

HAFENCITY UNIVERSITÄT HAMBURG

Bauingenieurwesen - Arbeitsbereich Baustofftechnologie

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina

MASTERARBEIT

Modellierung eines Frostangriffes auf Beton
als Zweischichtsystem mittels FEM
auf Basis von empirischen Daten
aus CDF und modifizierten Migrationsprüfungen

Manuel Prischtscheptschuk

6031181

Erstbetreuerin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina

Zweitbetreuer: Christoph Langer, M.Sc.

Hamburg, 01.07.2021

25 Wochen

21.12.2021

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	<u>Seite</u>
I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
II. EINLEITUNG	6
III. AUFBAU DIESER ARBEIT.....	7
1. GRUNDLAGEN	8
1.1 Transportmechanismen von Chloriden in Beton	8
1.2 Das Eindringen & die Schadensmechanismen von Chloridionen im Beton... ..	10
1.3 Schadensmechanismen beim Frost-Tauwechsel	11
2. STAND DER FEM-MODELLIERUNG	24
3. ABLAUF DER ZUGEHÖRIGEN LABORVERSUCHE	27
3.1 CDF-Verfahren	27
3.2 RCM-Verfahren.....	30
3.3 Ersatz von NaCl durch NaBr	32
4. FRAGESTELLUNG & VORGEHENSWEISE DER MODELLIERUNG.....	33
5. FEM-MODELLIERUNG.....	34
5.1 Modellierung des CDF-Verfahrens	34
5.1.1 Geometrie	34
5.1.2 Transport verdünnter Spezies in porösen Medien	35
5.1.3 Porosität	39
5.1.4 Hydratationsgrad	40
5.1.5 Adsorptionsisotherme.....	42
5.1.6 Fluid / Diffusion	45

5.1.7	Ergebnisermittlung.....	48
5.1.8	FEM-Netz und Studie	50
5.2	Modellierung des RCM-Verfahrens.....	51
5.2.1	Geometrie	51
5.2.2	Transport verdünnter Spezies in porösen Medien	52
5.2.3	Elektrische Ströme	55
5.2.4	FEM-Netz und Studie	58
6.	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE.....	59
6.1	Laborversuche CDF zu FEM	59
6.1.1	Porosität und Hydratationsgrad.....	60
6.1.2	Konvektion über das Geschwindigkeitsfeld	61
6.1.3	Adsorption.....	63
6.1.4	Arrhenius-Faktor	64
6.1.5	Ergebnisse der Varianten	65
6.2	Laborversuche RCM zu FEM.....	75
6.2.1	Migrationskoeffizient	76
6.2.2	Adsorption.....	76
6.2.3	Ergebnisse	77
7.	LITERATURVERGLEICH.....	80
7.1	CDF / Zweischichtmodell.....	80
8.	AUSBLICK	84
9.	FAZIT.....	86
IV.	TABELLENVERZEICHNIS	87
V.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	90

VI.	GLEICHUNGSVERZEICHNIS.....	96
VII.	LITERATURVERZEICHNIS	97
VIII.	ANHANG	101
	Anhang A. Ausführliche Bestimmung von Parametern	101
	Anhang B. COMSOL-Diagramme – Variante 1 CDF	132
	Anhang C. COMSOL-Diagramme – Variante 2 CDF	143
	Anhang D. COMSOL-Diagramme – Variante 3 CDF	154
	Anhang E. COMSOL-Diagramme – Variante 4 CDF	165
	Anhang F. COMSOL-Diagramme – Migration.....	176
	Anhang G. Nutzungs- und Verwertungsrechts.....	187
	Anhang H. Selbstständigkeitserklärung	188

I. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
CDF	Capillary suction of D e-icing chemicals and F reeze-thaw test
CIF	Capillary suction, I nternal damage and F reeze-thaw test
d	Tage
DIF	Diffusion-(Versuch)
FEM	Finite-Element-Methode
FTW	Frost-Tau-Wechsel
GK	Gesteinskörnung
Gl.	Gleichung
ITZ	Interfacial Transition Zone
LIBS	Laser Induzierten Breakdown Spektroskopie
MELP	Mikroelinspumpen
MIG	Migrationsversuch
n	Anzahl
OS	Oberflächenbeschichtung
PK	Probekörper
PK-Nr.	Probekörpernummer
RCM	Rapid-Chlorid-Migration
Var.	Variante
w/z-Wert	Wasser-Zement-Wert

II. EINLEITUNG

Neben den realen Versuchen im Labor oder am bestehenden Objekt rückt in der heutigen Zeit eine numerische Untersuchung immer häufiger in den Mittelpunkt. Während in der Statik dies eine Thematik ist, die schon lange angewendet wird, kann dies der Baustofftechnologie noch nicht in diesem Rahmen zugesprochen werden. Auch wenn der Beton in der statischen Berechnung bedacht wird, ist dort hauptsächlich die Festigkeit gefragt und weniger baustofftechnologische Eigenschaften. Wenn das Ziel die Bestimmung der Schädigung des Betons bzw. das Eindringen von Salzionen ist, dann ist der herkömmliche Weg, dass eine passende Betonzusammensetzung ermittelt und ein für die Zielwerte notwendiger Laborversuch durchgeführt wird. Dazu gehören z. B. Einlagerungsversuche, um den Diffusionskoeffizient zu bestimmen, die Ermittlung des Migrationskoeffizienten durch das Anlegen einer elektrischen Spannung oder die Erzeugung von aufeinanderfolgenden Frost-Tauwechsel, bei dem verschiedene Mechanismen dazu führen, dass sich an der Betonrandzone Zementstein löst und eine Chloridfront in den Beton vordringt. Damit eine gewisse Vororientierung für das Eindringen von Salzen gegeben werden kann, ist dieser Arbeit zum Ziel gesetzt, mithilfe einer Finite-Element-Methode (FEM) die Laborversuche von ausgewählten Probekörpern des Fachbereiches Baustoffe der HafenCity-Universität-Hamburg zu simulieren und nachzubilden. Zu diesen Untersuchungen gehört der CDF- (Frost-Tauwechsel) und der RCM-Versuch (Migration).

Bei den Laborversuchen ist der Nachteil gegenwärtig, dass mehrere Probekörper einer Betoncharge vorliegen, aber sich aufgrund des inhomogenen Querschnittes die Geometrie bei allen Prüfformen unterscheidet. Das Ergebnis bzw. die Wahrheit ist demnach stets der Mittelwert aus der Gesamtheit. Dies kann durch eine numerische Ermittlung vorweggenommen werden oder zumindest zu einer Eingrenzung der Varianten führen, die anschließend durch Laborversuche in der Realität zu verifizieren sind. Eine mehrfache FEM-Untersuchung an denselben Querschnitt kann ebenfalls das Ziel haben, eine Studie zu erzeugen, indem Einflussgrößen verändert werden.

III. AUFBAU DIESER ARBEIT

Bevor sich in dieser Arbeit mit der Modellierung beschäftigt wird, findet eine Darstellung des Verhaltens von Salzionen bei Raumtemperaturen sowie bei Frost-Tau-Wechseln statt, mit den dazugehörigen Mechanismen und Verfahren. Sodass ein Überblick geschaffen wird, in welcher Form und Art die Frostbeaufschlagung eine Schädigung des Gefüges verursachen kann und wie diese zu bewerten ist. Für den weiteren Themenüberblick ist ein kurzer Literaturüberblick zu dem Stand der FEM-Modellierung zusammengefasst, bevor anschließend die Laborversuche dargestellt sind, aus denen die zu simulierenden Eindringtiefen der Salzionen stammen. Mit der Erläuterung der Fragestellung wendet sich die Arbeit darauffolgend der FEM-Modellierung zu und beginnt mit dem Ablauf der numerischen Ermittlung der Ergebnisse aus den CDF- und RCM-Versuchen. Die Darstellung der Simulationsdaten folgt dann im Anschluss mit der zugehörigen Bewertung und Diskussion. Abschließend findet ein weiterer Blick in die Literatur statt, bei dem geprüft wird, ob das FEM-Modell auf Daten anderer Untersuchungen und Autoren übertragbar ist. Am Ende dieser Arbeit wird in einem Ausblick auf weitere Möglichkeiten verwiesen, wie das FEM-Modell anders abgebildet werden kann sowie Ansätze für die Implementierung der Parameter in einem angepassten Kontext verwendet werden können.

1. GRUNDLAGEN

1.1 Transportmechanismen von Chloriden in Beton

Bei dem Transport der Chloride in den Beton werden zwei Arten unterschieden. Das Eindringen über die Diffusion und mit der Konvektion. Diese unterscheiden sich darin, dass bei der Konvektion ein Wassertransport stattfindet, der die gelösten Stoffe eintreibt. Dies bedeutet, dass wiederum in einem wassergesättigten Bauteil ein Eindringen der Chloride lediglich über die Diffusion möglich ist, also über das Treiben von dem hohen Konzentrationsniveau zum niedrigeren Niveau, bis ein Ausgleich erreicht ist. [1] Die Zeitspanne, bis dieser Ausgleich vollzogen ist, ist neben der Porosität, der Zusammensetzung des Zementsteins und des Wasserzementwertes ebenfalls maßgeblich von der Temperatur abhängig. Sollte 20°C der Ausgangswert sein, dann ist bei z. B. 5°C die Beweglichkeit der Ionen wesentlich eingeschränkter als bei Temperaturen >20°C. [2]

Die Konvektion findet des Weiteren in drei maßgeblichen Transportmechanismen statt. Dazu gehört der Kapillartransport, die Permeation und das in dieser Arbeit behandelte Frostsaugen. Die Kapillarkräfte führen in einem porösen Bauteil dazu, dass bei direkter Wasserbeaufschlagung auf der Bauteiloberfläche dieses bis zur Sättigung aufgenommen wird. Hervorgerufen wird diese Wasseraufnahme durch die kapillare Zugkraft, die auf der Grenzflächenspannung beruht. Das bedeutet, dass das Wasser in den Kapillaren bestrebt ist, möglichst viel Oberfläche zu benetzen und somit in das Bauteil vordringt, bis der besagte Sättigungszustand eintritt. [1] Dieses Bestreben wird angetrieben durch die Adhäsionskräfte, die zwischen den Ionen der eindringenden Flüssigkeit und dem Zementstein entstehen. [3] Der Ablauf des kapillaren Saugens ist so zu beschreiben, dass in den kleineren Poren größere Kapillar- bzw. Druckkräfte vorherrschen und somit über das verzweigte Netz aus Kapillarporen bis hin zu Gelporen das Wasser hineingezwungen wird. Das hat zur Folge, dass anschließend die Flüssigkeit in den Gelporen durch die ansteigenden Oberflächenkräfte eine Strukturierung erfährt. Dies führt dazu, dass die Bewegungsmöglichkeit des Wassers massiv eingeschränkt wird. [1] Zu erwähnen ist, dass die Wassermoleküle meist tiefer eindringen als die gelösten Ionen der beaufschlagten Flüssigkeit. Das beruht zum Teil darauf, dass der Widerstand des Betons gegenüber des Chlorideindringens nicht nur abhängig von strukturellen Gegebenheiten ist, wie z. B. Risse für die Konvektion oder ein wassergesättigtes Porensystem für die Diffusion, dass durch die Porenradien oder Verwundenheit die Struktur bestimmt, sondern auch die Chloridbindung, die als Adsorption bezeichnet wird. Dabei werden

die Chloride chemisch zu Friedel'schem Salz und physikalisch über Oberflächenkräfte an dem Zementstein gebunden, während das Wasser weiter in das Betonbauteil konvektiv vordringt. [4]

Permeation bedeutet ein Eindringen des Wassers über einen hydrostatischen Druck. [1] Darunter ist zu verstehen, dass ein anliegender Druckunterschied der Wassersäule vorliegt. Dies ist z. B. bei einer betonierten Kellerwand mit einem anstehenden Grundwasserspiegel der Fall.

Zu dem Transportmechanismus, der in dieser Arbeit hauptsächlich beschrieben wird, gehört die Mikroislinsenpumpe, also das Eintreiben der Salze über den Frost-Tau-Wechsel und den dazugehörigen Vakuumzonen.

1.2 Das Eindringen & die Schadensmechanismen von Chloridionen im Beton

Das Eindringen von Chloridionen stellt eines der größten Schadensbilder bei Betonbauwerken dar. Eine Ursache ist das Streusalz (Natriumchlorid, NaCl), welches jeden Winter für befahrbare Straßen sorgt und durch Anhaftungen an den Fahrzeugen auch in Tiefgaragen und Tunnel gelangt. Ebenso werden Bauwerke im Meer bzw. in Meeresnähe mit Chloridionen beaufschlagt, sodass diese in das Stahlbetonbauwerk eindringen können. Weitere Quellen von schädigenden Chloriden sind angrenzende Baustoffe, aus denen die Chloride bei z. B. Wasserbeaufschlagung ausgewaschen werden oder durch Brandbeaufschlagung zersetzt werden. Dies geschieht z. B. bei Produkten aus Polyvinylchlorid (PVC). [5]

Der Zustand, der zu einem Schaden führt, tritt jedoch erst ein, wenn die Chloridionen den Bewehrungsstahl erreicht haben. Daraus resultieren die vorbeugenden Stutzmaßnahmen, sodass mithilfe der Betondeckung der Weg zwischen Betonoberfläche und Stahleinlage vergrößert wird. Alternativ kann auch von Beginn an eine kostenintensivere Oberflächenbeschichtung aufgetragen werden, dies findet jedoch nur in Ausnahmefällen statt. Solche Schutzsysteme sind überwiegend erst einzusetzen, wenn ein weiteres Beaufschlagen von Chloriden an einem bestehenden Bauwerk verhindert werden soll.

Die Bewehrungslage befindet sich unter optimalen Bedingungen in einem alkalischen Milieu mit einem pH-Wert von 12-14. Die daraus resultierende Passivschicht (Oxidschicht) führt dazu, dass die Korrosion des Eisens nahezu nicht stattfindet. Kommt es zu der Situation, dass Chloridionen über Konvektion oder bei wassergesättigten Poren über das Konzentrationsgefälle in die Tiefe diffundieren und die Passivschicht erreichen, dann senkt sich der schützende pH-Wert. Der Stahl beginnt daraufhin unter dem Einfluss von Feuchtigkeit und Sauerstoff zu korrodieren, sodass die Tragfähigkeit des Bauwerks abnimmt und die Bewehrungsstäbe versagen. [6]

1.3 Schadensmechanismen beim Frost-Tauwechsel

Die Modelle, die die Abwitterung bei einem Frost-Tauwechsel beschreiben und zurzeit in der Wissenschaft diskutiert werden, sind sehr vielseitig und erfahren regelmäßig Zusprüche, aber auch Abwägungen. Insbesondere in den vergangenen zwanzig Jahren sind neu entwickelte Modellansätze veröffentlicht worden, da seit dem Bestreben zum Klimaschutz und nachhaltigen Materialverbrauch die deskriptiven Ansätze nicht mehr der modernen und zukünftigen Bauwirtschaft zugeschrieben werden können. [7]

Zu Beginn der damaligen Untersuchungen war die Grundtheorie, dass die Abwitterung oder auch Betonabplatzung nur auf die Volumenzunahme des gefrorenen Wassers in den Poren zurückzuführen ist. Heute ist bekannt, dass das ca. 9 % größere Volumen des Eises nicht alleine für die Schadensmechanismen verantwortlich ist und die poröse Struktur des Betonwerkstoffes mit den Gel- und Luftporen wesentlich mehr Kapazität für Volumenzunahmen bietet. Ohne diese Expansionsräume wäre aber eine solche Volumenzunahme für den Beton nicht tragbar. [7] Zu erklären ist dies durch das Frostsaugen, d.h. wenn der poröse Werkstoff bereits wassergesättigt ist, das kapillare Saugen demnach vollständig stattgefunden hat, nimmt der Sättigungsgrad mit jedem Frost-Tauwechsel zu. Die eigentliche Eisdehnung ist erst zu erkennen, wenn das Frostsaugen den absoluten Sättigungsgrad erreicht hat bzw. auch das Gelwasser gefroren ist. Dies geschieht jedoch erst bei Temperaturen unter 25°C minus. [8] Wann ein vollständiges Gefrieren der Flüssigkeit vorliegt ist von verschiedenen Faktoren abhängig, dazu gehört maßgeblich die Ionenkonzentration der Porenflüssigkeit und die Wirkung von Oberflächenkräften. Die mögliche Vorstellung, dass ein Druckaufbau ebenfalls ein Faktor für eine Gefrierpunktniedrigung ist, wird widerlegt, da für ein Absenken der Temperatur dieser Druck wesentlich höher sein muss als der, den der Zementstein bzw. das Porensystem zulässt. Diesem Zwang könnte vorher entgegengewirkt werden, indem Risse entstehen oder das Wasser durch eine Umverteilung in freie nun zugängliche Räume bzw. an die Oberfläche des Bauwerkes transportiert wird. [9]

Die Ionenkonzentration der Porenflüssigkeit basiert nicht nur auf die anfangs beinhalteten gelösten Salze, wie in einer Taumittellösung, sondern auch auf Stoffe, die sich vom Zementstein gelöst haben. Dazu zählen verschiedene Zusätze und Inhalte von Beton bzw. Zementstein. Somit ist bereits in einer mit Wasser gefüllten Pore der Gefrierpunkt $< 0^{\circ}\text{C}$. [9] Die gelösten Chloride in bspw. einer NaCl-Lösung haben eine weitaus stärkere Auswirkung auf die Temperatur des Gefrierpunktes. Liegt z. B. eine 23,3 M.-% NaCl Lösung vor, ist in diesem Fall ein vollständiges Gefrieren bei $-21,1^{\circ}\text{C}$ erreicht. Dies basiert auf der Tatsache, dass

bei dem Gefriervorgang der Porenflüssigkeit nur das reine Wasser gefriert und die Konzentration in der restlichen Flüssigkeit durch die zwingende Aufnahme der nun anstehenden Salzionen ansteigt. Der Gefrierpunkt sinkt demnach mit stetiger Entstehung von Eiskristallen weiter, bis die gelösten Salze wieder kristallisiert sind und diese einen geringeren Einfluss auf die Konzentration der Lösung haben. [9]

Zu einer Auswirkung durch Oberflächenkräfte kommt es in einer Struktur aus sehr kleinen Porenradien ($\ll 100$ nm), da bei kleiner werdenden Poren das Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen stark ansteigt (Oberfläche Zementsteinmatrix ca. $200 \text{ m}^2/\text{g}$). Bei Porenradien < 30 nm wird das Wasser vorstrukturiert und der Gefrierpunkt sinkt auf minus 39°C , bis in Mikrogelporen (< 1 nm) das Wasser vollständig strukturiert vorliegt und die makroskopische Eigenschaft verliert, sodass der Gefrierphasenübergang erst bei minus 90°C durchzuführen ist. Das Resultat ist, dass die Wechselwirkung zwischen Porenwasser und der Porenoberfläche mit kleiner werdenden Porenradien stetig ansteigt. [9]

Neben der zuvor genannten Gefrierpunktserniedrigung kann zusätzlich auch ein Unterkühlungseffekt zur Eisbildung in der Porenflüssigkeit führen. Unter dem Szenario, dass die Betonoberfläche eisfrei gehalten wird bzw. mit einer vollständigen Eisschicht bedeckt ist, können keine Kristallisationskeime in das Bauteil eindringen, die der Porenflüssigkeit fehlen, um Eiskristalle bilden zu können. Demnach beginnt das Wasser erst durch spontane Keimbildung bei $\ll 0^\circ\text{C}$ zu gefrieren. In diesem Fall gefriert in kurzer Zeit das Porenwasser und es besteht keine Möglichkeit, dies umzuverteilen. Der Innendruck steigt dadurch punktuell deutlich an. [9] [10]

Auf die innere Schädigung folgt durch den Frost-Tauwechsel auch die äußere Schädigung, die Abwitterung der oberflächennahen Schicht. Dort beeinflusst das Taumittel mit seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften den Zementstein, indem die Hydratphasen in ihrer Stabilität geschwächt werden. [8]

Das Modell, welches in Deutschland die höchste Beachtung findet und für die Prüftechnik einen hohen Stellenwert hat, ist die Theorie der Mikroislinsenpumpe (MELP) von M.J.SETZER. [7]

Nachfolgend sind die verschiedenen Ansätze von Schädigungsmechanismen beschrieben, die in makroskopische und mikroskopische Schadensursachen aufgeteilt werden können.

Hydraulischer Druck (Mikroskopisch)

Wie in den vorherigen Absätzen von Kapitel 1.3 bereits angedeutet, ist das Grundmodell für die innere Schädigung des Betons eine Ausdehnung der gefrierenden Porenflüssigkeit. Dieser wird für den Zementstein kritisch, wenn das noch nicht gefrorene Wasser keine Möglichkeit hat, in Hohlräume oder an die Betonoberfläche zu expandieren und die Spannung die Zugfestigkeit des Betons übersteigt. Der maßgebliche Faktor für einen Schaden durch den Hydraulischen Druck ist, wie groß die Distanz entlang der Porenkanäle ist, bis das Wasser den anstehenden Druck in einem Expansionsraum abbauen kann. [9]

Kapillar-Effekt (Mikroskopisch)

Dass nicht nur eine Expansion der Porenflüssigkeit einen Schaden erzeugen kann, sondern auch Flüssigkeiten, die beim Gefrieren kontrahieren, wurde mit dem Stoff Benzol herausgefunden, der einen sehr niedrigen Gefrierpunkt hat. [10] Aus diesen Untersuchungen ist bekannt, dass der Kapillar-Effekt als ein weiteres Phänomen vorliegen muss. Er findet in Bereichen statt, in dem eine Anzahl an Poren vorliegt, die sich wesentlich im Radius unterscheiden. Der Ablauf des Effektes ist folgendermaßen zu beschreiben. Das Porenwasser gefriert in den Kapillarporen, zeitgleich liegt in den Gelporen das Wasser in flüssiger Form vor (vgl. Kap. 1.3). Durch die Koexistenz befindet sich das Wasser und Eis in einem nicht stabilen Zustand, der auf dem ungleichen Dampfdruck und einem thermodynamischen Ungleichgewicht beruht. Damit diese physikalischen Spannungen abgebaut werden können, wandert das ungefrorene Wasser aus den Gelporen zu den Kapillarporen, in den es sich ausdehnen kann und aufgrund des abfallenden Druckes sofort gefriert. Der Druck auf den Zementstein nimmt mit der Eisentstehung in den Kapillaren zu. [10]

Des Weiteren findet der Kapillar-Effekt ebenfalls statt, wenn eine übersättigte Salzlösung vorliegt. Eine Übersättigung der Restlösung kann mit der Verdunstung oder dem Gefrieren des reinen Wassers hervorgerufen werden. Durch die hohe Anzahl an Salzionen beginnen diese zu kristallisieren, dass wie bei dem kristallisierten Eis zu einer instabilen Struktur führt. Um dem entgegenzuwirken, wandern die Salzionen aus den angrenzenden Gelporen zu den Kapillarporen. Daraus resultiert, dass der Kristallisationsdruck auf die Zementsteinmatrix ansteigt. [10]

Wirken der Mikroislinsenpumpe (MELP) (Mikroskopisch)

Die Theorie der Mikroislinsenpumpe setzt voraus, dass ein Werkstoff mit einer porösen Struktur im Nanometerbereich vorliegt, die auch im Beton zu finden ist. In einem solchen System und zusätzlichem mechanischen sowie chemischen Stabilitätskriterium kann Wasser in seinen drei Aggregatzuständen als stabile Phase vorliegen. [8]

Chemisches Stabilitätskriterium bedeutet, dass die Phasen untereinander das gleiche chemische Potential haben. Dies geschieht über einen Druckunterschied. Aufgrund der Tatsache, dass Eis i.d.R. ohne einen erwähnenswerten Druck vorliegt, wirkt in den Gelporen auf das Porenwasser ein hoher Unterdruck, der mit sinkender Temperatur steigt. Somit bleibt das Porenwasser ungefroren. [8]

Der absolut mögliche Druckunterschied in diesem System wird durch das mechanische Stabilitätskriterium angegeben. Ist dieses nicht erfüllt, findet ein Aggregatwechsel des Porenwassers statt, bei dem unter Umständen auch eine Phase übersprungen werden kann und Eis direkt zu Wasserdampf sublimiert. Neben dem Unterdruck trägt auch die Grenzflächenenergie dazu bei, dass das gesamte Porenwasser nicht mit der ersten Frostbeaufschlagung gefriert. Dieses ist der Fall, da im porösen Beton die Phase des Wassers benetzend ist und das Eis dies nicht erfüllt. Strebt das Porenwasser das Gefrieren an, muss eine Grenzflächenenergie vorliegen, sodass ein Lösen von der Matrixoberfläche stattfindet. [8]

Sinkt die Temperatur, reduziert sich zu Beginn der Krümmungsradius des Poren-Eises in Richtung des Porenwassers, wodurch der Unterdruck in den Gelporen ansteigt. Dies ist rechts unter Bild A dargestellt. Das Bild B zeigt, wie die Saugkraft des Unterdruckes die Festigkeit des Eises übersteigt und dieses in die Pore hineingezogen wird. In den Gelporen liegt weiterhin ein Wasserfilm zwischen der Mikroislinsen und der Matrixoberfläche vor. [8]

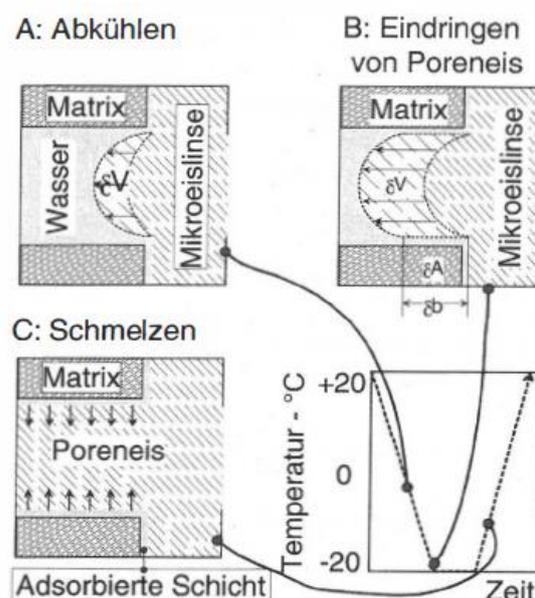


Abbildung 1 Gefrieren von Porenwasser [8]

Der Druck, der auch die Zugfestigkeit des Betons übersteigen kann, führt dazu, dass die Zementsteinmatrix nicht mehr als komplett starr gilt. Mit den sinkenden Temperaturen verlässt das Wasser die Gelporen und gefriert an dem bestehenden Eis. Kommt es mit steigenden Temperaturen zum Erwärmen des gesamten Systems, liegt eine verzögerte Rückgabe des Wassers in die wachsenden Gelporen vor, da dieses noch als Eis vorliegt. Wenn sich dort stattdessen externes Wasser befindet, nimmt der Beton es sofort auf und die Wassersättigung steigt an. [8] (vgl. Abbildung 2)

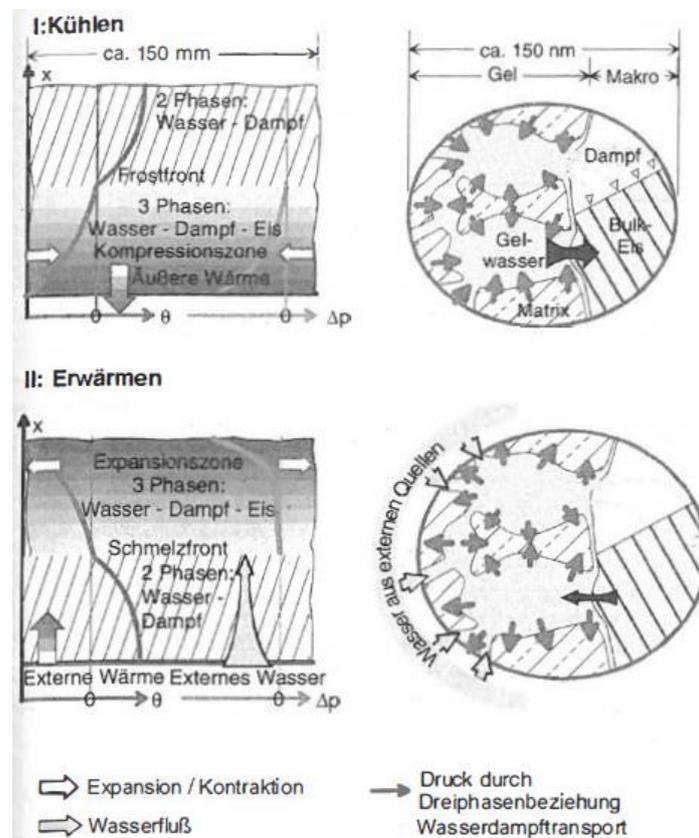


Abbildung 2 Mikroeislinnenmodell aus [8]

Ungleicher Temperatúrausdehnungskoeffizient (Makroskopisch)

Die Bestandteile von Beton, Gesteinskörnung und Zementstein besitzen in der Theorie unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten $[\alpha_T]$, die auch von äußeren Parametern abhängig sind, wie z. B. die Gesteinsart und die Feuchtigkeit der Matrix. Bei einem schnellen Abkühlen des Betonbauteiles kann es rechnerisch zu Spannungen kommen, die die Zugspannung des Betons übersteigt. Wenn die Theorie auf den Ausdehnungskoeffizienten des Eises projiziert wird, dann ist dieser gegenüber des α_T -Wertes des Zementsteines um 100 % größer. Auf dieser Basis könnte bei einer gefrorenen Porenflüssigkeit und einer Temperaturdifferenz von 15 K eine Spannung hervorgerufen werden, die der maximalen Zugspannung des Betons entspricht. [9]

Schichtweises Gefrieren (Makroskopisch)

Analog, wie die Beschreibung des Mechanismus andeutet, kann es im Betonkörper bei sinkenden Temperaturen dazu kommen, dass nicht jede Lage in derselben Geschwindigkeit gefriert und sich dadurch die Porenflüssigkeit in den einzelnen Schichten im Aggregatzustand unterscheidet. Maßgebliche Ursache dafür ist die Inhomogenität des Betons. Insbesondere in den oberflächennahen Schichten kann es zu einer Schwankung der Wassersättigung und des Taumittelgehaltes (Salzionen) kommen, sodass die Eiskristallbildung primär in wasserreichen und zugleich salzarmen Regionen des Betons stattfindet. [10] Mit diesem anliegenden Salz- und Temperaturgradienten kann laut dem Modell das Phänomen entstehen, dass der Betonkern (geringere Porosität) und die Betonrandzone (niedrigere Temperatur und ausgewaschene Poren [7]) früher gefrieren als die dazwischen liegende Schicht mit ihrem ansteigenden Taumittelgehalt. Setzt sich das Absenken der Temperatur fort, dann gefriert beim Erreichen des benötigten Gefrierpunktes ebenfalls die Zwischenschicht, die bei einer Eisdehnung auf die angrenzenden bereits gefrorenen Lagen stößt. Das Resultat können Spannungen und Absprengungen sein. [9] [10] Aufgrund der besagten Inhomogenität des Betons kann es auch ohne den Taumittelangriff zum schichtweisen Gefrieren kommen, denn die Eigenschaften des Betons zwischen Kern- und Randbeton weisen in der Regel entscheidende Unterschiede auf. [9] In der Arbeit von STARK UND WICHT [9] wird erwähnt, dass dieses Modell jedoch nicht in der Praxis realisiert wurde. Es ist aber in der Realität zu beobachten, dass dünne Schollen von der Oberfläche abwittern, die als sehr unversehrt

beschrieben werden können. Das Schadensergebnis entspricht somit dem Modell, aber der Ablauf ist nicht nachgewiesen. [9]

Temperatursturz (Makroskopisch)

Natriumchlorid wirkt als Taumittel, indem es der Umgebung Schmelzwärme entzieht. Dazu zählt die angrenzende Luftschicht oder der Betonkörper, der von diesen beiden deutlich mehr Wärme speichern und somit auch mehr abgeben kann. Dies führt dazu, dass die Temperatur im Beton abfällt. Das schockartige Gefrieren verursacht, dass langsame Spannungsableitungen und Wasserumlagerungen entstehen. [9]

Versuche von RÖSLI UND HARNIK [10] haben ergeben, dass unter Laborbedingungen durch einen Temperatursturz wenige Millimeter der Betonoberfläche betroffen sind und auch in der Praxis noch geringe Auswirkungen vorgefunden wurden. Bei unvorteilhaften Gegebenheiten besteht die Möglichkeit eines solchen Mechanismus', aber als wesentliches Schadensmodell kann es ausgeschlossen werden. [7] [9]

Wenn anstatt dem NaCl ein Calciumchlorid (CaCl_2) oder Magnesiumchlorid (MgCl_2) als Tausalz verwendet wird, ist die zusätzliche Wärmeaufnahme aus der Umgebung nicht mehr notwendig. Die Ursache liegt darin, dass diese Salze bei ihrer Reaktion Lösungswärme abgeben, die als zusätzliche Schmelzwärme dient. [9]

Cryogenic-Suction

Entwickelt wurde dieses Modell von LINDMARK [11]. Seine Theorie besagt, dass eine Aufnahme von Tausalzlösungen auch bei Temperaturen unter 0°C durchgeführt werden kann, indem eingeschlossene, ungefrorene, hochkonzentrierte „Sole-tropfen“ zu den Eislinsen transportiert werden [7].

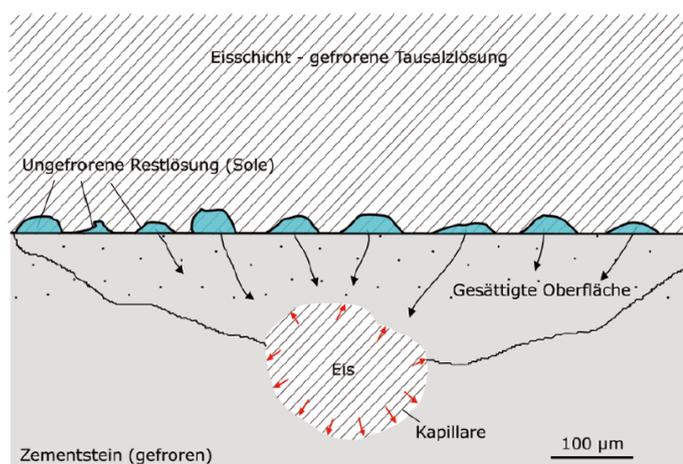


Abbildung 3 Schematische Darstellung des kryogenen Saugens [7]

Analog zu den vorherigen Modellen ist in diesem Fall die Basis, dass die Porenflüssigkeit anfangs in den Kapillarporen gefriert und die nicht gefrorene Porenlösung aus den Gelporen zu den Eislinsen diffundiert, bis das thermodynamische Gleichgewicht hergestellt ist. Wenn auf der Betonoberfläche eine Taumittelbeaufschlagung erfolgt, kann es nach dieser Theorie dazu kommen, dass sich unter der Eisschicht die genannten Sole-Einschlüsse an der Betonoberfläche bilden. Wenn bei sinkenden Temperaturen die Porenflüssigkeiten in der oberflächennahen Betonschicht gefriert, diffundieren die Restlösungen zu diesen Eislinsen und führen zu einer ansteigenden Eisdehnung in den Poren. Wird der Betonoberfläche mehr Taumittel zugeführt, dann bilden sich auch mehr ungefrorene Restlösungen auf der Betonoberfläche. Durch diese erhöhte Salzkonzentration sinkt der Gefrierpunkt in der Porenflüssigkeit, sodass das Modell erst bei wesentlich niedrigeren Temperaturen greifen könnte. [7]

Für die Belegung seiner Theorie hat LINDMARK [11] Mörtelscheiben einer Frostbeaufschlagung ausgesetzt, während diese in einer hochkonzentrierten NaCl-Lösung lagen. Dabei führt die abgestimmte Temperatur dazu, dass nur im Mörtelgefüge Eiskristalle entstehen und nicht in der anliegenden Lösung. [7] Laut LINDMARK [11] konnte das Modell durch Beobachtungen unterstützt werden, indem das Gewicht der Mörtelproben, die Luftporen enthielten, bei niedrigeren Temperaturen zunahm, was auch bei geringeren Salzkonzentrationen in den Probekörpern zu beobachten war. In den Fällen, bei denen keine künstlichen Luftporen vorlagen, zerfielen die Proben bei der genannten Temperatur und der anliegenden hohen NaCl-Konzentration. MÜLLER et al. erläutert hierzu, dass das schockartige Gefrieren ebenfalls ein möglicher Faktor ist, der zu dem Schaden beiträgt. [7]

LIU UND HANSEN [12] nahmen diese Theorie auf und fügten als zusätzliche Messstelle, neben dem Gewicht, die Längenänderung hinzu. Sie konnten nachweisen, wenn den Mörtelscheiben Feuchtigkeit zugeführt wird, dass bei anliegender Salzlösung eine Längenänderung stattfindet. Zur Verifizierung fand der gleiche Ablauf mit reinem Wasser statt (anstatt NaCl), dabei konnte keine vergleichbare Expansion festgestellt werden. [7]

MÜLLER et al. [7] beschreibt LINDMARK's Theorie als widerspruchsfreien Ansatz, wenn damit die Abwitterung beschrieben wird und sich eine notwendige Mindestmenge an Tausalz in der angreifenden Lösung befindet. Der Hintergrund, warum eine hohe Konzentration an Tausalzen die Abwitterung minimiert und besonders in der Tauphase ein Sättigungsprozess einsetzt, kann jedoch nicht genau beschrieben werden. [7]

Glue Spall

Die Technik des „glue spalling“ kommt aus der Glasherstellung und beschreibt das Bearbeiten einer Oberfläche. Dabei werden mithilfe der Sandstrahlung leichte Beschädigungen erzeugt, die zu einer rauen Oberfläche führen. Dies wird im weiteren Verfahren benötigt, damit die nachfolgende Kleberschicht eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Glas eingeht. Das erwünschte Endergebnis bei diesem Bearbeitungsschritt erfolgt in einem Ofen bei langsamem Erwärmen. Der Kleber schwindet und bricht auf, sodass einzelne Schollen entstehen. Mit fortlaufenden steigenden Temperaturen schreitet auch das Schwinden voran, sodass die Spannungen wachsen und sich die Struktur der aufgebrochenen Lage Kleber in der Glasoberfläche fortsetzt. Ein unebenes Außenbild entsteht. [13]

Nach diesem Ablauf findet auch das Modell von VALENZA UND SCHERER [14] statt, bei dem die Betonoberfläche analog zum Glas angesetzt wird und die darauf befindliche Eisschicht die Lage Kleber nachbildet. Voraussetzung ist zum einen die raue Betonoberfläche und zum anderen eine sinkende Temperatur. Spannungen und Kontraktionen entstehen, die bei den unterschiedlichen thermischen Eigenschaften in der Eisschicht ungefähr dem fünffachen des Betons entsprechen. Auf Basis der Tatsache, dass in einer Tausalzlösung (3 M.-% NaCl) Eiskristalle ohne Einbindung der Salze entstehen und Soleeinschlüsse wie im zuvor genannten Modell vorkommen, verringert sich die Festigkeit der Eisschicht. Setzt sich die sinkende Temperatur fort ($< 10^{\circ}\text{C}$), kann es zum Aufreißen der Eisschicht kommen und es besteht die Möglichkeit, dass der Riss in die Betonoberfläche übergeht, wenn die Spannung die Festigkeit der porösen Randzone übersteigt. Eine Abwitterung wäre die Folge. [7] [13] (vgl. Abbildung 4)

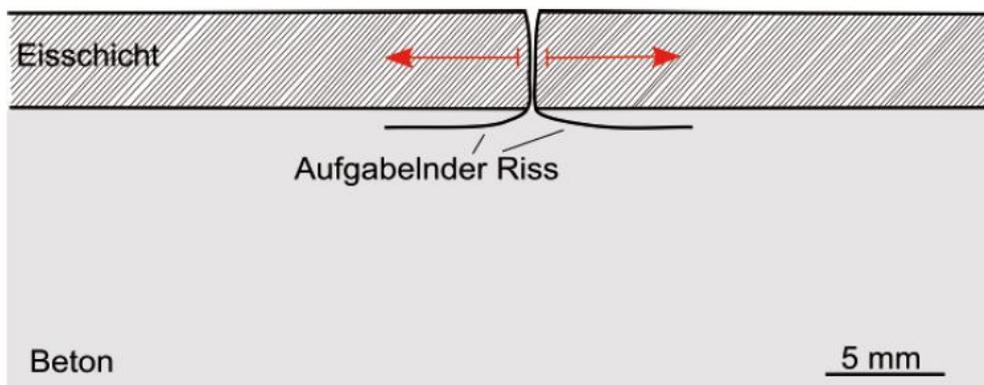


Abbildung 4 Rissfortpflanzung von einer Eisschicht in die Betonoberfläche [7]

Maßgeblich ist dieses Modell von der Konzentration der Tausalzlösung abhängig. Bekannterweise gefriert reines Wasser bei 0°C zu 100 %. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, sinkt der Lösungsanteil, der vollständig gefrieren kann, mit steigender NaCl-Konzentration. Die beiden Extrema dazu sind, dass bei reinem Wasser (0 M.-% NaCl) keine Spannungen entstehen, die die Festigkeit der Eisschicht überschreiten, wodurch ein Aufreißen nicht stattfinden kann und bei einer 6 M.-% NaCl-Lösung die Spannungen wesentlich niedriger sind, als dass sie Zwänge aufbauen, die in den Beton übertragen werden können. (vgl. Abbildung 5)

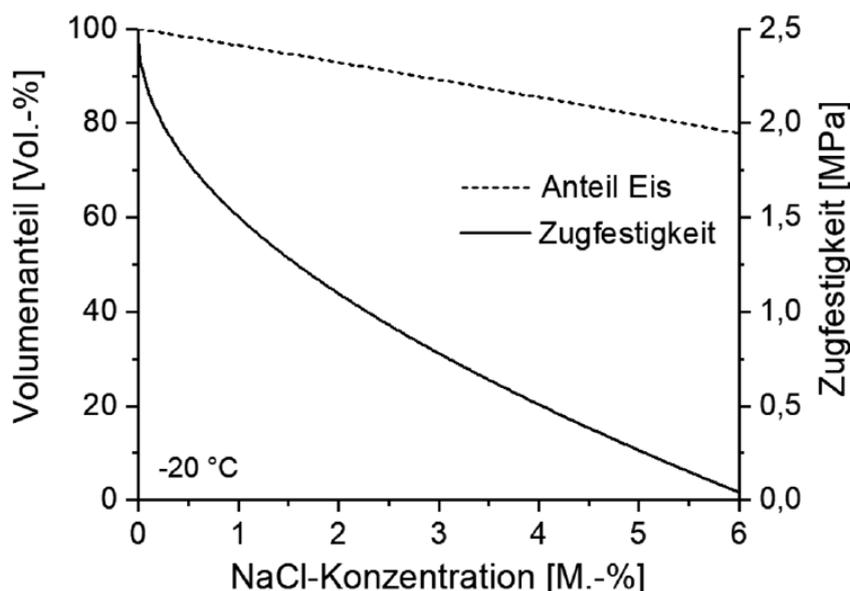


Abbildung 5 Einfluss der NaCl-Konzentration auf die berechnete (Ring)-Zugfestigkeit [7]

Der Schadensmechanismus ist maßgebend abhängig von der anliegenden Tausalzkonzentration (vgl. S.19) und somit weniger von den Chloriden, die in den Beton eindringen. Das Abwittern aus dem „Glue-Spall-Modell“ wirkt vorrangig als äußere Schädigung, sodass weitere Mechanismen mit einer möglichen inneren Schädigung parallel ablaufen und sich summieren könnten. [13]

Eine Variation des Betons mit einer höheren Anzahl an künstlichen Luftporen kann dazu führen, dass die Abwitterung nach diesem Modell verringert wird. Laut MÜLLER et al. [13] haben Berechnungen ergeben, dass bei einer Feuchteumlagerung in teilgesättigten Betonkörpern die Porenflüssigkeiten von Gel- und Kapillarporen zu den Eislinsen in den Luftporen wandern und ein Schwinden des Betons hervorgerufen wird. Die Summe aus dem Schwinden und thermischer Kontraktion führt im Beton dazu, dass sich die Differenz zu der

Längenänderung der Eisschicht verringert und anstehende Spannungen und Zwänge weniger eine Auswirkung haben. Nach MÜLLER et al. [13] kann die Spannung somit in der Theorie bis zu einem Drittel reduziert werden.

