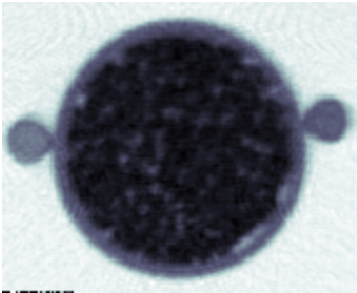
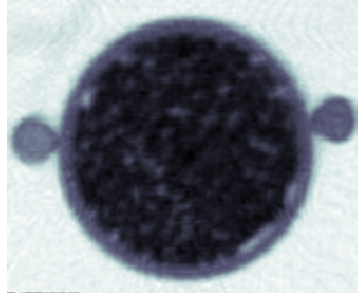
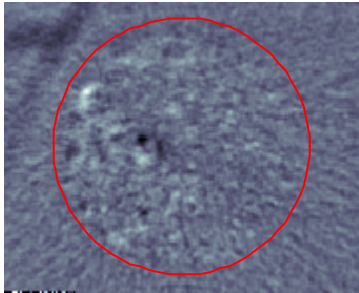
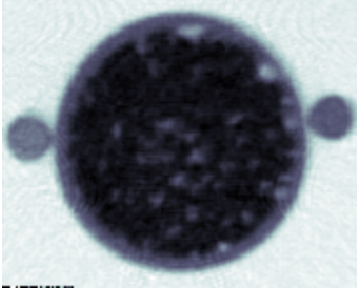
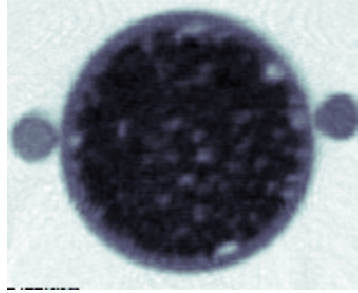
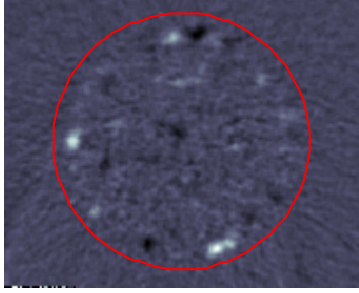
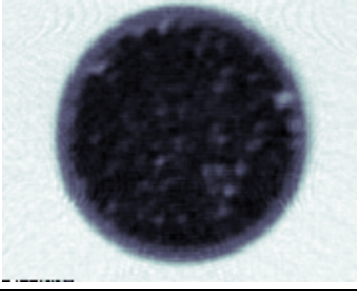
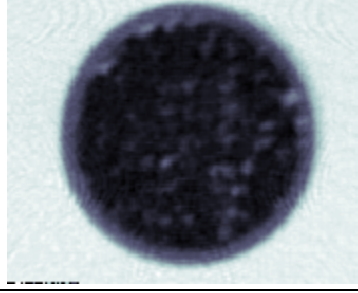
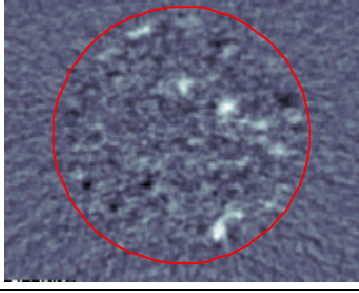
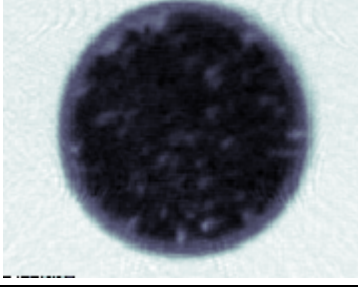
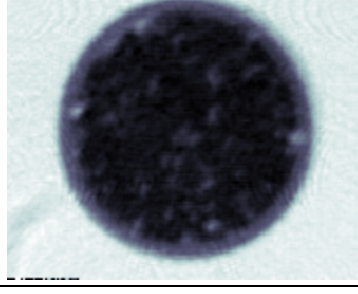
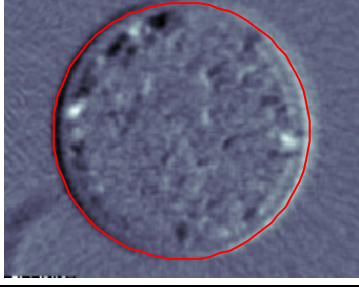
Abbildung 6: Radiogramme.