MÜLLER et al. weist in [7] und [13] darauf hin, dass die Theorie, der aus Kontraktion entstehenden Rissen, bisher nur auf Versuche am Zementstein bzw. Mörtel basiert und auf hieraus resultierenden Berechnungen. Ein bedeutendes Ergebnis dieser Theorie ist die Abhängigkeit der Eisschichtdicke in Bezug auf die Riss- und Abwitterungsintensität. In [13] konnte dieser Bezug in Versuchen mit steigender Eisdicke ebenfalls ermittelt werden. Jedoch ist in der Praxis nicht nachzuvollziehen, ob das „Glue-Spall-Phänomen“ oder andere Modelle die Ursache dafür sind. Auch in der theoretischen Betrachtung kann ein anderes Modell ebenfalls möglich sein.

MÜLLER et al. [7] schätzt diese Theorie, aufgrund der Alleinstellung im Bezug zu anderen Modellen und den fehlenden Ergebnissen aus der Realität, als kritisch ein. Dass auch ein homogener Eiskörper vorliegen muss, sodass die Zugfestigkeit nicht durch Lufteinschlüsse beeinträchtigt wird, kann ein Grund sein, dass hauptsächlich die im Labor untersuchten Probekörper Hinweise auf das Wirken dieser Theorie beisteuern.

Brine-Rejection

Analog zu den vorherigen Modellen und Theorien kommt es in den mit Tausalz beaufschlagten Flüssigkeiten zu den Abläufen, dass das Wasser gefriert und die Tausalzkonzentration in den Soleeinschlüssen ansteigt. Soleabsonderungen (Brine-Rejection) entstehen im gesamten Eiskörper und sind zu Beginn miteinander verbunden. Schreitet das Gefrieren der Lösung fort, steigt das Volumen des Eises an und die Solelinsen liegen getrennt voneinander vor. Mithilfe eines Druckunterschiedes werden die Soleneinschlüsse laut YENER [15] bei der Annahme einer einaxialen Abkühlung in Richtung der wärmeren Betonoberfläche transportiert. In Abbildung 6 ist bildlich dargestellt, dass die Soleeinschlüsse in der Kontaktzone zwischen Eis und Beton einen Verbund der rauen Oberfläche mit der Eisschicht lokal nicht ermöglichen. [7] [15]

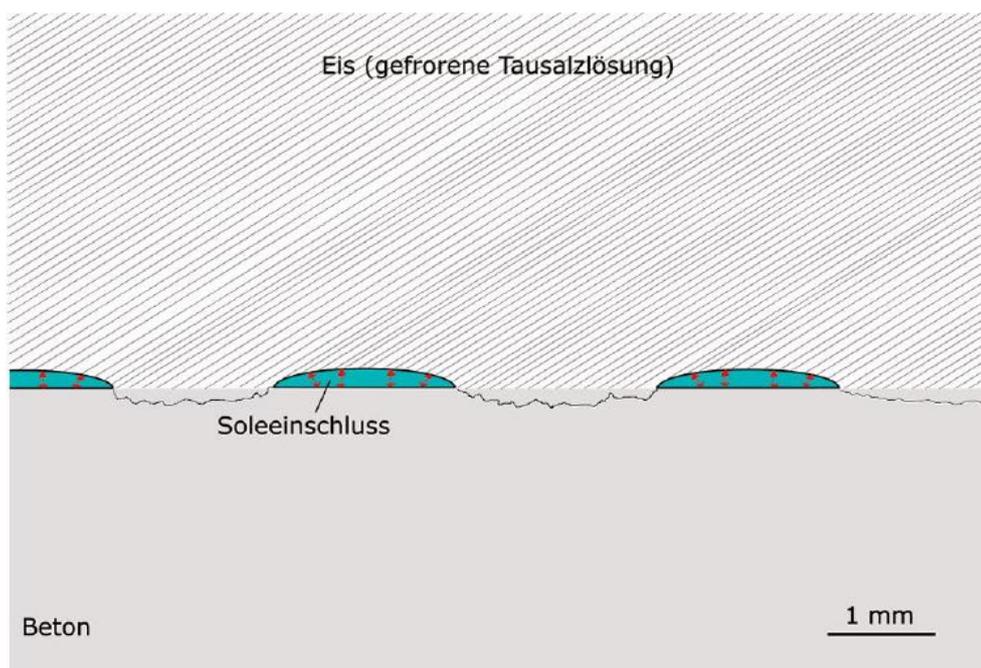


Abbildung 6 Schematische Darstellung des Brine-Rejection-Mechanismus [7]

Das Szenario stellt kein Problem dar, wenn die Betonoberfläche nicht vollständig gesättigt ist und die Lösung vom Betonkörper aufgenommen werden kann. Liegt stattdessen ein hoher Sättigungsgrad vor, z. B. aufgrund einer Vielzahl an Frost-Tauwechseln, verbleiben die Soleeinschlüsse in der Übergangszone von Eisschicht zu Beton. Mit sinkenden Temperaturen kommt es dazu, dass der Eiskörper sein Volumen vergrößert und die Verzahnung an der unebenen Betonoberfläche durch die Eisdehnung in der Kontaktzone fortschreitet, sodass ein hydraulischer Druck in den Solelinsen entstehen kann. Wenn die Randbedingungen es

zulassen, ist die Theorie, dass sich ein hoher Druck entwickelt, der die Eisschicht von der Betonoberfläche abdrückt. Zur Abwitterung kommt es in den haftenden Zonen zwischen Eis und Zementstein, sobald die Festigkeit der Verzahnung größer als die des Betons ist. [7] [15]

Die Randbedingungen bzw. das Pessimum ist laut YENER [15] eine mittlere Tausalzkonzentration. Je mehr Chloride sich in einer Lösung befinden, desto mehr Einschlüsse entstehen. Der Eiskörper wird zu einem porösen Medium, bzw. die ungefrorenen Restlösungen können einfacher entweichen. Liegt eine wesentlich geringere Konzentration vor, ist die Masse an flüssigen Soleeinschlüssen zu gering, um eine signifikante Spannung aus dem hydraulischen Druck hervorzurufen, die einen solchen Schadensmechanismus auslöst. [7]

MÜLLER et al. [7] schreibt dazu, dass die Wanderung von ungefrorenen Restlösungen von verschiedenen Wissenschaftler: innen in Versuchen eine Bestätigung fand. Dass hingegen eine Abwitterung aus einer Art Haftzug entsteht, basiert nur auf theoretischen Grundlagen. Somit schätzt MÜLLER et al. [7] diese Theorie vorbehaltlich als ungeeignet ein.

2. STAND DER FEM-MODELLIERUNG

Die Auswahl an bereits vorhandenen numerischen Modellen, die die Diffusion von Chloriden beinhalten und zusätzlich den Frost-Tau-Einfluss bzw. eine Schädigung daraus ansetzen, ist in der Literaturstudie als sehr gering angesehen worden. Es ist eine gewisse Anzahl in FEM-Modellen nachgebildeten Migrationsversuchen zu finden, aber ohne eine angesetzte Vorschädigung, wie z. B. durch Frost-Tau-Wechsel.

In Bezug auf Zweischichtsysteme beschreibt CELEBI [16] in seiner Dissertation, dass es einige Modelle zum diffusionsgesteuerten Chlorideindringvorgang gibt, die unter der Annahme eines reinen diffusionsgesteuerten Transportes der anliegenden Konzentrationen durchgeführt werden. CELEBI betrachtet für eine Chloridumverteilung die oberflächenbeschichteten Betonprobekörper als abgeschlossenes System. Die numerische Modellierung des Zweischichtsystems als Migrationsversuch (RCM) beruht auf dem Ziel den Migrationskoeffizienten des reinen Betonkerns und der jeweiligen Oberflächenbeschichtung (OS) zu bestimmen, ohne den Einfluss der OS. Für die erste Gegenüberstellung hat CELEBI ein homogenes Einschichtsystem implementiert und die im RCM-Versuch bestimmten Migrationskoeffizienten als Eingangsparameter verwendet. Aus der FEM-Modellierung ergibt sich eine Abweichung zwischen simulierter und gemessener Eindringtiefe von 11 bis 20 %, so dass die numerischen Ergebnisse eher überschätzt werden. [16] Um die einzelnen Migrationskoeffizienten zu bestimmen, hat CELEBI das Zweischichtsystem in einem FEM-Modell erzeugt und den Schichten als Eingangswert unterschiedliche Migrationskoeffizienten zugewiesen, wobei derjenige für die OS-Beschichtung iteriert wird, bis die im Versuch gemessene Eindringtiefe als simuliertes Ergebnis vorliegt. Mit den ermittelten Parametern der Oberflächenbeschichtung können rückwirkend die Migrationskoeffizienten zu den jeweiligen Betonkörpern bestimmt werden, die sich in der Wassersättigung unterschieden haben. [16]

Bei einem Frost-Tau-Wechsel ist das Ergebnis, dass Abwitterungen und Mikrorisse in der Randzone des Zementsteines entstehen. Diese Strukturänderung kann nachgebildet werden, indem die Porosität in dieser Schicht variiert oder der Randparameter der Diffusion bzw. Konvektion angepasst wird. WANG et al. untersucht in [17] einen bereits aufgerissenen Betonkörper mit verschiedenen Riss-Geometrien. Hierzu zählt z. B. ein konisch zulaufender oder ein sinuskurvenverlaufender Riss mit einer unterschiedlichen Anzahl an Perioden und einer variierende Amplitudenhöhe oder versetzte Strukturen mit stufigem Rand. Im FEM-Modell sind diese Geometrien in einem homogenen Querschnitt nachgestellt und als anliegende Flüssigkeit wird eine mit 0,555 mol/l konzentrierte Chloridlösung implementiert. [17] (s. Abbildung 7)

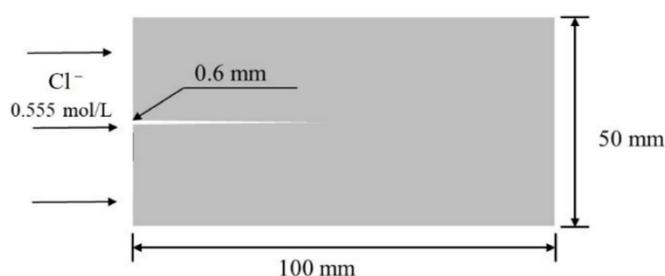


Abbildung 7 Darstellung der Geometrie im FEM-Modell für die Simulation der non-steady-state Chlorid Diffusion im gerissenen Beton [17]

Das Ziel der Arbeit von WANG et al. [17] ist die Bestimmung des Verhältnisses zwischen Rissbreite bzw. Risstiefe zum punktuellen Chlorideindringen. Es ist beschrieben, dass die Breite des Risses maßgeblich die Chloriddiffusion beeinflusst, wenn sich dieser zwischen dem unteren und oberen Schwellenwert befindet. Außerhalb dieser Schwellenwerte wirken andere Parameter deutlich mehr auf das Chlorideindringen ein als die Rissbreite. Mit der Berechnung im FEM-Programm ist in einer „Heatmap“ die Konzentrationsausbreitung entlang des Risses visualisiert worden. [17] (vgl. Abbildung 8)

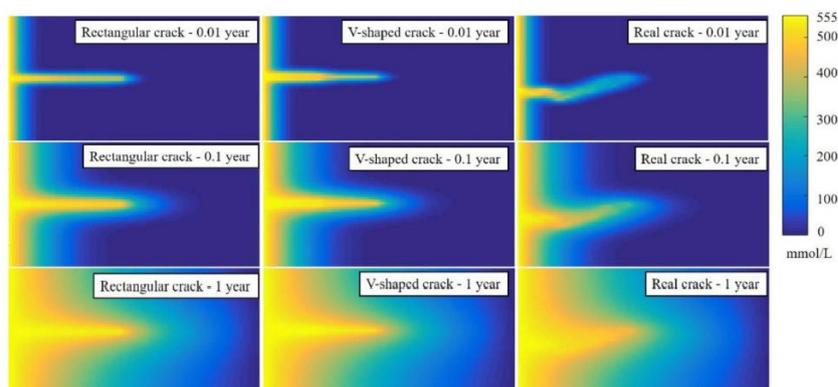


Abbildung 8 Chloridkonzentrationsverteilung in Beton mit unterschiedlichen Rissgeometrien [17]

Eine weitere FEM-Berechnung hat JIANG et al. [18] auf Basis von Frost-Tau-Wechseln mit dem Ziel durchgeführt, die Eindringtiefe der Chloridionen mit realen Laborversuchen zu vergleichen. Als Modell wird ein 3-Phasen mesoskopisches System gewählt. (s. Abbildung 10)

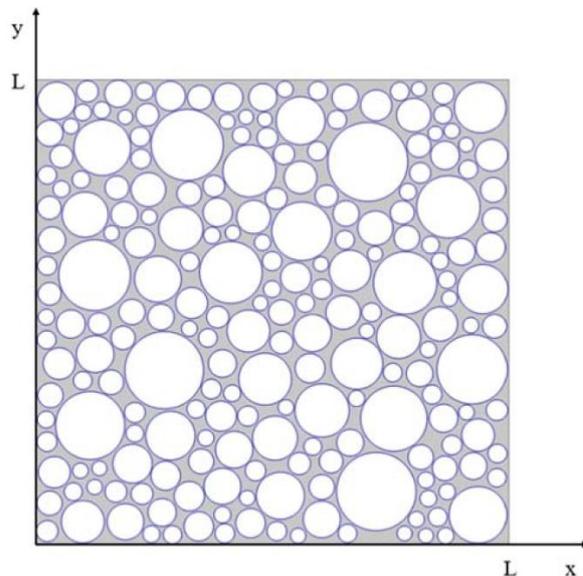


Abbildung 10 Geometrie des 3-Phasen mesoskopischen Betonkörpers

Unter den 3-Phasen ist die Zusammenstellung des Modells aus dem Zementstein, der Gesteinskörnung und der Randzone der impermeablen Zonen (ITZ) zu verstehen. Die Masse der Gesteinskörnung entspricht in diesem Modell 70 % des Gesamtvolumens und ist numerisch erzeugt. Als Verhältnis des Diffusionskoeffizienten der ITZ zum Zementstein ist $D_{ITZ}/D_{cp} = 3$ angesetzt. Laut JIANG et al. [18] zeigen Studien, dass das besagte Verhältnis zwischen den Werten 2 und 15 schwanken kann. Analog zu den anderen

Beispielen ist ebenfalls eine 3 %-NaCl Lösung angelegt (hier mit 520 mol/m^3). Für die Beachtung eines Frost-Tau-Wechsels setzte JIANG et al. einen zeitabhängigen Temperaturverlauf an, der in einer Zeit von 12 h von $+10^\circ\text{C}$ auf -20°C einen Frostprozess und anschließend in 12 h von -20°C auf $+10^\circ\text{C}$ einen Tauprozesse im FEM-Modell nachbildet. Der Ausgangspunkt aus den Laborversuchen ist, dass die Probekörper 100 Tage der Diffusion ausgesetzt

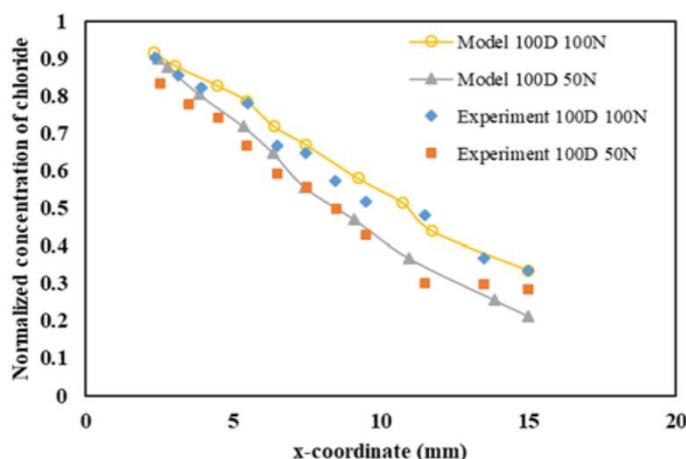


Abbildung 9 Vergleich von experimentellen Probekörpern zu numerisch erzeugten Ergebnissen [18]

waren. Dabei wurde zwischen der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln unterschieden. Ein Teil der Betonkörper erfuhr 50 und der andere Teil 100 Frost-Tau-Wechsel. Bei der Gegenüberstellung der realen und simulierten Eindringtiefen konnte JIANG et al. abschließend eine gute Abbildung der Laborversuche mit dem FEM-Modell feststellen.

3. ABLAUF DER ZUGEHÖRIGEN LABORVERSUCHE

3.1 CDF-Verfahren

Bei der Frostbeanspruchung sind zwei Testverfahren zu unterscheiden. Der CIF-Test behandelt den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel mit demineralisiertem Wasser und steht für "Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test". Hingegen läuft das Verfahren beim CDF-Test mit einer Tausalzlösung als Prüfflüssigkeit ab. Die Abkürzung steht für "Capillary suction of De-icing chemicals and Freeze-thaw test". Beide Verfahren erhalten als Ergebnis die Masse der Abwitterung, die als Materialverlust der Oberfläche nach jedem Zyklus zu bestimmen ist. Ein Frost-Tau-Wechselzyklus dauert 12 Stunden und verläuft von +20°C bis -20°C. (s. Abbildung 11) Für die Simulation der FTW sind in der Regel 28 Zyklen (14 Tage) notwendig. [19]

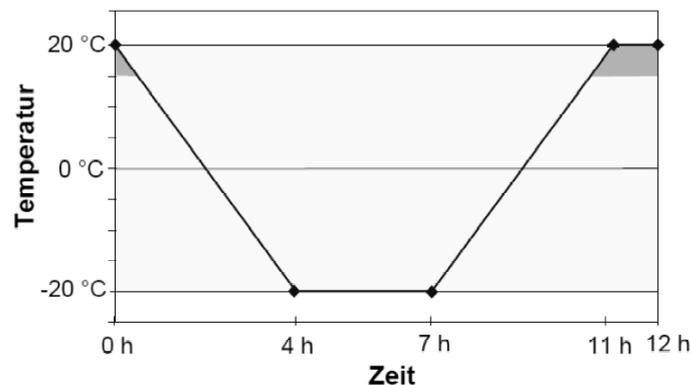


Abbildung 11 Temperaturzyklus – CDF-Verfahren [19]
Grau = Durchführung der Messungen

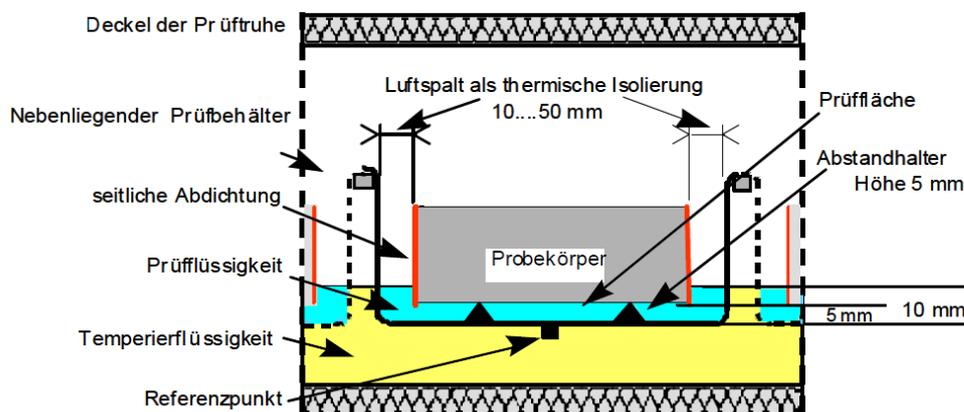


Abbildung 12 Prüfbehälter beim CDF- bzw. CIF-Verfahren [19]

Der Test läuft in einer isolierten Prüfruhe ab, die zum Teil mit einer Temperierflüssigkeit gefüllt ist. Diese wird dem Zyklus folgend erwärmt bzw. abkühlt. Der Aufbau, wie er in Abbildung 12 zu erkennen ist, liegt in der Prüfruhe wiederkehrend vor, sodass mehrere Probekörper einer Charge gleichzeitig dem Frost-Tauwechsel ausgesetzt sind. [19]

Ausschlaggebend für einen aussagekräftigen Testlauf ist, dass die Probekörper nach der Herstellung den Vorschriften entsprechend nachbehandelt werden und in den ersten sieben Tagen eine Wasserlagerung vorliegt. Bis zum 28. Tag ist laut dem BAW-Merkblatt eine Trockenlagerung im Klimaraum vorgesehen, bevor eine Vorsättigung der PK durch kapillares Saugen durchzuführen ist. Sollte ein Start der Vorsättigung erst nach 56 Tagen möglich sein, sind die Zeiträume für die Wasser- und Trockenlagerung zu verdoppeln. [19]

Die Prüfflüssigkeit besteht für die Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstands beim Vorsättigen sowie auch in der Prüfruhe aus einer 3 %igen NaCl-Lösung. Die Ursache für die Wahl dieser Prüfflüssigkeit basiert auf den Untersuchungen von VERBECK UND KLIEGER und auf dem beschriebenen Phänomen von ARNFELT aus dem Jahr 1943. [7] Diese besagen, wie in der schematischen Darstellung in Abbildung 13 zu erkennen, dass die maximale Abwitterung bei einer Tausalzkonzentration von etwa 2 bis 4 M.-% zu verzeichnen ist. Untersuchungen aus den letzten beiden Jahrzehnten setzten das Pessimum vielmehr bei 0,5 bis 1,5 M.-% an, wobei es für die Ursache des Pessimums in diesen Konzentrationsbereichen noch keine Erklärung gibt. [7]

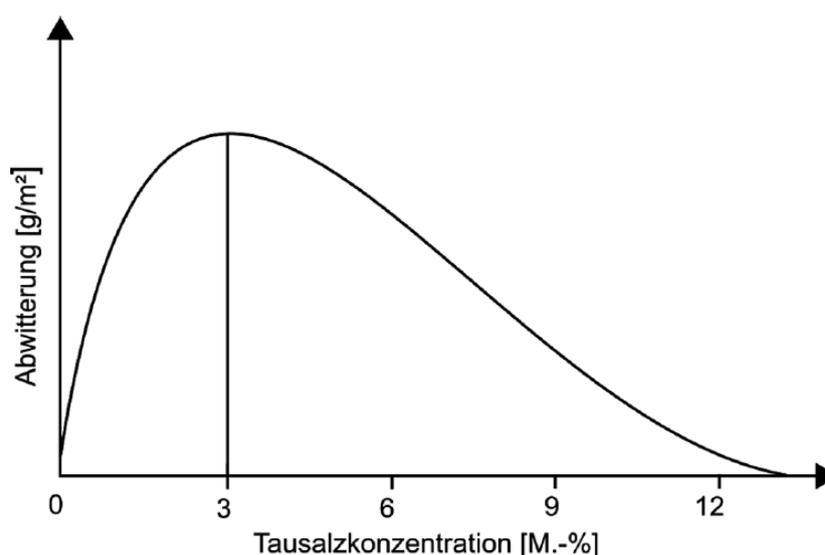


Abbildung 13 Abwitterungsintensität als schematische Darstellung [7]

Für die Ermittlung der Messergebnisse ist nach jedem vierten bis maximal jedem sechsten Frost-Tau-Wechsel eine Messfolge durchzuführen. Dabei ist zu beachten, wie in Abbildung 11 beschrieben, dass die Entnahme der Probekörper immer im Temperaturbereich von $> 15^{\circ}\text{C}$ geschieht. Der Ablauf einer Messfolge (Abbildung 15) besteht aus der Bestimmung der Oberflächenabwitterung, der Flüssigkeitsaufnahme durch die Differenz aus den Massen (vorher und nachher) und der Messung der Ultraschalllaufzeit. [19]

In einem Ultraschallbad wird das Material vom Probekörper entfernt, welches sich bei der Abwitterung noch nicht vollständig vom Probekörper gelöst hat. Das zusammenkommende Material wird anschließend gefiltert und gewogen. Durch das Wiegen des Probekörpers kann zusammen mit den vorherigen ermittelten Massen die Flüssigkeitsaufnahme bestimmt werden. Um die innere Schädigung abzuleiten, gibt das BAW-Merkblatt vor, die Ultraschalllaufzeit durch den Probekörper zu messen. [19] Der Messaufbau ist hierzu der nachstehenden Abbildung zu entnehmen.

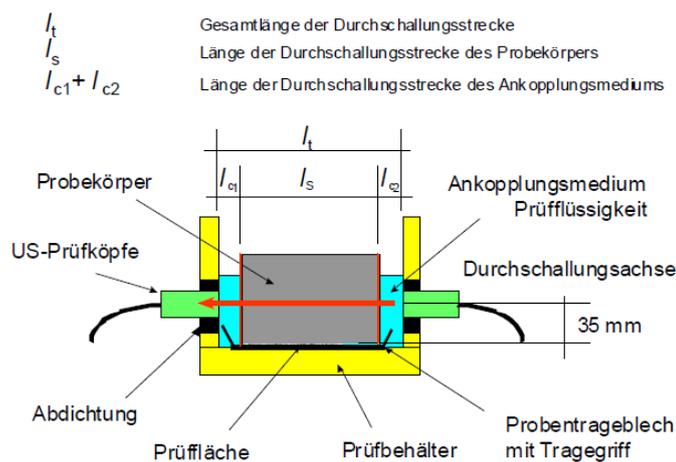


Abbildung 14 Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit [19]

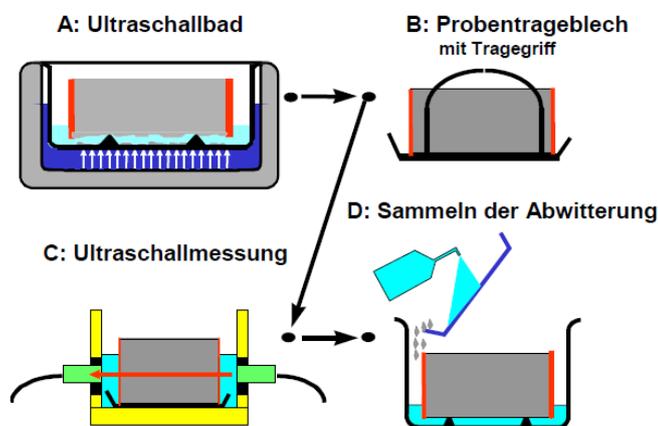


Abbildung 15 Messabfolge mit Ultraschalllaufzeit [19]

3.2 RCM-Verfahren

Das Rapid-Chlorid-Migration (RCM) Verfahren beruht auf dem mit einem Stromfluss angeregtem Eindringen von Chloriden in einen Probekörper. Wie in Abbildung 16 zu erkennen, ist der Probekörper in einem Gummischlauch eingespannt, sodass die Verbindung zwischen Anode und Kathode lediglich durch den Beton ermöglicht wird. Für das Konzentrationsgefälle ist die Kaliumhydroxidlösung im Bereich der Kathode mit 10 % Natriumchlorid angereichert. Die schräge Lage des Versuchsaufbaus dient dazu, dass kein Luftpolster an dem Probekörper entsteht. Die im Normalfall 28 Tage alten Probekörper sind in die Migrationszelle eingespannt und werden anschließend den Lösungen ausgesetzt. Die Anfangsspannung sollte bei 30 Volt liegen. Eine Bezugstabelle (vgl. [20]) gibt an, bei welcher anfänglichen Stromstärke [mA] die Prüfspannung anzupassen ist. Die Versuchsdauer beträgt in der Regel 24 bis 48 h, dafür ist vorausgesetzt, dass mindestens 10 mA vorliegen. Ist diese Stromstärke nicht erreicht, verlängert sich die Dauer des Versuches. [20]

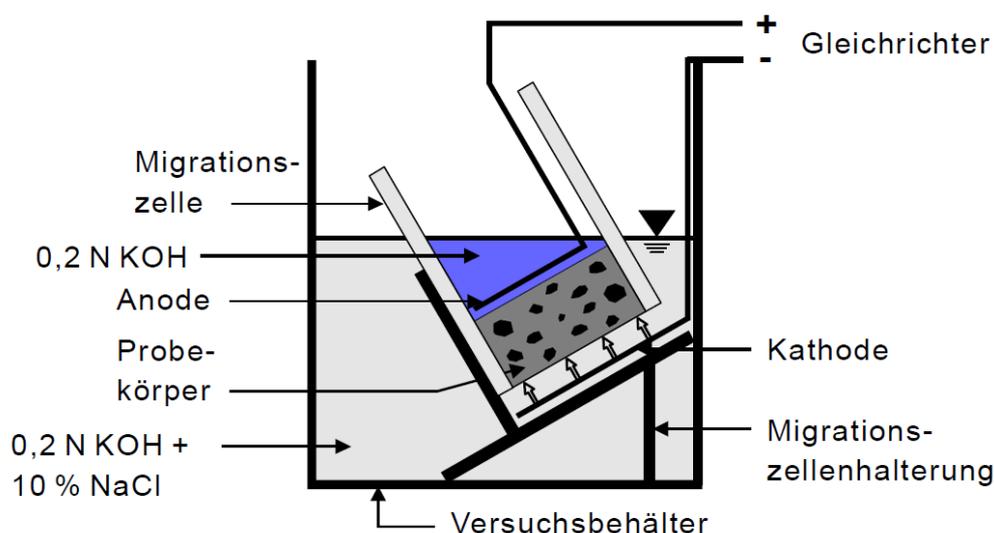


Abbildung 16 Prinzip-Skizze des Migrationsapparates [20]

Nach der Beendigung des Verfahrens sind die Betonzylinder herauszunehmen, zu reinigen und anschließend mittig zu spalten. Durch das Auftragen einer Indikatorlösung, wie z.B. Silbernitrat, bildet sich in den Bereichen mit einer Chloridkonzentration von $>0,07 \text{ mol/l}$ Silberchlorid, das als eine helle Verfärbung auf der Bruchfläche zu erkennen ist. [20]

Für die Auswertung sind die Eindringtiefen im Abstand von 10 mm zu messen und als arithmetischer Mittelwert anzugeben. Der Chloridmigrationskoeffizient kann dann wie folgt berechnet werden: [20]

$$D_{RCM} = \frac{R \cdot T \cdot h}{z \cdot F \cdot E} \cdot \frac{x_d - a \cdot \sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

$$\alpha = 2 * \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot h}{z \cdot F \cdot E}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0} \right) \quad (2)$$

$$E = \frac{U - 2}{h} \quad (3)$$

D_{RCM}	Chloridmigrationskoeffizient [m^2/s]
z	Ladungszahl für Chlorid $z = 1$
F	Faradaykonstante $F = 9.648 \cdot 10^4$ [$\text{J}/(\text{V} \cdot \text{mol})$] → Naturkonstante (Beruhend auf der elektrischen Ladung pro Stoffmenge bei der Elektrolyse)
R	Universelle Gaskonstante $R = 8,314$ [$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$]
U	Angelegte Spannung [V]
E	Angelegte Spannung / Prüfkörperhöhe [V/m]
T	Durchschnittstemperatur der Anodenlösung [K]
h	Höhe des Prüfkörpers [m]
x_d	Mittelwert der Eindringtiefen [m]
t	Prüfdauer [s]
erf^{-1}	Inverse Fehlerfunktion
c_d	Chloridkonzentration bei der die Indikatorlösung einen Farbumschlag verursacht, $c_d \approx 0,07 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$
c_0	Chloridkonzentration in der chloridhaltigen Lösung, $c_0 \approx 2 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$

3.3 Ersatz von NaCl durch NaBr

Aufgrund der parallelen Ausführung der beiden Verfahren (CDF und RCM) kann nicht dieselbe Salzlösung verwendet werden. Als vergleichbar ist für Natriumchlorid (NaCl) ein Natriumbromid (NaBr) zu nennen. Durch diesen Austausch der Prüflösung kann unterschieden werden, welche Salze von welchem Verfahren in den Probekörper hineingetrieben wurden. Der Indikator Silbernitrat (AgNO_3) bildet mit den Chloriden ein Silberchlorid (AgCl) und mit den Bromiden ein Silberbromid (AgBr). Beide dieser Verbindungen erscheinen auf der Prüffläche als helle Verfärbung, sodass mit dem menschlichen Auge kein Unterschied zu erkennen ist. Für die exakte Bestimmung der Eindringtiefen ist die Laser Induzierten Break-down Spektroskopie (LIBS) zu verwenden. Dieses zerstörungsfreie Messverfahren, dass mit einer optischen Signalerzeugung durch einen Laserstrahl arbeitet, kann die exakte Konzentration eines Stoffes bestimmen. Dazu muss das dem untersuchten Stoff zugehörige Lichtspektrum eingepflegt und das LIBS-Gerät kalibriert werden. Nachfolgend sind die Unterschiede der beiden Salze gelistet.

Natriumbromid [21] :

Molare Masse:	102,89 g / mol
Dichte:	3,20 g / cm ³ bei 20°C
Löslichkeit:	905 g / l bei 20°C in Wasser
Freier Diffusionskoeffizient Brom:	$2,01 \cdot 10^{-9}$ m ² / s

Natriumchlorid [22] :

Molare Masse:	58,44 g / mol
Dichte:	2,17 g / cm ³ bei 20°C
Löslichkeit:	358 g / l bei 20°C in Wasser
Freier Diffusionskoeffizient Chlor:	$2,03 \cdot 10^{-9}$ m ² / s

Die Überprüfung der Austauschbarkeit hat in einer breiten Studie des Fachbereiches (Baustoffe HCU) ergeben, dass die Ergebnisse im Mittel identisch sind und für die Forschungsfrage ein Wechsel der Salzlösung im Migrationsversuch von NaCl zu NaBr möglich ist.

4. FRAGESTELLUNG & VORGEHENSWEISE DER MODELLIERUNG

Mit dem Hintergrund, die Realität aus dem Labor mit Parametern und Ansätzen in einer numerischen Berechnung und Darstellung so exakt wie möglich abzubilden, besteht die Fragestellung in dieser Arbeit vielmehr aus dem Ansatz, wie genau die Realität aus einem Muster der Eigenschaften abgebildet werden kann. Dies beruht auf variierende, dem Probekörper zugeschriebene Parameter, die auf den Ergebnissen der Labor-Untersuchungen beruhen und weniger einer individuellen Anpassung entsprechen.

Als FEM-Programm wird die Software COMSOL-Multiphysics verwendet. Der Hersteller COMSOL betitelt sein Produkt als Simulationsplattform, die sämtliche Schritte des Modellierungsworkflows umfasst. Geometrien können definiert sowie Materialeigenschaften und deren physikalischen Zusammenhänge implementiert werden. Das Besondere an dieser Software ist die Möglichkeit, physikalische Gesetze zu koppeln, wie z. B. der diffusive Ionentransport mit einer elektrischen Spannung oder einem Wärmefluss.

Die Vorgehensweise entsprach einem Herantasten an die Wirklichkeit, indem Eigenschaften und Zusammensetzungen von dem Zementstein bzw. dem Bindemittel nacheinander in das FEM-Modell eingepflegt wurden. Anfänglich noch mit einer homogenen Probekörperstruktur und nach erwartungsvollen Ergebnissen anschließend mit einer berechnungsintensiveren Implementierung der Gesteinskörnung. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus vorangegangenen Arbeiten und Untersuchungen des Fachbereiches Baustoffe der Hafen-City Uni. Zur Verdeutlichung ist der Ablauf der Datenerhebung nachfolgend kurz erläutert.

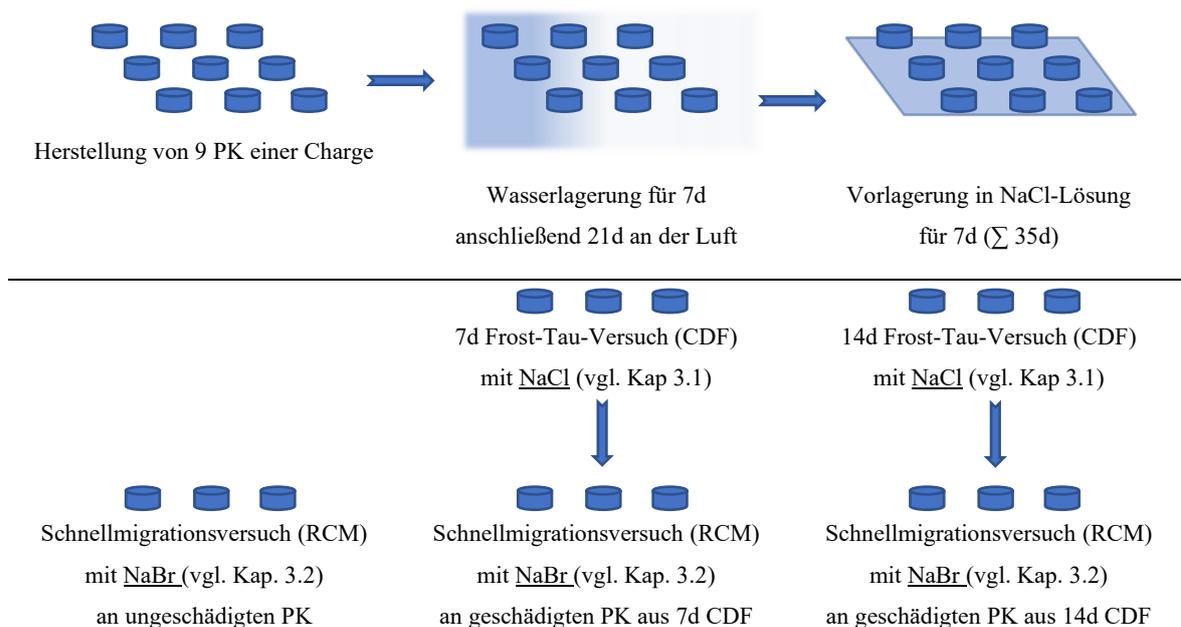


Abbildung 17 Ablauf der Datenerhebung im Zuge der Laboruntersuchungen

5. FEM-MODELLIERUNG

5.1 Modellierung des CDF-Verfahrens

Für die Modellierung der Ergebnisse aus dem CDF-Verfahren ist im Programm COMSOL-Multiphysics (Version 5.6) die Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ gewählt worden. Um diese gemäß den Parametern aus der Realität zu verwenden, ist eine Implementierung der Probekörper-Eigenschaften vorzunehmen. Maßgebliche Eingaben sind die Faktoren für die späteren Berechnungen sowie die bereits in der globalen Definition zu bestimmenden Porosität und dem dazugehörigen Hydratationsgrad.

5.1.1 Geometrie

Die Geometrie ist die Basis der Berechnung. Abweichend zu der Arbeit von CELEBI [16] wird kein homogener Querschnitt gewählt, sondern eine geometrisch angesetzte Gesteinskörnung implementiert, die die Eigenschaft der Verwindung und die verlangsamte Eindringgeschwindigkeit im Modell abbildet. Hierzu wird auf die Bachelorarbeit von ROKOß [23] zurückgegriffen, in der eine numerisch ermittelte Gesteinskörnungszusammensetzung über den „Application-Builder“ von COMSOL auf Basis der Sieblinie A/B-16 erzeugt wurde.

Aufgrund der einseitigen Beaufschlagung der NaCl-Lösung (vgl. Abschnitt 3.1) ist die Eindringrichtung des Chlorides als Normale zur beaufschlagten Fläche anzusehen, sodass das Modell als zweidimensionale Ansicht erstellt werden kann.

In dem Skript von ROKOß [23] sind für die Bestimmung der GK-Geometrie Annahmen getätigt, auf dessen Basis die Verteilung stattfindet. Dazu zählt, dass eine zufällige Verteilung hinreichend genau einen Ausschnitt aus der Realität abbildet. Des Weiteren wird angenommen, dass im zweidimensionalen Raum die Gesteinskörnung als Kreise angesetzt werden können und dass der bestimmte Volumenanteil dem Flächenanteil aller „GK-Kreise“ im betrachteten Ausschnitt entspricht. Der Aufbau erfolgte nach einem Ablauf, bei dem nacheinander die „GK-Kreise“, beginnend mit der Korngruppe 8/16, mit einem zufälligen Radius erzeugt und der passenden Korngröße zugeordnet werden, bis der prozentuale Anteil gemäß der Sieblinie A/B-16 erreicht ist. Letztere Bedingung ist, dass sich keine Kreise überlagern und nicht nur zum Teil im betrachteten Ausschnitt vorliegen dürfen. Im Gegensatz zu der Arbeit von ROKOß [23] ist in dieser Ausarbeitung die Betrachtung der möglichen Eigenschaften der „Interfacial Transition Zone“ (ITZ) entfallen. Aufgrund der übernommenen

Geometrie sind diese dennoch in der Struktur zu erkennen, erfahren jedoch dieselben Eigenschaften wie der Zementstein. (vgl. Abbildung 18)

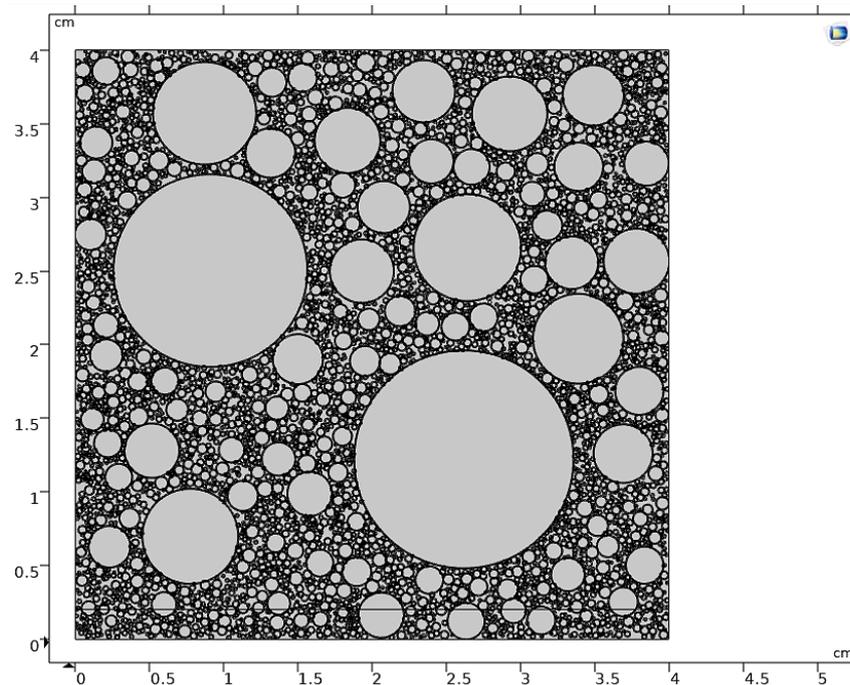


Abbildung 18 COMSOL - Geometrie auf Basis der zufälligen Erzeugung (Skript Rokoß [23])

5.1.2 Transport verdünnter Spezies in porösen Medien

Die Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ wird verwendet, wenn eine Spezies mit einer beschriebenen Konzentration im freien oder durch ein poröses Medium zu transportieren ist. Der Unterschied zu der Schnittstelle „Transport verdünnter Spezies“ aus vorherigen COMSOL-Versionen besteht darin, dass bereits die poröse Ausführung als Einstellung festgelegt ist. Maßgeblich können mit dieser Komponente Modelle nachgebildet werden, in dem sich die Spezies hauptsächlich in einem Fluid entlang von Poren durch ein festes poröses Medium bewegt. Diese können als gesättigt oder ungesättigt gewählt werden. Eigenschaften wie Adsorption, Verflüchtigung, Dispersion, Diffusion, Migration und Konvektion sind zusätzliche Auswahlrubriken. [24]

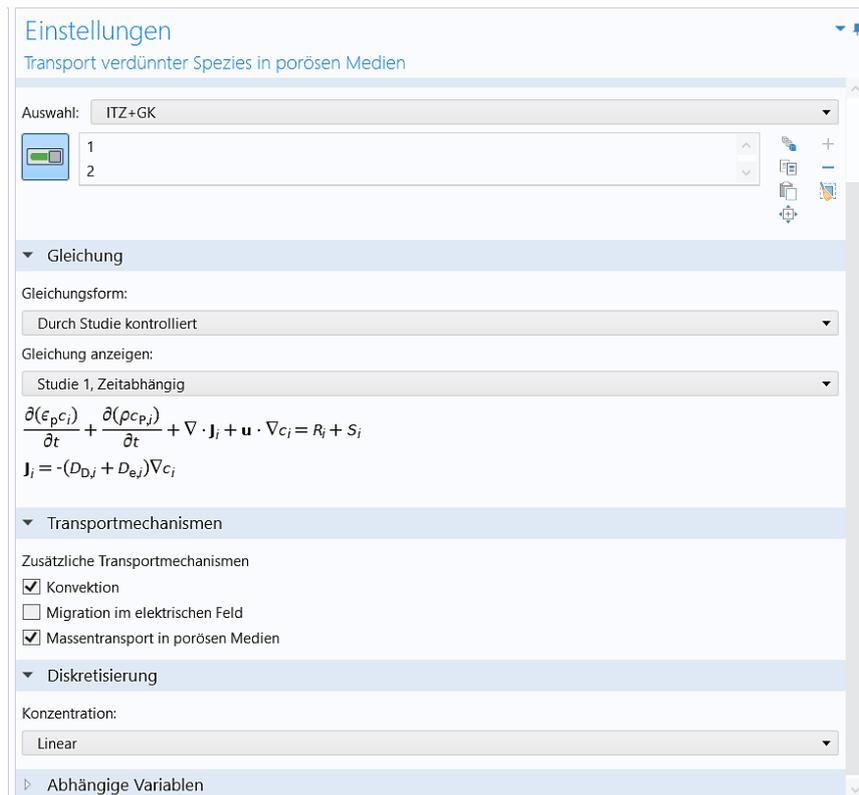


Abbildung 19 COMSOL - Einstellung zur Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (CDF)

Grundformel der Komponente:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i = R_i + S_i \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_i = -(D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i \quad (5)$$

Diese zeitabhängige Formel beinhaltet vorerst keine Transportmechanismen, sondern nur den Gradienten $[\nabla]$ der Konzentration der Spezies c_i $[\text{mol}/\text{m}^3]$, die Divergenz des Vektorfeldes $[\nabla \cdot]$ der Teilchenstromdichte \mathbf{J}_i $[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ sowie die Chemischen Reaktionen und Reaktionsgeschwindigkeiten der Spezies R_i und S_i $[\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$. Mit D_e $[\text{m}^2/\text{s}]$ wirkt der spätere effektive Diffusionskoeffizient mit ein. Des Weiteren ist D_D $[\text{m}^2/\text{s}]$ als Koeffizient für die Tensor-Dispersion im dreidimensionalen Raum bestimmt, die im Verlauf dieser Arbeit keine weitere Betrachtung findet. Sind der Komponente die Transportmechanismen „Konvektion“ und „Massentransport in porösen Medien“ hinzugefügt, dann erweitert sich die Gleichung mit folgendem **Summanden**.

$$\frac{\partial(\varepsilon_p c_i)}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i + S_i \quad (6)$$

ε_p gibt die Porosität als einheitslosen Faktor an und u die Konvektion in Form eines Geschwindigkeitsfeldes. Als eine weitere Anpassung der Grundgleichung ist in dieser Arbeit das Wirken der zeitabhängigen Adsorption zusätzlich mit angesetzt, sodass die Adsorptionisotherme $c_{p,c}$ [mol/kg] die Gleichung (6) ergänzt. (vgl. Abbildung 19)

$$\frac{\partial(\varepsilon_p c_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_{p,i})}{\partial t} + \nabla \cdot J_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i + S_i \quad (7)$$

Als Diskretisierung ist der lineare Ansatz gewählt. Darunter ist die Beschreibung in kleiner werdende Flächen/Elemente zu verstehen, damit das FEM-Modell eine exaktere Annäherung erfährt. Weitere Abstufungen, die gewählt werden können, sind quadratische, kubische, biquadratische und quintische Berechnungen. In dieser Arbeit ist für die erläuterte aufwändige Geometrie der lineare Ansatz gewählt. Eine kleinere Diskretisierung hätte die Berechnungszeit exponentiell erhöht und das Ergebnis unwesentlich beeinflusst.

Mit dem Ansatz, dass die Probekörper vollständig gesättigt sind, findet in dieser Arbeit keine Betrachtung von ungesättigten Poren statt. Dieses bedeutet, dass die Poren vollständig mit Porenflüssigkeiten gefüllt sind und nicht mit Gasen, die zu weiteren Auswirkungen im Transport der Salzionen geführt hätten.

Die Unterteilung der genannten Komponente ist in Abbildung 20 nachzuvollziehen und zeigt die Unterpunkte, denen einzelne Ränder oder Gebiete der Geometrie zuzuordnen sind.

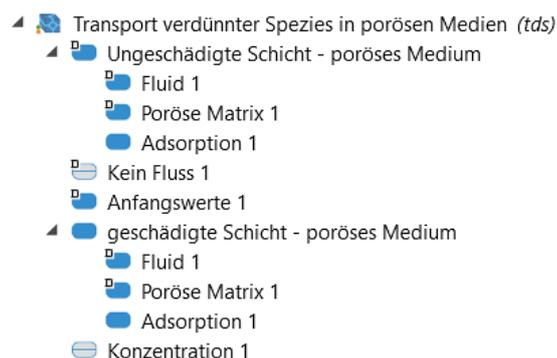


Abbildung 20 COMSOL - Unterteilung der Komponente „Transport verdünnter spezies in porösen Medien“ (CDF)

Der Ansatz, der bereits im Titel dieser Arbeit erwähnt ist, ist die Betrachtung eines Zweischicht Modells. Dazu ist als geschädigte Schicht der Bereich definiert, der über den abgewitterten Bereich hinaus mit Mikrorissen durchzogen wird. Als Quelle für den Kennwert der

rissinduzierten Schicht ist die Masterarbeit von GABERSTEIN [25] herangezogen worden. Diese beinhaltet mehrere Schichthöhen der Risszonen, aus denen der Mittelwert gebildet und dieser in der vorliegenden Geometrie implementiert wurde. In Abbildung 21 ist die dazugehörige Trennung zwischen geschädigter und ungeschädigter Schicht deutlich zu erkennen. Sollte eine Verschiebung der Grenze zwischen geschädigter und ungeschädigter Schicht gewünscht sein, ist zu beachten, dass mehrere neu-nummerierte Gebiete entstehen, die in der Geometrie händisch dem jeweiligen Unterpunkt zugeordnet werden müssen.

Der Punkt „Kein Fluss“ definiert die Ränder, die undurchlässig sind, dazu zählen die Ränder der Gesteinskörnung sowie drei Seiten der Hüllflächen des modellierten Probekörpers. Der vierte Außenrand ist für die Ansetzung der anliegenden äußeren Konzentration als durchlässig beschrieben. Für die vollständige Definition ist der Anfangswert eine von COMSOL verpflichtende Angabe. In dieser Arbeit wird der Grundgehalt an Chloriden im Zementstein mit 2 mol/m^3 gewählt. Es entspricht auch den Erfahrungswerten aus vergangenen Laboruntersuchungen im Fachbereich Baustofftechnologie der HafenCity Universität. [23] Auf einen differenzierten bindemittelabhängigen Anfangswert wird aufgrund von geringen Auswirkungen verzichtet.

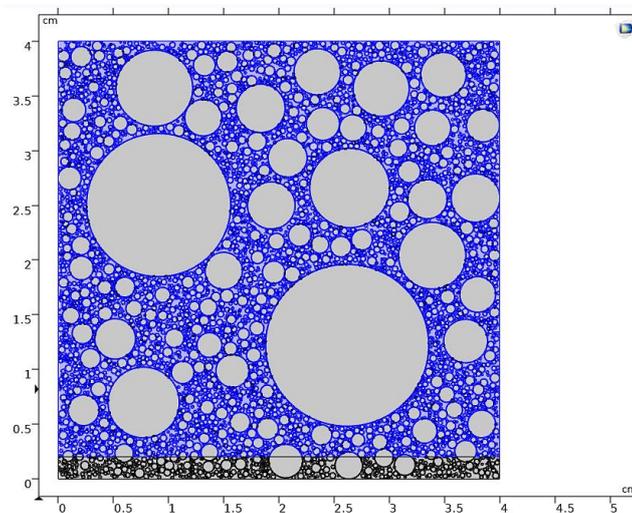


Abbildung 21 COMSOL - Darstellung der Schichten und Auswahl eines Gebietes

Der letzte Unterpunkt aus Abbildung 20 definiert die Beaufschlagung des Modells mit einer 3 M.-% konzentrierten NaCl-Lösung (vgl. Kapitel 3.1). Der Rand, der die Konzentration beschreibt, ist in der Geometrie aus Abbildung 21 auf den Koordinaten $Y = 0 \text{ cm}$ und $X = 0 - 4 \text{ cm}$ definiert. Die Einheit für die Implementierung ist in COMSOL Mol/Kubikmeter [mol/m^3], sodass für eine 3 M.-% Lösung eine Konzentration von 510 mol/m^3 anzusetzen ist.

5.1.3 Porosität

Die Porosität gibt den Anteil der Poren im Verhältnis zum betrachteten Betonkörper an und ist somit einheitenlos. Sie entstehen durch die Hydratationsvorgänge. Ebenso können Zusatzstoffe die Porosität bzw. die Porenverteilung beeinflussen. Um diese Abhängigkeiten zum jeweiligen Probekörper bzw. Bindemittel vorzuweisen, ist für die Implementierung der Ansatz von RÖHLING verwendet worden, der die Kapillarporosität beschreibt. [26]

$$\varepsilon_{KP}(\alpha) = \frac{V_{W0} - \alpha \cdot (\eta_G - 1) \cdot V_Z}{V_{W0} + V_Z} \quad (8)$$

- α → Hydratationsgrad [-]
 V_{W0} → Ausgangsvolumen des Wassers [m³]
 V_Z → Ausgangsvolumen vom Zementanteil [m³]
 η_G → Gelbildungsfaktor [-]

Der Gelbildungsfaktor stellt den Volumenzuwachs gegenüber dem unhydratisierten Zement dar. Der den Klinkerphasen und Zusatzstoffen zugehöriger Gelbildungsfaktor ist ebenfalls auf Basis der Angaben von RÖHLING [26] verwendet und ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Gelbildungsfaktor η_G [-] von Klinkerphasen und Zusatzstoffen [26]

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	SFA	BFA	HS	SF
2,16	2,10	2,674	2,123	2,52 (25% FA) 5,22 (50% FA)	2,50 (25% FA) 5,22 (50% FA)	2,18	1,80

Für die Implementierung der Kennwerte, dazu zählt die Masse (M_Z [kg/m³]) und Dichte (ρ_Z [kg/m³]) des Zementes sowie der Wasser/Zement Wert (w/z [-]), wird die Gleichung (8) zur Gleichung (9) angepasst.

$$\varepsilon_{KP}(\alpha) = \frac{\frac{M_Z \cdot w/z}{1000} - \alpha \cdot (\eta_G - 1) \cdot \frac{M_Z}{\rho_Z}}{\frac{M_Z \cdot w/z}{1000} + \frac{M_Z}{\rho_Z}} \quad (9)$$

5.1.4 Hydratationsgrad

Der Hydratationsgrad ist die Kenngröße, die angibt, wie viele Hydrate, im Vergleich zum nicht hydratisierten Klinker, entstanden sind. Interne Einflüsse, wie die entstehende Hydrationswärme, die Porosität oder der Wassergehalt, wirken direkt auf das Hydrationsverhalten. Aber auch Umwelteinflüsse, wie die Umgebungstemperatur oder fehlende bzw. nicht korrekt durchgeführte Nachbehandlungen, haben Auswirkungen auf die zeitliche Entwicklung des Hydratationsgrades. [26]

Des Weiteren kann es keine vollständige Hydratation geben, da dafür eine Verteilung der unhydratisierten Klinkerphasen und des Restwassers im Betonkörper stattfinden müsste. Sind solche „Inseln“ an Klinkerphasen und Wasser von hydratisierten Phasen umschlossen, werden diese dem Prozess entzogen und der maximale Hydratationsgrad kann einen Faktor von 1,0 (100 %) nicht mehr erreichen. Das gilt auch, wenn Zementpartikel einen größeren Durchmesser aufweisen. Es hydratisiert die Hülle und ab einem bestimmten Zeitpunkt kann kein Anmachwasser mehr zum Kern vordringen, sodass dieser nicht hydratisiert. [26]

Treten die genannten Randbedingungen in einer erwartungsgemäßen Spannweite auf, und es liegen keine extremen äußeren Einflüsse vor, dann kann der maximale Hydratationsgrad eines Betonkörpers laut RÖHLING, auf Basis einer Vielzahl von Versuchsdaten, nach der Gleichung (10) in einer ausreichenden Näherung beschrieben werden. [26]

$$\alpha_{max} = 1 - e^{(-3,8 \cdot w/z)} \quad (10)$$

Für die Bestimmung des vorherrschenden Hydratationsgrades kann sich ebenfalls auf die Funktion von RÖHLING bezogen werden, die die freiwerdende Hydrationswärme beschreibt. [26] Die zugehörigen Beiwerte sind für eine Auswahl an Zementen der Tabelle 2 zu entnehmen.

$$Q_{(t)} = Q_0 + Q_{max} \cdot e^{\left(A_{Röhling} \left(\frac{t}{t_k} \right)^{B_{Röhling}} \right)} \quad (11)$$

ROKOß verwendet in seiner Arbeit [23] ebenfalls diesen Ansatz und setzt zudem den Anpassungsfaktor $Q_0 = 0$. Dieser dient lediglich als Ergänzung zur Verbesserung einer Regressionsanalyse, sodass diese Annahme in dieser Arbeit ebenfalls Anwendung findet. Für die Bestimmung eines zeitlich abhängigen Hydratationsgrades setzt ROKOß das Produkt aus Gleichung (11) der maximalen Hydrationswärme gegenüber. Dies ist als nachvollziehbarer Ansatz bewertet worden und in diese Arbeit mit eingeflossen. [23] [26]

$$\alpha_{(t)} = \frac{Q_{max} \cdot e^{\left(A_{Röhling} \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^{B_{Röhling}}\right)}}{Q_{max}} = e^{\left(A_{Röhling} \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^{B_{Röhling}}\right)} \quad (12)$$

Damit der maximal mögliche Hydratationsgrad beachtet wird, ist der Faktor aus Gleichung (12) mit α_{max} aus Gleichung (10) zu multiplizieren. [23]

$$\alpha_{(t)} = \left(1 - e^{\left(-3,8 \cdot \frac{w}{z}\right)}\right) \cdot e^{\left(A_{Röhling} \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^{B_{Röhling}}\right)} \quad (13)$$

Dieser zeitabhängige Hydratationsgrad kann in der Gleichung (9) von S. 39 zur Berechnung der Porosität implementiert werden, sodass diese durch die Erweiterung ebenfalls den Faktor Zeit beinhaltet.

Tabelle 2 Wärmeentwicklung und Beiwerte von verschiedenen Zementen zur Berechnung des Hydratationsgrades aus [26]

Zement	Q_{max} [J/g]	A	B	t_k [h]	E_A / R [K]
CEM I 42,5 R	450	- 1,60	- 0,73	11,0	4000
CEM I 32,5 R	450	- 1,83	- 0,70	13,0	4000
CEM I/A 42,5 R	420	- 1,78	- 0,78	12,0	4200
CEM I/A 32,5 R	420	- 2,10	- 0,75	15,0	4200
CEM I/B-S 32,5 R (30 % Hüttensand)	400	- 1,55	- 0,70	8,9	4400
CEM III/A 42,5 N	380	- 1,90	- 0,85	13,0	4800
CEM III/A 32,5 N (55–60 % Hüttensand)	380	- 2,30	- 0,80	13,0	4800
CEM III/B 42,5 N	360	- 1,68	- 0,86	16,0	5600
CEM III/B 32,5 N	360	- 1,82	- 0,75	18,0	5600
CEM III/B 42,5 – LH/HS/NA	360	- 2,20	- 0,78	13,0	5700
CEM III/B 32,5 – LH/HS/NA	360	- 2,20	- 0,72	14,0	5700

5.1.5 Adsorptionsisotherme

Zu den Eigenschaften des Betons, die das Eindringverhalten von Chloridionen beeinflussen, zählen auch die in kurzen Zeitspannen schnell auftretenden Sorptionsvorgänge. [1] Diese führen zu Wechselwirkungen zwischen Phasen des Zementsteines und der eindringenden Moleküle, in diesem Fall der Chloridionen. Es wird ein Gleichgewicht angestrebt und es kommt zur Stoffaufnahme (Sorption) des höher konzentrierten eindringenden Moleküls an den CSH-Phasen. [27] Die Auswirkung des bremsenden Chlorideindringens beruht auf der Tatsache, dass gebundene Chloride keinen Anteil an dem Potentialunterschied und dem dazugehörigen Diffusionsprozess haben. [1]

Es wird unterschieden zwischen Adsorption, bei der der Stoff an der Phasengrenze gebunden wird, und Absorption, bei der die Moleküle ins Innere der Phase diffundieren. Der umgekehrte Fall wird Desorption genannt, also die Abgabe von den CSH-Phasen an angrenzende weitere Phasen. [27]

Die Bindungskräfte im Adsorbat, wie der Komplex zwischen stoffaufnehmender und abgebender Phase zu nennen ist, unterscheiden sich in Chemisorption und Physisorption. Ersteres bezieht sich auf Bindungen durch chemische Kräfte und beschreibt eine höhere Bindung des Sorbats. Eine Physisorption liegt vor, wenn hauptsächlich über „van der Waals-Kräfte“ Moleküle gebunden werden können, in diesem Fall ist die Bindungskraft deutlich geringer. Damit ein Adsorptionsgleichgewicht entstehen kann, muss der erwähnte Stoffaustausch zwischen der Adsorbensoberfläche (aufnehmende Phase) und dem Adsorptiv (abgebende Phase) stattfinden. Abhängig ist dieser Ablauf von der anliegenden Konzentration und der Umgebungstemperatur. [27]

Es gibt in der Literatur verschiedene Beschreibungen von Isothermen, die für die Chloridbindkapazitäten in Frage kommen. Zu den bekannten Modellen zählen die Langmuir-, Freundlich- sowie BET-Isothermen. Sie gelten jeweils für Bereiche mit verschiedenen Konzentrationen und beschreiben die differenzierten Adsorptionsgleichgewichte. [27] Die Langmuir-Isotherme eignet sich vorrangig für geringe Chloridkonzentrationen von $< 0,05 \text{ mol/l}$, da die Grundannahme eine einlagige Adsorption ist. Liegt eine höhere Konzentration vor, entspricht dies vielmehr der empirisch ermittelten Freundlich-Isotherme, die ein Konzentrationsbereich von $0,01$ bis $1,0 \text{ mol/l}$ abdeckt. [1] Sowohl die Langmuir- als auch die Freundlich-Isotherme können die Chemisorptions- und Physisorptionsprozesse abbilden. In den zuletzt genannten BET-Isotherme werden im Unterschied zu den vorherigen Isothermen

mehrere monomolekulare Adsorptionsschichten berücksichtigt, bzw. wird eine mehrlagige Adsorption betrachtet. [1] [27]

KAPTEINA beschreibt in [1], dass in Laborversuchen ein Gleichgewichtszustand der Adsorption bei etwa 7 bis 28 Tagen eingetreten ist. Hauptsächlich ist dies von der eigentlichen Bindekapazität des Zementsteines abhängig.

Unter Beachtung der in dieser Arbeit verwendeten Konzentration ($0,510 \text{ mol/l} < 1,0 \text{ mol/l}$) und dem von TANG [28] vorliegenden Ansatz wird für die Implementierung im FEM-Programm die Freundlich-Isotherme verwendet. TANG stellt hierzu in [28] eine Gleichung [vgl. (14)] auf, die die Bindung der Chloride abhängig von den Beiwerten f_b und β beschreibt.

$$C_b = f_b \cdot c^\beta \quad (14)$$

Tabelle 3 Beiwerte aus [28] für Freundlich-Isotherme

Zementzusammensetzung	Freundlich-Konstante [-] f_b	Freundlich-Exponent [-] β
100% Portlandzement	3,57	0,38
70% Portlandz. + 30% HS	3,82	0,37
50% Portlandz. + 50% HS	5,87	0,29
70% Portlandz. + 30% SFA	5,73	0,29

Die Variable c_b bezieht sich auf die Masse des Chlorides im Bezug zur Masse des Zementsteines ($g_{Cl} / kg_{Zementst.}$) und c auf g_{Cl}/l . In der FEM-Implementierung ist für die Freundlich-Isotherme die Adsorption in mol/kg festgelegt, sodass die Gleichung (14) für den Einheitenwechsel umzuschreiben ist (vgl. Gl. (15)). Dazu wird die Masse von Chlorid pro Mol herangezogen, die $35,45 \text{ [g/mol]}$ beträgt. [23] Aufgrund von nicht nachvollziehbaren Fehlermeldungen in COMSOL wird für die Adsorption der Wert in Microsoft-Excel berechnet und die resultierende Adsorption für die jeweiligen Probekörper als benutzerdefinierte Angabe eingepflegt.

$$C_b = \frac{f_b}{35,45 \cdot \left(\frac{1}{35,45}\right)^\beta} \cdot \left(\frac{c}{1000}\right)^\beta \quad (15)$$

$$\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right] = \frac{\left[\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right]}{\left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right] \cdot \left(\frac{1}{\left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]}\right)^\beta} \cdot \left(\frac{\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right]}{\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right]}\right)^\beta$$

The image shows two panels from a software interface. The left panel, titled 'Adsorption', displays the Freundlich adsorption isotherm equation: $c_{P,j,F} = K_{F,j} \left(\frac{c_i}{c_{ref,j}}\right)^{N_{F,j}}$. Below the equation, it lists 'Adsorptionsisotherme: Freundlich' and 'Spezies c' checked. Input fields include 'Freundlich-Konstante: $K_{F,c}$ fb/(35,45*((1/35,45)^beta)) mol/kg', 'Freundlich-Exponent: $N_{F,c}$ beta 1', and 'Referenzkonzentration: $c_{ref,c}$ 1000[mol/m^3] mol/m^3'. The right panel, titled 'Gleichung', shows the governing equation: $\frac{\partial(\epsilon_p c_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_{P,j})}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_i + \mathbf{u} \cdot \nabla c_i = R_i + S_i$ and $\frac{\partial(\rho c_{P,j})}{\partial t} = \rho K_{P,j} \frac{\partial c_i}{\partial t} - c_{P,j} \rho_s \frac{\partial \epsilon_p}{\partial t}$, with $\rho_s = \frac{\rho}{(1 - \epsilon_p)}$ and $K_{P,j} = \frac{\partial c_{P,j}}{\partial c_i}$. Under 'Matrixeigenschaften', 'Dichte der trockenen Schüttung' is selected, and 'rhoPK' is entered as the density. The 'Adsorption' section in the right panel shows $c_{P,j} = f(c_i)$ and 'Spezies c' checked, with 'c_P,c' set to 'cb'.

Abbildung 22 (links) reguläre Berechnung der Adsorption |
(rechts) benutzerdefinierte Berechnung nach Vorgabe der regulären Berechnung
(vgl. Gleichung (15))

Für den Bezug zu der Rohdichte (s. Abbildung 22 [rechts]) beruht die Auswahl der „Dichte der trockenen Schüttung“ auf die Näherung der späteren Ergebnisse. Aufgrund des inhomogenen Probekörperaufbaus (Gesteinskörnung und Zementstein getrennt) liegt keine eindeutige Auswahl zwischen „trockenen Schüttung“ oder „festen Phase“ vor. Diese Bezeichnungen der Rohdichten sind für dieses Modell somit kritisch zu betrachten.

5.1.6 Fluid / Diffusion

Im Unterpunkt Fluid (s. Abbildung 23) von „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ finden sich die Eingabefelder für die eindringende Konzentration, die durch die Auswahl der Transportmechanismen (s. Abbildung 19) aktiviert sind. Ebenso findet dort die Kopplung mit der Porosität (vgl. Kap. 5.1.3) sowie die Bestimmung der effektiven Diffusivität statt.



Abbildung 23 COMSOL –
Einstellung für das Fluid in „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“

Konvektion als Geschwindigkeitsfeld

Analog zu der konvektiven Beschreibung im Abschnitt 1.3 zum „Wirken der Mikroeislinsepumpe“ muss für diesen Ablauf im FEM-Modell ein variabler Wert gefunden werden, der für den Probekörper den jeweiligen zugehörigen konvektiven Part bestimmt. Als Grundlage für die Ermittlung sind die Ergebnisse (Eindringtiefen) aus den zusätzlich durchgeführten Einlagerungsversuchen gewählt. Bei diesen Untersuchungen lagerten von jeder Charge unbeschädigte, wassergesättigte Probekörper in einem Chloridbad (vollständiger Kontakt

mit der Beaufschlagungsseite), sodass ein Eindringen der Chloride hauptsächlich über die Diffusion vorlag.

Das Geschwindigkeitsfeldes bezieht sich auf Y-Achse, da nur eine Außenfläche in der zwei-dimensionalen Geometrie beaufschlagt wird, wodurch die Eindringtiefe in Y-Richtung maßgebend ist.

$$u_y = \frac{\left(\frac{x_{CDF} - x_{Dif}}{1000}\right)}{t_x} \quad (16)$$

$u_y \rightarrow$ Geschwindigkeitsfeld $\left[\frac{m}{s}\right]$

$x_{CDF} \rightarrow$ Eindringtiefe aus dem CDF – Versuch [mm] (für 7d bzw. 14d)

$x_{Dif} \rightarrow$ Eindringtiefe aus dem Einlagerungsversuch [mm] (für 7d bzw. 14d)

$t_x \rightarrow$ 7d bzw. 14d in [s]

Die Implementierung des Geschwindigkeitsfeldes ist der maßgebende Parameter für die Simulation eines Zweischichtmodells. Die Bezugswerte für 7-Tage (7d) sind in der geschädigten Schicht (Abbildung 21 [grau]) und die Bezugswerte für 14-Tage (14d) sind in der ungeschädigten Schicht (Abbildung 21 [blau]) angesetzt.

Fluid-Diffusionskoeffizient

Der Fluid-Diffusionskoeffizient ist die Basis für die Eigenschaften der eindringenden Moleküle und ist, wie zu Beginn von Kap. 5.1.6 beschrieben, mit den Abminderungsfaktoren gekoppelt. Für den Fluid-Diffusionskoeffizienten wird in diesem Fall der freie Diffusionskoeffizient von Chlorid verwendet. Dieser beträgt laut TANG [28] $2,03 \cdot 10^{-9}$ [m²/s] und konnte mit den Daten aus „Table of Diffusion Coefficients“ [29] bestätigt werden.

Dieser Wert entspricht dem Verhalten von Chlorid in einer freien Lösung bei Raumtemperatur (ca. 20°C). Um die deutlich geringere Temperatur aus dem CDF-Versuch zu berücksichtigen, muss der Arrheniusfaktor hinzugezogen werden.

$$D_{F,c} = D_{0,Chlorid} \cdot k_e \quad (17)$$

Mit dem Arrheniusfaktor (k_e [-]) kann der Einfluss auf den Diffusionskoeffizienten im Modell beachtet werden, der u. a. aus der im CDF-Versuch niedrigeren vorherrschenden Temperatur (T_{IST} [K]) resultiert. [3] Je niedriger die Außen- bzw. Bauteiltemperaturen ist, desto langsamer die Bewegung der Moleküle. Die Referenztemperatur (T_{ref} [K]) entspricht der genannten 20°C Raumtemperatur.

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{IST}} \right) \right) \quad (18)$$

Für die Bestimmung von T_{IST} liegt der Mittelwert aus dem Temperaturverlauf des CDF-Versuches zugrunde, der sich unter dem Gefrierpunkt bei -3,333°C befindet. Dieser ist durch die Bildung der Integrale im Diagramm aus Abbildung 11 nachzuvollziehen.

$$T_{IST} = -3,333 \text{ °C} = 293 \text{ K} - 3,333 \cong 269,67 \text{ K} \quad (19)$$

Der Faktor b_e [K] in Gleichung (18) entspricht einem Regressionsparameter. GEHLEN bezieht sich in [3] auf eine Quantifizierung von PAGE et al. [30], bei der der Parameter b_e statistisch zu $b_e = 4800 \text{ K}$ definiert werden kann.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird neben dieser Annahme auch eine variable Beschreibung des Arrheniusfaktors verwendet. Den variablen Part übernimmt dabei der Regressionsparameter b_e , der bei RÖHLING [26] von dem Bindemittel bzw. der Betonzusammensetzung abhängig gemacht wird. Hierzu hat RÖHLING Werte aus Messergebnissen und Regressionen ermittelt, die der Tabelle 2 (S. 41) entnommen werden können. Dort beschreibt RÖHLING den Beiwert als Aktivierungstemperatur (E_A/R [K]). [26]

Modell für die effektive Diffusivität

In COMSOL-Multiphysics sind für das „Modell der effektiven Diffusivität“ vier Möglichkeiten vorhanden, um den Abminderungsfaktor zu definieren.

Dazu zählt das Millington & Quirk-Modell Gl. (20), das Bruggeman-Modell Gl. (21), ein benutzerdefiniertes Tortuositätsmodell oder die Auswahl, dass keine Korrektur angesetzt wird.

$$\tau_{F,i} = \varepsilon_p^{-\frac{1}{3}} \quad (20)$$

$$\tau_{F,i} = \varepsilon_p^{-\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Unter der Tortuosität ist die Verwundenheit der Porensysteme zu verstehen. Im Gegensatz zum Modellierungsansatz bei einem diffusiven Eindringverhalten in der Arbeit von ROKOß [23] findet in dieser Ausarbeitung das Modell von MILLINGTON & QUIRK seine Anwendung. Der Ansatz dazu ist den folgenden Gleichungen zu entnehmen. [24]

$$\tau_L = \theta^{-7/3} \cdot \varepsilon^2 ; \tau_G = a_v^{-7/3} \cdot \varepsilon^2 \quad (22)$$

Die Indizes L und G stehen hier für „*pure liquid phases*“ und „*gas phases*“.

Für ein gesättigtes poröses Medium ist $\theta = \tau$ zu setzen, sodass sich die in COMSOL hinterlegte Gleichung (20) ergibt. Der Parameter τ_G fällt in dieser Situation weg, da in einem gesättigten Medium keine Gas-Phase vorliegt. Die Grundlage sowie die Herleitung des Modells von MILLINGTON & QUIRK kann in der Arbeit „PERMEABILITY OF POROUS SOLIDS“ [31] nachgelesen werden.

5.1.7 Ergebnisermittlung

Damit die Ergebnisse aus dem FEM-Modell ausgelesen werden können, ist festzulegen, bei welcher Konzentration die im Labor ermittelte Eindringtiefe bestimmt wurde. Wie in Kapitel 4 beschrieben, fand eine Untersuchung mit zwei verschiedenen Salzlösungen statt (NaBr und NaCl), sodass eine Untersuchung des Chloridgehaltes mit dem LIBS-Verfahren durchgeführt wurde. Die Massengrenze an Chloriden konnte mit diesem Verfahren wesentlich exakter bestimmt werden, weshalb die gewöhnliche Indikatorgrenze von 0,07 mol/l (70 mol/m³) auf 0,034 mol/l (34 mol/m³) anzupassen ist.

Dieser Wert setzte sich aus der Bestimmungsgrenze des LIBS-Verfahrens (0,2 M.%) und dem Wert der anliegenden 3 M.-% NaCl-Lösung (0,510 mol/l) zusammen.

$$\frac{510 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}}{3 \text{ M.-%}} = \frac{X}{0,2 \text{ M.-%}} \rightarrow X = 34 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \quad (23)$$

Für die Auslesung der genauen Eindringtiefe wird im FEM-Programm COMSOL die Isolinie (vgl. Abbildung 24) genutzt, die mit der Eingabemethode „Levels“ die 34 [mol/m³]-Grenze anzeigt. In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass die definierte Gesteinskörnung dabei übersprungen wird und nur die aussagekräftigen Messergebnisse eine Verwendung finden. Anschließend sind die Daten als Text-Datei zu exportieren und mit Microsoft-Excel auszuwerten.

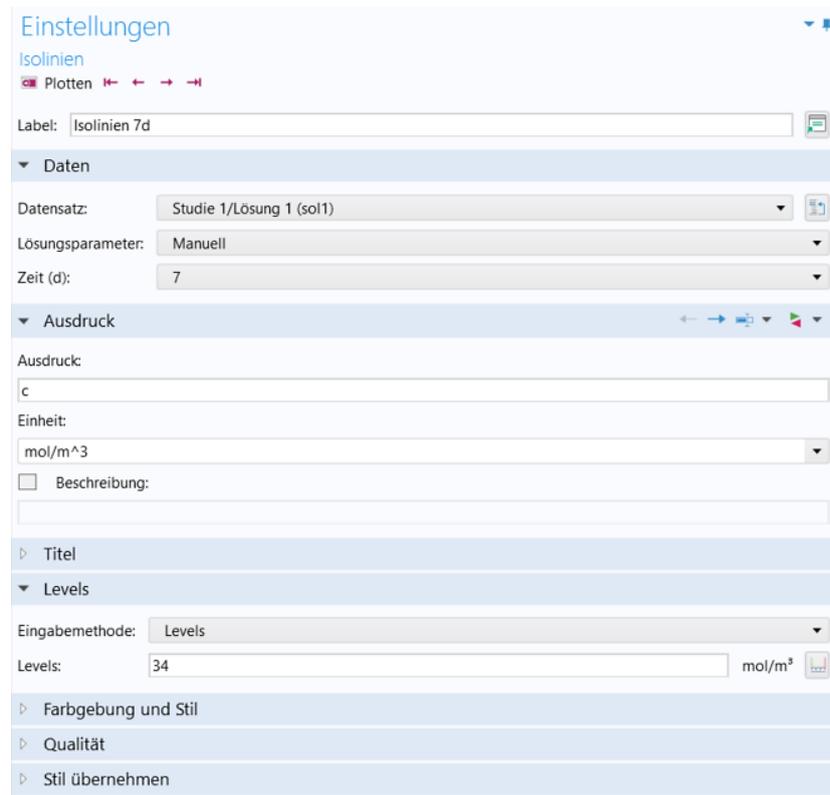


Abbildung 24 COMSOL - Auslesen der Eindringtiefe mithilfe der Funktion der Isolinien

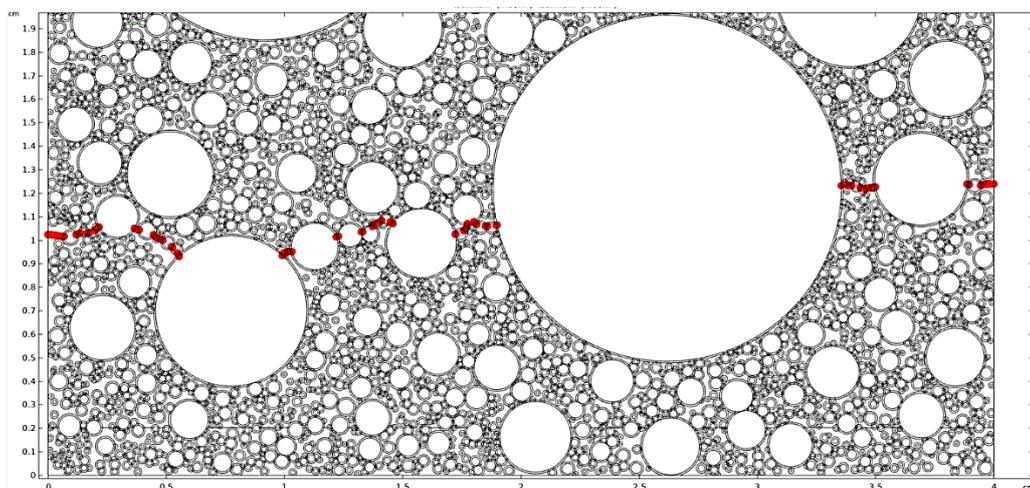


Abbildung 25 COMSOL - Darstellung der Isolinie in der Probekörper-Geometrie

5.1.8 FEM-Netz und Studie

Das FEM-Netz ist der Teil des Modells, der bestimmt, wie nah die Simulation an die Realität heranrücken kann. Je feiner das Netz, desto exakter, aber auch zeitintensiver ist die Berechnung. Mit der Möglichkeit des Zuganges zum Rechenzentrum der Technischen-Universität Hamburg-Harburg konnte ein „feines“ FEM-Netz angelegt werden, sodass die Bereiche zwischen den modellierten Gesteinskörnern hinreichend genau definiert werden können.

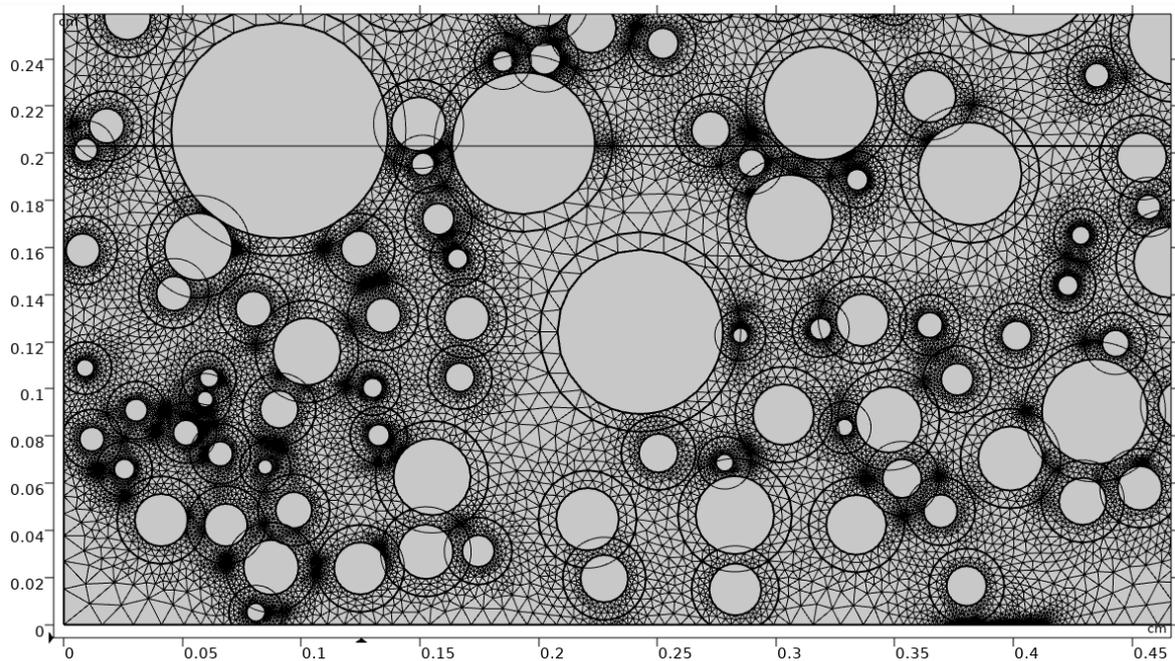


Abbildung 26 COMSOL - FEM-Netz der Geometrie für das Zweischichtmodell (CDF)

Für den Ansatz der Berechnung sind in COMSOL-Multiphysics zwei Basisvarianten zu finden. Eine stationäre und eine zeitabhängige Studie. Die Studien legen fest, wie die Kopplung von zwei Komponenten und die Lösung der Variablen durchgeführt wird. In dieser Arbeit kommt die zeitabhängige Studie zum Tragen und wird für die Modellierung des Zweischichtsystems in die für die Auswertung benötigten Zeitabschnitte in null, sieben und vierzehn Tage [d] unterteilt.

5.2 Modellierung des RCM-Verfahrens

Die Modellierung des Schnellmigrationsversuches (**R**apid-**C**hlorid-**M**igration) findet unter der Implementierung der Komponenten „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ und „elektrische Ströme“ in COMSOL-Multiphysics statt. Abweichend zu dem Modell in Kapitel 5.1 ist die Porosität sowie der Hydratationsgrad für die „Migration im elektrischen Feld“ nicht als einzelner Parameter implementiert, sondern erfolgt über eine zusammenfassende Eingabe in den Transporteigenschaften. (vgl. Kap. 5.2.2)

5.2.1 Geometrie

Die Verwendung der identischen Geometrie, wie in Kapitel 5.1.1, ergaben anders als erwartet keine realitätsnahen Ergebnisse. Der Grund liegt darin, dass in den angesprochenen Transporteigenschaften bereits Informationen implementiert werden, die im Modell in Kapitel 5.1 über die Geometrie modelliert sind. Daraus resultiert, dass ein homogener Querschnitt nach den exakten Maßen der realen Probekörper die Lösung ist. (s. Abbildung 27) Insbesondere die reale Höhe ist zu beachten, da diese dem Abstand der Anode zur Kathode entspricht und mit der elektrischen Spannung [V] sowie dem beschriebenen Abstand [m] die elektrische Feldstärke [V/m] bestimmt wird, die wiederum Einfluss auf die treibende Kraft hat.

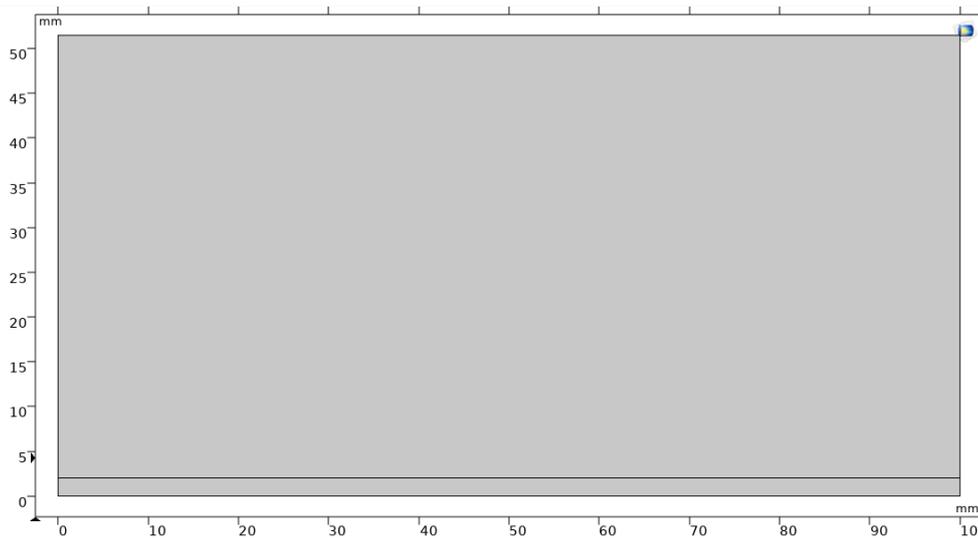


Abbildung 27 COMSOL – Geometrie der Probekörper für die Modellierung des RCM-Versuches

5.2.2 Transport verdünnter Spezies in porösen Medien

Wie sich diese Komponente grundsätzlich zusammensetzt, ist bereits in Kapitel 5.1.2 erläutert. Bei der Modellierung des RCM-Versuches ist abweichend, dass als Transportmechanismus nur die „Migration im elektrischen Feld“ ausgewählt ist. (vgl. Abbildung 28)

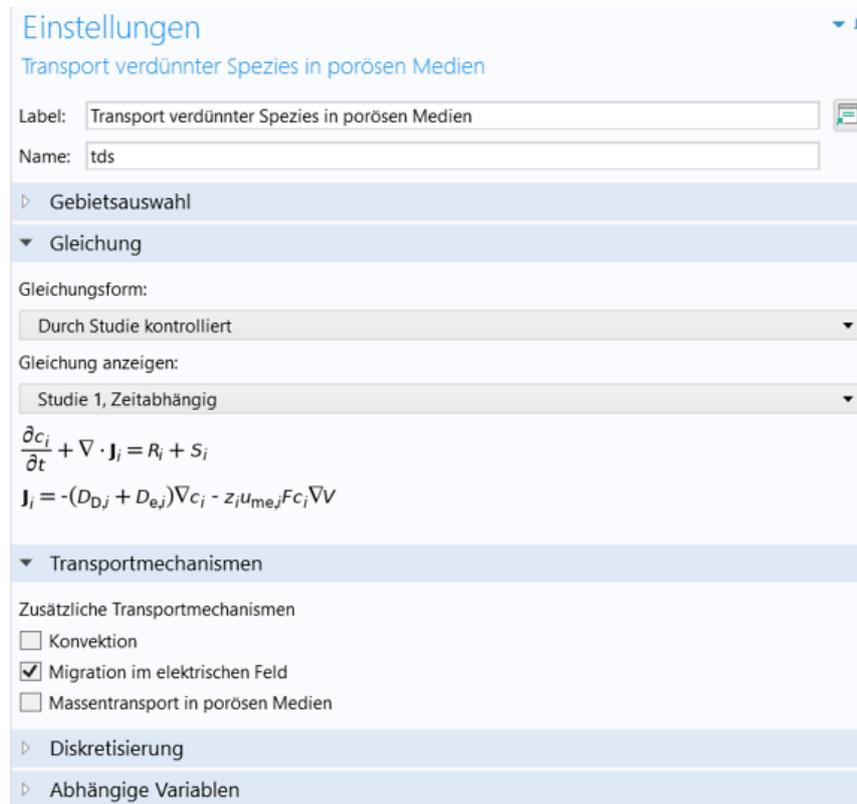


Abbildung 28 COMSOL - Einstellung zur Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (RCM)

Als Basis dient dieselbe Gleichung, die unter (4) [S.36] beschrieben ist. Die Gleichung (5) [S.36] ändert sich dagegen. Es wird ein Subtrahend hinzugefügt, um die Teilchenstromdichte J_i [mol/(m²·s)] zu bestimmen.

$$J_i = -(D_{D,i} + D_{e,i}) \nabla c_i - (z_i \cdot u_{me,i} \cdot F \cdot c_i \cdot \nabla V) \quad (24)$$

Wie sich der Minuend zusammensetzt, kann in Kapitel 5.1.2 nachvollzogen werden. Hinzu kommt der Teil, der den Bezug zu den elektrischen Strömen herstellt. Dieser beinhaltet die Ladungszahl der ionischen Spezies z_i [-], die Geschwindigkeit des Fluides $u_{me,i}$ [m/s], die Faraday'sche Konstante F [A·s/mol], die Konzentration der anliegenden Spezies c_i [mol/m³] und den Gradienten des elektrischen Potentials V [V]. Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird auf die einzelnen Faktoren näher eingegangen.