Abbildung 7 zeigt die tomographischen Rekonstruktionen der ausgewählten Schnittebenen. In den Absolutbildern bedeuten dunkle Grauwerte hohe Schwächungswerte. Im Differenzbild kennzeichnet der Farbwert im Gebiet außerhalb der Säule den Differenzwert Null. Ein heller Farbwert innerhalb des Säulenquerschnitts bedeutet, dass in diesem Probevolumen die Strahlschwächung bei  $\text{BaCl}_2$ -Durchströmung geringer ist.



Dies wäre plausibel begründbar, wenn man annimmt, dass sich dieses Probevolumen nach der Wassermessung mit Gas gefüllt hat. Eine andere Begründung, ist die Bewegung von Granulatkörnern zwischen den Messungen (siehe Diskussion).

Um Referenzschwächungswerte für die verwendeten Flüssigkeiten zu gewinnen, wurden links und rechts der Säule Reagenzgläser angebracht, die mit Wasser (links) BaCl<sub>2</sub>-Lösung (rechts) gefüllt sind. Diese sind in den Absolutradiogrammen (Abbildung 6) schwach und in den Tomographiebilder (Abbildung 7, Ebenen 160 und 255) gut erkennbar.

|              | $\dot{V} = 10\text{ l/h}$                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ebene</b> | <b>Wasser</b>                                                                       | <b>BaCl<sub>2</sub>-Lösung</b>                                                       | <b>Differenz</b>                                                                      |
| <b>160</b>   |   |   |   |
| <b>255</b>   |  |  |  |
| <b>340</b>   |  |  |  |
| <b>425</b>   |  |  |  |

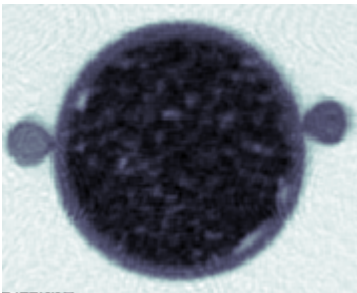
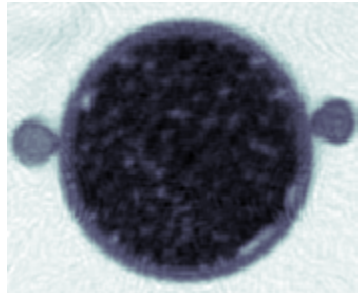
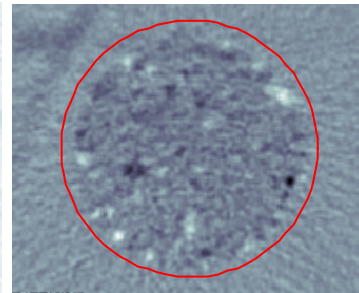
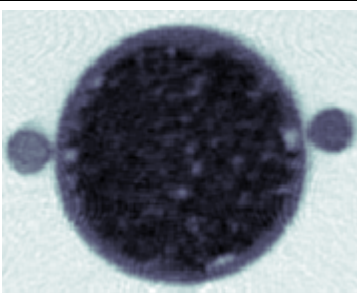
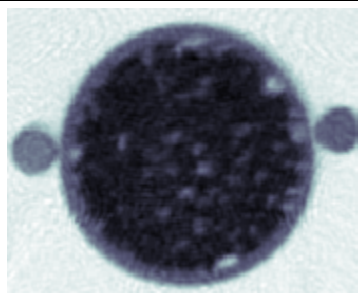
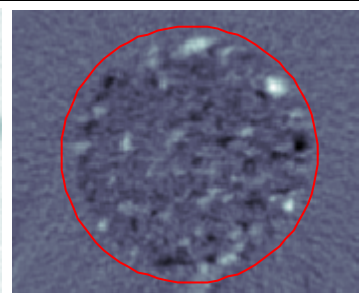
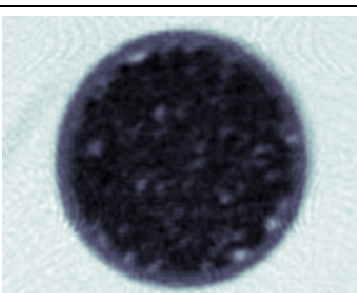
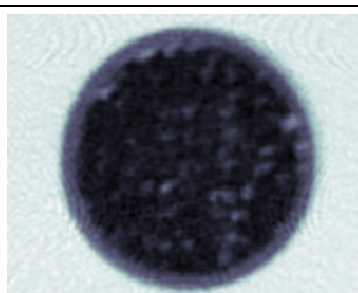
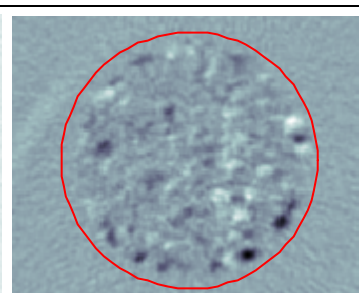
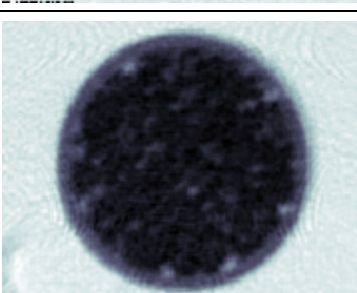
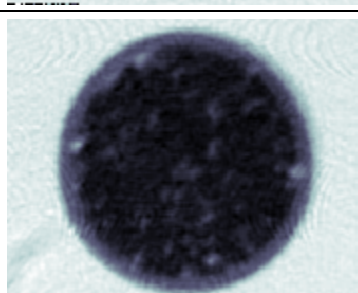
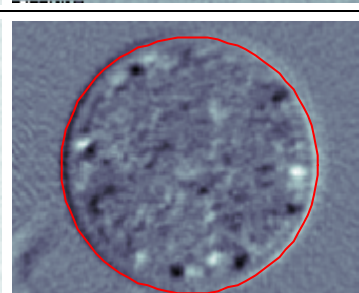
|              | $\dot{V} = 20\text{ l/h}$                                                           |                                                                                      |                                                                                       |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ebene</b> | <b>Wasser</b>                                                                       | <b>BaCl<sub>2</sub>-Lösung</b>                                                       | <b>Differenz</b>                                                                      |
| <b>160</b>   |    |    |    |
| <b>255</b>   |    |    |    |
| <b>340</b>   |   |   |   |
| <b>425</b>   |  |  |  |