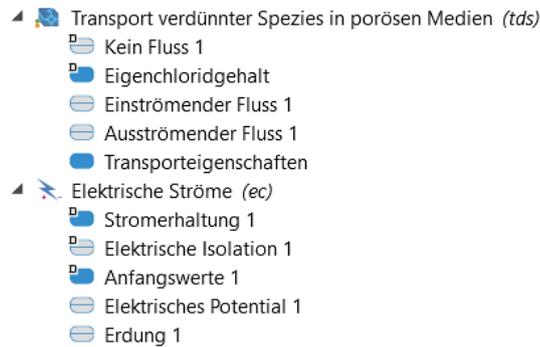


Abbildung 29 COMSOL - Unterteilung der Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (RCM)

Die Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ enthält für den RCM-Versuch, wie der Abbildung 29 zu entnehmen, fünf Unterpunkte. Der Abschnitt „Eigenchloridgehalt“ ist gleichzusetzen mit dem „Anfangswert“ aus Kapitel 5.1.2 und entspricht ebenfalls der dort zu findenden Erläuterung. Auch der Part „Kein Fluss“ ist dem Sinn nach dem Kapitel 5.1.2 zu entnehmen und gibt ebenfalls die Ränder wieder, die undurchlässig sind. Durchlässige Ränder sind als einströmender und ausströmender Fluss definiert und funktionieren als Eingang und Ausgang, um die Strömungsrichtung festzulegen. Angesetzt ist die anliegende Konzentration (NaBr) mit 510 mol/m^3 (vgl. Abbildung 30). In der vorliegenden Geometrie (Abbildung 27) befindet sich der für die Konzentrationsbeaufschlagung zugehörige Rand auf der Achse $Y = 0 \text{ mm}$, $X = 0\text{-}100 \text{ mm}$ und analog diesem gegenüber der „ausströmende Fluss“.

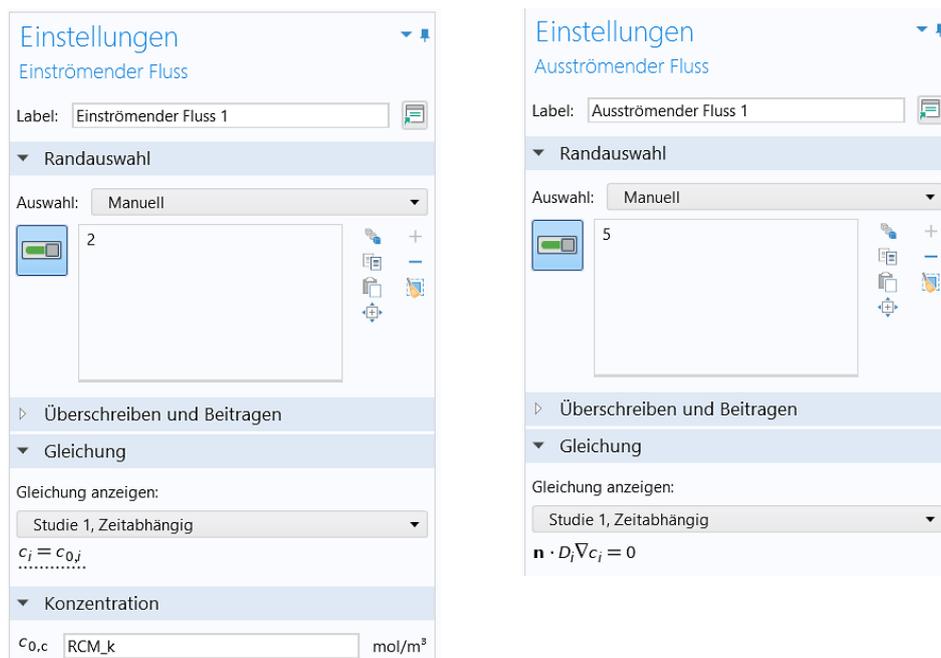


Abbildung 30 COMSOL - Einströmender Fluss (links) | Ausströmender Fluss (rechts)

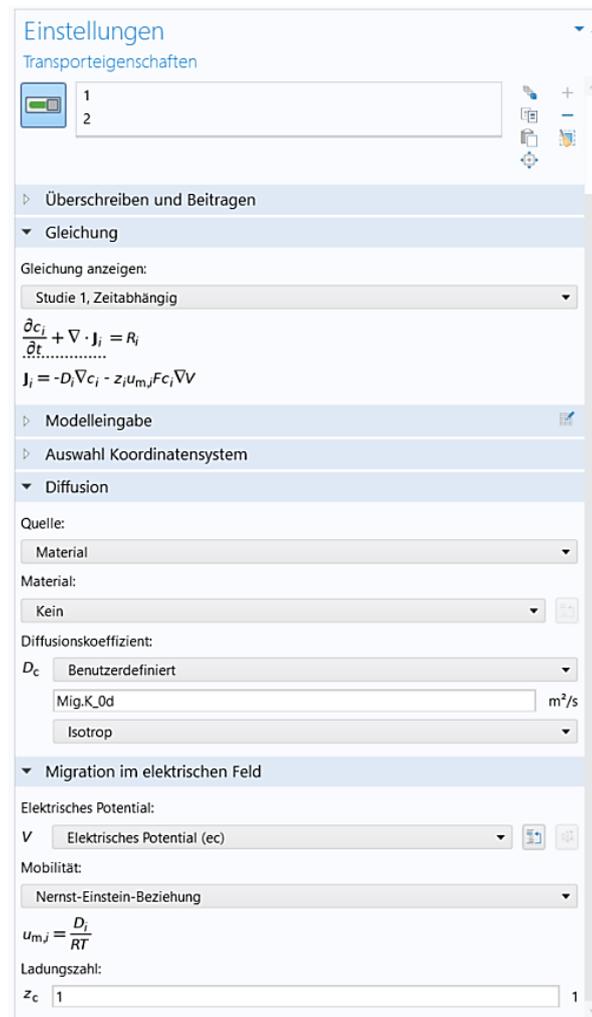


Abbildung 31 COMSOL - Transporteigenschaften in „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (RCM)

Der Abschnitt „Transporteigenschaften“ dient zur Implementierung der Diffusion und der Verknüpfung zum elektrischen Feld (vgl. Abbildung 31). Als Diffusionskoeffizient ist wie in den Arbeiten von CELEBI [16] und KRINGS [32] der Migrationskoeffizient des jeweiligen Probekörpers aus den Laboruntersuchungen angesetzt, der, wie zu Beginn des Abschnittes beschrieben, die Informationen bündelt, die im Modell unter Kapitel 5.1 u. a. durch die Porosität, den Hydratationsgrad und mit der GK-Geometrie in die Simulation eingehen. Die „Migration im elektrischen Feld“ beinhaltet die noch fehlenden Variablen für die Gleichung (24) [S.52]. Dazu gehört die Mobilität $u_{m,i}$, die auf der Nernst-Einstein-Beziehung beruht und sich aus der molaren Gaskonstanten R [$J/(mol \cdot K)$], der vorherrschenden Temperatur T [K], dem Diffusionskoeffizienten und der Ladungszahl der ionischen Spezies z_c zusammensetzt. Die Ladungszahl von Chlor ist mit dem Betrag 1 anzusetzen. [29]

5.2.3 Elektrische Ströme

Die Komponente „Elektrische Ströme“ beinhaltet die Implementierung der Spannung und die Modellierung des Stromflusses durch den Probekörper. Der Abbildung 29 ist zu entnehmen, dass sich diese Komponente in die Stromerhaltung, die Elektrische Isolation, den Anfangswert, das Elektrische Potential sowie die zugehörige Erdung unterteilt.

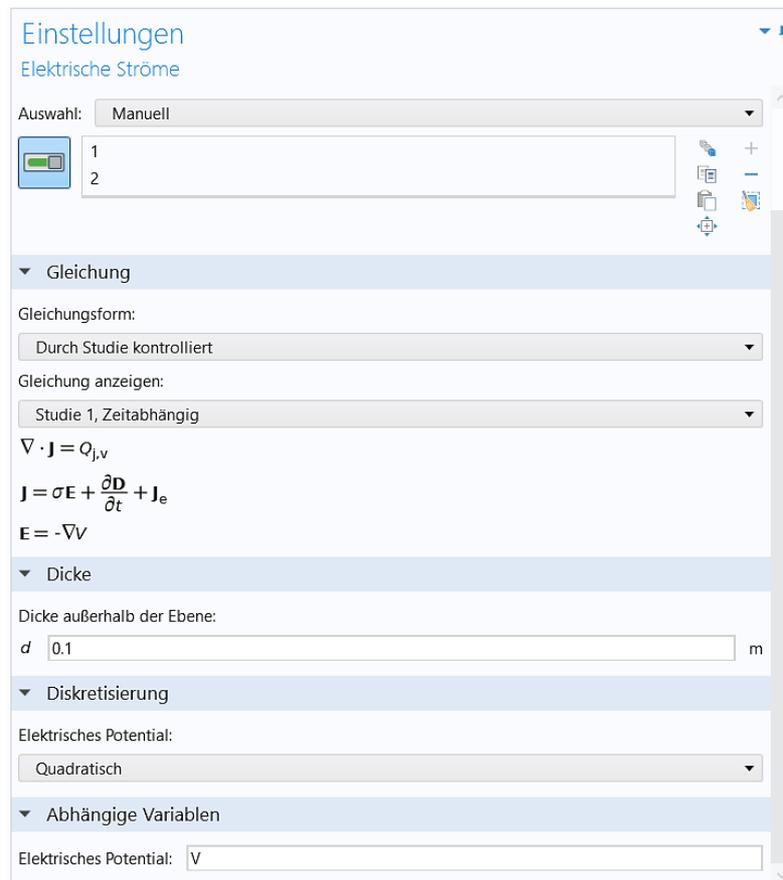


Abbildung 32 COMSOL - Komponente Elektrische Ströme (RCM)

Die Grundgleichungen für die „Elektrischen Ströme“ setzen sich aus dem Gradienten $[\nabla]$ des elektrischen Potentials V [V] (vgl. Abbildung 33) zum elektrischen Feld E (Gl. (27)) zusammen, das gemeinsam mit der elektrischen Verschiebung D und der extern erzeugten Stromdichte J_e [A/m²] als „Divergenz eines Vektorfeldes“ $[\nabla \cdot]$ der Stromquelle $Q_{j,v}$ in A/m³ entspricht (Gl. (25)). [33]

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad (25)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (26)$$

$$E = -\nabla V \quad (27)$$

Unter der Einstellung „Dicke“ in Abbildung 32 ist die Tiefe aus dem zweidimensionalen Probekörper zu verstehen, sodass eine mögliche externe Stromdichte J_e [A/m²] korrekt vom Modell verstanden wird. Aus variierenden Eingaben heraus ist festzustellen, dass in dieser Dimension die angegebene Dicke keine maßgebende Auswirkung hat. [33] Als Diskretisierung ist analog zu den Einstellungen in 5.2.2 die quadratische Berechnung als Näherung gewählt, da im homogenen Querschnitt der Rechenaufwand wesentlich geringer ausfällt als in der Geometrie aus Abschnitt 5.1.

Für die Ansetzung der elektrischen Spannung sind analog zu dem anliegenden Konzentrationsfluss (vgl. 5.2.2) zwei Unterpunkte notwendig. Der Abbildung 33 (links) ist die Einstellung für den Stromzufluss als elektrisches Potential zu entnehmen, das in diesem Modell 30 V entspricht (analog zu den Laborversuchen, vgl. Anhang A). Der Gegenpol bildet die Erdung ab. (vgl. Abbildung 33 (rechts))

Die Verortung ist ebenfalls analog zur Beaufschlagung der Konzentration aus Abschnitt 5.2.2, sodass das Potential in der Geometrie aus Abbildung 27 auf der Achse $Y = 0\text{mm}$, $X = 0\text{-}100\text{mm}$ und parallel dazu die Erdung anzusetzen ist.

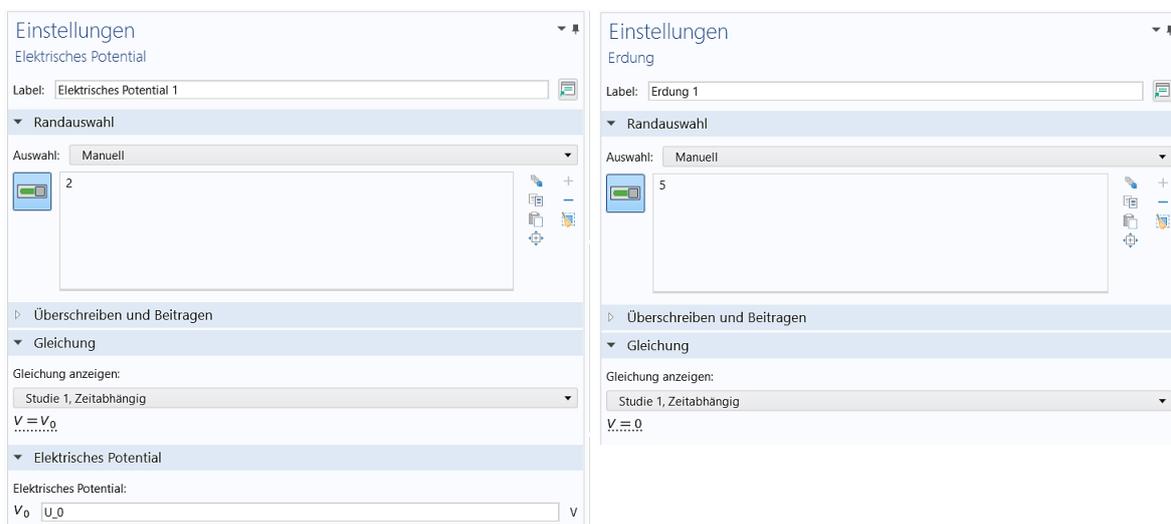


Abbildung 33 COMSOL - Elektrisches Potential (links) | Erdung (rechts)

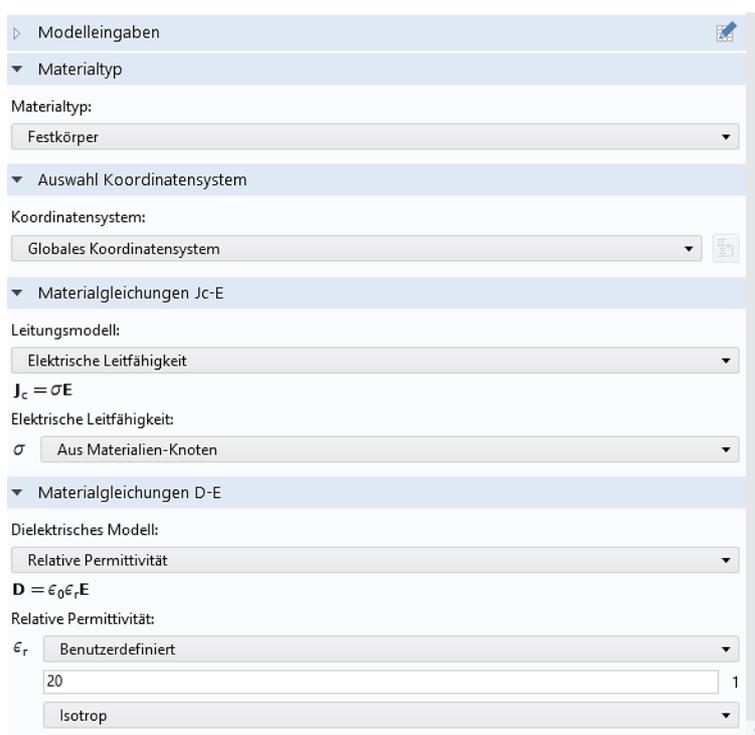


Abbildung 34 COMSOL – Einstellung zur Stromerhaltung (RCM)

Für die Implementierungen zu der Leitfähigkeit und den Materialkennwerten dienen die Eingaben in der „Stromerhaltung“. Das Leitungsmodell basiert dabei auf dem Ohm’schen Gesetz des Strömungsfeldes, bei dem die Stromdichte J_c und die Feldstärke E über den Faktor der Leitfähigkeit σ [S/m] proportional zueinander sind. Die zugehörige Einheit der Leitfähigkeit ist Siemens pro Meter [S/m], die dem Kehrwert des elektrischen Widerstandes $1/\Omega$ bzw. $(1 \text{ A})/(1 \text{ V})$ entspricht. [34] Als allgemeiner Kennwert ist in COMSOL-Multiphysics für das Material „Beton“ die Leitfähigkeit von $0,0333$ [S/m] hinterlegt. Dies entspricht ebenfalls dem von KRINGS [32] verwendeten Parameter.

$$J_c = \sigma \cdot E \quad (28)$$

Die Permittivität bzw. dielektrische Leitfähigkeit gibt mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ die Polarisierbarkeit z. B. eines Feststoffes an. Damit ist die Fähigkeit gemeint, mit der sich die Moleküle an dem angelegten Spannungsfeld ausrichten können. Zusammen mit der Naturkonstanten ϵ_0 , die der Permittivität des Vakuums entspricht, und dem elektrischen Feld E , ergibt sich die elektrische Verschiebung bzw. das elektrische Erregungsfeld D . [35] Der Wert 20 [-] für ϵ_r stammt aus den in COMSOL-Multiphysics hinterlegten Materialkennwerten für Beton. [32]

$$D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E \quad (29)$$

5.2.4 FEM-Netz und Studie

Die grundlegenden Erläuterungen zum FEM-Netz und den Studien sind dem Abschnitt 5.1.8 zu entnehmen. Auch die Modellierung des RCM-Versuches basiert auf der zeitabhängigen Studie, dabei ist die Dauer der Simulation analog zu den jeweiligen Laboruntersuchungen (vgl. Anhang A) gewählt, die im Mittel bei 24 h liegt, wie es die Vorgabe (vgl. Kap. 3.2) verlangt. Da abweichend zum Modell aus 5.1 ein homogener Querschnitt vorliegt und die benötigte Rechenleistung somit sehr gering ist, kann für die Elementgröße „extra fein“ gewählt werden. (vgl. Abbildung 35)

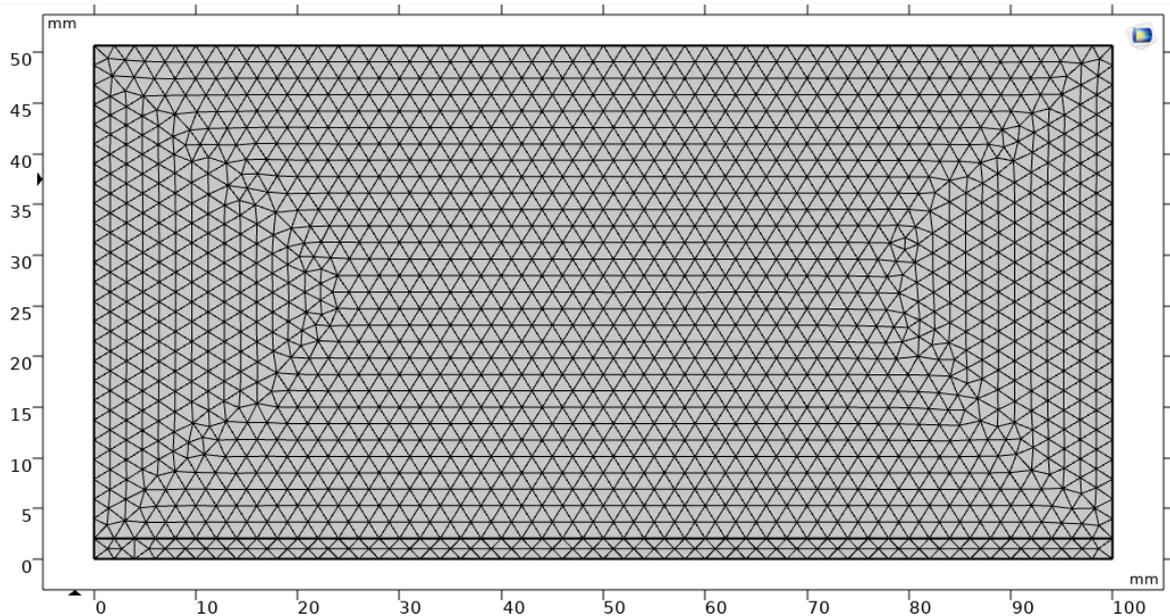


Abbildung 35 COMSOL - FEM-Netz für die Modellierung des RCM-Versuches

6. DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

6.1 Laborversuche CDF zu FEM

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes werden vier Varianten der FEM-Annäherung beschrieben, die auf der Modellierung aus Abschnitt 5.1 basieren und sich in den angesetzten Werten sowie Betrachtungsgrenzen differenzieren. Diese Unterschiede beschränken sich auf die Ansetzung der Hydratation und den Arrheniusfaktor. In den nachfolgenden Tabellen sind die gleichbleibenden Parameter dargestellt, die den Laborergebnissen entsprechen und auf den Ansätzen aus 5.1 basieren. (Laborwerte gemäß WEGNER [36] und SIEVERS [37])

Tabelle 4 Probekörperbezeichnung und Bindemittelrezeptur

Nr.	Probekörper Bezeichnung	Bindemittel Rezeptur
1	PA200113	CEM I AB16-Splitt 175/350 (0,5)
2	PA200113	CEM I 42,5 R-Si AB16-Splitt 175/350 (0,5) [SF=5%]
3	PA200518	CEM I 42.5 R - LP AB16-Splitt 175/350(0,5)
4	PA200518	CEM I + SF 42.5 R - LP AB16-Splitt 175/350(0,5) [SF=5%]
5	PA200713	CEM II/A-S 42.5 (ohne LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5) [HS=13%]
6	PA200713	CEM II/A-S 42.5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)
7	PA201005	CEM I 42.5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)
8	PA201005	CEM III-B (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5) [HS=73%]
9	PA210222	CEM I 42,5 N+SFA AB16-Splitt 175/309(102) (0,5); LP; SFA=33%
10	PA210222	CEM I 42,5 N+SF AB16-Splitt 175/350(34) (0,5); LP; SF=11%

Tabelle 5 Randparameter und Laborwerte zu den Probekörpern

Nr.	w/z-Wert	LP [Vol.-%]	Dichte der PK [kg/m ³]	Dichte des Zements [kg/m ³]	Angesetzte NaCl-Konzentration [mol/m ³]
1	0,5	1	2508,13	3100	510
2	0,5	1	2499,05	3100	510
3	0,5	10	2238,14	3100	510
4	0,5	7	2378,57	3100	510
5	0,5	0,8	2465,18	3050	510
6	0,5	9	2283,31	3050	510
7	0,5	7,2	2298,14	3100	510
8	0,5	5,5	2372,95	3000	510
9	0,5	7	2289,92	3100	510
10	0,5	7	2329,63	3100	510

6.1.1 Porosität und Hydratationsgrad

Mit Hilfe der Probekörper-Eigenschaften aus Tabelle 4 und Tabelle 5 können die benötigten Parameter für die Bestimmung der Porosität (vgl. Gleichung (9) S.39) und des Hydratationsgrades (vgl. Gleichung (13) S.41) bestimmt werden. Dazu fand ein Abgleich mit den von RÖHLING [26] bestimmten Werten statt, die für eine Auswahl von Bindemitteln vorliegen. (vgl. Tabelle 1 & Tabelle 2 , S.39 & 41) Die genauere Bestimmung des Gelbildungsfaktors zu den jeweiligen Probekörpern ist der Tabelle A 1 im Anhang A zu entnehmen.

Tabelle 6 Zuordnung des Gelbildungsfaktors η_G [-] (vgl. Tabelle 1) und der Beiwerte von Röhling (vgl. Tabelle 2)

Nr.	η_G [-]	A-Röhling [-]	B-Röhling [-]	t_k [-]
1	2,161	-1,83	-0,70	13
2	2,143	-1,60	-0,73	11
3	2,161	-1,60	-0,73	11
4	2,143	-1,78	-0,78	12
5	2,176	-1,78	-0,78	12
6	2,176	-1,78	-0,78	12
7	2,161	-1,60	-0,73	11
8	2,248	-1,82	-0,75	18
9	2,279	-2,10	-0,75	15
10	2,121	-1,78	-0,78	12

Am Beispiel der Parameter des Probekörpers Nr.1 wird nachfolgend der Hydratationsgrad α Gl. (30) sowie die Porosität ε Gl. (31) für den Tag 35 ($t=840$ h) berechnet, der dem Tag entspricht, ab dem die Probekörper mit dem ersten Frost-Tauwechsel konfrontiert wurden.

$$\alpha_{(840);PK1;35d} = (1 - e^{(-3,8 \cdot 0,5)}) \cdot e^{\left(-1,83 \cdot \left(\frac{35 [d] \cdot 24 [h]}{13 [h]}\right)^{-0,70}\right)} = 0,77 [-] \quad (30)$$

$$\varepsilon_{(0,77);PK1;35d} = \frac{\frac{350 \cdot 0,5}{1000} - 0,77 \cdot (2,161 - 1) \cdot \frac{350}{3100}}{\frac{350 \cdot 0,5}{1000} + \frac{350}{3100}} = 0,257 [-] \quad (31)$$

6.1.2 Konvektion über das Geschwindigkeitsfeld

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes werden, wie in 5.1.6 beschrieben, die Ergebnisse der Einlagerungsversuche hinzugezogen, die auf der reinen Diffusion in den jeweiligen Probekörpern basieren. Diese sowie die modifizierten Chlorid-Diffusionskoeffizienten mit ihren Eindringtiefen nach 7 Tagen und 14 Tagen sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen und stammen aus der Aufstellung der Bachelorarbeit von WEGNER [36].

Tabelle 7 Diffusionskoeffizient und Eindringtiefe aus Einlagerungsversuchen [36]

Nr.	Diffusionskoeffizient aus Einlagerung		Eindringtiefe der NaCl-Konzentration aus Diffusion	
	DIF 7d [m ² /s] · 10 ⁻¹²	DIF 14d [m ² /s] · 10 ⁻¹²	DIF 7d [mm]	DIF 14d [mm]
1	15,51	13,94	9,0	13,0
2	5,56	6,43	4,5	9,0
3	16,82	14,23	8,5	10,0
4	6,25	8,31	5,5	7,5
5	21,53	13,66	7,0	7,5
6	22,16	9,56	8,0	7,5
7	18,12	11,62	7,5	10,5
8	5,27	3,12	5,5	7,0
9	41,05	17,67	10,0	11,0
10	8,88	2,97	6,8	6,5

Tabelle 8 modifizierte Diffusionskoeffizienten und Eindringtiefe der CDF-Versuche [36]

Nr.	modifizierter Cl-Diffusionskoeffizient aus CDF		Eindringtiefe der NaCl-Konzentration nach CDF	
	MELP 7d [m ² /s] · 10 ⁻¹²	MELP 14d [m ² /s] · 10 ⁻¹²	MELP 7d [mm]	MELP 14d [mm]
1	44,7	44,79	15,38	20,19
2	39,95	30,91	15,05	18,75
3	30,48	13,07	10,04	12,08
4	20,36	22,6	10,07	13,68
5	34,07	10,51	14,84	14,27
6	21,08	7,34	9,56	9,09
7	13,61	13,99	7,28	12,85
8	22,02	18,6	10,95	14,06
9	24,52	16,95	11,09	13,26
10	7,14	5,37	7,53	10,39

Die Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes in Y-Richtung des FEM-Modells (vgl. 5.1.6) erfolgt nach der Gleichung (16) und ist für den jeweiligen Probekörper in der Tabelle 9 dargestellt. Für PK07_7d liegt aufgrund der Eindringtiefe ein negativer Wert vor. Um den Sinn der Ansetzung zu entsprechen, ist dieser Wert auf null (0) gesetzt.

Tabelle 9 Geschwindigkeitsfelder der jeweiligen Probekörper

Nr.	7d in Sec. = 604.800 s	14d in Sec. = 1.209.600 s
	DIF 7d zu MELP 7d [m/s]	DIF 14d zu MELP 14d [m/s]
1	$1,055 \cdot 10^{-8}$	$5,944 \cdot 10^{-9}$
2	$1,744 \cdot 10^{-8}$	$8,061 \cdot 10^{-9}$
3	$2,546 \cdot 10^{-9}$	$1,720 \cdot 10^{-9}$
4	$7,556 \cdot 10^{-9}$	$5,109 \cdot 10^{-9}$
5	$1,296 \cdot 10^{-8}$	$5,597 \cdot 10^{-9}$
6	$2,579 \cdot 10^{-9}$	$1,314 \cdot 10^{-9}$
7	0	$1,943 \cdot 10^{-9}$
8	$9,011 \cdot 10^{-9}$	$5,837 \cdot 10^{-9}$
9	$1,802 \cdot 10^{-9}$	$1,868 \cdot 10^{-9}$
10	$1,290 \cdot 10^{-9}$	$3,216 \cdot 10^{-9}$

Zur Nachvollziehbarkeit ist nachstehend die Berechnung für das Geschwindigkeitsfeld u_y des Probekörpers Nr.1 zum Zeitpunkt von 7 Tagen eingefügt.

$$u_{y;PK1;7d} = \frac{\left(\frac{15,38 - 9,0}{1000}\right)}{604.800} = 1,055 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{s}\right] \quad (32)$$

6.1.3 Adsorption

Die Grundlagen zur Bestimmung der Adsorptionsisothermen ist in Kap. 5.1.5 beschrieben und findet hier seine Anwendung. Dazu wird sich auf die Werte von TANG [28] bezogen, die in der Tabelle 3 (S.43) gelistet sind. Zusammen mit der Gleichung (15) von S.44 ist eine Bestimmung der wirkenden Adsorption möglich. Das für die Berechnung benötigte molare Gewicht von Chlor beträgt in diesem Fall 35,45 [g/mol].

Tabelle 10 Beiwerte und Berechnung der Adsorptionsisotherme für das CDF-Modell

Nr.	Bindemittel	Freundlich-Konstante f_b [-]	Freundlich-Exponent β [-]	ermittelte Freundlich-Isotherme [mol/kg]
1	CEMI	3,57	0,38	0,30254
2	CEMI+SF (5%)	3,57	0,38	0,30254
3	CEMI	3,57	0,38	0,30254
4	CEMI+SF (5%)	3,57	0,38	0,30254
5	CEMII/A-S	3,82	0,37	0,31449
6	CEMII/A-S	3,82	0,37	0,31449
7	CEMI	3,57	0,38	0,30254
8	CEMIII/B	5,87	0,29	0,38336
9	CEMI+SFA (33%)	3,57	0,38	0,30254
10	CEMI+SF (11%)	3,57	0,38	0,30254

6.1.4 Arrhenius-Faktor

Bereits in Kapitel 5.1.6 ist erwähnt, dass für den Arrheniusfaktor zwei Varianten zur Implementierung vorliegen. Eine davon ist die statistische Bestimmung des Faktors nach PAGE et al. [30], auf den sich GEHLEN [3] in seiner Arbeit bezieht. Dieser Arrheniusfaktor ist mit der Gleichung (18) von S.47 und der Ist-Temperatur aus Gleichung (19) zu bestimmen.

$$k_{e,be=4800} = \exp\left(4800 \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{269,67}\right)\right) = 0,24237 [-] \quad (33)$$

Die Variante für einen variablen Arrheniusfaktor, der sich zwischen den untersuchten Probekörpern unterscheidet, ist der Tabelle 11 zu entnehmen. Diese beinhaltet den veränderlichen Regressionsparameter b_e bzw. die Aktivierungstemperatur E_A/R [K], die gemäß der Tabelle 2 von RÖHLING [26] der jeweilig passenden Bindemittelzusammensetzung zugeordnet ist.

Tabelle 11 Bestimmung des variablen Arrheniusfaktor

Nr.	Regressionsparameter b_e [K]	Arrheniusfaktor [-]
1	4000	0,30695
2	4000	0,30695
3	4000	0,30695
4	4200	0,28935
5	4200	0,28935
6	4200	0,28935
7	4000	0,30695
8	5600	0,19138
9	4200	0,28935
10	4200	0,28935

6.1.5 Ergebnisse der Varianten

Es sind verschiedene Kombinationen und Ansätze untersucht worden, um die Abweichungen zwischen Labor- und FEM-Ergebnissen zu minimieren. Die Reihenfolge der folgenden Varianten entspricht dabei der chronologischen Abfolge der Untersuchungen bzw. Berechnungen. Die grundlegenden gleichbleibenden Einstellungen, wie sie bereits im Abschnitt 5.1 zu finden sind, werden zum Verständnis in der nachfolgenden Probekörperabbildung kurz zusammengefasst.

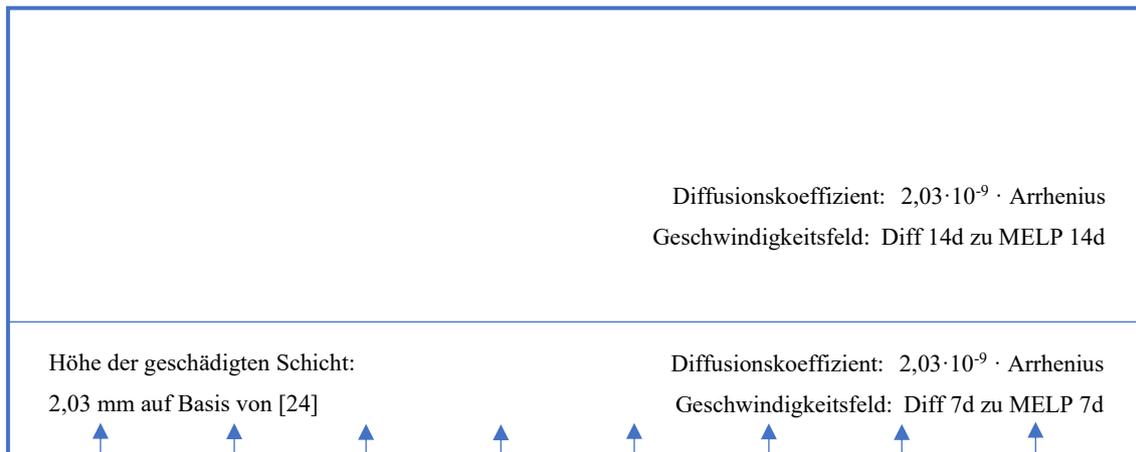


Abbildung 36 Schema zum Aufbau eines Probekörpers

Zu beachten ist, dass die geschädigte Schicht nur den rissinduzierten Bereich beschreibt. Dies bedeutet, dass die abgewitterte Schicht aus den CDF-Versuchen nicht im FEM-Modell abgebildet wird. Die Eindringtiefen aus Tabelle 8 nach WEGNER [36] beinhalten die Höhen der abgewitterten Schicht, sodass dieser Betrag für den Vergleich mit den simulierten Eindringtiefen subtrahiert werden muss. Die resultierenden Eindringtiefen enden auf 0,5 mm-Schritte, da dies dem Raster der LIBS-Untersuchung entspricht.

Tabelle 12 Bestimmung der Eindringtiefe ohne der abgewitterten Schicht aus CDF

Nr.	Chlorid Eindringtiefe [mm]		Höhe der abgewitterten Schicht [mm]		Resultierende Eindringtiefe [mm]	
	MELP 7d	MELP 14d	MELP 7d	MELP 14d	MELP 7d	MELP 14d
1	15,38	20,19	0,88	3,19	14,50	17,00
2	15,05	18,75	0,55	1,75	14,50	17,00
3	10,04	12,08	0,04	0,08	10,00	12,00
4	10,07	13,68	0,07	0,18	10,00	13,50
5	14,84	14,27	0,84	3,27	14,00	11,00
6	9,56	9,09	0,06	0,09	9,50	9,00
7	7,28	12,85	0,28	0,35	7,00	12,50
8	10,95	14,06	0,95	1,56	10,00	12,50
9	11,09	13,26	0,09	0,26	11,00	13,00
10	7,53	10,39	0,53	0,89	7,00	9,50

Variante 1 (allgemein variabler Hydratationsgrad)

Die erste Näherung erfolgt mit der Verwendung der in 6.1.1 beschriebenen Variabilität für den Hydratationsgrad und dementsprechend auch für die Porosität. Der Startwert bezieht sich auf den Tag 35 nach Probekörperherstellung, sodass die Gleichung (13) von S.41 mit $t+35$ anzusetzen ist.

$$\alpha_{(t)} = (1 - e^{(-3,8 \cdot \frac{w}{z})}) \cdot e^{\left(A_{Röhling} \cdot \left(\frac{(t+35) \cdot 24}{t_k}\right)^{B_{Röhling}}\right)} \quad (34)$$

Tabelle 13 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 1)

Nr.	Chlorid Eindringtiefe abzgl. abgewitterte Schicht [mm]		Simulierte Eindringtiefe [mm]	
	MELP 7d	MELP 14d	nach 7d	nach 14d
1	14,50	17,00	9,51	15,80
2	14,50	17,00	11,16	19,40
3	10,00	12,00	7,82	10,50
4	10,00	13,50	9,52	14,59
5	14,00	11,00	9,41	14,39
6	9,50	9,00	7,01	9,58
7	7,00	12,50	7,86	10,68
8	10,00	12,50	8,28	13,25
9	11,00	13,00	6,82	9,38
10	7,00	9,50	8,85	12,40

Tabelle 14 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 1)

Nr.	Abweichung in [mm]		Abweichung in [%]	
	nach 7d	nach 14d	nach 7d	nach 14d
1	-5,0	-1,2	-34,4 %	-7,1 %
2	-3,3	2,4	-23,0 %	14,1 %
3	-2,2	-1,5	-21,8 %	-12,5 %
4	-0,5	1,1	-4,8 %	8,1 %
5	-4,6	3,4	-32,8 %	30,8 %
6	-2,5	0,6	-26,2 %	6,4 %
7	0,9	-1,8	12,3 %	-14,6 %
8	-1,7	0,8	-17,2 %	6,0 %
9	-4,2	-3,6	-38,0 %	-27,8 %
10	1,9	2,9	26,4 %	30,5 %

x < 3mm	3mm < x < 6mm	x > 6mm
x < 15 %	25 % < x < 15 %	x > 25 %

Variante 2 (individueller variabler Hydratationsgrad bis Tag 35)

Bekannt ist, dass sich der Hydratationsgrad bei Temperaturen unter 5°C sehr verlangsamt und bei weiter sinkenden Temperaturen immer weniger CSH-Phasen gebildet werden. Unter -10°C ist dieser vollständig gestoppt. [38] Mit dem Hintergrund, dass die Durchschnittstemperatur im CDF-Versuch -3,33°C beträgt, ist der Ansatz gewählt worden, dass der variable Hydratationsgrad für den Tag 35 nach Probekörperherstellung bestimmt wird und dieser über die folgenden simulierten 14 Tage konstant bleibt. In der Gleichung (13) von S.41 ist daher für die Zeit $t=840$ h anzusetzen.

$$\alpha_{(840)} = \left(1 - e^{\left(-3,8 \frac{w}{z}\right)}\right) \cdot e^{\left(A_{Röhling} \cdot \left(\frac{(35 \cdot 24)}{t_k}\right)^{B_{Röhling}}\right)} \quad (35)$$

Tabelle 15 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 2)

Nr.	Chlorid Eindringtiefe abzgl. abgewitterte Schicht [mm]		Simulierte Eindringtiefe [mm]	
	MELP 7d	MELP 14d	nach 7d	nach 14d
1	14,50	17,00	10,22	16,79
2	14,50	17,00	11,51	19,05
3	10,00	12,00	8,28	11,24
4	10,00	13,50	9,86	15,73
5	14,00	11,00	9,68	15,29
6	9,50	9,00	7,53	9,99
7	7,00	12,50	8,32	11,20
8	10,00	12,50	9,09	13,88
9	11,00	13,00	7,65	10,54
10	7,00	9,50	9,42	13,04

Tabelle 16 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 2)

Nr.	Abweichung in [mm]		Abweichung in [%]	
	nach 7d	nach 14d	nach 7d	nach 14d
1	-4,3	-0,2	-29,5 %	-1,2 %
2	-3,0	2,1	-20,6 %	12,1 %
3	-1,7	-0,8	-17,2 %	-6,3 %
4	-0,1	2,2	-1,4 %	16,5 %
5	-4,3	4,3	-30,9 %	39,0 %
6	-2,0	1,0	-20,7 %	11,0 %
7	1,3	-1,3	18,9 %	-10,4 %
8	-0,9	1,4	-9,1 %	11,0 %
9	-3,4	-2,5	-30,5 %	-18,9 %
10	2,4	3,5	34,6 %	37,3 %

Variante 3 (variabler Hydratationsgrad und variabler Arrheniusfaktor)

Die dritte Variante beruht auf der ersten Annäherung (Var.1 S.66) mit dem Zusatz, dass der Arrheniusfaktor von der Zementzusammensetzung bzw. der Aktivierungstemperatur abhängig ist. Wie es bereits im Abschnitt 6.1.4 beschrieben ist, wird der Regressionsparameter b_e von GEHLEN [3] mit den bindemittelabhängigen Werten von RÖHLING [26] ersetzt.

Tabelle 17 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 3)

Nr.	Chlorid Eindringtiefe abzgl. abgewitterte Schicht [mm]		Simulierte Eindringtiefe [mm]	
	MELP 7d	MELP 14d	nach 7d	nach 14d
1	14,50	17,00	10,30	16,48
2	14,50	17,00	11,60	19,47
3	10,00	12,00	8,34	11,19
4	10,00	13,50	9,65	15,59
5	14,00	11,00	9,58	15,23
6	9,50	9,00	7,34	9,91
7	7,00	12,50	8,38	11,13
8	10,00	12,50	8,26	13,15
9	11,00	13,00	7,19	9,78
10	7,00	9,50	9,39	13,07

Tabelle 18 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 3)

Nr.	Abweichung in [mm]		Abweichung in [%]	
	nach 7d	nach 14d	nach 7d	nach 14d
1	-4,2	-0,5	-29,0 %	-3,1 %
2	-2,9	2,5	-20,0 %	14,5 %
3	-1,7	-0,8	-16,6 %	-6,8 %
4	-0,4	2,1	-3,5 %	15,5 %
5	-4,4	4,2	-31,6 %	38,5 %
6	-2,2	0,9	-22,7 %	10,1 %
7	1,4	-1,4	19,7 %	-11,0 %
8	-1,7	0,7	-17,4 %	5,2 %
9	-3,8	-3,2	-34,6 %	-24,8 %
10	2,4	3,6	34,1 %	37,6 %

Variante 4 (variabler Hydratationsgrad bis Tag 35 und variabler Arrheniusfaktor)

Die letzte Variante beruht auf der Koppelung der Ansätze für den Hydratationsgrad (S.66) und des Arrheniusfaktors (S.67), sodass dies eine Erweiterung der zweiten Variante ist. Dies bedeutet, dass analog zum vorherigen Ablauf (Var.4) die verschiedenen Faktoren zur Berücksichtigung der Temperaturen bestimmt werden (vgl. Tabelle 11) und der der Hydratationsgrad als variabler Wert für den Tag 35 festgelegt wird.

Tabelle 19 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 4)

Nr.	Chlorid Eindringtiefe abzgl. abgewitterte Schicht [mm]		Simulierte Eindringtiefe [mm]	
	MELP 7d	MELP 14d	nach 7d	nach 14d
1	14,50	17,00	10,71	17,49
2	14,50	17,00	11,86	20,07
3	10,00	12,00	9,22	12,35
4	10,00	13,50	10,10	16,67
5	14,00	11,00	9,91	16,49
6	9,50	9,00	8,00	10,84
7	7,00	12,50	9,24	12,51
8	10,00	12,50	8,49	13,49
9	11,00	13,00	8,20	11,04
10	7,00	9,50	9,62	14,01

Tabelle 20 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 4)

Nr.	Abweichung in [mm]		Abweichung in [%]	
	nach 7d	nach 14d	nach 7d	nach 14d
1	-3,8	0,5	-26,1 %	2,9 %
2	-2,6	3,1	-18,2 %	18,1 %
3	-0,8	0,4	-7,8 %	2,9 %
4	0,1	3,2	1,0 %	23,5 %
5	-4,1	5,5	-29,2 %	49,9 %
6	-1,5	1,8	-15,8 %	20,4 %
7	2,2	0,0	32,0 %	0,1 %
8	-1,5	1,0	-15,1 %	7,9 %
9	-2,8	-2,0	-25,5 %	-15,1 %
10	2,6	4,5	37,4 %	47,5 %

Diskussion der Ergebnisse

Die absoluten Werte der Eindringtiefen geben eine ungefähre Erfolgsquote ab, wie gut das Modell die jeweiligen PK abbildet. Jedoch kann mit der Gegenüberstellung der prozentualen Abweichungen deutlich besser das Verhalten diskutiert werden. Diese sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 21 Gesamtübersicht der gerundeten prozentualen Abweichungen und Markierung der besten Annäherung

Nr.	Zeit	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
1	7d	-34 %	-29 %	-29 %	<u>-26 %</u>
1	14d	-7 %	<u>-1 %</u>	-3 %	3 %
2	7d	-23 %	-21 %	-20 %	<u>-18 %</u>
2	14d	14 %	<u>12 %</u>	14 %	18 %
3	7d	-22 %	-17 %	-17 %	<u>-8 %</u>
3	14d	-12 %	-6 %	-7 %	<u>3 %</u>
4	7d	-5 %	-1 %	-3 %	<u>1 %</u>
4	14d	<u>8 %</u>	16 %	15 %	23 %
5	7d	-33 %	-31 %	-32 %	<u>-29 %</u>
5	14d	<u>31 %</u>	39 %	38 %	50 %
6	7d	-26 %	-21 %	-23 %	<u>-16 %</u>
6	14d	<u>6 %</u>	11 %	10 %	20 %
7	7d	<u>12 %</u>	19 %	20 %	32 %
7	14d	-15 %	-10 %	-11 %	<u>0 %</u>
8	7d	-17 %	<u>-9 %</u>	-17 %	-15 %
8	14d	6 %	1 %	<u>5 %</u>	8 %
9	7d	-38 %	-30 %	-34 %	<u>-25 %</u>
9	14d	-28 %	-19 %	-25 %	<u>-15 %</u>
10	7d	<u>26 %</u>	35 %	34 %	37 %
10	14d	<u>30 %</u>	37 %	37 %	47 %
		n=6	n=3	n=1	n=10

Bei dem Vergleich der prozentualen Abweichungen wie in Tabelle 21 ist deutlich zu erkennen, dass die vierte Variante die höchste Anzahl (n=10) an Messungen mit den geringsten Abweichungen zu der Realität (Laborergebnisse) vorweisen kann. Es ist auffällig, wenn dies nicht der Fall ist, dass die treffendste Annäherung hauptsächlich unter der Var. 1 zu finden ist, sodass die Zwischenschritte weniger Auswirkung auf die Annäherung haben.

Um die Unterschiede zwischen sieben und vierzehn Tagen verstehen zu können, muss wiederholt erwähnt werden, dass für die geschädigte Schichthöhe ein allgemein untersuchter Wert angesetzt ist. Bei dem alleinigen Betrachten der Werte nach sieben Tagen ist deutlich, dass 8 von 10 Probekörper (7d) eine negative Abweichung aufzeigen. Negativ bedeutet in

diesem Fall, dass die simulierte Eindringtiefe geringer ist, als diejenige die im Labor gemessen wurde. Daraus lässt sich schließen, dass die Ausmaße der geschädigten Schicht in der Wirklichkeit höher oder das Geschwindigkeitsfeld (Konvektion) schneller sind. Aber es besteht auch die Möglichkeit, dass im Laborversuch das Geschwindigkeitsfeld der Konvektion in unterschiedlichen Intervallen wirkt und nicht wie im FEM-Modell zuerst eine höhere und anschließend die geringere Geschwindigkeit. Ein Bezug zu einem der Modelle aus Abschnitt 1.3 kann z. B. mit dem Modell des schichtweisen Gefrierens gemacht werden. Damit ist gemeint, dass es im CDF-Versuch durchaus zu unterschiedlichem Gefrier- und Tauverhalten kommen kann und sich einzelne Schichten abbilden, die die Geschwindigkeit des Vordringens der Chloridionen beeinflussen könnten. Diese Vermutung besteht, da im Mittel der 7-Tage Wert unterschätzt und der 14-Tage Wert überschätzt wird, sodass ein oder mehrere Sprünge in der Eindringgeschwindigkeit vorliegen könnten.

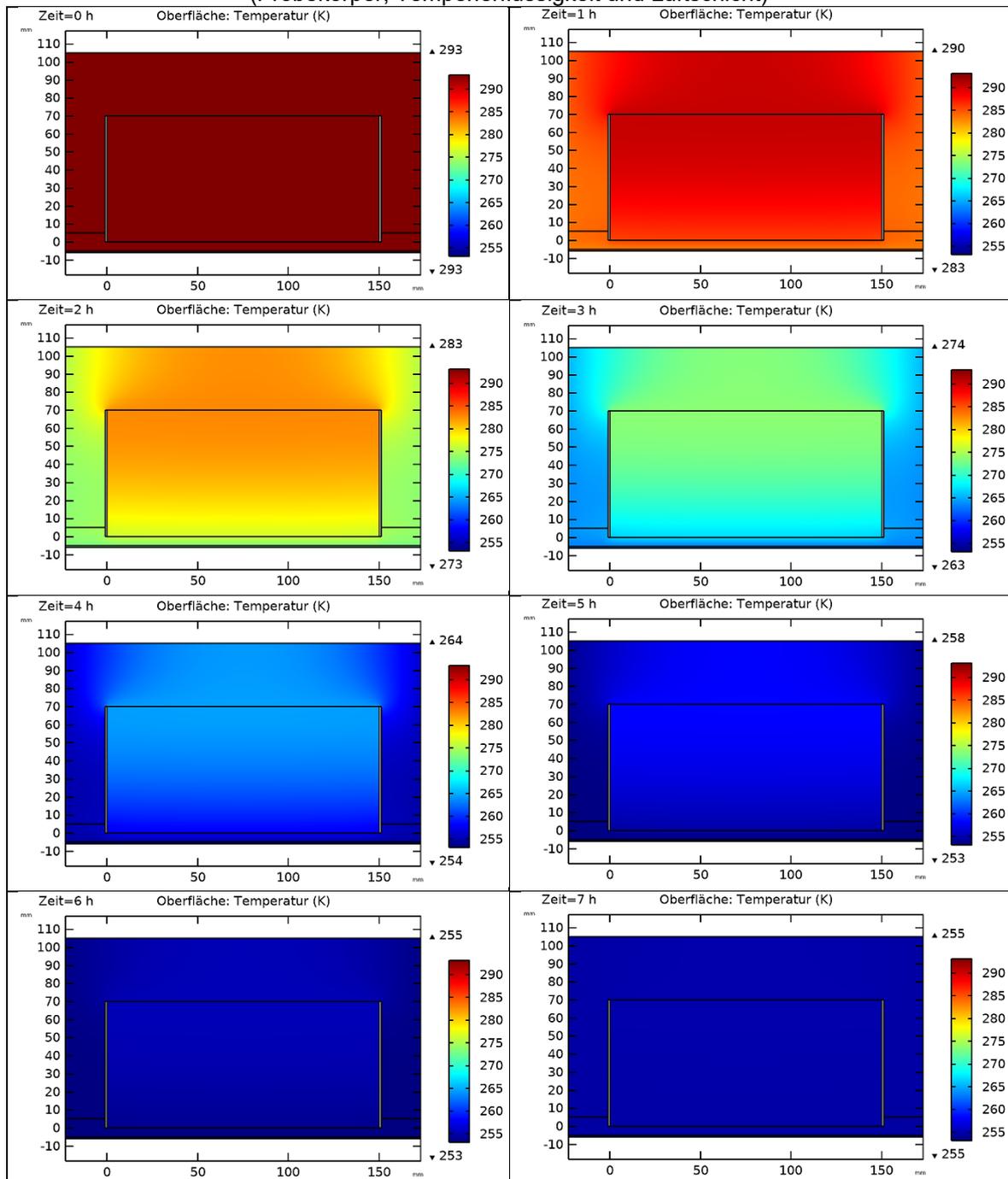
Zu den Probekörpern, bei denen nach sieben Tagen eine positive Abweichung zu notieren ist, handelt es sich um die PK-Nr. 7 und Nr.10. Für PK-Nr. 7 ist die Ursache offensichtlich, da dort ein negatives Geschwindigkeitsfeld bestimmt und dieses dann zu Null geändert wird. PK-Nr. 10 zeigt andere Auffälligkeiten, besonders im Vergleich mit dem Probekörper 9. Beide beinhalten einen CEM I 42,5 N als Bindemittel, allerdings unterscheiden sie sich bei der Wahl der Zusatzstoffe (PK9 → 33% Flugasche ; PK10 → 11% Silikastaub). Die jeweiligen FEM-Ergebnisse der beiden Probekörper weisen einen großen Unterschied auf, indem sie im Durchschnitt ca. 60 Prozentpunkte voneinander abweichen. Besonders in diesen beiden Fällen wird deutlich, dass hier die allgemeine Definition der Parameter und die Berücksichtigung der Bindemittel zu wenig bzw. zu stark greift. Die modifizierten Diffusionskoeffizienten in Tabelle 8 stellen ebenfalls klar, dass es sich bei dem Probekörper 10 um ein sehr dichtes Gefüge handelt, das bei Betonen mit Silikastaub zu erwarten ist. Die Silikaflugasche besitzt ebenfalls die Eigenschaft der Gefügeverdichtung, jedoch setzt das puzzolanische Wirken im Vergleich zu der Hydratation wesentlich später ein. [38] Somit kann die Ursache der zu gering simulierten Eindringtiefen darin liegen, dass mit dem Faktor „Zeit“, bei der Parameterbestimmung für das Geschwindigkeitsfeld sowie für den Beiwerten der Hydratation, die Simulation das Verhalten des Betons gegenüber der Realität zu früh abbildet. Damit ist gemeint, dass ein individueller Abminderungsfaktor für den Hydratationsgrad eine höhere Porosität hervorbringen würde und die Chloridionen tiefer eindringen könnten.

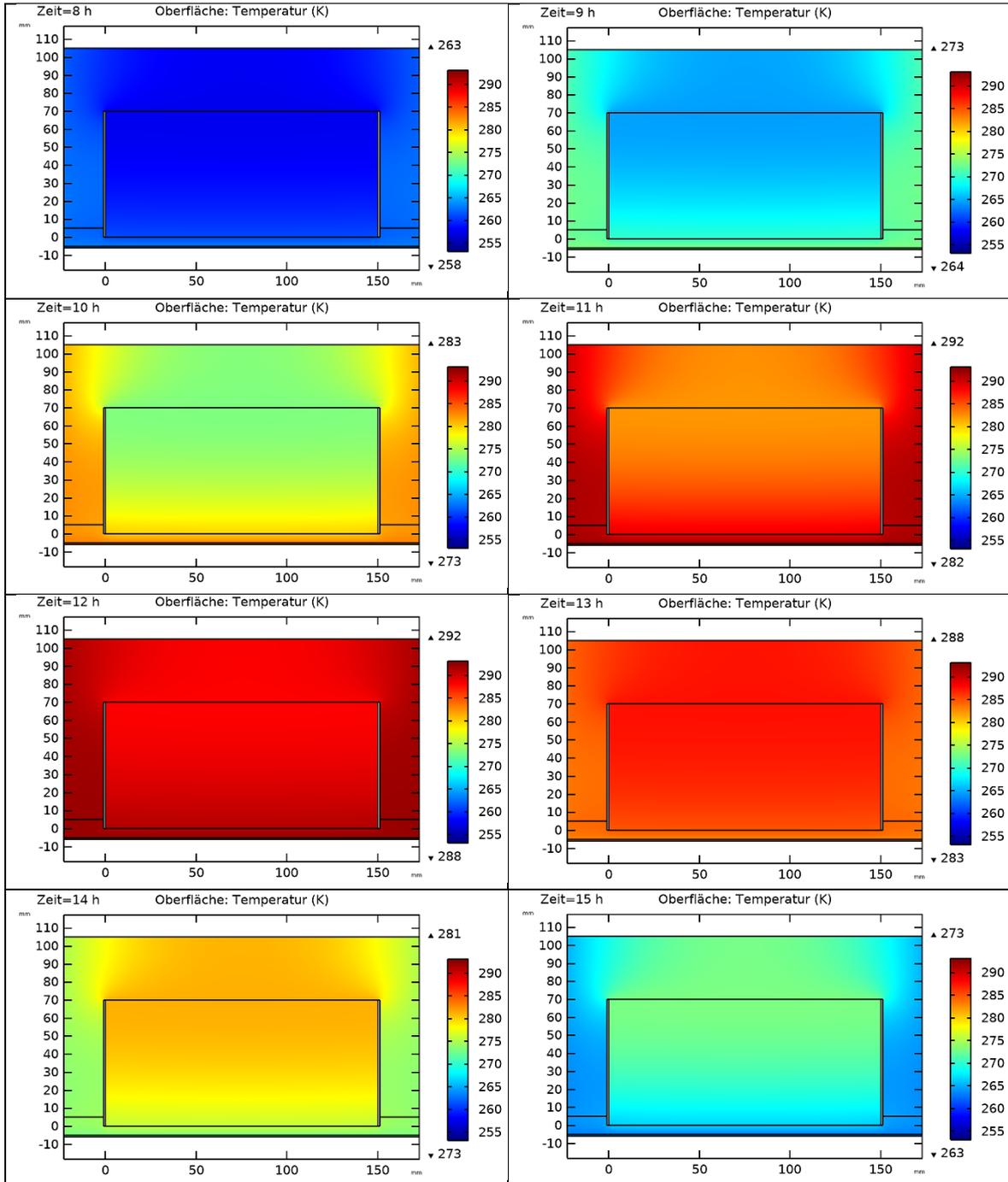
Bei der Betrachtung der Ergebnisse, ohne die der Probekörper Nr.9 und Nr.10, lässt sich eine Verbindung zwischen dem Luftporengehalt und der im Mittel besseren Annäherung vermuten, ohne einen Bezug zu einer bestimmten Variante einzugehen. Mit der Bestimmung der durchschnittlichen Abweichung ergibt sich für die Luftporen-Betone (ohne PK9 & 10) eine mittlere Abweichung von $\pm 6,8$ -Prozentpunkten, im Vergleich zu $\pm 19,5$ - Prozentpunkten bei den Betonen ohne zusätzliche Luftporen. Im Modell sind die Luftporen bzw. ihre Auswirkung indirekt über das Geschwindigkeitsfeld implementiert. Deutlich ist diese Annahme zwischen den Probekörpern Nr.5 und Nr.6 zu erkennen, die sich in ihrer Zusammensetzung lediglich im Gehalt der Luftporen unterscheiden. Am einzelnen Abgleich ist dort der Unterschied zwischen den prozentualen Abweichungen offensichtlich, so wie dies auch bei den zuvor bestimmten Mittelwerten der Fall ist.

Ein Parameter der ebenfalls zu einer Unregelmäßigkeit führen kann, ist die Ansetzung des Arrheniusfaktors auf Basis der Durchschnittstemperatur von $-3,33^{\circ}\text{C}$. Je nachdem wie gut oder schlecht der Zementstein bzw. das Porenwasser die Temperatur leitet, kann der Unterschied zwischen tatsächlich anliegender Gradzahl im Inneren des Betonkörpers und der Temperierflüssigkeit schwanken. Eine mögliche Auswirkung auf den Arrheniusfaktor kann in beide Richtungen argumentiert werden. Sollte z. B. die innenliegende Temperatur zu Beginn des CDF-Versuches weniger als 20°C betragen, resultiert daraus eine geringere Durchschnittstemperatur, die zu einer größeren Abminderung des freien Diffusionskoeffizienten führt. Die Hydratation verzögert sich, da bei Temperaturen unter 5°C diese deutlich verlangsamt wird (vgl. S. 67) und erst später wieder einsetzt, wenn höhere Temperaturen vorliegen. Dieses Phänomen könnte durchaus bei den 14-Tagen-FEM-Eindringtiefen Auswirkungen haben, da wie bereits erwähnt, der Großteil dieser Werte gegenüber der Realität überschätzt wird. Umgekehrt kann in manchen Fällen die Temperatur über die Tiefe auch zunehmen, z. B. durch einen verzögerten Hydratationsvorgang mit der dazugehörigen entstehenden Wärme und einer eventuellen Speicherung durch eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Somit ist es möglich, dass in den ersten sieben Tagen höhere Temperaturen im Beton zum Rand abgeleitet werden und der im Modell angesetzte Arrheniusfaktor für die Realität zu gering ist. Ebenso ist die verzögerte Anpassung der Kerntemperatur an die Umgebungstemperatur durchaus ein Ansatzpunkt, der zu einer niedrigeren Innentemperatur führen kann. Denn das Zeitintervall, bei dem sich die Temperatur in der Nähe von $+20^{\circ}\text{C}$ befindet, beträgt nur ein Drittel von der Zeitspanne bei -20°C (vgl. Abschnitt 3.1). In der nachfolgenden Tabelle 22 ist ein in COMSOL-Multiphysics nachgebildeter Aufbau dargestellt, bei dem die

Temperierflüssigkeit mit dem Temperaturverlauf von Abbildung 11 verknüpft ist. Die 16 Abbildungen stellen die numerisch ermittelte Verteilung der Wärme dar, die auf die in COMSOL hinterlegten Wärmeleitfähigkeit von Beton beruht. Dargestellt ist ein Intervall ab der Stunde 0 bis zur Stunde 12 und den ersten drei Stunden des nachfolgenden Intervalls (13. ; 14. und 15. h). Dabei ist zu erkennen, dass erst die 15. Stunde wieder analog zu der dritten Stunde ist.

Tabelle 22 in COMSOL nachgebildeter Aufbau des CDF-Versuches
(Probekörper, Temperierflüssigkeit und Luftschicht)





6.2 Laborversuche RCM zu FEM

Anders als bei der Simulierung der CDF-Ergebnisse in FEM reduzieren sich die Varianten des Modells für den Migrationsversuch auf die fortlaufende Genauigkeit der Simulationen. Die grundlegenden Parameter sind gleichbleibend zum vorherigen Abschnitt 6.1 und sind der Tabelle 4 und Tabelle 5 (S.59), mit Ausnahme der anliegenden Konzentration, zu entnehmen. Der Unterschied zwischen PK1 & 2 und den Probekörpern PK3 bis PK10 hat den Hintergrund, dass ab PK3 entschieden wurde, Bromid einzusparen und die 10-%ige Lösung durch eine 3-%ige Lösung auszutauschen.

Tabelle 23 Anliegende NaBr-Konzentration
im Migrationsversuch

Nr.	Angesetzte NaBr-Konzentration [mol/m ³]
1	1710
2	1710
3	510
4	510
5	510
6	510
7	510
8	510
9	510

6.2.1 Migrationskoeffizient

Nach dem Schema, wie es im Abschnitt 5.2.2 erläutert ist, wird für den Diffusionskoeffizienten der aus den Laborergebnissen ermittelte Migrationskoeffizient angesetzt. Die Berechnungsgrundlage sowie die Randwerte zu den RCM-Versuchen sind im Anhang dieser Arbeit beigefügt. (vgl. Tabelle A 2 bis Tabelle A 31)

Tabelle 24 Migrationskoeffizient analog den Laborergebnissen

Nr.	Br-Migrationskoeffizient	
	MIG 7d [m ² /s] · 10 ⁻¹²	MIG 14d [m ² /s] · 10 ⁻¹²
1	14,63	15,2
2	9,75	10,84
3	13,37	13,15
4	7,3	7,59
5	12,82	16,44
6	11,81	12,65
7	12,13	12,82
8	2,24	2,09
9	11,94	11,62
10	2,97	3,7

6.2.2 Adsorption

Analog zu 6.1.3 findet für das RCM-Modell die Bestimmung der Adsorptions-Isotherme mit der Gleichung (15) von S.44 statt, mit der Abwandlung, dass das molare Gewicht von Chlor ausgetauscht wird. Dies beträgt für Brom 79,904 [g/mol].

Tabelle 25 Beiwerte und Berechnung der Adsorptionsisotherme für das Migrationsmodell

Nr.	Bindemittel	Freundlich-Konstante f_b [-]	Freundlich-Exponent β [-]	ermittelte Freundlich-Isotherme [mol/kg]
1	CEMI	3,57	0,38	0,30254
2	CEMI+SF (5%)	3,57	0,38	0,30254
3	CEMI	3,57	0,38	0,30254
4	CEMI+SF (5%)	3,57	0,38	0,30254
5	CEMII/A-S	3,82	0,37	0,31449
6	CEMII/A-S	3,82	0,37	0,31449
7	CEMI	3,57	0,38	0,30254
8	CEMIII/B	5,87	0,29	0,38336
9	CEMI+SFA (33%)	3,57	0,38	0,30254
10	CEMI+SF (11%)	3,57	0,38	0,30254

6.2.3 Ergebnisse

Für den Abgleich der modellierten Ergebnisse mit den realen Eindringtiefen findet im Gegensatz zur Simulierung des CDF-Versuches kein Variantenvergleich statt. Denn für den Migrationskoeffizienten ist der Laborwert anzusetzen, der die Information der Beiwerte für u.a. die Porosität und den Bromid-Transport bereits beinhaltet. Da die gemessenen Mittelwerte von WEGNER [36] sich auf den neuen Rand beziehen, der nach der Material-Abwitterung vorliegt, ist ein Abzug der Höhe nicht notwendig. Es ist lediglich, wie bereits erwähnt, die reale Geometriehöhe im FEM-Modell hinterlegt worden.

Tabelle 26 Bromid-Eindringtiefe durch Migration aus [36]

Nr.	Bromid Eindringtiefe [mm]		
	MIG nach 0d	MIG nach 7d	MIG nach 14d
1	18	32	32
2	8,9	19	20
3	21,5	26	19
4	10	14	15
5	10,1	26	33
6	13,9	24	25
7	20,1	26	29
8	n. lesbar	11	9
9	16,5	24,5	24
10	3,5	7	8,5

Vergleich der Bromid-Eindringtiefen aus Migration nach 0 Tagen CDF

Tabelle 27 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 0d

Nr.	Migration nach 0d			
	Bromid Eindringtiefe [mm]	Simulierte Eindringtiefe [mm]	Abweichung in [mm]	Abweichung in [%]
1	18	18,2	0,2	1,2 %
2	8,9	8,5	-0,4	-4,8 %
3	21,5	20,9	-0,6	-2,6 %
4	10	8,7	-1,3	-12,6 %
5	10,1	8,8	-1,3	-13,1 %
6	13,9	13,0	-0,9	-6,8 %
7	20,1	19,5	-0,6	-3,0 %
8	n. lesbar	---	---	---
9	16,5	15,6	-0,9	-5,6 %
10	3,5	2,0	-1,5	-42,9 %

x < 3mm	3mm < x < 6mm	x > 6mm
x < 15 %	25 % < x < 15 %	x > 25 %

Vergleich der Bromid-Eindringtiefen aus Migration nach 7 Tagen CDF

Tabelle 28 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 7d

Nr.	Migration nach 7d			
	Bromid Eindringtiefe [mm]	Simulierte Eindringtiefe [mm]	Abweichung in [mm]	Abweichung in [%]
1	32	33,5	1,5	4,5 %
2	19	21,5	2,5	13,3 %
3	26	28,4	2,4	9,2 %
4	14	15,4	1,4	10,3 %
5	26	25,7	-0,3	-1,3 %
6	24	23,7	-0,3	-1,5 %
7	26	26,1	0,1	0,3 %
8	11	8,4	-2,6	-23,3 %
9	24,5	24,9	0,4	1,8 %
10	7	5,6	-1,4	-20,7 %

Vergleich der Bromid-Eindringtiefen aus Migration nach 14 Tagen CDF

Tabelle 29 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 14d

Nr.	Migration nach 14d			
	Bromid Eindringtiefe [mm]	Simulierte Eindringtiefe [mm]	Abweichung in [mm]	Abweichung in [%]
1	32	33,4	1,4	4,5 %
2	20	23,0	3,0	14,9 %
3	28	27,5	-0,5	-1,8 %
4	15	15,8	0,8	5,5 %
5	33	33,7	0,7	2,2 %
6	25	25,2	0,2	0,9 %
7	29	29,5	0,5	1,8 %
8	9	8,1	-0,9	-10,4 %
9	24	23,8	-0,2	-0,9 %
10	8,5	7,1	-1,4	-16,6 %

Diskussion der Ergebnisse

Dass eine Großzahl der simulierten Eindringtiefen der Realität sehr nahekommt, ist bei der Betrachtung der implementierten Parameter zu erwarten, da es streng genommen eine Rückwärtsrechnung ist. Andererseits kann sehr genau bestimmt werden, welche Auswirkungen eine andere Probekörperhöhe oder eine geänderte Versuchsdauer hat. Dass bei dem numerisch ermittelten Migrationsversuch nach 0-Tagen-CDF bei dem PK-10 eine extreme prozentuale Abweichung vorliegt, ist in diesem Fall der im Labor ermittelten sehr geringen Eindringtiefe geschuldet. Die absolute Abweichung in Millimeter ist dem der anderen Probekörper ähnlich. Zu vermuten ist, dass diese allgemeinen Abweichungen auf Temperaturschwankungen oder eventuelle Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Laborwerte zurückzuführen sind. Denn insbesondere bei Probekörpern mit kaum vorgedrungener Bromidfront kann die Gesteinskörnung einen gering höheren Anteil an einer Blockierung des Eindringens haben, da speziell am Rand wenige Ausweichwege vorhanden sind. Ähnliches gilt bei den FEM-Migrations-Ergebnissen von PK-Nr. 8 und Nr.10 nach sieben bzw. vierzehn Tagen CDF. Dort wirkt sich allerdings die prozentuale Abweichung weniger extrem aus.

Wie sich die Bindemittelzusammensetzung auf den Migrationswert auswirkt, wird in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert. Eine ausführliche Ausarbeitung zu der Zementabhängigkeit mit seinen Zusatzstoffen kann der Arbeit von WEGNER [36] entnommen werden.

7. LITERATURVERGLEICH

7.1 CDF / Zweischichtmodell

Ein Vergleich mit Ergebnissen zum Frost-Tau-Versuch aus der Literatur lässt sich nur schwer herstellen, da die Herangehensweise und der Versuchsablauf, wie er im Fachbereich der HafenCity Universität durchgeführt wurde, nicht mit den recherchierten Quellen übereinstimmt. Des Weiteren sind die Parameter und Grunddaten, die in der Literatur zu finden sind, häufig nicht ausreichend, um diese in die Simulation zu implementieren. Als eine mögliche Vergleichsquelle ist der Artikel von ZHANG et al. [39] herangezogen worden, jedoch stellten sich beim näheren Betrachten deutliche Unterschiede dar.

Der Ablauf von ZHANG et al. ist wie folgt dem Artikel [39] zu entnehmen:

1. Die jeweiligen Probekörper werden nach 28 Tagen mehreren Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Ein Tauwechsel ist von $+20^{\circ}\text{C}$ auf -20°C und erneut auf $+20^{\circ}\text{C}$ in einer Zeit von $< 2,5$ h durchzuführen. Unterschieden wird dabei zwischen der Anzahl von 0, 10, 50 und 100 Frost-Tau-Wechsel.
2. Die Probekörper werden bei 50°C bis zum Erreichen eines konstanten Gewichtes getrocknet.
3. Anschließend folgt eine Beaufschlagung der Probekörper mit einer 3%-NaCl-Lösung für eine Dauer von 3, 10 bzw. 100 Tagen.

Für die Überprüfung sind die Daten von ZHANG et al. in einem leicht angepassten FEM-Modell in COMSOL-Multiphysics implementiert worden. Dazu fand der Ansatz des Geschwindigkeitsfeldes ebenfalls seine Anwendung. Der Abbildung 37 sind die Eindringtiefen aus dem Laborversuch von ZHANG et al. [39] zu entnehmen.

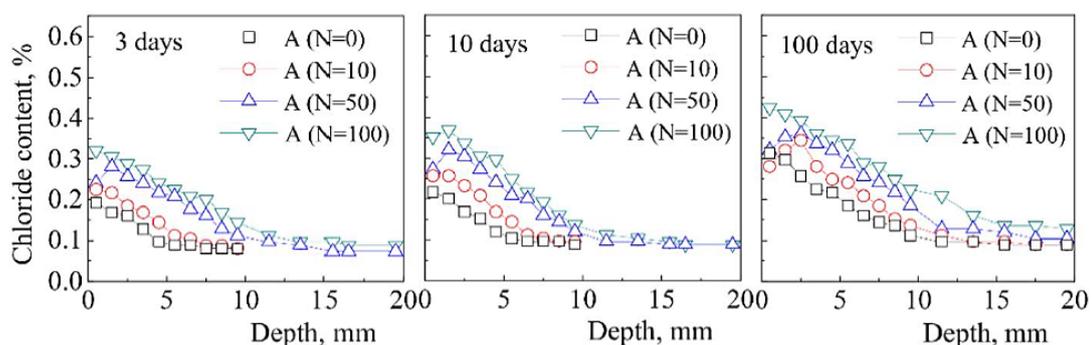


Abbildung 37 Chloridprofile der untersuchten Probekörper (aus Zhang et al. [39])

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes für die vorherrschende Konvektion wurden die Differenzen zwischen den Chloridprofilen der Daten aus 0 FTW (N=0) und der aus 10, 50 bzw. 100 FTW bei der Chloridkonzentration von 0,2 % abgelesen.

Tabelle 30 Ergebnisse aus Chloridprofil (vgl. Abbildung 37)

[mm]	Eindringtiefe bei 0,2%			Differenz zu 0 FTW		
	3d	10d	100d	3d	10d	100d
A (0 FTW)	1	2	5			
A (10 FTW)	2	3	7	1	1	2
A (50 FTW)	5	6	9	4	4	4
A (100 FTW)	7	7	12	6	5	7

Tabelle 31 Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes auf Basis der Differenz aus Tabelle 30

Tage in [s]	259.200	864.000	8.640.000
[m/s]	3d	10d	100d
A (10 FTW)	$3,86 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-9}$	$2,31 \cdot 10^{-10}$
A (50 FTW)	$1,54 \cdot 10^{-8}$	$4,63 \cdot 10^{-9}$	$4,63 \cdot 10^{-10}$
A (100 FTW)	<u>$2,31 \cdot 10^{-8}$</u>	<u>$5,79 \cdot 10^{-9}$</u>	<u>$8,10 \cdot 10^{-10}$</u>

Als Basis für die FEM-Eingabe sind die Werte für 100 FTW gewählt, da diese Anzahl an Frost-Tau-Wechsel etwa 14 Tage entsprechen ($100 \cdot 2,5 \text{ h} = 250 \text{ h} = 10,42 \text{ d}$) und die geschädigte Schichthöhe dem Wert aus der Arbeit von GABERSTEIN [25] entsprechen könnte. Für die Berechnung des Hydratationsgrades ist der Startwert auf die Zeit von 28 d festgelegt. Weitere Parameter wie w/z-Wert oder Masse des Zementes sind den Angaben von ZHANG et al. [39] entnommen. Außerdem ist der Diffusionskoeffizient für das Chlorid ($2,03 \cdot 10^{-9} \text{ [m}^2/\text{s]}$) in freiem Fluid ohne den Arrheniusfaktor angesetzt, da bei den Versuchen von ZHANG et al. während der NaCl-Beaufschlagung eine normale Raumtemperatur vorherrscht hat. Zu den zwei Varianten, die ausprobiert wurden, gehört ein Vergleich von 3d und 10d sowie zwischen 10d und 100d. Dabei sind die jeweilig höheren Geschwindigkeitsfelder für die geschädigte Schicht angesetzt. Die auf dieser Grundlage ermittelten Eindringtiefen sind der Abbildung 38 und Abbildung 39 zu entnehmen. Die Anzeigegrenze der „Heatmap“ wird für die Kenntlichmachung auf 34 mol/m^3 eingestellt, sodass bei Konzentrationen $< 34 \text{ mol/m}^3$ keine farbliche Darstellung stattfindet.

Bei der Betrachtung der Diagramme ist deutlich zu erkennen, dass das simulierte Chlorideindringen wesentlich tiefer eindringt als die Werte der Tabelle 30. Wie anfangs erwähnt verlaufen die Untersuchungen von ZHANG et al. einem abweichenden Schema, sodass ein endgültiger Abgleich diffizil ist.

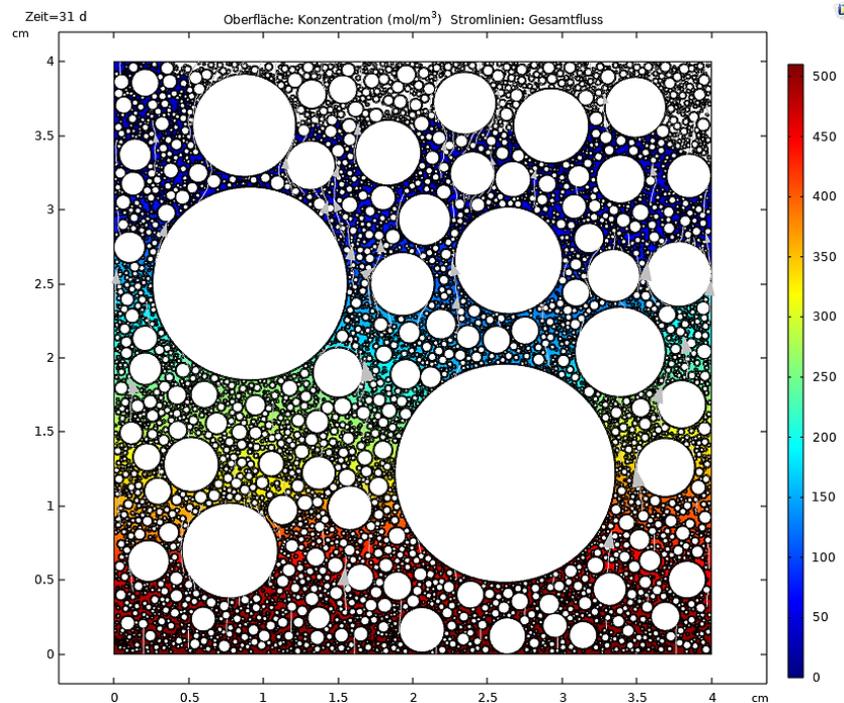


Abbildung 38 COMSOL Ergebnis – Variante 1 – Ergebnis für 28d+3d

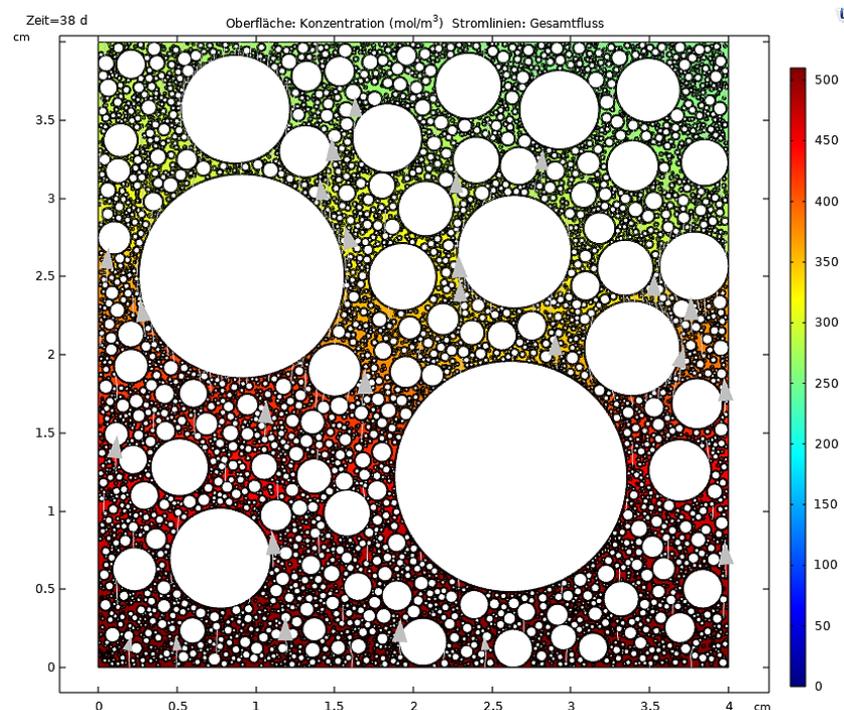


Abbildung 39 COMSOL Ergebnis – Variante 1 – Ergebnis für 28d+10d

Auf einen Vergleich des Migrationsmodells mit Ergebnissen aus der Literatur wurde verzichtet, da der Migrationskoeffizient der alleinige vom Betonkörper bestimmte Wert ist, der als Eingabemöglichkeit in COMSOL-Multiphysics vorliegt. Die restlichen Parameter wie der Stromfluss oder die Abmessungen aus der Geometrie sind keine Einflussgrößen für eine Annäherung, sondern vom Laborversuch festgelegte Randbedingungen. Demnach wäre es kein Literaturvergleich, sondern eine Literaturnachbildung. Dies hat eine Kontrollbestimmung der Ergebnisse aus der Arbeit von CELEBI [16] bestätigt.

8. AUSBLICK

Neben den in dieser Arbeit vorgestellten Varianten und Eingaben im FEM-Programm COMSOL-Multiphysics wurden weitere Möglichkeiten untersucht und ausprobiert, die aber nicht die gewünschten Ziele hervorbrachten. Zu einem dieser Möglichkeiten gehörte die Rückwärtsbestimmung nach einem Ansatz von TANG [28], indem ein Faktor aus dem vorliegenden Diffusionskoeffizient D_i und dem des anliegenden Salzes in einer freien Flüssigkeit D_0 gebildet wird.

$$f_i = \frac{D_i}{D_0} \quad (36)$$

Dieser dimensionslose Faktor f beinhaltet die Faktoren, die durch die Gesteinskörnung, der Porosität sowie der Tortuosität auf das Eindringen der Chloride einwirken. Eine Implementierung eines solchen Ansatzes hätte aber zur Folge gehabt, dass in COMSOL-Multiphysics sämtliche Beziehungen und Abhängigkeiten hätten deaktiviert werden müssen. Dennoch ist dies ein interessanter Ansatz, um zukünftige FEM-Simulationen zu belegen oder darauf aufzubauen.

Neben dem anvisierten Zweischichtmodell als Grundlage ist auch das Schema von CELEBI [16] eine vielversprechende Möglichkeit, um die Parameter der unterschiedlichen Schichten nach 0 und 7 bzw. 14 Tagen Frost-Tauwechsel zu ermitteln. CELEBI wendet dies auf einem beschichteten Betonkörper an, bei dem die einzelnen Schichthöhen klar definiert werden können. Im Fall einer wechselnden geschädigten Schichthöhe wäre der Ansatz möglich, dass für die intakte Schicht der Diffusionskoeffizient aus den Messungen nach 0 Tagen angesetzt wird und die Eindringtiefen aus den Daten nach 7 bzw. 14 Tage als Zielwerte gelten. Für die geschädigte rissinduzierte Schicht, die aus den Daten einer Lichtmikroskopie hervorgeht, wird iterativ ein Diffusionskoeffizient bestimmt, bis die Eindringtiefe dem zuvor genannten Zielwert entspricht. Für ein besseres Verständnis dieser Anwendung von CELEBI [16] ist nachfolgend eine bildliche Erklärung angefügt.

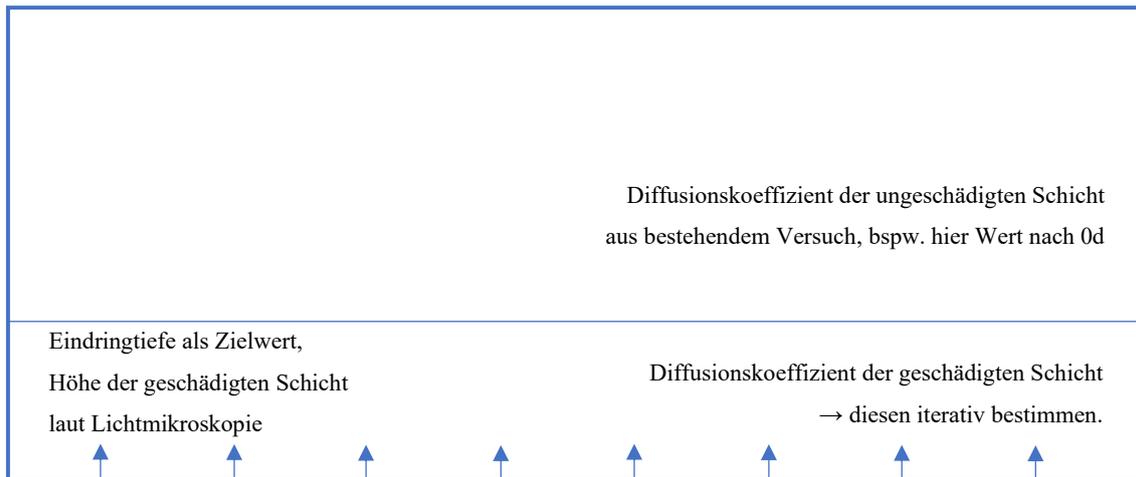


Abbildung 40 Bestimmung des variierenden Diffusionskoeffizienten für geschädigte Probekörper nach dem Schema von Celebi [16]

Neben der Anpassung des Verfahrens und der Eingabeparameter ist der nächste Schritt, dass die Geometrie der Gesteinskörnung, unter der Verwendung des Skriptes von ROKOß [23], ein weiteres Mal nach dem numerischen Prinzip generiert wird. Aufgrund der Tatsache, dass das Rechenzentrum der TU Hamburg-Harburg zur Verfügung stand und dadurch die Rechenleistung ausgelagert werden konnte, erfolgte parallel zu dieser Arbeit eine solche neue Generierung. Ein Beispiel ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen. Eine Verwen-

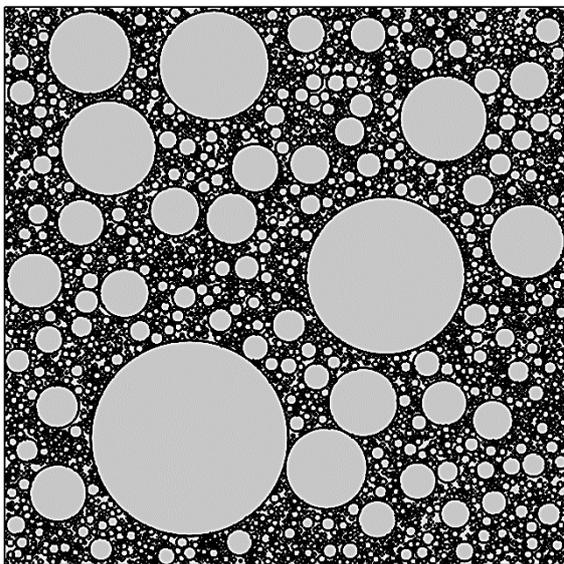


Abbildung 41 neu generierte GK-Geometrie

dung fand jedoch nicht statt, da die automatische Sortierung einen Teil der GK-Kreise nicht als Gesteinskörnung definiert hat. Dies hat zu größeren Abständen zwischen den verschiedenen Korngrößen geführt und hätte ein schnelleres Eindringen der Salzionen verursacht. Ein manuelles Anpassen/Zuordnen der Geometrien konnte aus Zeitgründen nicht realisiert bzw. eine Problemlösung konnte nicht durchgeführt werden.