Abbildung 7: Tomographische Schnittbilder.

#### 4.3 Diskussion

Zunächst ist in den Radiogrammen zu erkennen, dass sich der Säuleninhalt von Messung zu Messung in axialer Richtung verändert hat. Dies ist mit ziemlicher Sicherheit auf ein Verdichten des Kiesbettes während der Untersuchungen zurückzuführen. Dieses wird vor allem durch Vibrationen der Pumpe und der To-

mographienstellachsen verursacht. Die Erkennung von Gaseinschlüssen im Säulenquerschnitt wird dadurch nicht beeinträchtigt, da diese in den Absolutrekonstruktionsbildern bereits erkannt werden. Für die Differenzbilder relativiert sich aber die Aussagekraft, da Grauwertdifferenzen nun auch durch Strukturunterschiede infolge der Verdichtung des Kiesbettes verursacht sein können.

Bezüglich der Tracerverteilung ist aus dem dargestellten Radiogramm (jeweils 20 l/h Förderrate für Wasser und  $\text{BaCl}_2$ -Lösung) kein bedeutsamer radialer oder axialer Konzentrationsgradient der Tracerflüssigkeit festzustellen. Anhand der Radiogramme ist also auf keine nennenswerte Maldistribution der Flüssigkeit zu schließen.

In den Tomographiebildern sind sowohl für den Fall der Wasserdurchströmung als auch der Durchströmung mit  $\text{BaCl}_2$ -Lösung Gaseinschlüsse erkennbar. Gasgefüllte Hohlräume haben einen Grauwert, der etwa dem des Bereiches außerhalb der Säule entspricht. Sie heben sich damit deutlich von flüssigkeitsgefüllten Räumen ab. Die (größeren) gasgefüllten Gebiete wurden mit Hilfe eines Bildsegmentationsverfahrens automatisch extrahiert. Dazu wurde im Gebiet des wassergefüllten Reagenzglases der mittlere Grauwert bestimmt. Alle Pixel mit Grauwerten größer als der Schwellwert wurden in den Schnittbildern der Wasserphase markiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 dargestellt. Gasbereiche werden innerhalb der Säule schwarz dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es sich nur um geringe Gasanteile handelt, die sich vornehmlich im peripheren Bereich des Säulenquerschnitts befinden. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass nur Gasbereiche innerhalb der Auflösungsgrenze des CT-Systems gefunden werden. Kleinere Gaseinschlüsse haben wegen des Partialvolumeneffektes dunklere Grauwerte und werden richtig erkannt.