9. FAZIT

Bei Betrachtung der erzielten Ergebnisse ist festzustellen, dass bei unterschiedlichen Zement- und Bindemittelzusammensetzungen mit allgemein angepassten Parametern eine Simulation zu erzielen ist, die sich der Realität aus dem Labor erkennbar annähern kann.

Die Abweichungen der Eindringtiefen aus den **Migrationsmessungen** weisen im Vergleich zu der FEM-Modellierung eine gute Näherung auf. Nur vier der 29 Ergebnisse (~86 %) zeigen eine Abweichung zu den Laborwerten über $\pm 15\%$ auf. Es ist zu erwähnen, dass drei dieser Näherungen zu Probekörpern gehören, die geringe Eindringtiefen aufweisen, sodass die durchlaufende ständige Unwucht von $\pm 1,0$ bis $1,5$ mm bei diesen Werten bereits schon zu einer höher ausfallenden prozentualen Abweichung führt. Zu erklären sind diese positiv ausfallenden Näherungen durch die notwendige Implementierung des im Labor ermittelten Migrationskoeffizienten. Dieser besitzt Informationen über die Dichte des Gefüges und gibt dadurch ebenfalls die Porosität und die Tortuosität mit an.

Mit der Simulation des Chlorideindringes in Bezug auf den **CDF-Versuch** liegt eine höhere Anzahl an Stellschrauben vor bzw. werden mehrere solcher Parameter benötigt, um ein FEM-Modell der Realität anzunähern. Mit angepassten Varianten konnte eine schrittweise Näherung durchgeführt werden, die jedoch mit fortschreitenden Variationen nicht bei jedem Probekörper Verbesserungen hervorbrachte. Die Anpassungen der Parameter richteten sich hauptsächlich nach der Bindemittel- und Temperaturabhängigkeit, die die Hydratation und die simulierte Porosität wesentlich beeinflusst. Zusätzlich erfährt der angesetzte Freie-Diffusionskoeffizient des Chlorides eine variable Temperaturanpassung, sodass die in den Laborversuchen anliegenden Frost-Tauwechsel als mittlere Temperatur implementiert werden kann. Zeitliche Anpassungen im Hinblick auf das anhaltende Intervall, in dem die Hydratation wirkt, weisen ebenfalls funktionierende Ansätze auf, um die Modellierung der Realität voranschreiten zu lassen.

Mit heranwachsendem Wissen über das Programm COMSOL-Multiphysics konnten Ansätze und Möglichkeiten für eine vorteilhafte Entwicklung der Anpassungen an die Realität genutzt werden, um die Ursache zu verfolgen bzw. anzugleichen. Darüber hinaus sind dem Abschnitt 8 „Ausblick“ weitere Ideen und Ansätze zu entnehmen, die zu einer Fortführung dieser Arbeit entwickelt werden könnten.

IV. TABELLENVERZEICHNIS

<u>Tabellen im Hauptteil</u>	<u>Seite</u>
Tabelle 1 Gelbildungsfaktor η_G [-] von Klinkerphasen und Zusatzstoffen [26]	39
Tabelle 2 Wärmeentwicklung und Beiwerte von verschiedenen Zementen zur Berechnung des Hydratationsgrades aus [26].....	41
Tabelle 3 Beiwerte aus [28] für Freundlich-Isotherme.....	43
Tabelle 4 Probekörperbezeichnung und Bindemittelrezeptur.....	59
Tabelle 5 Randparameter und Laborwerte zu den Probekörpern	59
Tabelle 6 Zuordnung des Gelbildungsfaktors η_G [-] (vgl. Tabelle 1) und der Beiwerte von Röhling (vgl. Tabelle 2)	60
Tabelle 7 Diffusionskoeffizient und Eindringtiefe aus Einlagerungsversuchen [36]	61
Tabelle 8 modifizierte Diffusionskoeffizienten und Eindringtiefe der CDF-Versuche [36]	61
Tabelle 9 Geschwindigkeitsfelder der jeweiligen Probekörper	62
Tabelle 10 Beiwerte und Berechnung der Adsorptionsisotherme für das CDF-Modell	63
Tabelle 11 Bestimmung des variablen Arrheniusfaktor	64
Tabelle 12 Bestimmung der Eindringtiefe ohne der abgewitterten Schicht aus CDF	65
Tabelle 13 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 1)	66
Tabelle 14 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 1)	66
Tabelle 15 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 2)	67
Tabelle 16 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 2)	67
Tabelle 17 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 3)	68
Tabelle 18 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 3)	68
Tabelle 19 Gegenüberstellung der Eindringtiefen von Labor zu FEM (Variante 4)	69
Tabelle 20 Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Eindringtiefe (Variante 4)	69
Tabelle 21 Gesamtübersicht der gerundeten prozentualen Abweichungen und Markierung der besten Annäherung.....	70
Tabelle 22 in COMSOL nachgebildeter Aufbau des CDF-Versuches (Probekörper, Temperierflüssigkeit und Luftschicht)	73
Tabelle 23 Anliegende NaBr-Konzentration im Migrationsversuch	75
Tabelle 24 Migrationskoeffizient analog den Laborergebnissen.....	76
Tabelle 25 Beiwerte und Berechnung der Adsorptionsisotherme für das Migrationsmodell	76

Tabelle 26 Bromid-Eindringtiefe durch Migration aus [36].....	77
Tabelle 27 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 0d.....	77
Tabelle 28 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 7d.....	78
Tabelle 29 Vergleich der Br-Eindringtiefe - 14d.....	78
Tabelle 30 Ergebnisse aus Chloridprofil (vgl. Abbildung 37).....	81
Tabelle 31 Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes auf Basis der Differenz aus Tabelle 30.....	81

Tabellen im Anhang A

Seite

Tabelle A 1 Bestimmung des Gelbildungsfaktors n_G auf Basis von [26] und Ablauf nach [23].....	101
Tabelle A 2 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	102
Tabelle A 3 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	103
Tabelle A 4 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	104
Tabelle A 5 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	105
Tabelle A 6 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	106
Tabelle A 7 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	107
Tabelle A 8 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	108
Tabelle A 9 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])...	109
Tabelle A 10 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	110
Tabelle A 11 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	111
Tabelle A 12 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	112
Tabelle A 13 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	113
Tabelle A 14 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	114
Tabelle A 15 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	115
Tabelle A 16 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	116
Tabelle A 17 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	117
Tabelle A 18 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	118
Tabelle A 19 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	119
Tabelle A 20 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	120
Tabelle A 21 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	121
Tabelle A 22 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	122

Tabelle A 23 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	123
Tabelle A 24 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	124
Tabelle A 25 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	125
Tabelle A 26 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	126
Tabelle A 27 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	127
Tabelle A 28 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	128
Tabelle A 29 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	129
Tabelle A 30 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36]) .	130
Tabelle A 31 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])	131

V. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<u>Abbildungen im Hauptteil</u>	<u>Seite</u>
Abbildung 1 Gefrieren von Porenwasser [8].....	14
Abbildung 2 Mikroeislinnenmodell aus [8].....	15
Abbildung 3 Schematische Darstellung des kryogenen Saugens [7].....	17
Abbildung 4 Rissfortpflanzung von einer Eisschicht in die Betonoberfläche [7]	19
Abbildung 5 Einfluss der NaCl-Konzentration auf die berechnete (Ring)-Zugfestigkeit [7].....	20
Abbildung 6 Schematische Darstellung des Brine-Rejection-Mechanismus [7].....	22
Abbildung 7 Darstellung der Geometrie im FEM-Modell für die Simulation der non-steady-state Chlorid Diffusion im gerissenen Beton [17]	25
Abbildung 8 Chloridkonzentrationsverteilung in Beton mit unterschiedlichen Rissgeometrien [17]	25
Abbildung 9 Vergleich von experimentellen Probekörpern zu numerisch erzeugten Ergebnissen [18]	26
Abbildung 10 Geometrie des 3-Phasen mesoskopischen Betonkörper	26
Abbildung 11 Temperaturzyklus – CDF-Verfahren [19] <i>Grau = Durchführung der Messungen</i>	27
Abbildung 12 Prüfbehälter beim CDF- bzw. CIF-Verfahren [19]	27
Abbildung 13 Abwitterungsintensität als schematische Darstellung [7]	28
Abbildung 14 Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit [19]	29
Abbildung 15 Messabfolge mit Ultraschalllaufzeit [19]	29
Abbildung 16 Prinzip-Skizze des Migrationsapparates [20]	30
Abbildung 17 Ablauf der Datenerhebung im Zuge der Laboruntersuchungen.....	33
Abbildung 18 COMSOL - Geometrie auf Basis der zufälligen Erzeugung (Skript Rokoß [23])	35
Abbildung 19 COMSOL - Einstellung zur Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (CDF)	36
Abbildung 20 COMSOL - Unterteilung der Komponente „Transport verdünnter spezies in porösen Medien“ (CDF)	37
Abbildung 21 COMSOL - Darstellung der Schichten und Auswahl eines Gebietes.....	38
Abbildung 22 (links) reguläre Berechnung der Adsorption (rechts) benutzerdefinierte Berechnung nach Vorgabe der regulären Berechnung (vgl. Gleichung (15)).....	44
Abbildung 23 COMSOL – Einstellung für das Fluid in „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“.....	45
Abbildung 24 COMSOL - Auslesen der Eindrigtiefe mithilfe der Funktion der Isolinien.....	49
Abbildung 25 COMSOL - Darstellung der Isolinie in der Probekörper-Geometrie.....	49

Abbildung 26 COMSOL - FEM-Netz der Geometrie für das Zweischichtmodell (CDF).....	50
Abbildung 27 COMSOL – Geometrie der Probekörper für die Modellierung des RCM-Versuches	51
Abbildung 28 COMSOL - Einstellung zur Komponente „Transport verdünnter Spezies in porösen Medien“ (RCM)	52
Abbildung 29 COMSOL - Unterteilung der Komponente „Transport verdünnter spezies in porösen Medien“ (RCM)	53
Abbildung 30 COMSOL - Einströmender Fluss (links) Ausströmender Fluss (rechts)	53
Abbildung 31 COMSOL - Transporteigenschaften in „Transport verdünnter spezies in porösen Medien“ (RCM)	54
Abbildung 32 COMSOL - Komponente Elektrische Ströme (RCM).....	55
Abbildung 33 COMSOL - Elektrisches Potential (links) Erdung (rechts).....	56
Abbildung 34 COMSOL – Einstellung zur Stromerhaltung (RCM)	57
Abbildung 35 COMSOL - FEM-Netz für die Modellierung des RCM-Versuches	58
Abbildung 36 Schema zum Aufbau eines Probekörpers	65
Abbildung 37 Chloridprofile der untersuchten Probekörper (aus Zhang et al. [39])	80
Abbildung 38 COMSOL Ergebnis – Variante 1 – Ergebnis für 28d+3d	82
Abbildung 39 COMSOL Ergebnis – Variante 1 – Ergebnis für 28d+10d	82
Abbildung 40 Bestimmung des variierenden Diffusionskoeffizienten für geschädigte Probekörper nach dem Schema von Celebi [16]	85
Abbildung 41 neu generierte GK-Geometrie	85

Abbildungen im Anhang B

Seite

Abbildung B 1 Variante 1 - PK1 7d	133
Abbildung B 2 Variante 1 - PK1 14d	133
Abbildung B 3 Variante 1 – PK2 7d.....	134
Abbildung B 4 Variante 1 – PK2 14d.....	134
Abbildung B 5 Variante 1 – PK3 7d.....	135
Abbildung B 6 Variante 1 – PK3 14d.....	135
Abbildung B 7 Variante 1 – PK4 7d.....	136
Abbildung B 8 Variante 1 – PK4 14d.....	136
Abbildung B 9 Variante 1 – PK5 7d.....	137
Abbildung B 10 Variante 1 – PK5 14d.....	137

Abbildung B 11 Variante 1 – PK6 7d.....	138
Abbildung B 12 Variante 1 – PK6 14d.....	138
Abbildung B 13 Variante 1 – PK7 7d.....	139
Abbildung B 14 Variante 1 – PK7 14d.....	139
Abbildung B 15 Variante 1 – PK8 7d.....	140
Abbildung B 16 Variante 1 – PK8 14d.....	140
Abbildung B 17 Variante 1 – PK9 7d.....	141
Abbildung B 18 Variante 1 – PK9 14d.....	141
Abbildung B 19 Variante 1 - PK10 7d	142
Abbildung B 20 Variante 1 - PK10 14d	142

Abbildungen im Anhang C

Seite

Abbildung C 1 Variante 2 - PK1 7d	144
Abbildung C 2 Variante 2 - PK1 14d	144
Abbildung C 3 Variante 2 – PK2 7d.....	145
Abbildung C 4 Variante 2 – PK2 14d.....	145
Abbildung C 5 Variante 2 – PK3 7d.....	146
Abbildung C 6 Variante 2 – PK3 14d.....	146
Abbildung C 7 Variante 2 – PK4 7d.....	147
Abbildung C 8 Variante 2 – PK4 14d.....	147
Abbildung C 9 Variante 2 – PK5 7d.....	148
Abbildung C 10 Variante 2 – PK5 14d.....	148
Abbildung C 11 Variante 2 – PK6 7d.....	149
Abbildung C 12 Variante 2 – PK6 14d.....	149
Abbildung C 13 Variante 2 – PK7 7d.....	150
Abbildung C 14 Variante 2 – PK7 14d.....	150
Abbildung C 15 Variante 2 – PK8 7d.....	151
Abbildung C 16 Variante 2 – PK8 14d.....	151
Abbildung C 17 Variante 2 – PK9 7d.....	152
Abbildung C 18 Variante 2 – PK9 14d.....	152

Abbildung C 19 Variante 2 - PK10 7d	153
Abbildung C 20 Variante 2 - PK10 14d	153

Abbildungen im Anhang DSeite

Abbildung D 1 Variante 3 - PK1 7d	155
Abbildung D 2 Variante 3 - PK1 14d	155
Abbildung D 3 Variante 3 – PK2 7d	156
Abbildung D 4 Variante 3 – PK2 14d	156
Abbildung D 5 Variante 3 – PK2 7d	157
Abbildung D 6 Variante 3 – PK2 14d	157
Abbildung D 7 Variante 3 – PK4 7d	158
Abbildung D 8 Variante 3 – PK4 14d	158
Abbildung D 9 Variante 3 – PK5 7d	159
Abbildung D 10 Variante 3 – PK5 14d	159
Abbildung D 11 Variante 3 – PK6 7d	160
Abbildung D 12 Variante 3 – PK6 14d	160
Abbildung D 13 Variante 3 – PK7 7d	161
Abbildung D 14 Variante 3 – PK7 14d	161
Abbildung D 15 Variante 3 – PK8 7d	162
Abbildung D 16 Variante 3 – PK8 14d	162
Abbildung D 17 Variante 3 – PK9 7d	163
Abbildung D 18 Variante 3 – PK9 14d	163
Abbildung D 19 Variante 3 - PK10 7d	164
Abbildung D 20 Variante 3 - PK10 14d	164

Abbildungen im Anhang ESeite

Abbildung E 1 Variante 4 - PK1 7d	166
Abbildung E 2 Variante 4 - PK1 14d	166
Abbildung E 3 Variante 4 – PK2 7d.....	167

Abbildung E 4 Variante 4 – PK2 14d.....	167
Abbildung E 5 Variante 4 – PK3 7d.....	168
Abbildung E 6 Variante 4 – PK3 14d.....	168
Abbildung E 7 Variante 4 – PK4 7d.....	169
Abbildung E 8 Variante 4 – PK4 14d.....	169
Abbildung E 9 Variante 4 – PK5 7d.....	170
Abbildung E 10 Variante 4 – PK5 14d.....	170
Abbildung E 11 Variante 4 – PK6 7d.....	171
Abbildung E 12 Variante 4 – PK6 14d.....	171
Abbildung E 13 Variante 4 – PK7 7d.....	172
Abbildung E 14 Variante 4 – PK7 14d.....	172
Abbildung E 15 Variante 4 – PK8 7d.....	173
Abbildung E 16 Variante 4 – PK8 14d.....	173
Abbildung E 17 Variante 4 – PK9 7d.....	174
Abbildung E 18 Variante 4 – PK9 14d.....	174
Abbildung E 19 Variante 4 - PK10 7d	175
Abbildung E 20 Variante 4 - PK10 14d.....	175

Abbildungen im Anhang F

Seite

Abbildung F 1 Migration PK1 – 0d.....	177
Abbildung F 2 Migration PK1 – 7d.....	177
Abbildung F 3 Migration PK1 – 14d.....	177
Abbildung F 4 Migration PK2 – 0d.....	178
Abbildung F 5 Migration PK2 – 7d.....	178
Abbildung F 6 Migration PK2 – 14d.....	178
Abbildung F 7 Migration PK3 – 0d.....	179
Abbildung F 8 Migration PK3 – 7d.....	179
Abbildung F 9 Migration PK3 – 14d.....	179
Abbildung F 10 Migration PK4 – 0d.....	180
Abbildung F 11 Migration PK4 – 7d.....	180

Abbildung F 12 Migration PK4 – 14d.....	180
Abbildung F 13 Migration PK5 – 0d.....	181
Abbildung F 14 Migration PK5 – 7d.....	181
Abbildung F 15 Migration PK5 – 14d.....	181
Abbildung F 16 Migration PK6 – 0d.....	182
Abbildung F 17 Migration PK6 – 7d.....	182
Abbildung F 18 Migration PK6 – 14d.....	182
Abbildung F 19 Migration PK7 – 0d.....	183
Abbildung F 20 Migration PK7 – 7d.....	183
Abbildung F 21 Migration PK7 – 14d.....	183
Abbildung F 22 Migration PK8 – 7d.....	184
Abbildung F 23 Migration PK8 – 14d.....	184
Abbildung F 24 Migration PK9 – 0d.....	185
Abbildung F 25 Migration PK9 – 7d.....	185
Abbildung F 26 Migration PK9 – 14d.....	185
Abbildung F 27 Migration PK10 – 0d.....	186
Abbildung F 28 Migration PK10 – 7d.....	186
Abbildung F 29 Migration PK10 – 14d.....	186

VI. GLEICHUNGSVERZEICHNIS

(1)	31	(20)	48
(2)	31	(21)	48
(3)	31	(22)	48
(4)	36	(23)	48
(5)	36	(24)	52
(6)	37	(25)	55
(7)	37	(26)	55
(8)	39	(27)	55
(9)	39	(28)	57
(10)	40	(29)	57
(11)	40	(30)	60
(12)	41	(31)	60
(13)	41	(32)	62
(14)	43	(33)	64
(15)	44	(34)	66
(16)	46	(35)	67
(17)	46	(36)	84
(18)	47		
(19)	47		

VII. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Kapteina, Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken, München: Dissertation, 2011.
- [2] E. Siebel und et al, *Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse*, Bd. Heft 560, DAfStb, Hrsg., Berlin: Beuth, 2005.
- [3] C. Gehlen, Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2000.
- [4] M. Raupach, „Beurteilung von Feuchte- und Chloridprofilen verschiedener Bauteile,“ *Dauerhafter Beton - Grundlagen, Planung, und Ausführung bei Frost- und Frot-Taumittel-Beanspruchung*, Nr. 6. Symposium, pp. 13-20, 12 März 2009.
- [5] G. Prof.Dr.-Ing. Kapteina, *Vorlesungsskript - Bewehrungskorrosion-2_A - Chlorideindringen_A (Einflüsse, Proben)*, Hamburg, 2020.
- [6] A. Volkwein, Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, TU-München Baustoffinstitut, Hrsg., München, 1991.
- [7] M. Müller, H.-M. Ludwig und D. Ehrhardt, „Frost-Tausalz-Angriff auf Beton,“ in *Beton- und Stahlbetonbau 114, Heft 6*, Berlin, Ernst & SOhn, 2019, pp. 392 - 400.
- [8] M. J. Setzer, „Frostschaden Grundlagen und Prüfung,“ in *Beton- und Stahlbetonbau 97, Heft 7*, Essen, Ernst & Sohn, 2002, pp. 350 - 359.
- [9] J. Stark und B. Wicht, *Dauerhaftigkeit von Beton*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [10] A. Rösli und A. B. Harnik, „Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton,“ *Schweizer Ingenieur und Architekt*, pp. 929 - 934, 1979.
- [11] S. Lindmark, „Mechanisms of Salt Frost Scaling of Portland Cement-bound Materials: Studies and Hypothesis,“ Lund Institute of Technology, Lund, 1998.

- [12] Z. Liu und W. Hansen, „A Hypothesis for Salt Frost Scaling in Cementitious Materials,“ in *Journal of Advanced Concrete Technology*, Bd. Vol. 13, Japan Concrete Institute, 2015, pp. 403-414.
- [13] M. Müller und H.-M. Ludwig, „Glue Spall" - Ein geeignetes Modell für den Frost-Tausalz-Angriff?,“ in *Forschungskolloquium Band 1 - Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium*, Technische Universität Kaiserslautern, 2017.
- [14] J. J. Valenza und G. W. Scherer, „A review of salt scaling: II. Mechanisms,“ Elsevier Ltd., Princeton, NJ, 2006.
- [15] E. Yener, „A new frost salt scaling mechanism for concrete pavements based on brine rejection from ice layer adhered to concrete surface,“ in *Road Marterial and Pavement Design, Vol.16*, Bayburt, Türkei, Taylor & Francis, 2015, pp. 89 - 100.
- [16] A. R. Celebi, Auszug zum Vorgehen zur Berechnung von DRCM im Zweischichtsystem (Dissertation), Kaiserslautern, 2020.
- [17] Q. Wang, G. Zhang, Y. Tong und C. Gu, „A Numerical Study on Chloride Diffusion in Cracked Concrete,“ *Crystals / MDPI*, Basel, Schweiz, 2021.
- [18] W.-q. Jiang, X.-h. Shen, J. Xia, L.-x. Mao, J. Yang und Q.-f. Liu, „A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete,“ Elsevier, 2018.
- [19] BAW Bundesanstalt für Wasserbau, *BAWMerkblatt - Frostprüfung von Beton*, Karlsruhe: BAW, 2012.
- [20] BAW Bundesanstalt für Wasserbau, *BAWMerkblatt - Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewehrung von Stahlbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)*, Karlsruhe: BAW, 2017.
- [21] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „www.gestis.dguv.de (Natriumbromid),“ DGUV, [Online]. Available: <https://gestis.dguv.de/data?name=002900>. [Zugriff am 05. August 2021].
- [22] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „www.gestis.dguv.de (Natriumchlorid),“ DGUV, [Online]. Available: <https://gestis.dguv.de/data?name=001330>. [Zugriff am 05. August 2021].

- [23] N.-C. Rokoß, *BA-Thesis - Entwicklung eines FEM - Diffusionsmodells*, Hamburg: HafenCity Universität, 2021.
- [24] COMSOL, *The Chemical Reaction Engineering Module User's Guide*, 2019.
- [25] W. Gaberstein, *MA-Thesis - Einfluss der Mikroislinsenpumpe auf den konvektiven Chlorideintrag in Beton*, Hamburg: HafenCity Universität, 2018.
- [26] S. Röhling, *Betonbau | Hydratation – junger Beton – Festbeton*, Bd. 2, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012.
- [27] W. Bechmann und I. Bald, *Einstieg in die Physikalische Chemie für Naturwissenschaftler*, 7.Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 2020.
- [28] L. Tang, *Chloride transport in concrete - Measurement and Prediction*, Göteborg: Chalmers University of Technology - Department of Building Materials, 1996.
- [29] „Table of Diffusion Coefficients,“ aqion, 5 Dezember 2020. [Online]. Available: <https://www.aqion.de/site/diffusion-coefficients>. [Zugriff am 12. Oktober 2021].
- [30] C. Page, N. Short und A. El Tarras, „DIFFUSION OF CHLORIDE IONS IN HARDENED CEMENT PASTES,“ in *CEMENT and CONCRETE RESEARCH Vol. II*, USA, Pergamon Press, Ltd., 1981, pp. 395-406.
- [31] R. J. Millington und J. P. Quirk, „Permeability of Porous Solids,“ in *Trans. Faraday Soc. Vol.57*, University of Adelaide, 1961, pp. 1200-1207.
- [32] L. Krings, *Masterarbeit - Untersuchungen und numerische Modellierung des Chlorideindringens durch Beschichtungs- und Abdichtungssysteme*, München: Hochschule München, 2019.
- [33] COMSOL, *AC/DC Module User's Guide*, 2018.
- [34] S. Paul und R. Paul, *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 2*, 2.Auflage, Bremen: Springer Vieweg, 2018.
- [35] J. D. Jackson, „MULTIPOLE, ELEKTROSTATIK MAKROSKOPISCHER MEDIEN, DIELEKTRIKA,“ in *Klassische Elektrodynamik*, Berlin, New York, Walter de Gruyter, 1981, pp. 159-195.

- [36] S. Wegner, *Berechnung von modifizierten Ionendiffusionskoeffizienten von befristeten Betonprobekörpern im Rahmen von CDF- und modifizierten Migrationsprüfungen*, Hamburg: HafenCity Uni, 2021.
- [37] L. Sievers, *Einfluss einer Frostschädigung auf den Ionentransport im Beton*, Hamburg: HafenCity Uni, 2021.
- [38] F. W. Locher, *Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Düsseldorf: Bau+Technik GmbH, 2000.
- [39] P. Zhang, F. H. Wittmann, M. Vogel, H. S. Müller und T. Zhao, „Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete,“ in *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 2017, pp. 60-67.

VIII. ANHANG

ANHANG A. AUSFÜHRLICHE BESTIMMUNG VON PARAMETERN

Tabelle A 1 Bestimmung des Gelbildungsfaktors n_G auf Basis von [26] und Ablauf nach [23]

			Probekörper nach vergleichbarer Zementart					
			PK01 PK03 PK07	PK09	PK02 PK04	PK10	PK05 PK06	PK08
Kap.Po- ren	n_G	[-]	2,161	2,279	2,143	2,121	2,176	2,248
			Anteile der Klinker-Bestandteile nach Zementart [M-%]					
Be- stand- teil	n_G [-] Unter- grenze	n_G [-] Ober- grenze	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
C₃S	2,16		63	42,21	59,85	56,07	54,81	17,01
C₂S	2,1		16	10,72	15,2	14,24	13,92	4,32
C₃A	2,674		11	7,37	10,45	9,79	9,57	2,97
C₄AF	2,123		8	5,36	7,6	7,12	6,96	2,16
SFA	2,52	5,22	0	33	0	0	0	0
BFA	2,5	5,22	0	0	0	0	0	0
HS	2,28		0	0	0	0	13	73
SF	1,8		0	0	5	11	0	0

PK01 – 0 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020	13.1.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	17.2.2020	17.2.2020	17.2.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM I IAB-Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	10	11	12			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0994	0,0995			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0515	0,0498	0,0508			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	1,0126	0,9622	0,9795			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2554,35	2487,35	2482,69			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	17.2.2020	17.2.2020	17.2.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	09:30	09:30	09:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	18.2.2020	18.2.2020	18.2.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:04	10:04	10:04			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:34	24:34	24:34			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61	17,61			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	69,30	74,50	69,30			
Stromstärke (Ende)	[mA]	60,20	63,40	57,40			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	15,89	14,62	15,89			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	17,41	16,42	17,41			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	15,90	-	20,37	-	20,43	-
	x ₂ [mm]	15,17	-	19,73	-	17,21	-
	x ₃ [mm]	16,00	-	18,23	-	22,20	-
	x ₄ [mm]	16,67	-	16,17	-	22,15	-
	x ₅ [mm]	15,59	-	16,89	-	18,20	-
	x ₆ [mm]	15,54	-	18,51	-	17,00	-
	x ₇ [mm]	n.v.	-	19,50	-	14,06	-
	x ₈ [mm]	n.v.	-	20,27	-	20,50	-
	x ₉ [mm]	n.v.	-	20,44	-	20,61	-
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	15,8		18,9		19,2	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	16,67		20,44		22,20	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	7,16		8,37		8,67	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			8,07			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,56		289,57		290,56	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,05153		0,0498		0,0508	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	543,37		562,02		551,51	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,01581		0,01890		0,01915	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	88440		88440		88440	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	1,711		1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	17,41		16,42		17,41	
Versuchsdauer t _v	[h]	24,57		24,57		24,57	

Tabelle A 2 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK01 – 7 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	24.2.2020	24.2.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM I IAB-Splittl 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1.1	2.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0994	0,0994		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0542	0,0498		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	1,0130	0,9622		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2408,50	2487,35		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	24.2.2020	24.2.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	15:04	15:04		
Prüfende	dd/mm/jjjj	25.2.2020	25.2.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	16:45	16:45		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	25:41	25:41		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	79,50	91,00		
Stromstärke (Ende)	[mA]	57,30	58,80		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	15,89	14,62		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	17,41	16,42		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	32,2	-	29,8	LIBS
	x ₂ [mm]	31,9	-	31,9	LIBS
	x ₃ [mm]	27,8	-	34,6	LIBS
	x ₄ [mm]	26,5	-	35,1	LIBS
	x ₅ [mm]	28,7	-	36,2	LIBS
	x ₆ [mm]	32,2	-	34,4	LIBS
	x ₇ [mm]	31,6	-	36,1	LIBS
	x ₈ [mm]	30,1	-	36,7	LIBS
	x ₉ [mm]	25,2	-	38,4	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	29,6		34,8	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	32,2		38,4	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	13,99		15,26	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			14,63	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,56		289,57	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0542		0,0498	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	516,61		562,02	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02958		0,03480	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	92460		92460	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	17,41		16,42	
Versuchsdauer t _v	[h]	25,7		25,7	

Tabelle A 3 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK01 – 14 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020	13.1.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	2.3.2020	2.3.2020	2.3.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM I IAB-Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"lfd-Nr."	3.1	4.1	5.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0998	0,0994	0,0995			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0517	0,0498	0,0508			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9597	0,9622	0,9795			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2370,16	2487,35	2482,69			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	2.3.2020	2.3.2020	2.3.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:30	12:30	12:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	3.3.2020	3.3.2020	3.3.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:30	12:30	12:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61	17,61			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	67,50	n.v.	n.v.			
Stromstärke (Ende)	[mA]	44,40	n.v.	n.v.			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	13,30	17,40	17,60			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	15,70	17,30	17,40			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	16,70	16,70	16,70			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	17,20	17,20	17,20			
		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	29,45	-	33,12	-	34,12	-
	x ₂ [mm]	28,33	-	35,15	-	34,56	-
	x ₃ [mm]	27,25	-	32,40	-	33,20	-
	x ₄ [mm]	26,43	-	31,51	-	30,10	-
	x ₅ [mm]	28,82	-	32,65	-	30,50	-
	x ₆ [mm]	28,65	-	35,75	-	30,71	-
	x ₇ [mm]	31,90	-	33,01	-	31,52	-
	x ₈ [mm]	31,31	-	34,03	-	33,20	-
	x ₉ [mm]	33,93	-	33,92	-	36,24	-
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	29,6		33,5		32,7	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	33,93		35,75		36,24	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	14,23		15,74		15,62	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			15,20			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	288,85		290,45		290,55	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0517		0,0498		0,0508	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	541,38		562,02		551,51	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02956		0,03350		0,03268	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c _o	[mol/l]	1,711		1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	15,70		17,30		17,40	
Versuchsdauer t _v	[h]	24,00		24,00		24,00	

Tabelle A 4 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK01-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK02 – 0 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020	13.1.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	17.2.2020	17.2.2020	17.2.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 R-Si I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	15	16	17			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0988	0,0996	0,0994			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0516	0,0510	0,0507			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	1,0077	0,9667	0,9860			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2549,37	2433,33	2505,15			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	17.2.2020	17.2.2020	17.2.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	18.2.2020	18.2.2020	18.2.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:04	10:04	10:04			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:34	23:34	23:34			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61	17,61			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	34,80	40,70	37,50			
Stromstärke (Ende)	[mA]	32,90	37,30	35,70			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	15,50	15,40	15,50			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	16,90	16,70	16,70			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	6,52	-	12,36	-	9,60	-
	x ₂ [mm]	8,83	-	13,36	-	8,10	-
	x ₃ [mm]	8,40	-	11,00	-	8,45	-
	x ₄ [mm]	8,22	-	8,35	-	7,00	-
	x ₅ [mm]	9,29	-	10,70	-	7,62	-
	x ₆ [mm]	6,47	-	7,75	-	7,20	-
	x ₇ [mm]	8,91	-	9,90	-	6,09	-
	x ₈ [mm]	9,02	-	9,20	-	9,80	-
	x ₉ [mm]	7,24	-	9,11	-	12,13	-
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	8,1		10,2		8,4	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	9,29		13,36		12,13	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	3,59		4,58		3,70	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			3,96			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,05		289,85		289,85	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0516		0,0510		0,0507	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	542,53		549,02		552,16	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00810		0,01019		0,00844	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	84840		84840		84840	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	1,711		1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	16,90		16,70		16,70	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 5 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-0d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK02 – 7 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	24.2.2020	24.2.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 R-Si I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	22.1	23.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0994	0,0994		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0541	0,0534		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	1,0220	1,0070		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2434,39	2430,11		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	24.2.2020	24.2.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30		
Prüfende	dd/mm/jjjj	25.2.2020	25.2.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	25:30	25:30		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	56,80	63,60		
Stromstärke (Ende)	[mA]	43,20	48,20		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	17,00	16,80		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	16,90	16,60		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	20,0	-	19,8	-
	x ₂ [mm]	20,3	-	19,7	-
	x ₃ [mm]	22,6	-	16,1	-
	x ₄ [mm]	23,0	-	19,5	-
	x ₅ [mm]	23,7	-	19,0	-
	x ₆ [mm]	21,9	-	19,0	-
	x ₇ [mm]	24,8	-	21,6	-
	x ₈ [mm]	24,0	-	18,4	-
	x ₉ [mm]	24,5	-	21,8	-
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	22,8		19,4	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	24,8		21,8	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	10,64		8,87	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			9,75	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,05		289,75	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0541		0,0534	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	517,56		524,34	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02276		0,01943	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	91800		91800	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	16,90		16,60	
Versuchsdauer t _v	[h]	26		26	

Tabelle A 6 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK02 – 14 Tage (PA200113)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020	13.1.2020	13.1.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	2.3.2020	2.3.2020	2.3.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 R-Si I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	24.1	25.1	26.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992	0,0989	0,0993			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0522	0,0521	0,0540			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9379	0,9365	0,9569			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2324,73	2339,37	2286,38			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	2.3.2020	2.3.2020	2.3.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:30	12:30	12:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	3.3.2020	3.3.2020	3.3.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:30	12:30	12:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	17,61	17,61	17,61			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	60,40	57,90	58,80			
Stromstärke (Ende)	[mA]	42,10	40,10	41,70			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	17,00	16,80	17,50			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	16,90	16,60	17,30			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	16,70	16,70	16,70			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	17,20	17,20	17,20			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	23,88	-	22,48	-	20,63	-
	x ₂ [mm]	25,13	-	22,33	-	24,09	-
	x ₃ [mm]	24,82	-	22,05	-	19,00	-
	x ₄ [mm]	23,08	-	20,70	-	20,03	-
	x ₅ [mm]	23,22	-	21,74	-	23,14	-
	x ₆ [mm]	19,08	-	21,52	-	20,96	-
	x ₇ [mm]	19,52	-	18,65	-	16,90	-
	x ₈ [mm]	21,40	-	24,46	-	22,72	-
	x ₉ [mm]	29,83	-	29,96	-	23,10	-
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	23,3		22,7		21,2	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	29,83		29,96		24,09	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	11,22		10,85		10,47	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			10,84			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,05		289,75		290,45	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0522		0,0521		0,0540	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	536,40		537,43		518,33	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02333		0,02265		0,02117	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,211		1,211		1,211	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	1,711		1,711		1,711	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	16,90		16,60		17,30	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 7 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK02-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK03 – 0 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	18.5.2020	18.5.2020	18.5.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	22.6.2020	22.6.2020	22.6.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42.5 R - LP I AB16-Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1	2	3			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992	0,0992	0,0992			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0530	0,0527	0,0509			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9140	0,9180	0,8770			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2231,30	2253,82	2229,30			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	22.6.2020	22.6.2020	22.6.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:55	10:55	10:55			
Prüfende	dd/mm/jjjj	23.6.2020	23.6.2020	23.6.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:35	23:35	23:35			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	76,10	80,30	79,50			
Stromstärke (Ende)	[mA]	65,60	68,10	66,20			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	19,11	20,84	20,46			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,39	21,29	20,41			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20,3	20,3	20,3			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,6	20,6	20,6			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	21,4	LIBS	20,4	LIBS	18,7	LIBS
	x ₂ [mm]	20,2	LIBS	20,4	LIBS	20,7	LIBS
	x ₃ [mm]	19,9	LIBS	21,3	LIBS	19,9	LIBS
	x ₄ [mm]	20,2	LIBS	21,0	LIBS	21,8	LIBS
	x ₅ [mm]	19,7	LIBS	20,8	LIBS	25,9	LIBS
	x ₆ [mm]	20,6	LIBS	21,4	LIBS	29,4	LIBS
	x ₇ [mm]	19,7	LIBS	22,0	LIBS	24,0	LIBS
	x ₈ [mm]	20,7	LIBS	20,7	LIBS	23,3	LIBS
	x ₉ [mm]	21,1	LIBS	22,7	LIBS	23,0	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	20,4		21,2		23,0	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	21,4		22,7		29,4	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	10,04		10,47		11,01	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			10,51			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,54		294,44		293,56	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0530		0,0527		0,0509	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	528,30		531,31		550,10	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02039		0,02119		0,02297	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	84900		84900		84900	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,39		21,29		20,41	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 8 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-0d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK03 – 7 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	18.5.2020	18.5.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	29.6.2020	29.6.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM I 42.5 R - LP I AB16-Splittl 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1.1	2.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992	0,0992		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0501	0,0502		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8830	0,8760		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2280,39	2257,81		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	29.6.2020	29.6.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	14:30	14:30		
Prüfende	dd/mm/jjjj	30.6.2020	30.6.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	14:30	14:30		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	79,50	90,50		
Stromstärke (Ende)	[mA]	75,60	83,90		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	14,17	13,25		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,45	17,27		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	21,7	21,7		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	26,3	LIBS	29,3	LIBS
	x ₂ [mm]	27,1	LIBS	29,7	LIBS
	x ₃ [mm]	28,9	LIBS	25,4	LIBS
	x ₄ [mm]	31,8	LIBS	27,8	LIBS
	x ₅ [mm]	30,4	LIBS	30,7	LIBS
	x ₆ [mm]	28,0	LIBS	26,0	LIBS
	x ₇ [mm]	31,3	LIBS	26,9	LIBS
	x ₈ [mm]	29,3	LIBS	26,7	LIBS
	x ₉ [mm]	28,4	LIBS	30,5	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	29,1		28,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	31,8		30,7	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBm} [m²/s]	13,64		13,10	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			13,37	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,60		290,42	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0501		0,0502	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	558,88		557,77	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02906		0,02811	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,45		17,27	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24	

Tabelle A 9 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK03 – 14 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	18.5.2020	18.5.2020	18.5.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	6.7.2020	6.7.2020	6.7.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42.5 R - LP I AB16-Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	3.1	4.1	5.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0490	0,0510	0,0491			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8800	0,8610	0,8590			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2333,06	2193,17	2272,75			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	6.7.2020	6.7.2020	6.7.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	13:30	13:30	13:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	7.7.2020	7.7.2020	7.7.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	13:00	13:00	13:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:30	23:30	23:30			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	64,50	69,80	71,30			
Stromstärke (Ende)	[mA]	54,00	57,70	57,90			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	13,27	17,44	17,56			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	15,70	17,28	17,43			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]						
Raumtemperatur (Ende)	[°C]						
		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	30,5	LIBS	27,9	LIBS	27,50	LIBS
	x ₂ [mm]	30,4	LIBS	23,7	LIBS	26,6	LIBS
	x ₃ [mm]	32,3	LIBS	27,1	LIBS	25,6	LIBS
	x ₄ [mm]	30,0	LIBS	25,0	LIBS	24,8	LIBS
	x ₅ [mm]	31,2	LIBS	27,5	LIBS	27,9	LIBS
	x ₆ [mm]	29,1	LIBS	29,9	LIBS	27,9	LIBS
	x ₇ [mm]	29,2	LIBS	29,6	LIBS	26,6	LIBS
	x ₈ [mm]	28,9	LIBS	25,0	LIBS	28,5	LIBS
	x ₉ [mm]	28,6	LIBS	24,9	LIBS	28,4	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	30,0		26,7		27,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	32,3		29,9		28,5	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	13,95		12,88		12,61	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			13,15			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	288,85		290,43		290,58	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0490		0,0510		0,0491	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	571,43		549,02		570,26	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,03002		0,02673		0,02709	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	84600		84600		84600	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	15,70		17,28		17,43	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 10 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK03-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK04 – 0 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	18.5.2020	18.5.2020	18.5.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	22.6.2020	22.6.2020	22.6.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM I + SF 42.5 R - LP IAB-16Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7	8	9			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992	0,0992	0,0992			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0520	0,0520	0,0519			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9600	0,9550	0,9510			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2388,66	2376,22	2370,83			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	22.6.2020	22.6.2020	22.6.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:55	10:55	10:55			
Prüfende	dd/mm/jjjj	23.6.2020	23.6.2020	23.6.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:35	23:35	23:35			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	44,50	48,80	52,60			
Stromstärke (Ende)	[mA]	43,20	48,70	51,50			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,64	20,83	20,96			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,61	21,22	21,30			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20,3	20,3	20,3			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,6	20,6	20,6			
		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	9,5	LIBS	9,3	LIBS	12,3	LIBS
	x ₂ [mm]	8,5	LIBS	9,0	LIBS	10,0	LIBS
	x ₃ [mm]	10,5	LIBS	9,7	LIBS	10,9	LIBS
	x ₄ [mm]	9,0	LIBS	9,2	LIBS	9,4	LIBS
	x ₅ [mm]	8,5	LIBS	9,4	LIBS	10,0	LIBS
	x ₆ [mm]	8,2	LIBS	9,6	LIBS	9,6	LIBS
	x ₇ [mm]	9,9	LIBS	10,3	LIBS	13,3	LIBS
	x ₈ [mm]	10,5	LIBS	10,2	LIBS	11,1	LIBS
	x ₉ [mm]	10,3	LIBS	9,6	LIBS	11,2	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	9,4		9,6		10,9	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	10,5		10,3		13,3	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	4,28		4,36		5,00	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			4,55			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,76		294,37		294,45	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0520		0,0520		0,0519	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	538,46		538,46		539,50	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00943		0,00959		0,01087	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	84900		84900		84900	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,61		21,22		21,30	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 11 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK04 – 7 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	18.5.2020	18.5.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	29.6.2020	29.6.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM I + SF 42.5 R - LP IAB-16Splittl 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	13.1	14.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992	0,0992		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0496	0,0498		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9050	0,9220		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2360,77	2395,46		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	29.6.2020	29.6.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	14:30	14:30		
Prüfende	dd/mm/jjjj	30.6.2020	30.6.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	14:30	14:30		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	56,80	63,60		
Stromstärke (Ende)	[mA]	43,20	48,20		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	12,79	14,69		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,43	16,75		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	21,7	21,7		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	15,9	LIBS	17,7	LIBS
	x ₂ [mm]	16,2	LIBS	19,6	LIBS
	x ₃ [mm]	15,0	LIBS	19,8	LIBS
	x ₄ [mm]	14,4	LIBS	18,9	LIBS
	x ₅ [mm]	14,7	LIBS	18,7	LIBS
	x ₆ [mm]	15,1	LIBS	17,7	LIBS
	x ₇ [mm]	14,6	LIBS	17,0	LIBS
	x ₈ [mm]	14,1	LIBS	15,5	LIBS
	x ₉ [mm]	14,3	LIBS	14,8	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	14,9		17,7	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	16,2		19,8	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	6,65		7,95	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			7,30	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,58		289,90	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0496		0,0498	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	564,52		562,25	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,01492		0,01774	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,43		16,75	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24	