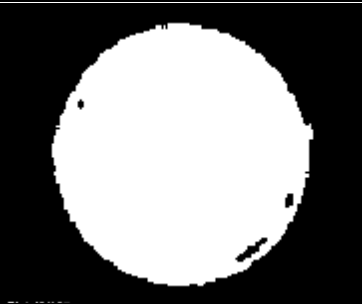

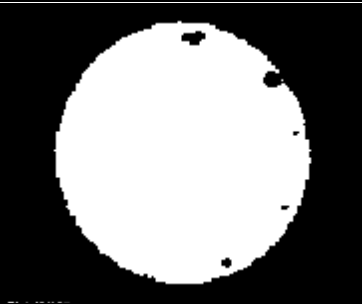
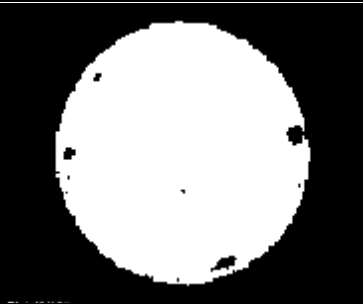
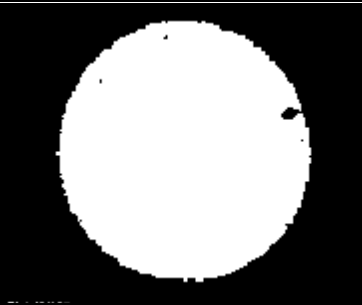
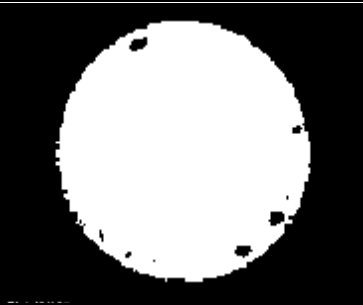
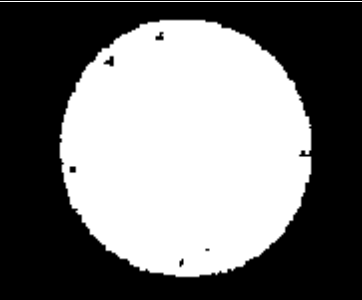
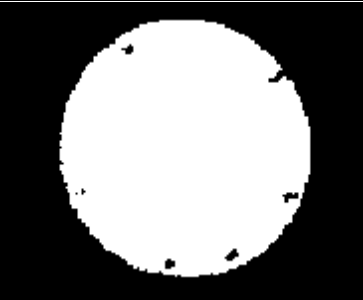
| Ebene | $\dot{V} = 10\text{l/h}$                                                            | $\dot{V} = 20\text{l/h}$                                                             |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 160   |    |    |
| 255   |    |    |
| 340   |   |   |
| 425   |  |  |

Abbildung 8: Gasanteile in wasserdurchströmter Säule.

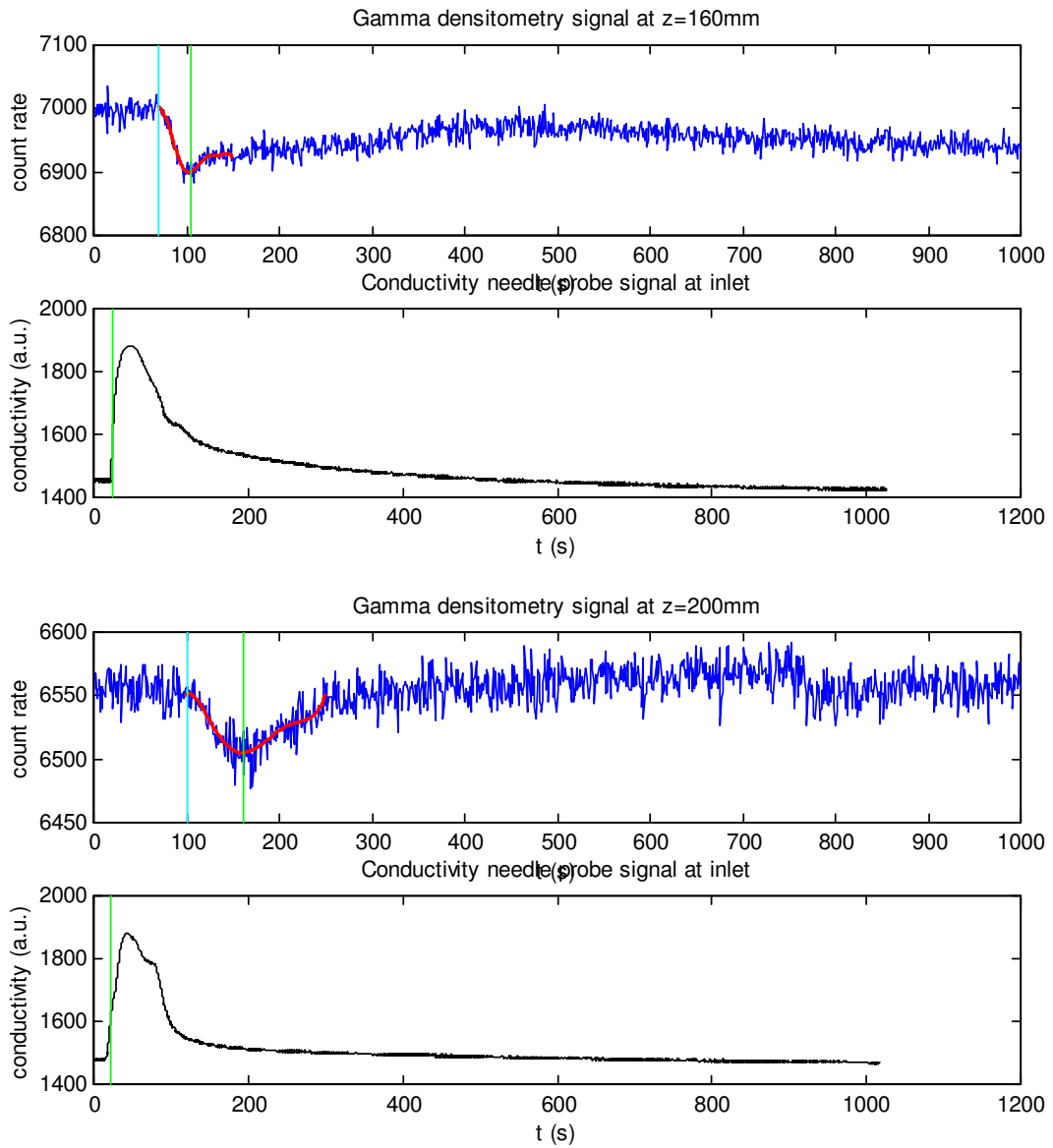
## Zusammenfassung

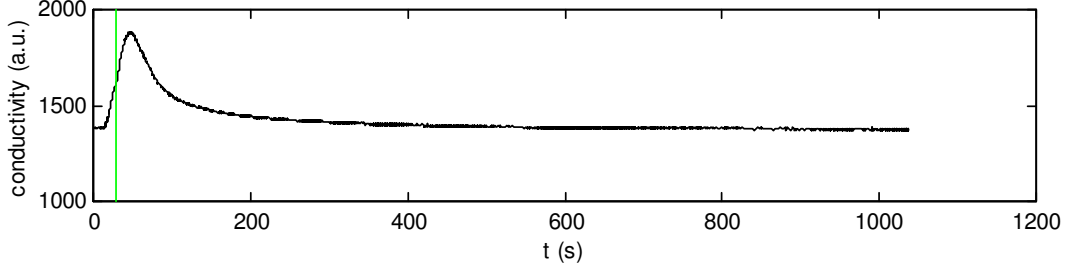
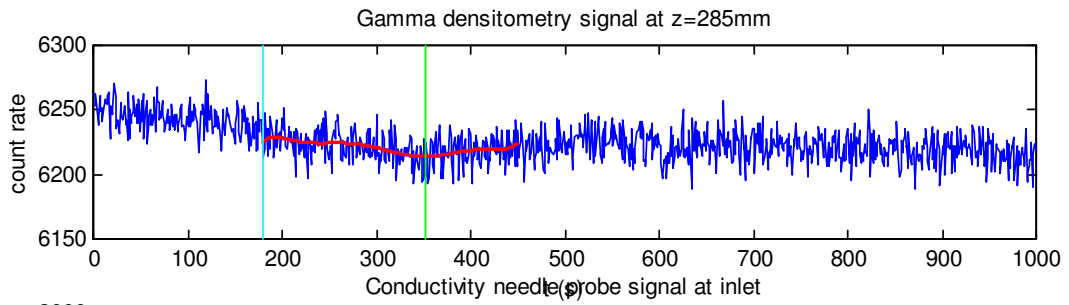
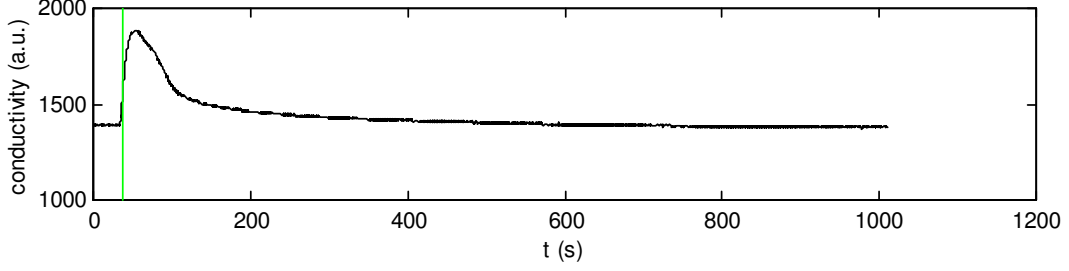
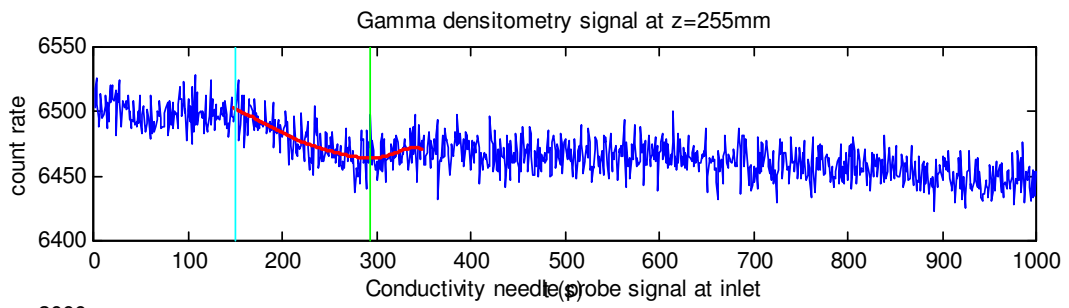
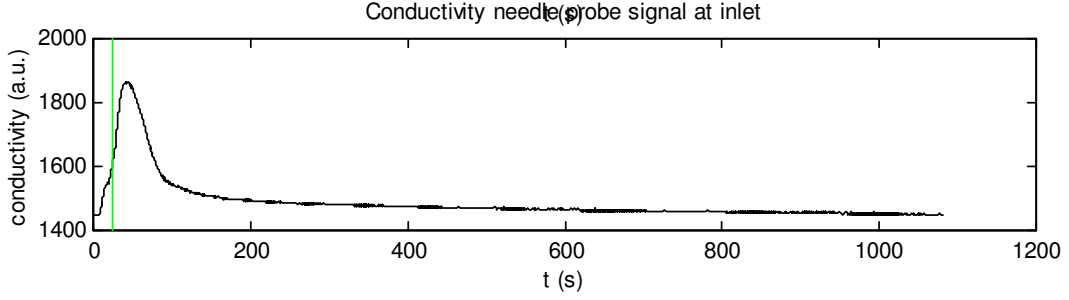
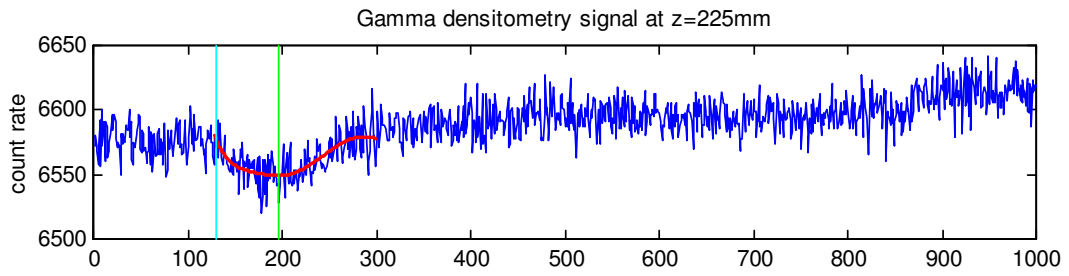
Es wurden Verweilzeituntersuchungen und Gasverteilungsmessungen an einer senkrecht mit Wasser durchströmten kiesbefüllten Säule mit vier intermediären Eisengraneltschichten durchgeführt. Zur Messung der Verweilzeitspektren wurde in die Zuleitung der Säule ein 60 ml - Bolus  $\text{BaCl}_2$ -Lösung (1,4 mol/l) eingespeist. Der Eintrittszeitpunkt des Bolus an der Säule wurde mittels einer direkt am Eintrittstutzen angebrachten Leitfähigkeitsnadelsonde erfasst. Der Durchgang des Tracerbolus durch verschiedene Messebenen wurde mittels Gammadurchstrahlung aufgezeichnet. Aus dem Schwächungssignal lassen sich Verweilzeitspektren direkt ableiten. Zur Bestimmung der Verweilzeit bzw. der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Säule wurden zwei charakteristische Zeitpunkte des Verweilzeitspektrums verrechnet. Einmal der Frontzeitpunkt, der den erstmaligen Nachweis von Tracerflüssigkeit in der Messebene bezeichnet, sowie der Boluszeitpunkt, der durch die maximale Tracerkonzentration in der Messebene gegeben ist. Der gammadensitometrische Nachweis des Tracerbolus war aufgrund der starken axialen Dispersion nur in der unteren Hälfte der Säule möglich. Die Ergebnisse gaben keinen Hinweis auf größere gasbedingte hydraulische Obstruktionen in der Säule.