Tabelle A 12 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-7d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK04 – 14 Tage (PA200518)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.1.2020		13.1.2020		13.1.2020	
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	2.3.2020		2.3.2020		2.3.2020	
Prüfungsalter	d.	49		49		49	
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM I + SF 42.5 R - LP IAB-16Splittl 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	15.1		16.1		17.1	
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0992		0,0989		0,0993	
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0490		0,0490		0,0490	
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8950		0,9150		0,9200	
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2363,27		2430,27		2423,42	
Zelle	"Nr."	1		2		3	
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	6.7.2020		6.7.2020		6.7.2020	
Uhrzeit	[hh:min]	13:30		13:30		13:30	
Prüfende	dd/mm/jjjj	7.7.2020		7.7.2020		7.7.2020	
Uhrzeit	[hh:min]	13:00		13:00		13:00	
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00		24:00		24:00	
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:30		23:30		23:30	
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5		5		5	
Spannung (Anfang)	[V]	30,0		30,0		30,0	
Spannung (Ende)	[V]	30,0		30,0		30,0	
Stromstärke (Anfang)	[mA]	60,40		57,90		58,80	
Stromstärke (Ende)	[mA]	42,10		40,10		41,70	
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	17,01		16,79		17,52	
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	16,94		16,58		17,33	
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]						
Raumtemperatur (Ende)	[°C]						
		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	15,4	LIBS	16,9	LIBS	16,90	LIBS
	x ₂ [mm]	16,0	LIBS	14,5	LIBS	17,8	LIBS
	x ₃ [mm]	14,5	LIBS	17,0	LIBS	18,0	LIBS
	x ₄ [mm]	17,3	LIBS	16,7	LIBS	18,5	LIBS
	x ₅ [mm]	17,3	LIBS	15,5	LIBS	16,9	LIBS
	x ₆ [mm]	19,0	LIBS	17,4	LIBS	15,7	LIBS
	x ₇ [mm]	17,0	LIBS	16,8	LIBS	16,2	LIBS
	x ₈ [mm]	18,0	LIBS	20,9	LIBS	15,5	LIBS
	x ₉ [mm]	17,5	LIBS	18,7	LIBS	14,1	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	16,9		17,2		16,6	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	19		20,9		18,5	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	7,59		7,71		7,47	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²	7,59					
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	290,09		289,73		290,48	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0490		0,0490		0,0490	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	571,43		571,43		571,43	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,01689		0,01716		0,01662	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	84600		84600		84600	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c _o	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	16,94		16,58		17,33	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 13 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK04-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK05 – 0 Tage (PA200713)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020	13.7.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	17.8.2020	17.8.2020	17.8.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (ohne LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1	2	3			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,1000	0,1000	0,1000			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0500	0,0520	0,0500			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9620	1,0190	0,9630			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2449,71	2495,06	2452,26			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	17.8.2020	17.8.2020	17.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	13:45	13:45	13:45			
Prüfende	dd/mm/jjjj	18.8.2020	18.8.2020	18.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:15	10:15	10:15			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	20:30	20:30	20:30			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	61,10	59,10	63,60			
Stromstärke (Ende)	[mA]	57,90	53,60	59,00			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	19,11	20,84	20,46			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,39	21,29	20,41			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	24	24	24			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	8,5	LIBS	7,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₂ [mm]	9,2	LIBS	10,2	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₃ [mm]	8,9	LIBS	11,6	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₄ [mm]	10,7	LIBS	9,9	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₅ [mm]	11,7	LIBS	12,8	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₆ [mm]	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₇ [mm]	8,0	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₈ [mm]	11,2	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₉ [mm]	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	9,7		10,4		10,0	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	11,7		12,8		n.v.	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	4,91		5,52		5,07	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			5,16			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,54		294,44		293,56	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0500		0,0520		0,0500	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	560,00		538,46		560,00	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00974		0,01044		0,01000	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	73800		73800		73800	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,39		21,29		20,41	
Versuchsdauer t _v	[h]	21		21		21	

Tabelle A 14 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-0d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK05 – 7 Tage (PA200713)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	24.8.2020	24.8.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (ohne LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1.1	2.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,1000	0,1000		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0510	0,0506		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9625	0,9541		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2402,93	2400,79		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	24.8.2020	24.8.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00		
Prüfende	dd/mm/jjjj	25.8.2020	25.8.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:00	23:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	80,10	90,50		
Stromstärke (Ende)	[mA]	63,10	59,90		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,33	22,74		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	21,46	22,24		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	22,20	22,20		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	19,3	LIBS	29,4	LIBS
	x ₂ [mm]	20,6	LIBS	30,3	LIBS
	x ₃ [mm]	22,4	LIBS	29,8	LIBS
	x ₄ [mm]	22,9	LIBS	30,0	LIBS
	x ₅ [mm]	21,2	LIBS	31,6	LIBS
	x ₆ [mm]	22,3	LIBS	30,9	LIBS
	x ₇ [mm]	22,4	LIBS	29,8	LIBS
	x ₈ [mm]	21,9	LIBS	28,8	LIBS
	x ₉ [mm]	nicht lesbar	LIBS	29,5	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	21,6		30,0	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	22,9		31,6	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	10,64		15,00	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			12,82	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	294,61		295,39	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0510		0,0506	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	549,02		553,36	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02163		0,03001	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	82800		82800	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	21,46		22,24	
Versuchsdauer t _v	[h]	23		23	

Tabelle A 15 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK05 – 14 Tage (PA200713)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020	13.7.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	31.8.2020	31.8.2020	31.8.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (ohne LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	3.1	4.1	5.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0510	0,0520	0,0530			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9230	0,9320	0,9510			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2351,10	2328,37	2331,01			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	31.8.2020	31.8.2020	31.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:45	12:45	12:45			
Prüfende	dd/mm/jjjj	1.9.2020	1.9.2020	1.9.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:45	12:45	12:45			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	83,10					
Stromstärke (Ende)	[mA]	52,80					
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	19,36	21,84	21,82			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,77	21,34	21,71			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	21,90	21,90	21,90			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	34,5	LIBS	nicht lesbar	LIBS	30,40	LIBS
	x ₂ [mm]	36,6	LIBS	nicht lesbar	LIBS	31,5	LIBS
	x ₃ [mm]	34,3	LIBS	nicht lesbar	LIBS	28,4	LIBS
	x ₄ [mm]	34,5	LIBS	34,9	LIBS	30,2	LIBS
	x ₅ [mm]	nicht lesbar	LIBS	33,1	LIBS	30,6	LIBS
	x ₆ [mm]	34,1	LIBS	34,0	LIBS	31,1	LIBS
	x ₇ [mm]	33,9	LIBS	34,0	LIBS	30,2	LIBS
	x ₈ [mm]	34,8	LIBS	36,7	LIBS	30,2	LIBS
	x ₉ [mm]	34,9	LIBS	38,2	LIBS	n.v.	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	34,7		35,2		30,3	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	36,6		38,2		31,5	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	16,80		17,37		15,16	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			16,44			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,92		294,49		294,86	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0510		0,0520		0,0530	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	549,02		538,46		528,30	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,03470		0,03515		0,03033	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,77		21,34		21,71	
Versuchsdauer t _v	[h]	24,00		24,00		24,00	

Tabelle A 16 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK05-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK06 – 0 Tage (PA200713)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020	13.7.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	17.8.2020	17.8.2020	17.8.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7	8	9			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,1000	0,1000	0,1000			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0500	0,0500	0,0490			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8850	0,9070	0,8800			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2253,63	2309,66	2286,63			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	17.8.2020	17.8.2020	17.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	13:45	13:45	13:45			
Prüfende	dd/mm/jjjj	18.8.2020	18.8.2020	18.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:15	10:15	10:15			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	20:30	20:30	20:30			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	77,40	59,30	78,70			
Stromstärke (Ende)	[mA]	72,00	59,30	78,70			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,64	20,83	20,96			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,61	21,22	21,30			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	24	24	24			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	15,9	LIBS	9,8	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₂ [mm]	14,1	LIBS	11,8	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₃ [mm]	15,9	LIBS	12,0	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₄ [mm]	13,5	LIBS	14,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₅ [mm]	11,7	LIBS	14,3	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₆ [mm]	nicht lesbar	LIBS	12,2	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₇ [mm]	nicht lesbar	LIBS	14,3	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₈ [mm]	nicht lesbar	LIBS	11,3	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₉ [mm]	nicht lesbar	LIBS	13,1	LIBS	nicht lesbar	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	14,2		12,6		15,0	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	15,9		14,7		n.v.	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	7,45		6,55		7,77	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			7,26			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,76		294,37		294,45	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0500		0,0500		0,0490	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	560,00		560,00		571,43	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,01422		0,01261		0,01500	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	73800		73800		73800	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c _o	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,61		21,22		21,30	
Versuchsdauer t _v	[h]	21		21		21	

Tabelle A 17 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK06 – 7 Tage (PA200713)

Herstellungsdatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	24.8.2020	24.8.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	13.1	14.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,1000	0,1000		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0506	0,0510		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8986	0,8984		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2261,13	2242,90		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	24.8.2020	24.8.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00		
Prüfende	dd/mm/jjjj	25.8.2020	25.8.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	23:00	23:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	61,80	62,80		
Stromstärke (Ende)	[mA]	55,40	53,80		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	23,06	23,08		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	22,11	22,49		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	22,20	22,20		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	22,5	LIBS	25,3	LIBS
	x ₂ [mm]	22,4	LIBS	26,3	LIBS
	x ₃ [mm]	nicht lesbar	LIBS	24,2	LIBS
	x ₄ [mm]	nicht lesbar	LIBS	24,8	LIBS
	x ₅ [mm]	23,7	LIBS	24,2	LIBS
	x ₆ [mm]	23,3	LIBS	22,8	LIBS
	x ₇ [mm]	23,3	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₈ [mm]	23,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₉ [mm]	23,3	LIBS	24,3	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	23,2		24,6	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	23,7		26,3	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBm} [m²/s]	11,40		12,23	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			11,81	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	295,26		295,64	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0506		0,0510	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	553,36		549,02	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02317		0,02456	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	82800		82800	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	22,11		22,49	
Versuchsdauer t _v	[h]	23		23	

Tabelle A 18 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK06 – 14 Tage (PA200713)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	13.7.2020	13.7.2020	13.7.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	31.8.2020	31.8.2020	31.8.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM II/A-S 42.5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	15.1	16.1	17.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0994	0,0994	0,0994			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0530	0,0530	0,0540			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9460	0,9520	0,9440			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2300,13	2314,72	2252,76			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	31.8.2020	31.8.2020	31.8.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:45	12:45	12:45			
Prüfende	dd/mm/jjjj	1.9.2020	1.9.2020	1.9.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:45	12:45	12:45			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	57,50	60,00	60,50			
Stromstärke (Ende)	[mA]	50,50	51,30	52,60			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	21,79	21,80	22,01			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	21,37	21,66	21,91			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	21,90	21,90	21,90			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	26,9	LIBS	26,3	LIBS	27,80	LIBS
	x ₂ [mm]	26,3	LIBS	26,4	LIBS	25,4	LIBS
	x ₃ [mm]	25,2	LIBS	27,4	LIBS	24,0	LIBS
	x ₄ [mm]	28,7	LIBS	24,2	LIBS	23,4	LIBS
	x ₅ [mm]	25,5	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₆ [mm]	24,0	LIBS	28,2	LIBS	26,4	LIBS
	x ₇ [mm]	22,7	LIBS	25,9	LIBS	25,1	LIBS
	x ₈ [mm]	22,8	LIBS	25,4	LIBS	24,6	LIBS
	x ₉ [mm]	22,4	LIBS	n.v.	LIBS	24,0	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	24,9		26,3		25,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	28,7		28,2		27,8	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	12,31		13,01		12,62	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			12,65			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	294,52		294,81		295,06	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0530		0,0530		0,0540	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	528,30		528,30		518,52	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02494		0,02626		0,02509	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	21,37		21,66		21,91	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 19 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK06-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK07 – 0 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020	5.10.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	9.11.2020	9.11.2020	9.11.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1	2	3			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0470	0,0510	0,0510			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8263	0,9050	0,9050			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2283,91	2305,25	2305,25			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	9.11.2020	9.11.2020	9.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	11:30	11:30	11:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	10.11.2020	10.11.2020	10.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:00	10:00	10:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	22:30	22:30	22:30			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	85,40	71,00	79,60			
Stromstärke (Ende)	[mA]	75,00	59,50	69,80			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,03	19,87	19,81			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,60	20,60	20,60			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	21	21	21			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
Eindringtiefen		1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte	1.Hälfte	2.Hälfte
	x ₁ [mm]	21,7	LIBS	18,9	LIBS	19,0	LIBS
	x ₂ [mm]	23,7	LIBS	20,8	LIBS	19,0	LIBS
	x ₃ [mm]	23,8	LIBS	19,1	LIBS	20,0	LIBS
	x ₄ [mm]	20,7	LIBS	21,3	LIBS	19,0	LIBS
	x ₅ [mm]	21,6	LIBS	21,3	LIBS	19,5	LIBS
	x ₆ [mm]	18,8	LIBS	21,6	LIBS	17,8	LIBS
	x ₇ [mm]	17,7	LIBS	20,2	LIBS	19,0	LIBS
	x ₈ [mm]	19,1	LIBS	21,5	LIBS	17,4	LIBS
	x ₉ [mm]	20,5	LIBS	22,0	LIBS	17,5	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	20,8		20,7		18,7	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	23,8		22		20	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	9,67		10,38		9,28	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			9,78			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,75		293,75		293,75	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0470		0,0510		0,0510	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	595,74		549,02		549,02	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02084		0,02074		0,01869	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	81000		81000		81000	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c _o	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,60		20,60		20,60	
Versuchsdauer t _v	[h]	23		23		23	

Tabelle A 20 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK07 – 7 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	16.11.2020	16.11.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 (mit LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1.1	2.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0510	0,0500		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9180	0,9144		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2338,36	2375,78		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	16.11.2020	16.11.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00		
Prüfende	dd/mm/jjjj	17.11.2020	17.11.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:30	12:30		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:30	24:30		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	59,60	60,50		
Stromstärke (Ende)	[mA]	51,80	50,40		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,00	20,00		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,00	20,00		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,60	20,60		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	26,7	LIBS	24,0	LIBS
	x ₂ [mm]	26,0	LIBS	24,6	LIBS
	x ₃ [mm]	25,7	LIBS	25,0	LIBS
	x ₄ [mm]	25,1	LIBS	27,3	LIBS
	x ₅ [mm]	24,6	LIBS	26,6	LIBS
	x ₆ [mm]	26,8	LIBS	25,3	LIBS
	x ₇ [mm]	28,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₈ [mm]	27,2	LIBS	27,9	LIBS
	x ₉ [mm]	27,4	LIBS	28,0	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	26,5		26,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	28,7		28	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	12,33		11,92	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			12,13	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,15		293,15	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0510		0,0500	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	549,02		560,00	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02647		0,02609	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	88200		88200	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,00		20,00	
Versuchsdauer t _v	[h]	25		25	

Tabelle A 21 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK07 – 14 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020	5.10.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	23.11.2020	23.11.2020	23.11.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM I 42,5 (mit LP) AB16-Splitt 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	3.1	4.1	5.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0500	0,0500	0,0500			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8880	0,8859	0,8960			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2307,19	2301,73	2327,97			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	23.11.2020	23.11.2020	23.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00	12:00			
Prüfende	dd/mm/jjjj	24.11.2020	24.11.2020	24.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:55	13:55	14:55			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:55	25:55	26:55			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	63,80	66,80	62,30			
Stromstärke (Ende)	[mA]	52,20	51,60	52,30			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	18,50	20,46	20,33			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,25	20,66	20,34			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,80	20,80	20,80			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	27,8	LIBS	35,6	LIBS	27,00	LIBS
	x ₂ [mm]	29,1	LIBS	34,6	LIBS	29,5	LIBS
	x ₃ [mm]	28,0	LIBS	34,1	LIBS	29,4	LIBS
	x ₄ [mm]	27,1	LIBS	33,6	LIBS	28,0	LIBS
	x ₅ [mm]	27,7	LIBS	30,5	LIBS	26,0	LIBS
	x ₆ [mm]	29,3	LIBS	30,5	LIBS	28,0	LIBS
	x ₇ [mm]	30,6	LIBS	28,6	LIBS	28,8	LIBS
	x ₈ [mm]	29,6	LIBS	28,3	LIBS	29,7	LIBS
	x ₉ [mm]	27,7	LIBS	29,0	LIBS	26,8	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	28,5		31,6		28,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	30,6		35,6		29,7	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	12,86		13,85		11,76	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			12,82			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,40		293,81		293,49	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0500		0,0500		0,0500	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	560,00		560,00		560,00	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02854		0,03164		0,02813	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	89700		93300		96900	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,25		20,66		20,34	
Versuchsdauer t _v	[h]	25		26		27	

Tabelle A 22 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK07-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK08 – 0 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020	5.10.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	9.11.2020	9.11.2020	9.11.2020			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	CEM III-B (mit LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7	8	9			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0500	0,0510	0,0500			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9244	0,9213	0,9123			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2401,76	2346,77	2370,32			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	9.11.2020	9.11.2020	9.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	11:30	11:30	11:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	10.11.2020	10.11.2020	10.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:00	10:00	10:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	22:30	22:30	22:30			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	8,30	8,20	8,20			
Stromstärke (Ende)	[mA]	9,40	9,10	9,70			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,27	20,32	20,40			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,88	20,32	20,44			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20,60	20,60	20,60			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₂ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₃ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₄ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₅ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₆ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₇ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₈ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
	x ₉ [mm]		LIBS		LIBS		LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	3,0	5,0	3,0			
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	0	0	0			
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	1,14	2,14	1,15			
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²	1,48					
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315	8,315	8,315			
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,03	293,47	293,59			
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0500	0,0510	0,0500			
Ionenladung z	[-]	1	1	1			
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490	96490	96490			
elektrische Feldstärke E	[V/m]	560,00	549,02	560,00			
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0	30,0	30,0			
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00300	0,00500	0,00300			
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283	1,283	1,283			
Versuchsdauer t	[s]	81000	81000	81000			
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034	0,034	0,034			
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510	0,510	0,510			
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,88	20,32	20,44			
Versuchsdauer t _v	[h]	23	23	23			

Tabelle A 23 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-0d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK08 – 7 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	16.11.2020	16.11.2020		
Prüfungsalter	d.	42	42		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	CEM III-B (mit LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7.1	8.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0520	0,0520		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9355	0,9159		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2337,12	2288,15		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	16.11.2020	16.11.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00		
Prüfende	dd/mm/jjjj	18.11.2020	18.11.2020		
Uhrzeit	[hh:min]	10:00	10:00		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	46:00	46:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	8,20	8,70		
Stromstärke (Ende)	[mA]	9,50	8,80		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,00	20,00		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,00	20,00		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,60	20,60		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	10,5	LIBS	15,3	LIBS
	x ₂ [mm]	7,9	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₃ [mm]	7,7	LIBS	10,8	LIBS
	x ₄ [mm]	8,2	LIBS	10,1	LIBS
	x ₅ [mm]	9,0	LIBS	7,7	LIBS
	x ₆ [mm]	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₇ [mm]	nicht lesbar	LIBS	9,6	LIBS
	x ₈ [mm]	7,7	LIBS	10,4	LIBS
	x ₉ [mm]	10,4	LIBS	9,7	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	8,8		10,5	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	10,5		15,3	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	2,02		2,47	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			2,24	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,15		293,15	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0520		0,0520	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	538,46		538,46	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00877		0,01051	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	165600		165600	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,00		20,00	
Versuchsdauer t _v	[h]	46		46	

Tabelle A 24 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK08 – 14 Tage (PA201005)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	5.10.2020	5.10.2020	5.10.2020			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	23.11.2020	23.11.2020	23.11.2020			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	CEM III-B (mit LP) I AB16-Splitt I 175/350 (0,5)					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	9.1	10.1	11.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0990	0,0990	0,0990			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0500	0,0500	0,0500			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8914	0,8993	0,8941			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2316,02	2336,55	2323,04			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	23.11.2020	23.11.2020	23.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	12:00	12:00	12:00			
Prüfende	dd/mm/jjjj	25.11.2020	25.11.2020	25.11.2020			
Uhrzeit	[hh:min]	10:00	10:00	10:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	46:00	46:00	46:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	9,50	9,60	9,20			
Stromstärke (Ende)	[mA]	10,00	10,10	10,00			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,45	19,92	20,24			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,85	19,78	19,79			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	20,80	20,80	20,80			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	8,7	LIBS	10,6	LIBS	7,60	LIBS
	x ₂ [mm]	7,7	LIBS	9,5	LIBS	7,1	LIBS
	x ₃ [mm]	7,6	LIBS	8,8	LIBS	7,0	LIBS
	x ₄ [mm]	8,6	LIBS	11,3	LIBS	9,0	LIBS
	x ₅ [mm]	8,6	LIBS	12,4	LIBS	8,6	LIBS
	x ₆ [mm]	nicht lesbar	LIBS	11,9	LIBS	9,4	LIBS
	x ₇ [mm]	10,2	LIBS	8,6	LIBS	12,2	LIBS
	x ₈ [mm]	7,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS	10,0	LIBS
	x ₉ [mm]	7,5	LIBS	9,4	LIBS	13,2	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	8,3		10,3		9,3	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	10,2		12,4		13,2	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	1,84		2,33		2,09	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			2,09			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	294,00		292,93		292,94	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0500		0,0500		0,0500	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	560,00		560,00		560,00	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00833		0,01031		0,00934	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	165600		165600		165600	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,85		19,78		19,79	
Versuchsdauer t _v	[h]	46		46		46	

Tabelle A 25 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK08-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK09 – 0 Tage (PA210222)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021	22.2.2021	22.2.2021			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	29.3.2021	29.3.2021	29.3.2021			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	I 42,5 N+SFA I AB16-Splitt I 175/309(102) (0,5); LP; SFA = 33%; k					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1	2	3			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0997	0,0996	0,0996			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0512	0,0518	0,0499			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9148	0,9006	0,9135			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2288,63	2231,48	2349,63			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	29.3.2021	29.3.2021	29.3.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	30.3.2021	30.3.2021	30.3.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	60,00	65,90	66,30			
Stromstärke (Ende)	[mA]	57,10	63,80	63,60			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	18,33	18,46	18,54			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	18,33	19,47	19,39			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	18	18	18			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	19,5	LIBS	17,0	LIBS	14,1	LIBS
	x ₂ [mm]	14,7	LIBS	17,2	LIBS	15,0	LIBS
	x ₃ [mm]	17,9	LIBS	16,7	LIBS	15,7	LIBS
	x ₄ [mm]	16,5	LIBS	16,4	LIBS	15,3	LIBS
	x ₅ [mm]	16,0	LIBS	17,5	LIBS	15,4	LIBS
	x ₆ [mm]	16,7	LIBS	15,8	LIBS	16,3	LIBS
	x ₇ [mm]	16,4	LIBS	16,3	LIBS	15,5	LIBS
	x ₈ [mm]	19,0	LIBS	16,9	LIBS	16,0	LIBS
	x ₉ [mm]	19,7	LIBS	16,2	LIBS	16,9	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	17,4		16,7		15,6	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	19,7		17,5		16,9	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	8,02		7,78		6,98	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			7,59			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	291,48		292,62		292,54	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0512		0,0518		0,0499	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	546,88		540,54		561,12	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,01738		0,01667		0,01558	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	18,33		19,47		19,39	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 26 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-0d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK09 – 7 Tage (PA210222)

Herstellungsdatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021	22.2.2021		
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	6.4.2021	6.4.2021		
Prüfungsalter	d.	43	43		
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	I 42,5 N+SFA AB16-Splitt 175/309(102) (0,5); LP; SFA = 33%; k			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	1.1	2.1		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0998	0,0992		
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0509	0,0510		
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,8955	0,9112		
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2249,04	2311,69		
Zelle	"Nr."	1	2		
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	6.4.2021	6.4.2021		
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00		
Prüfende	dd/mm/jjjj	7.4.2021	7.4.2021		
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00		
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00		
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00		
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5		
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0		
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0		
Stromstärke (Anfang)	[mA]	49,60	47,90		
Stromstärke (Ende)	[mA]	43,10	42,00		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,36	20,55		
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,43	20,27		
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20	20		
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.		
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	25,3	LIBS	27,2	LIBS
	x ₂ [mm]	25,5	LIBS	26,8	LIBS
	x ₃ [mm]	24,9	LIBS	25,6	LIBS
	x ₄ [mm]	26,0	LIBS	27,3	LIBS
	x ₅ [mm]	24,3	LIBS	25,8	LIBS
	x ₆ [mm]	25,3	LIBS	24,5	LIBS
	x ₇ [mm]	25,0	LIBS	25,4	LIBS
	x ₈ [mm]	23,2	LIBS	24,0	LIBS
	x ₉ [mm]	23,3	LIBS	23,6	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	24,8		25,6	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	26		27,3	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	11,72		12,15	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			11,94	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,58		293,42	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0509		0,0510	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	550,10		549,02	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02476		0,02558	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,43		20,27	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24	

Tabelle A 27 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK09 – 14 Tage (PA210222)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021	22.2.2021	22.2.2021			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	12.4.2021	12.4.2021	12.4.2021			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	I 142,5 N+SFA I AB16-Splitt I 175/309(102) (0,5); LP; SFA = 33%; k					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	3.1	4.1	5.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0997	0,0996	0,0996			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0521	0,0515	0,0517			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9290	0,9290	0,9270			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2284,01	2315,26	2301,34			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	12.4.2021	12.4.2021	12.4.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00	11:00			
Prüfende	dd/mm/jjjj	13.4.2021	13.4.2021	13.4.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00	11:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	47,20	48,20	47,20			
Stromstärke (Ende)	[mA]	39,80	42,00	42,00			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,03	20,00	20,14			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,00	19,69	20,16			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20	20	20			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	24,7	LIBS	21,4	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₂ [mm]	23,2	LIBS	23,2	LIBS	23,1	LIBS
	x ₃ [mm]	27,8	LIBS	22,8	LIBS	23,3	LIBS
	x ₄ [mm]	24,6	LIBS	23,7	LIBS	25,7	LIBS
	x ₅ [mm]	22,1	LIBS	nicht lesbar	LIBS	25,9	LIBS
	x ₆ [mm]	21,6	LIBS	24,5	LIBS	25,0	LIBS
	x ₇ [mm]	24,5	LIBS	24,9	LIBS	23,8	LIBS
	x ₈ [mm]	23,7	LIBS	26,1	LIBS	23,2	LIBS
	x ₉ [mm]	27,3	LIBS	25,9	LIBS	23,8	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	24,4		24,1		24,2	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	27,8		26,1		25,9	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	11,77		11,47		11,61	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			11,62			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,15		292,84		293,31	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0521		0,0515		0,0517	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	537,43		543,69		541,59	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,02439		0,02406		0,02423	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	20,00		19,69		20,16	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 28 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK09-14d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK10 – 0 Tage (PA210222)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021	22.2.2021	22.2.2021			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	29.3.2021	29.3.2021	29.3.2021			
Prüfungsalter	d.	35	35	35			
Prüfung	"Name"	NaBr-0 Versuch					
Rezeptur	"Name"	I 42,5 N+SF AB16-Splitt 175/309(102) (0,5); LP; SF = 11%; k=0 wg.					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7	8	9			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0997	0,0996	0,0996			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0519	0,0512	0,0513			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9125	0,9537	0,9377			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2252,09	2390,75	2346,05			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	29.3.2021	29.3.2021	29.3.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfende	dd/mm/jjjj	30.3.2021	30.3.2021	30.3.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	10:30	10:30	10:30			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	17,70	16,90	17,80			
Stromstärke (Ende)	[mA]	17,40	16,30	17,80			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	18,42	18,39	18,28			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,50	18,36	18,34			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	18	18	18			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	3,1	LIBS	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₂ [mm]	nicht lesbar	LIBS	3,6	LIBS	3,1	LIBS
	x ₃ [mm]	3,1	LIBS	3,5	LIBS	3,1	LIBS
	x ₄ [mm]	nicht lesbar	LIBS	nicht lesbar	LIBS	2,9	LIBS
	x ₅ [mm]	nicht lesbar	LIBS	2,6	LIBS	4,0	LIBS
	x ₆ [mm]	nicht lesbar	LIBS	3,0	LIBS	4,0	LIBS
	x ₇ [mm]	3,4	LIBS	4,8	LIBS	4,7	LIBS
	x ₈ [mm]	2,6	LIBS	nicht lesbar	LIBS	2,7	LIBS
	x ₉ [mm]	4,7	LIBS	-	LIBS	-	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	3,4		3,5		3,5	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	4,7		4,8		4,7	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{Bm} [m²/s]	1,28		1,31		1,32	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			1,30			
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,65		291,51		291,49	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0519		0,0512		0,0513	
Ionenladung z	[-]	1		1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	539,50		546,88		545,81	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00338		0,00350		0,00350	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _v	[°C]	19,50		18,36		18,34	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24		24	

Tabelle A 29 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-0d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK10 – 7 Tage (PA210222)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021		22.2.2021	
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	6.4.2021		6.4.2021	
Prüfungsalter	d.	43		43	
Prüfung	"Name"	NaBr - 7 Tage MELP			
Rezeptur	"Name"	I 42,5 N+SF AB16-Splitt 175/309(102) (0,5); LP; SF = 11%; k=0 wg.			
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	7.1		8.1	
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0993		0,0994	
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0510		0,0518	
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9250		0,9418	
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2341,98		2342,97	
Zelle	"Nr."	1		2	
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	6.4.2021		6.4.2021	
Uhrzeit	[hh:min]	11:00		11:00	
Prüfende	dd/mm/jjjj	7.4.2021		7.4.2021	
Uhrzeit	[hh:min]	11:00		11:00	
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00		24:00	
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00		24:00	
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5		5	
Spannung (Anfang)	[V]	30,0		30,0	
Spannung (Ende)	[V]	30,0		30,0	
Stromstärke (Anfang)	[mA]	17,60		16,70	
Stromstärke (Ende)	[mA]	16,90		16,70	
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	20,42		20,51	
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	20,04		20,24	
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20		20	
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.		n.v.	
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	7,6	LIBS	7,8	LIBS
	x ₂ [mm]	6,9	LIBS	7,4	LIBS
	x ₃ [mm]	7,3	LIBS	8,0	LIBS
	x ₄ [mm]	7,8	LIBS	6,9	LIBS
	x ₅ [mm]	9,6	LIBS	6,7	LIBS
	x ₆ [mm]	6,2	LIBS	6,9	LIBS
	x ₇ [mm]	5,5	LIBS	6,8	LIBS
	x ₈ [mm]	5,7	LIBS	6,9	LIBS
	x ₉ [mm]	5,1	LIBS	6,9	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	6,9		7,1	
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	9,6		8	
Bromidmigrationskoeffizient	D_{BrM} [m²/s]	2,88		3,06	
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²			2,97	
mit:					
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315		8,315	
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	293,19		293,39	
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0510		0,0518	
Ionenladung z	[-]	1		1	
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490		96490	
elektrische Feldstärke E	[V/m]	549,02		540,54	
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0		30,0	
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00686		0,00714	
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283		1,283	
Versuchsdauer t	[s]	86400		86400	
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034		0,034	
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510		0,510	
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _V	[°C]	20,04		20,24	
Versuchsdauer t _v	[h]	24		24	

Tabelle A 30 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-7d
(angepasste Tabelle auf Basis von [36])

PK10 – 14 Tage (PA210222)

Herstelldatum	dd/mm/jjjj	22.2.2021	22.2.2021	22.2.2021			
Prüfung (PK)	dd/mm/jjjj	12.4.2021	12.4.2021	12.4.2021			
Prüfungsalter	d.	49	49	49			
Prüfung	"Name"	NaBr - 14 Tage MELP					
Rezeptur	"Name"	I 42,5 N+SF AB16-Splitt 175/309(102) (0,5); LP; SF = 11%; k=0 wg.					
PK-Nr.	"Ifd-Nr."	9.1	10.1	11.1			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	Ø [m]	0,0997	0,0996	0,0996			
PK-Abmessung nach Wasserlagerung	h [m]	0,0515	0,0511	0,0525			
PK-Gewicht nach Wasserlagerung	m _w [kg]	0,9420	0,9260	0,9420			
Rohdichte PK, wassergestättigt	ρ _{nr} [kg/m ³]	2342,95	2325,85	2302,94			
Zelle	"Nr."	1	2	3			
Prüfanfang	dd/mm/jjjj	12.4.2021	12.4.2021	12.4.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00	11:00			
Prüfende	dd/mm/jjjj	13.4.2021	13.4.2021	13.4.2021			
Uhrzeit	[hh:min]	11:00	11:00	11:00			
Prüfdauer (SOLL)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
Prüfdauer (IST)	[hh:min]	24:00	24:00	24:00			
NaBr-Konzentration	%-NaBr	5	5	5			
Spannung (Anfang)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Spannung (Ende)	[V]	30,0	30,0	30,0			
Stromstärke (Anfang)	[mA]	17,10	18,10	16,80			
Stromstärke (Ende)	[mA]	16,70	17,90	16,50			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Anfang)	[°C]	19,90	20,44	20,12			
Temperaturen der Elektrolytlösung des PK (Ende)	[°C]	19,63	20,20	20,05			
Raumtemperatur (Anfang)	[°C]	20	20	20			
Raumtemperatur (Ende)	[°C]	n.v.	n.v.	n.v.			
		1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte	1. Hälfte	2. Hälfte
Eindringtiefen	x ₁ [mm]	nicht lesbar	LIBS	7,8	LIBS	8,4	LIBS
	x ₂ [mm]	nicht lesbar	LIBS	7,4	LIBS	8,2	LIBS
	x ₃ [mm]	nicht lesbar	LIBS	6,6	LIBS	9,0	LIBS
	x ₄ [mm]	7,4	LIBS	8,0	LIBS	8,4	LIBS
	x ₅ [mm]	nicht lesbar	LIBS	7,4	LIBS	7,4	LIBS
	x ₆ [mm]	11,7	LIBS	7,6	LIBS	8,2	LIBS
	x ₇ [mm]	9,5	LIBS	7,0	LIBS	9,7	LIBS
	x ₈ [mm]	9,3	LIBS	8,2	LIBS	nicht lesbar	LIBS
	x ₉ [mm]	9,1	LIBS	7,7	LIBS	nicht lesbar	LIBS
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[mm]	9,4	7,5	8,5			
maximale Br-Eindringtiefe x _{max}	[mm]	11,7	8,2	9,7			
Bromidmigrationskoeffizient	D_{RBM} [m²/s]	4,14	3,21	3,75			
Bromidmigrationskoeffizient (arithm. Mittelwert)	·10⁻¹²	3,70					
mit:							
Gaskonstante R	[J·(K·mol) ⁻¹]	8,315	8,315	8,315			
absolute, mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T	[K]	292,78	293,35	293,20			
Höhe des Probekörpers h	[m]	0,0515	0,0511	0,0525			
Ionenladung z	[-]	1	1	1			
Faraday'sche Konstante F	[J·(V·mol) ⁻¹]	96490	96490	96490			
elektrische Feldstärke E	[V/m]	543,69	547,95	533,33			
absoluter Wert der angelegten Spannung U	[V]	30,0	30,0	30,0			
mittlere Br-Eindringtiefe x _d	[m]	0,00940	0,00752	0,00847			
inverse Fehlerfunktion erf ⁻¹	[-]	1,283	1,283	1,283			
Versuchsdauer t	[s]	86400	86400	86400			
Farbumschlagauslösende Chloridkonzentration c _d	[mol/l]	0,034	0,034	0,034			
Bromidkonzentration der Kaliumhydroxidlösung c ₀	[mol/l]	0,510	0,510	0,510			
mittlere Temperatur der Lösungen während des Versuchs T _V	[°C]	19,63	20,20	20,05			
Versuchsdauer t _V	[h]	24	24	24			

Tabelle A 31 Berechnung des Migrationskoeffizienten PK10-14d (angepasste Tabelle auf Basis von [36])