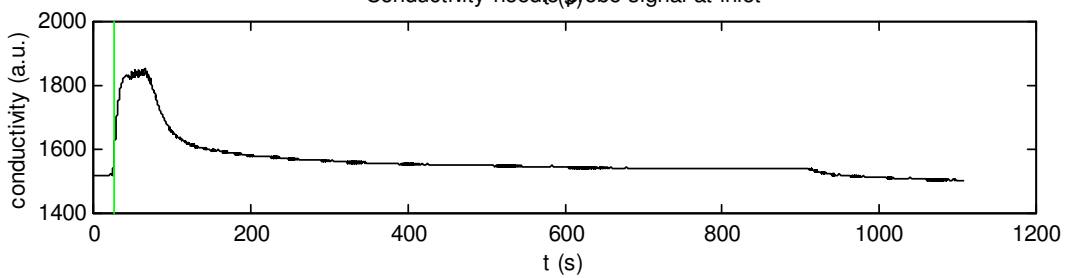
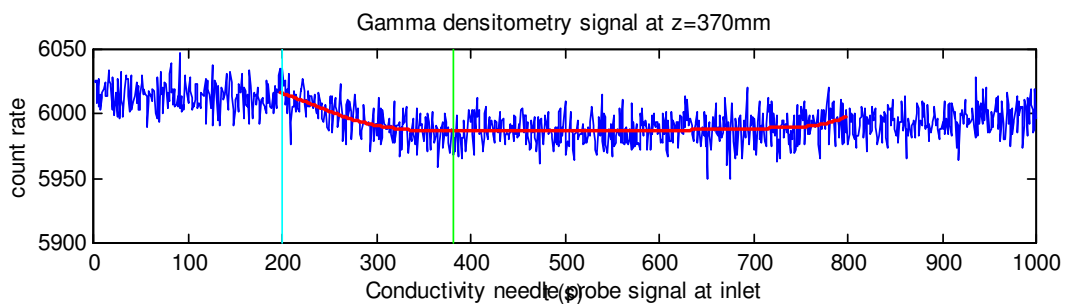
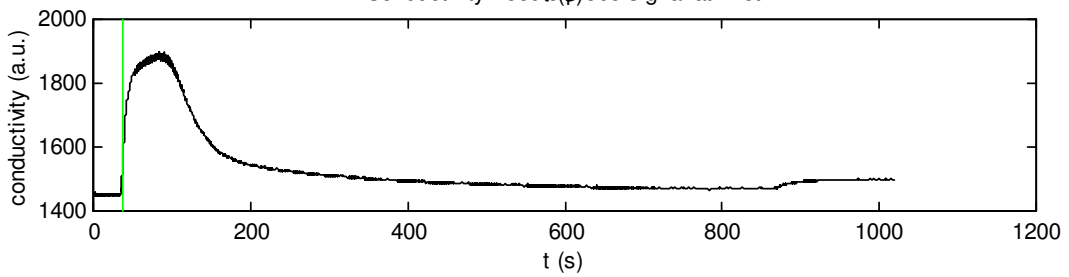
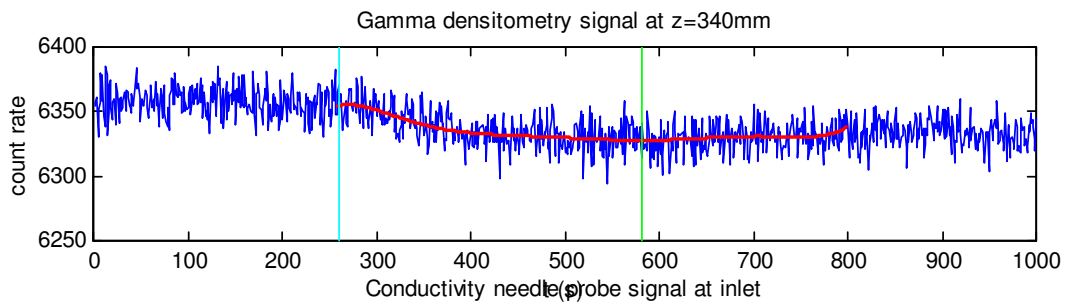
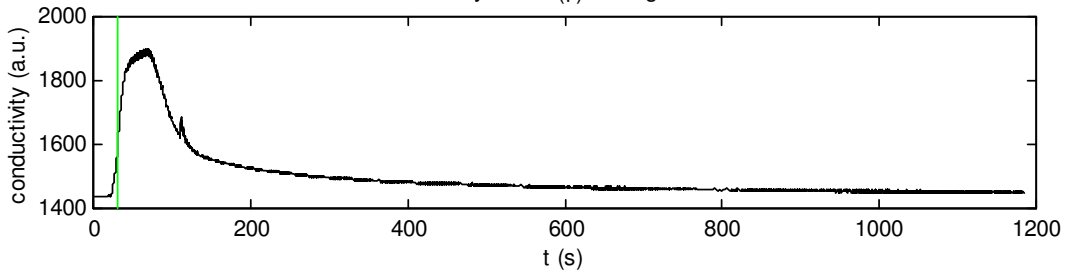
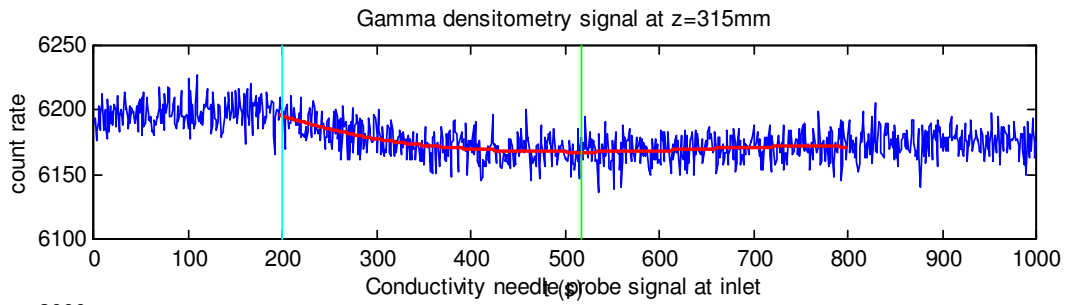
Der Nachweis von Gaseinschlüssen bzw. die Darstellung der Gasverteilung in vier ausgewählten Messebenen wurde mit dem Verfahren der Gammastrahlungstomographie realisiert. Die Messebenen wurden jeweils mittig zwischen den Eisengraneltschichten gewählt. Bezüglich der Verteilung des Bariumtracers wurden keine nennenswerten Konzentrationsgradienten im Messquerschnitt gefunden, so dass von einer homogenen Durchströmung der Säule ausgegangen werden kann. Erkannt wurden Gaseinschlüsse besonders im peripheren Bereich des Säulenquerschnitts. Der globale Gasgehalt ist dabei kleiner als 5%.

# Anhang 1 - Diagramme zu den Verweilzeitmessungen

Förderrate 10 l/h









Förderrate 20 l/h