ANHANG B. COMSOL-DIAGRAMME – VARIANTE 1 CDF

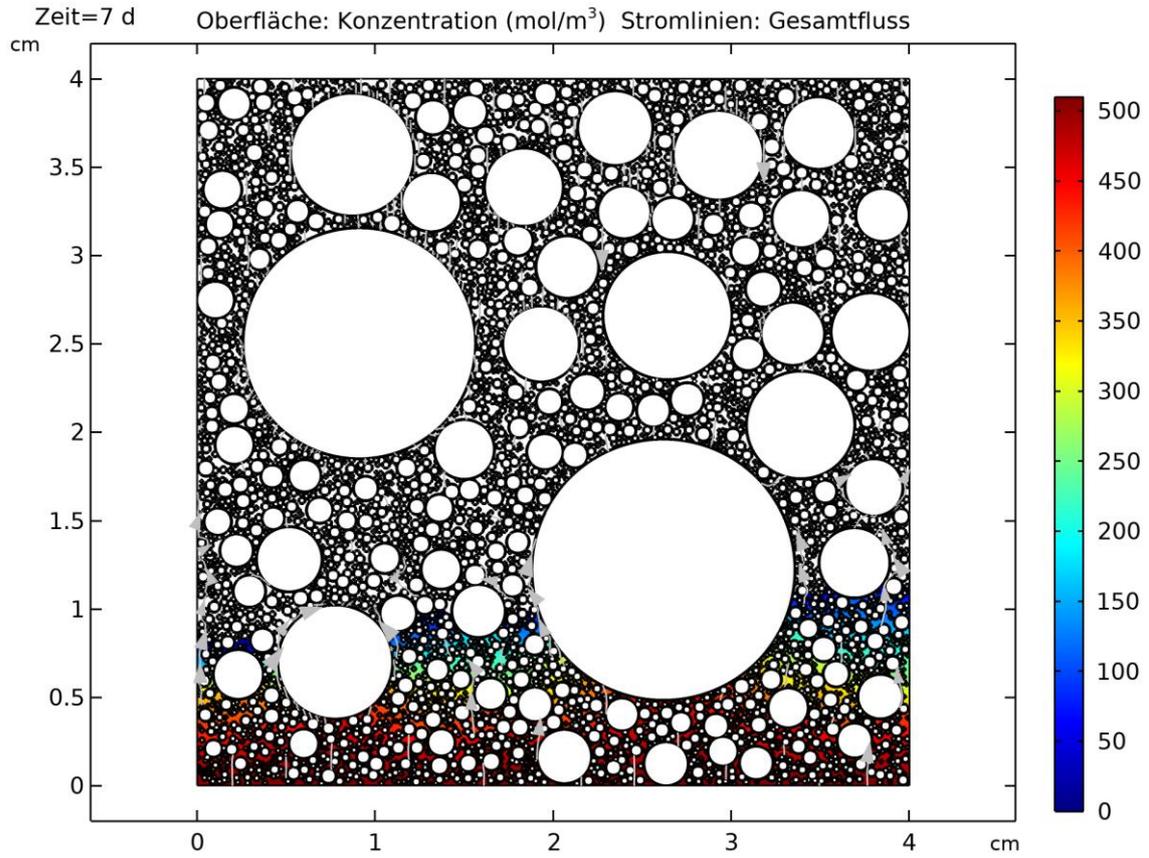


Abbildung B 1 Variante 1 - PK1 7d

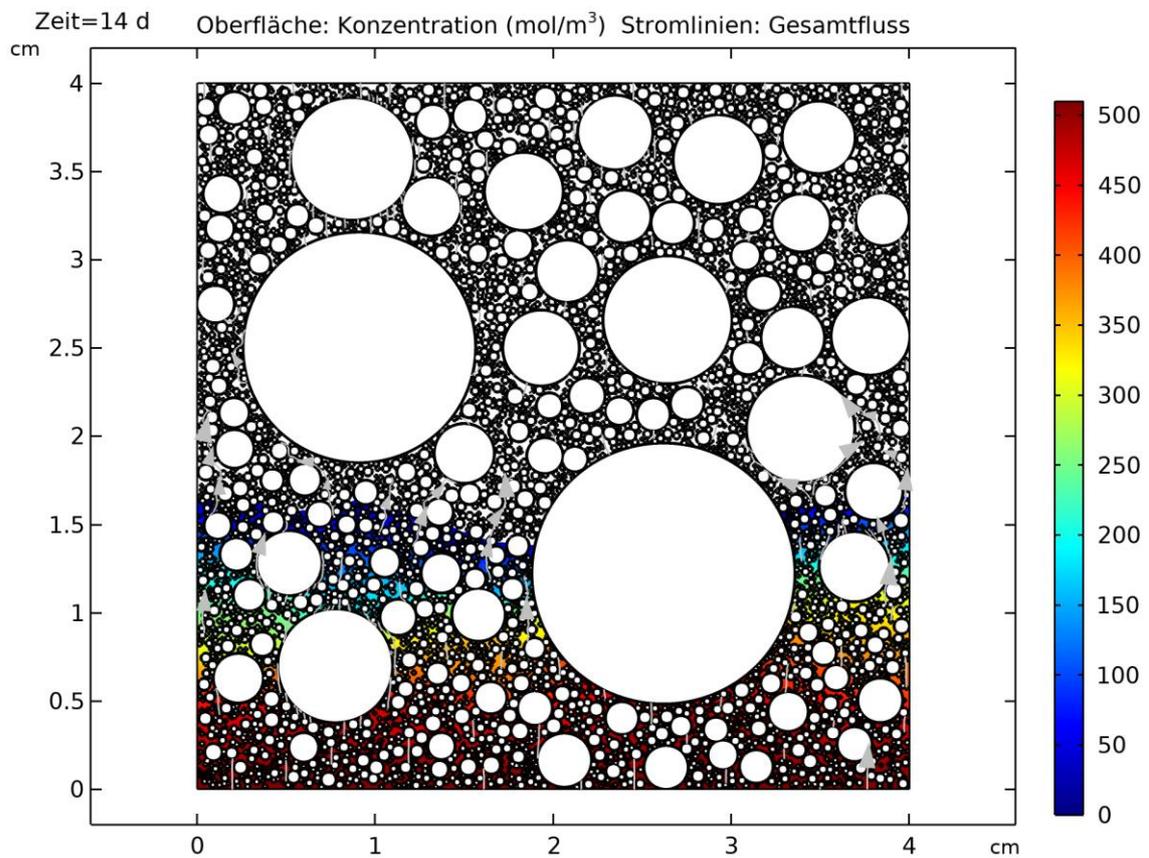


Abbildung B 2 Variante 1 - PK1 14d

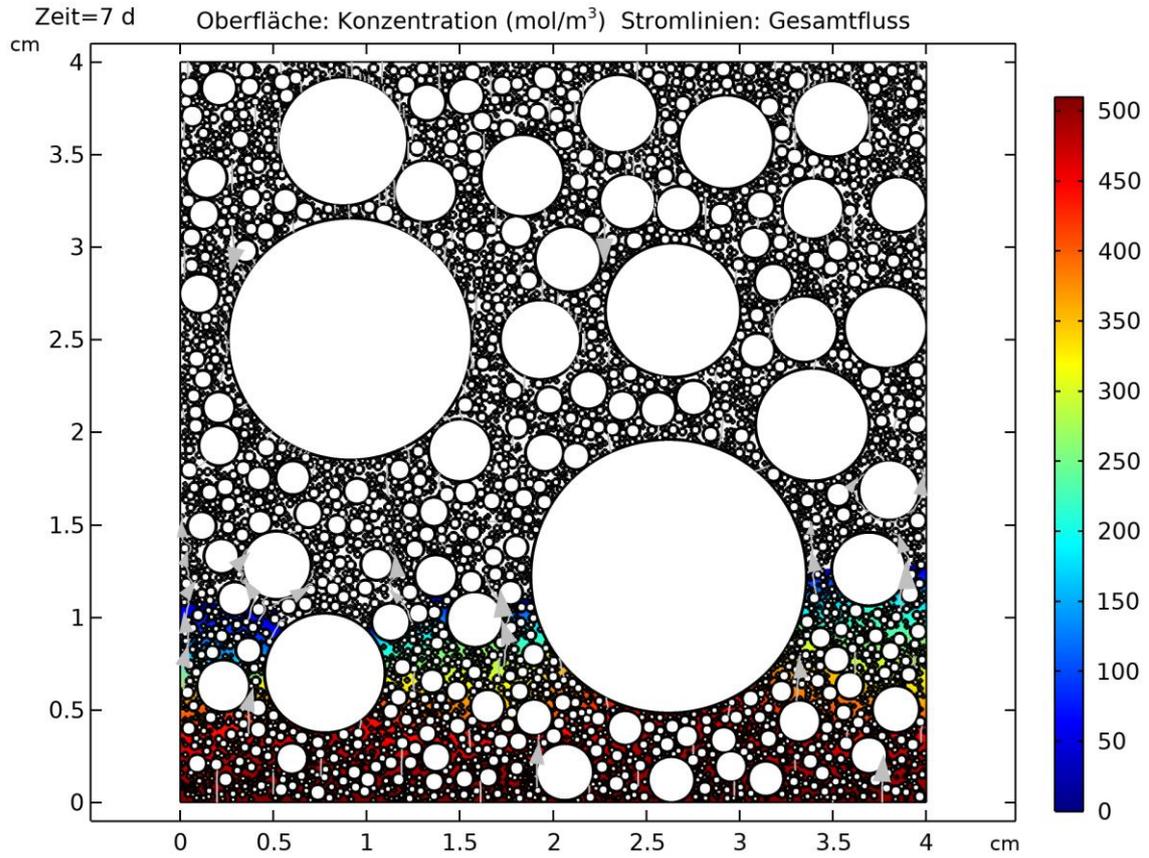


Abbildung B 3 Variante 1 – PK2 7d

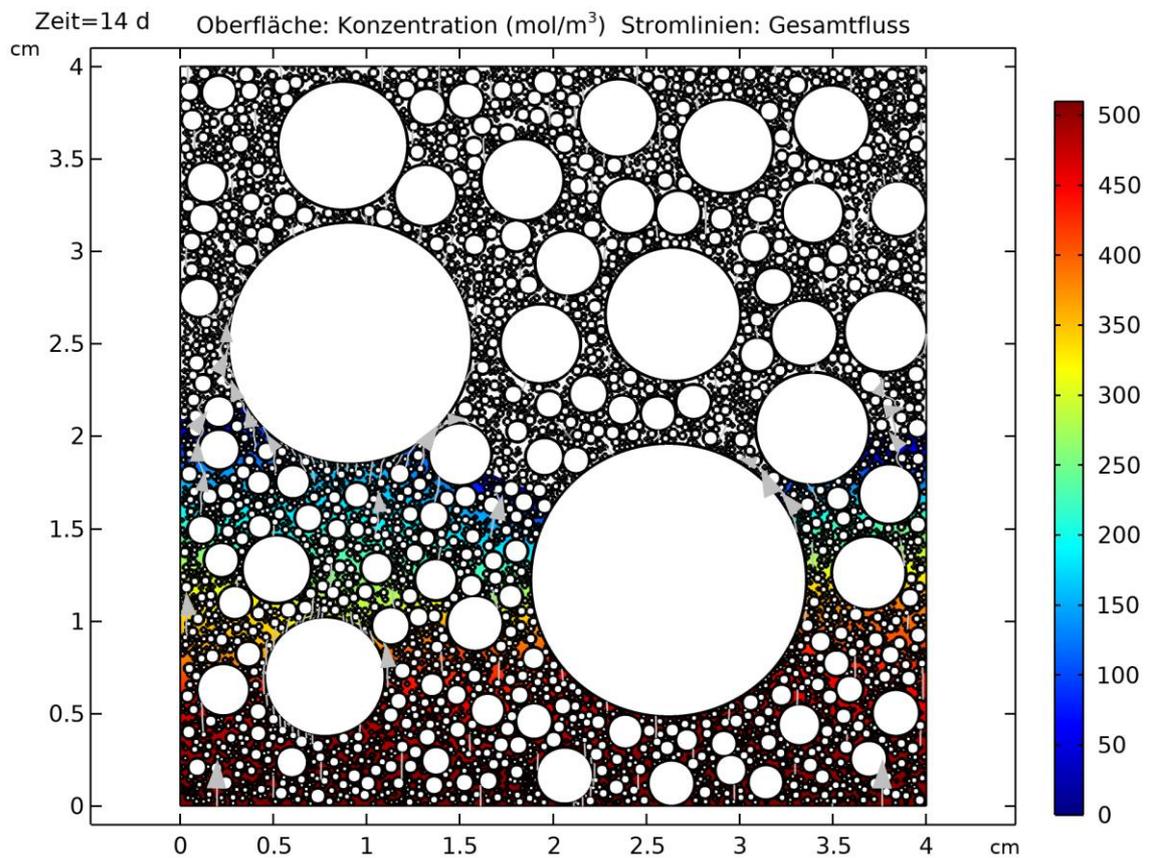


Abbildung B 4 Variante 1 – PK2 14d

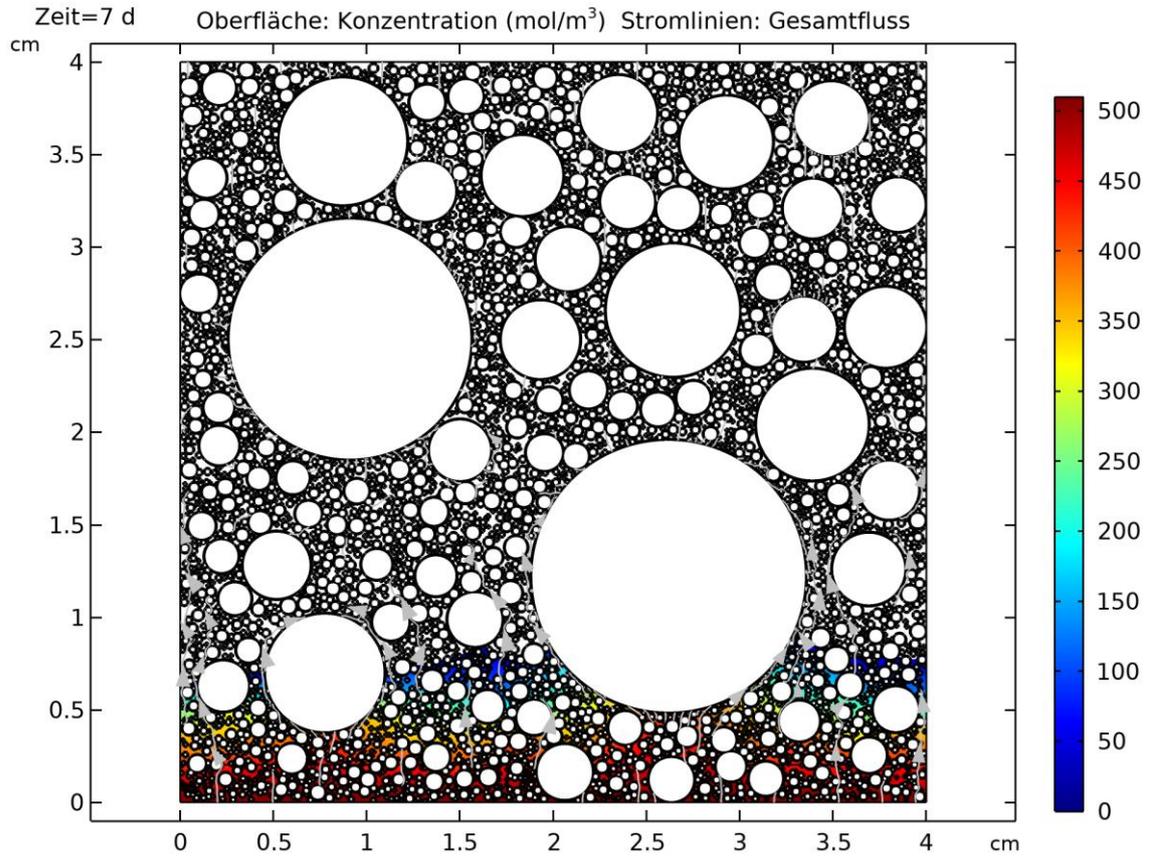


Abbildung B 5 Variante 1 – PK3 7d

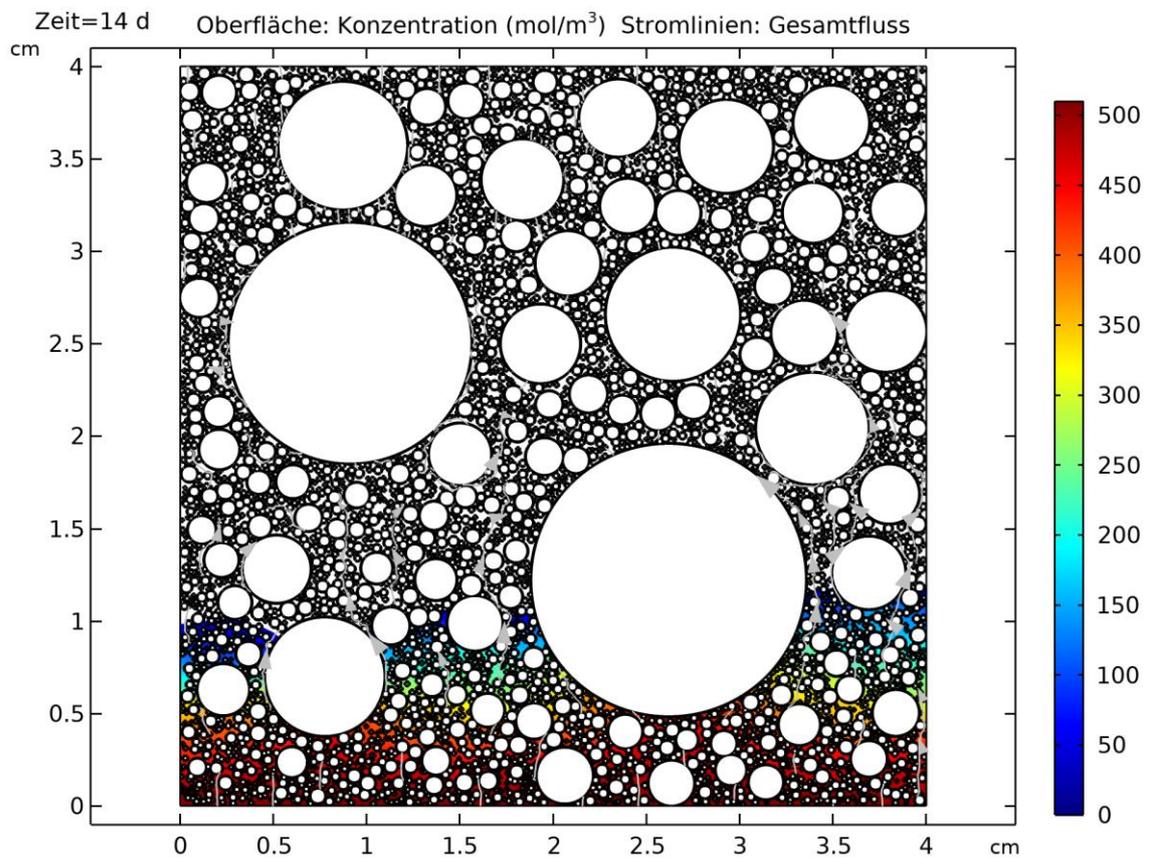


Abbildung B 6 Variante 1 – PK3 14d

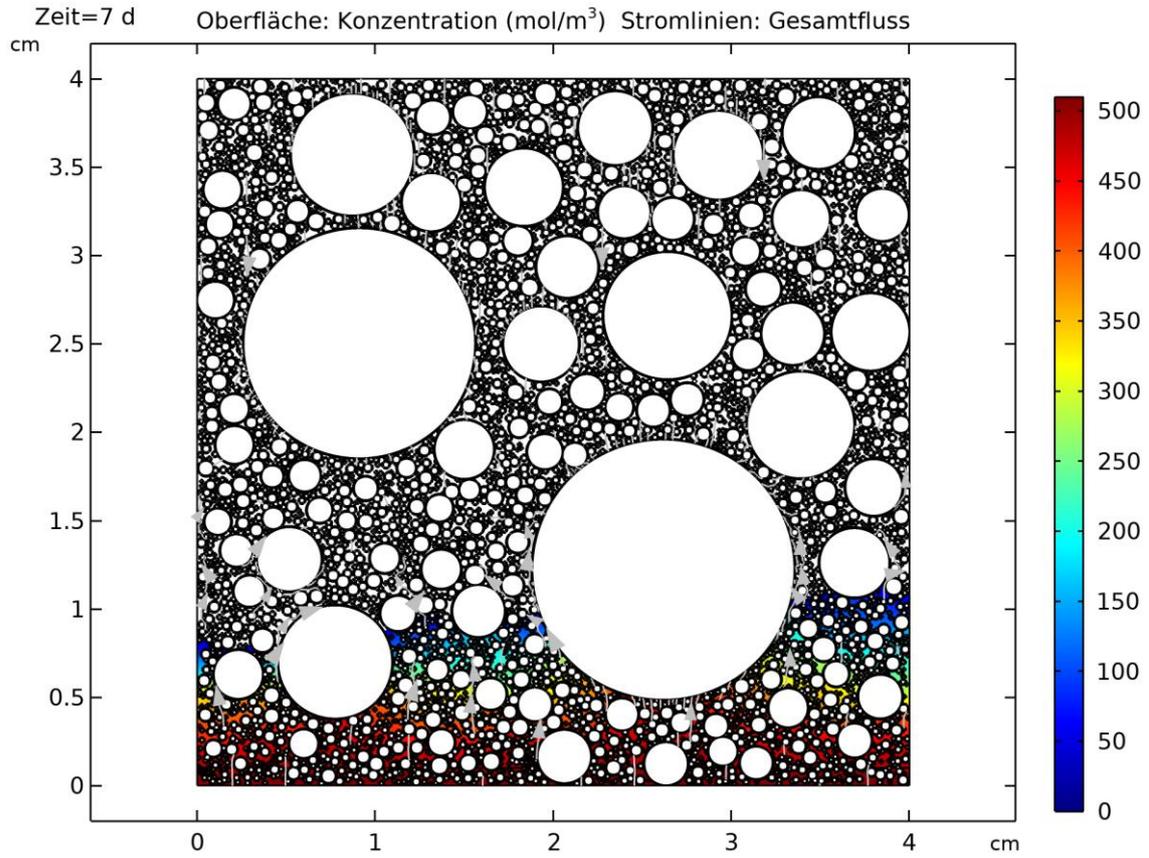


Abbildung B 7 Variante 1 – PK4 7d

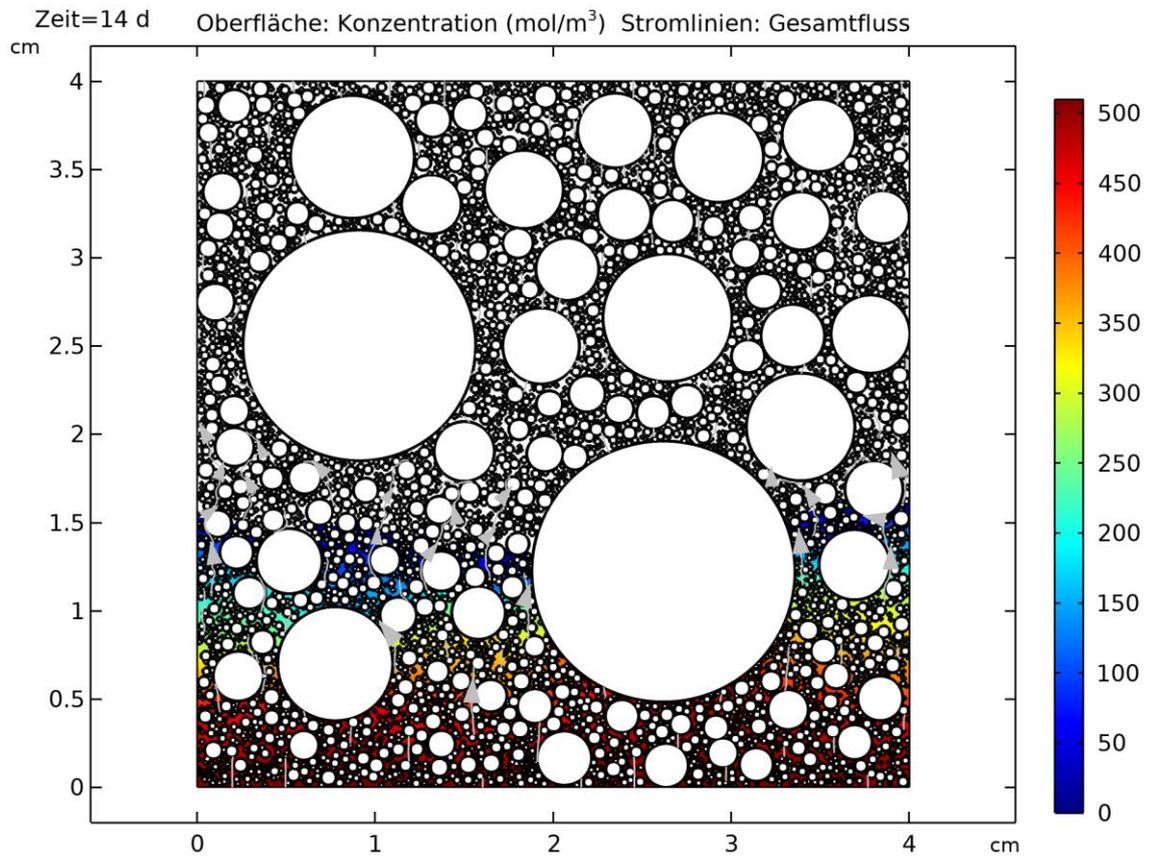


Abbildung B 8 Variante 1 – PK4 14d

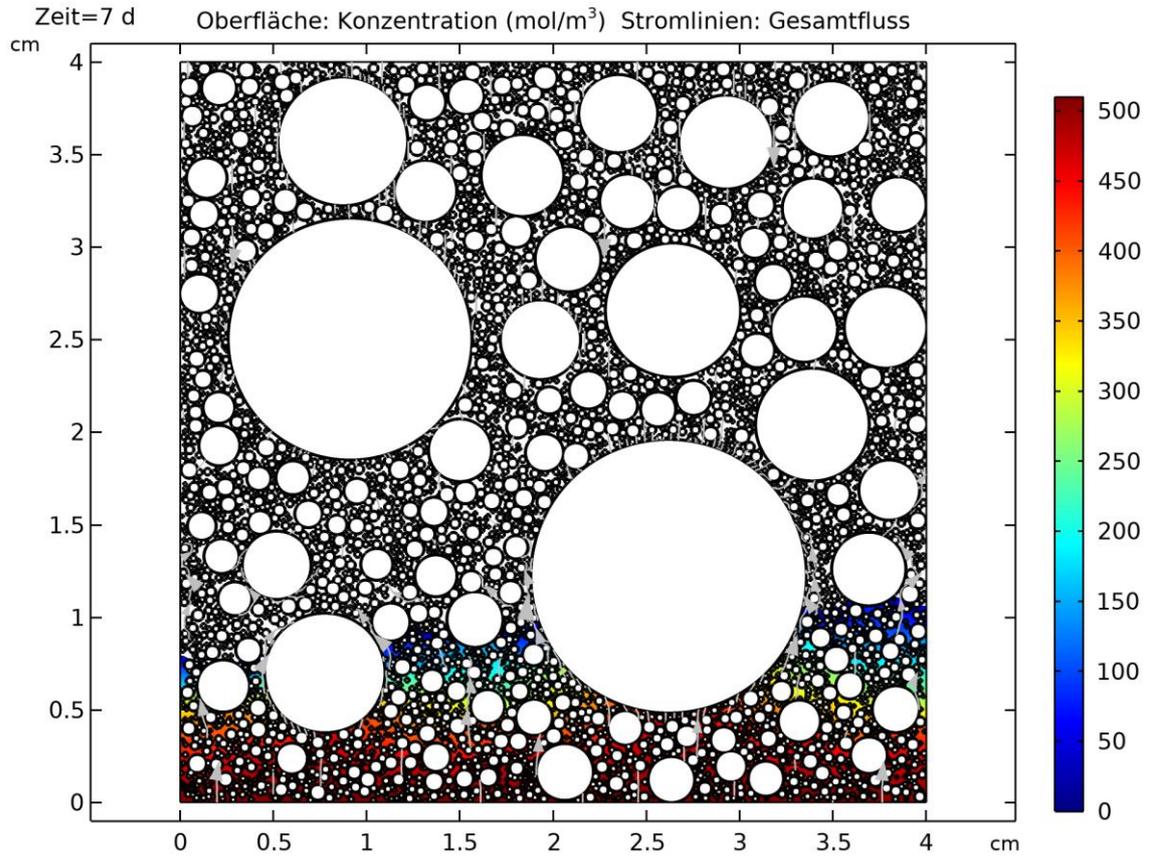


Abbildung B 9 Variante 1 – PK5 7d

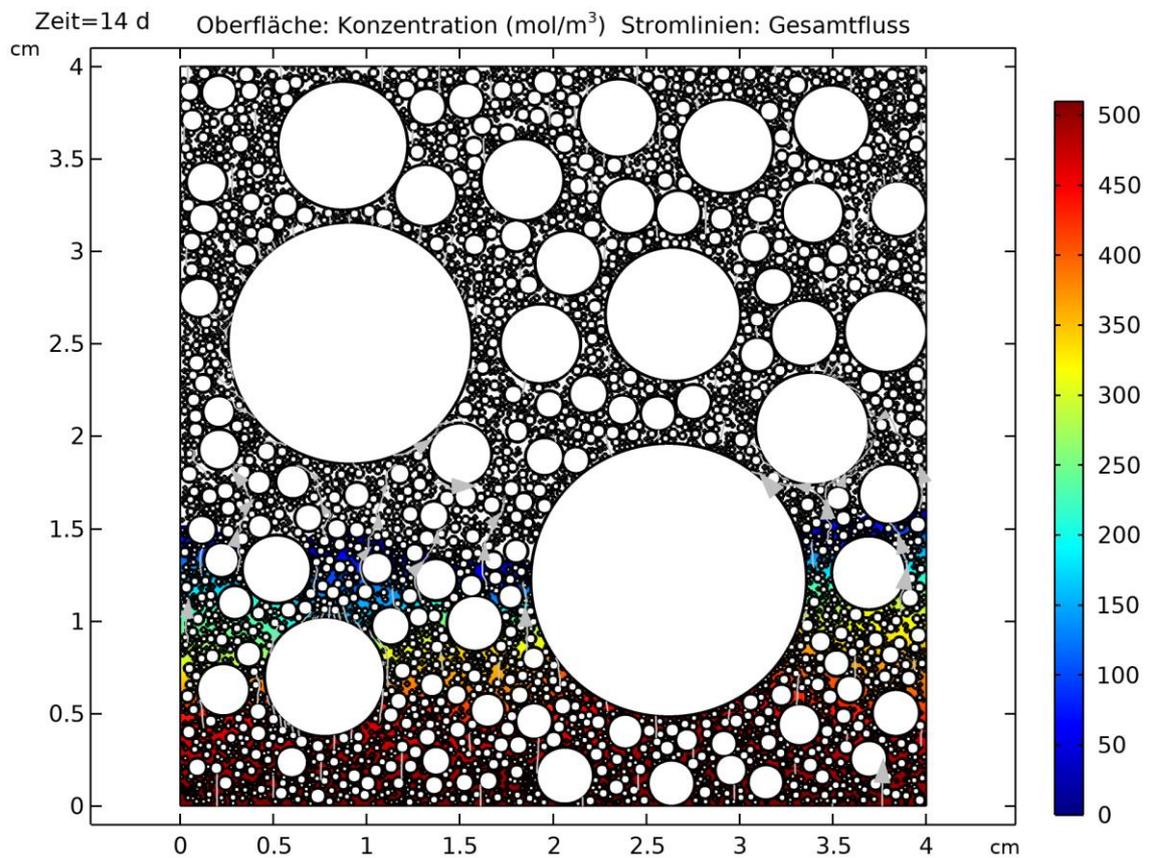


Abbildung B 10 Variante 1 – PK5 14d

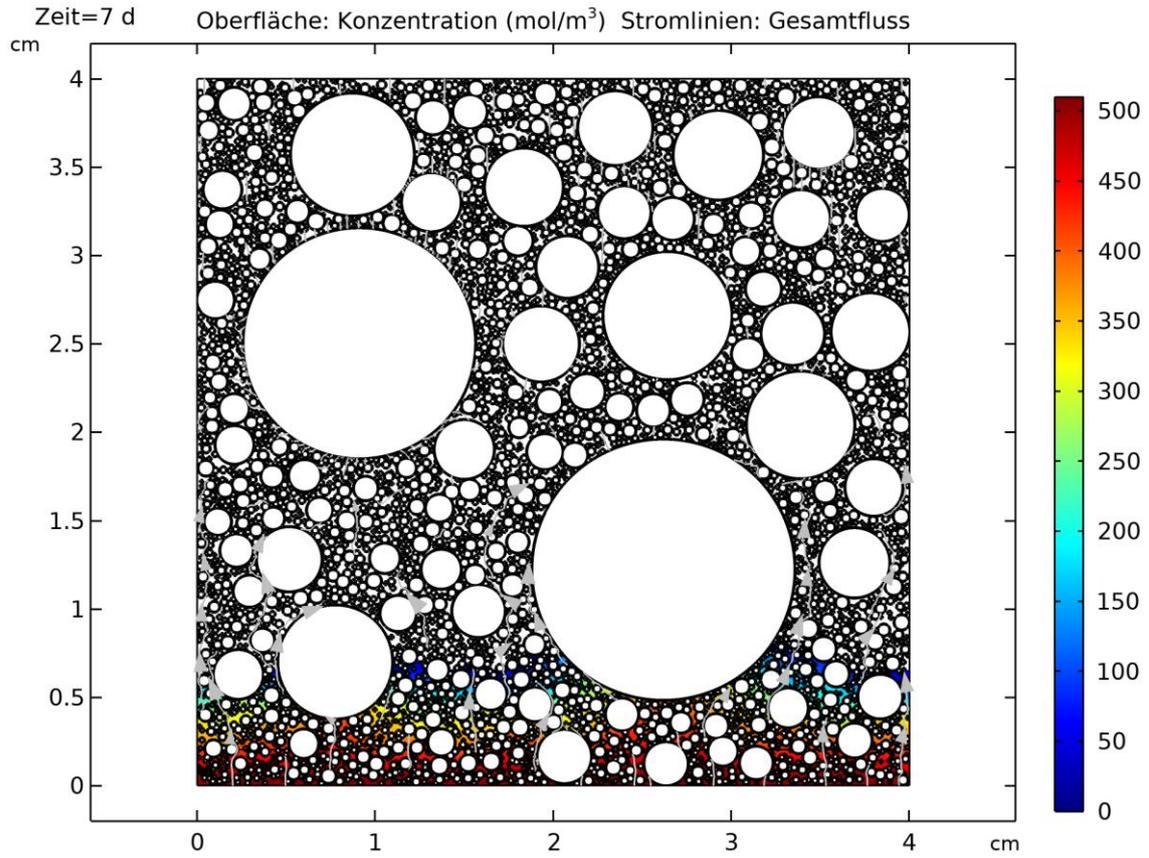


Abbildung B 11 Variante 1 – PK6 7d

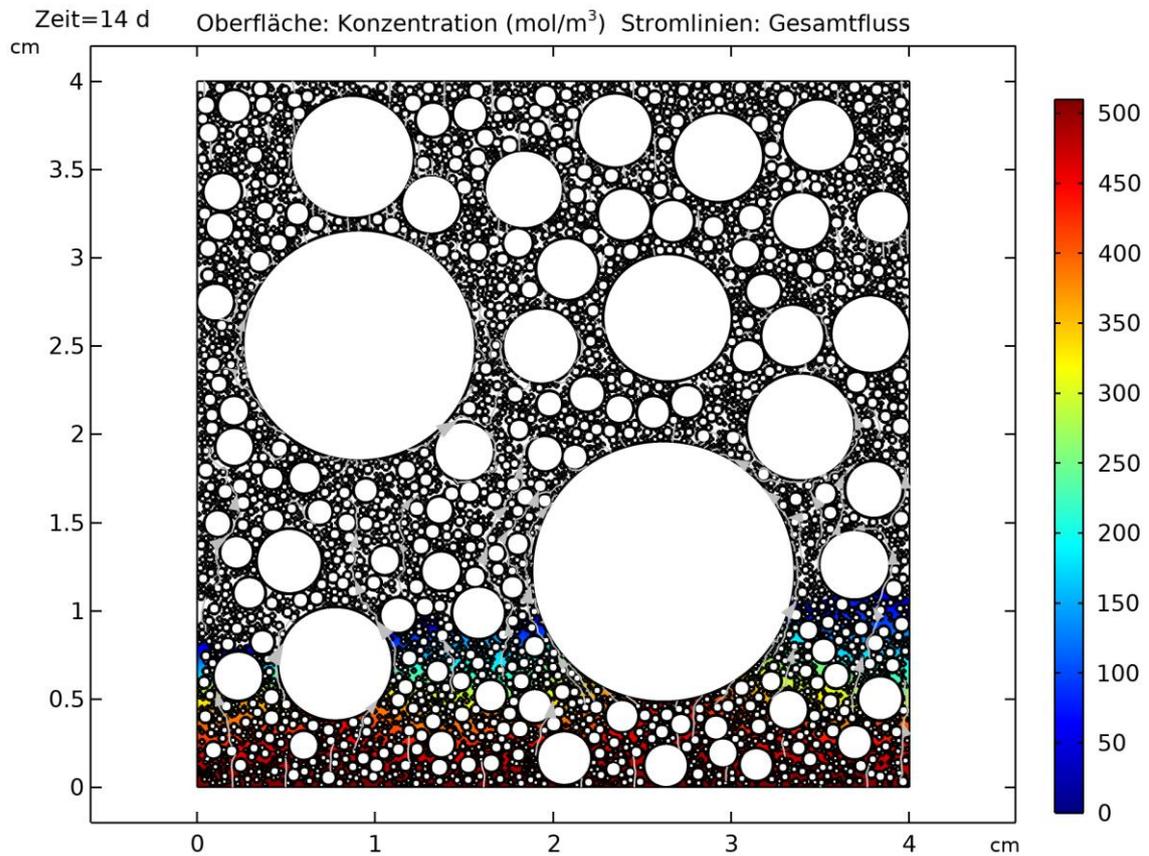


Abbildung B 12 Variante 1 – PK6 14d

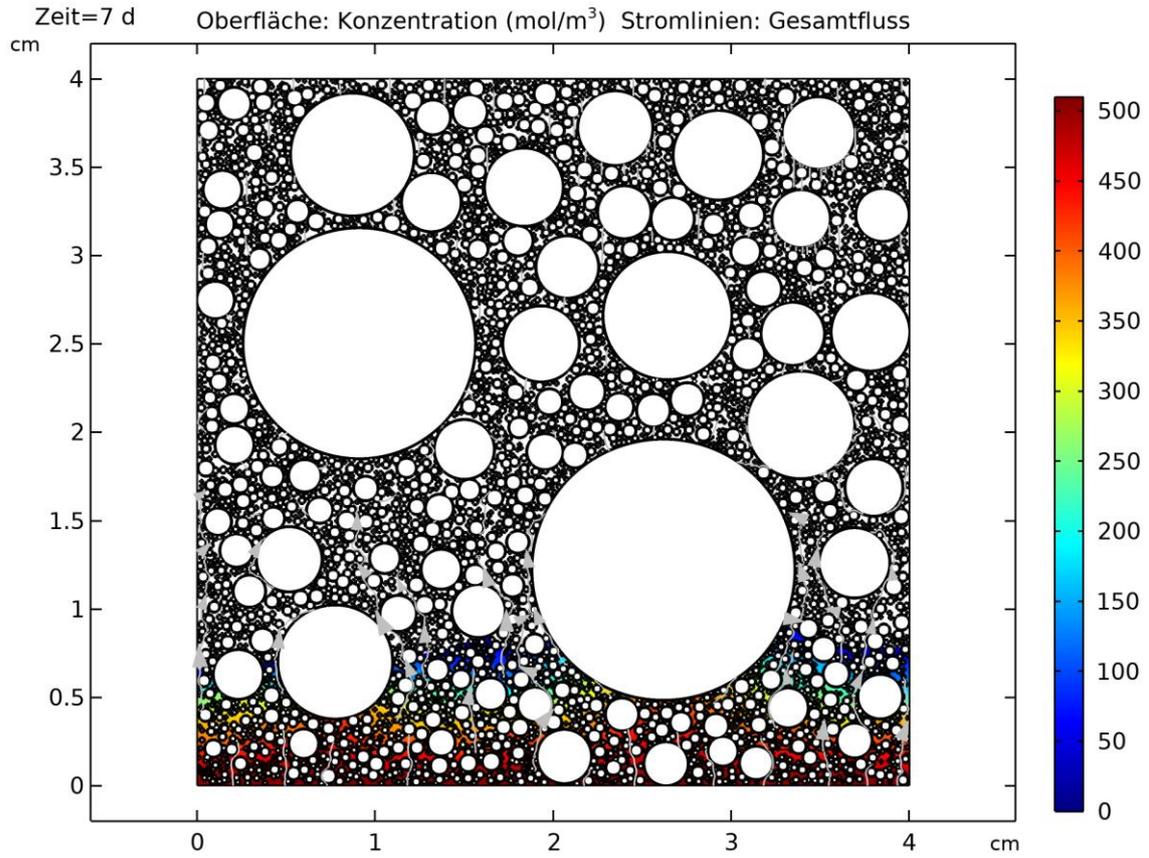


Abbildung B 13 Variante 1 – PK7 7d

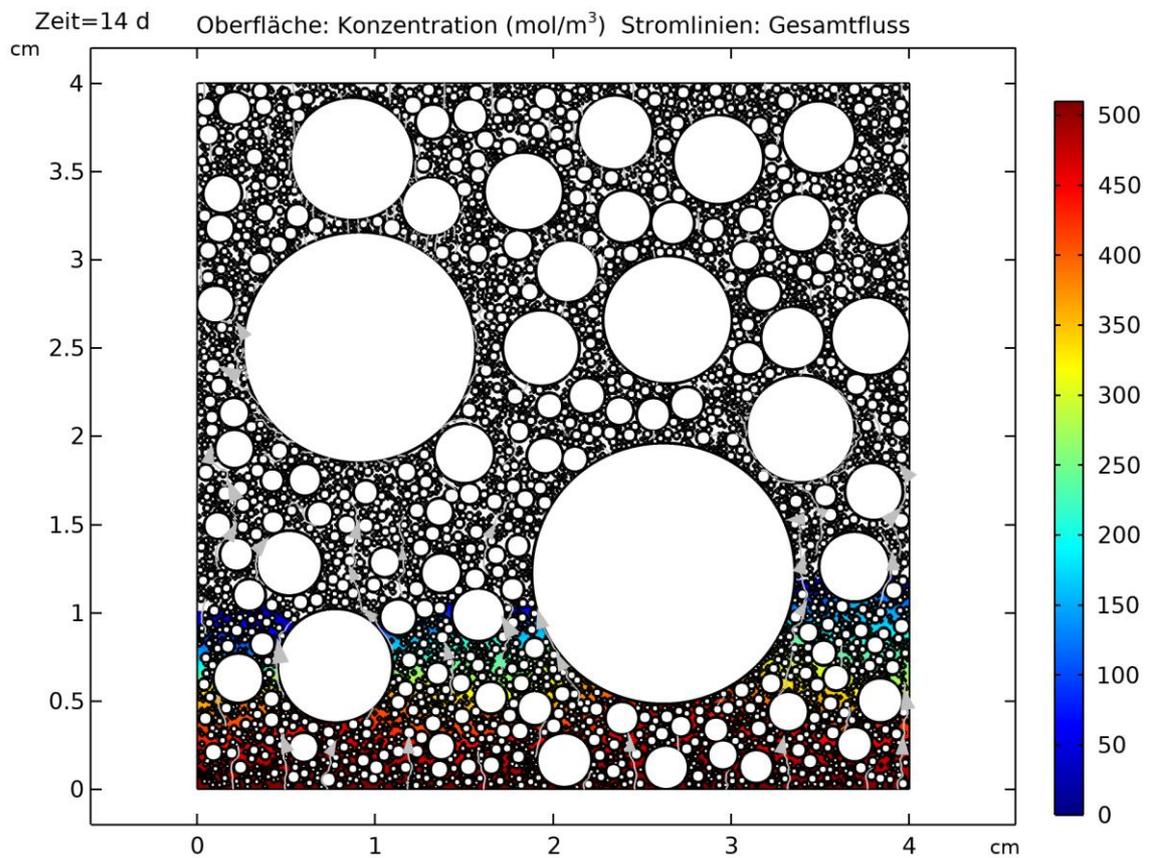


Abbildung B 14 Variante 1 – PK7 14d

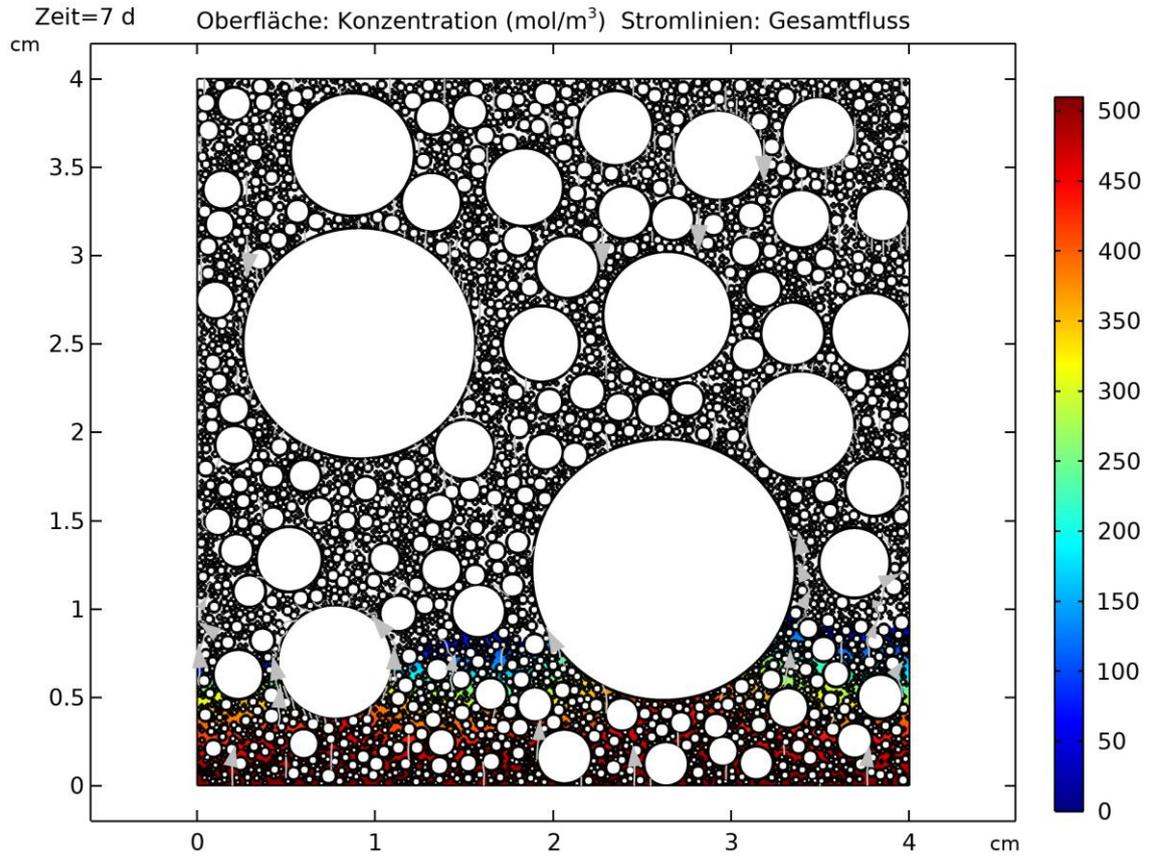


Abbildung B 15 Variante 1 – PK8 7d

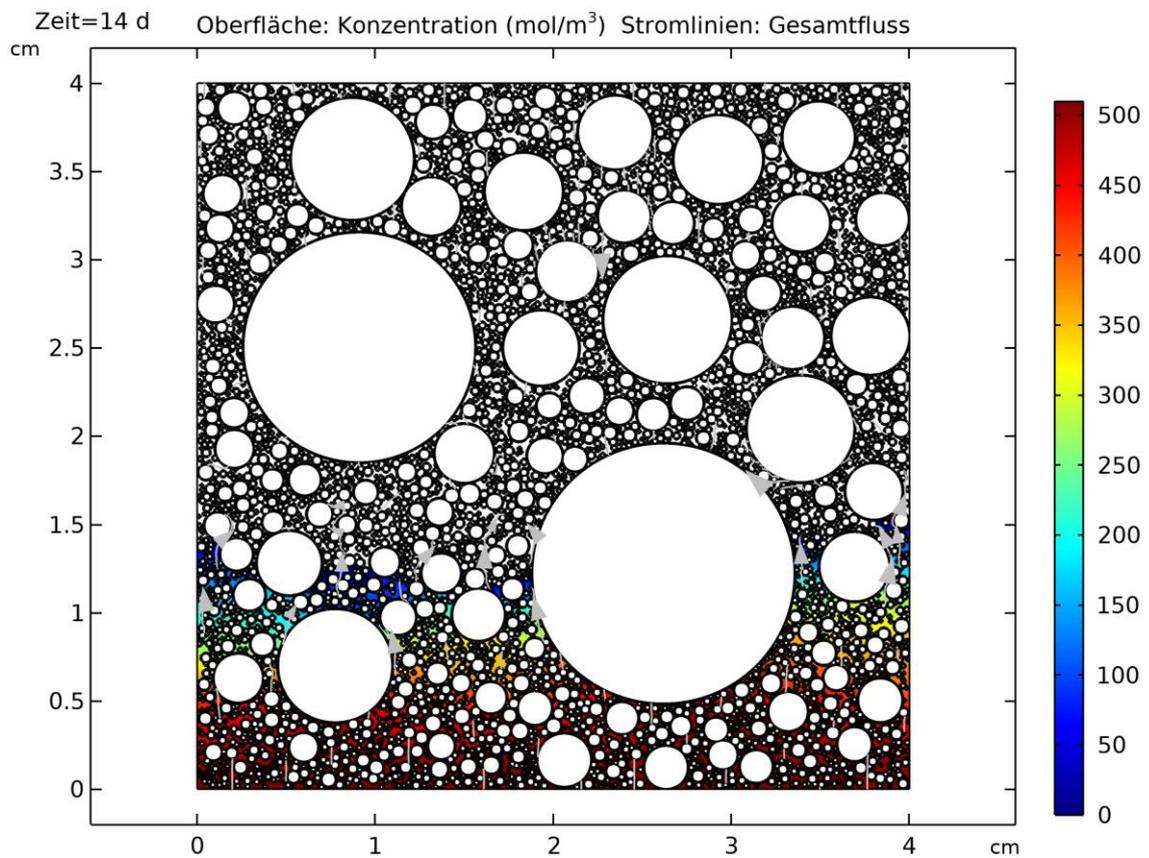


Abbildung B 16 Variante 1 – PK8 14d

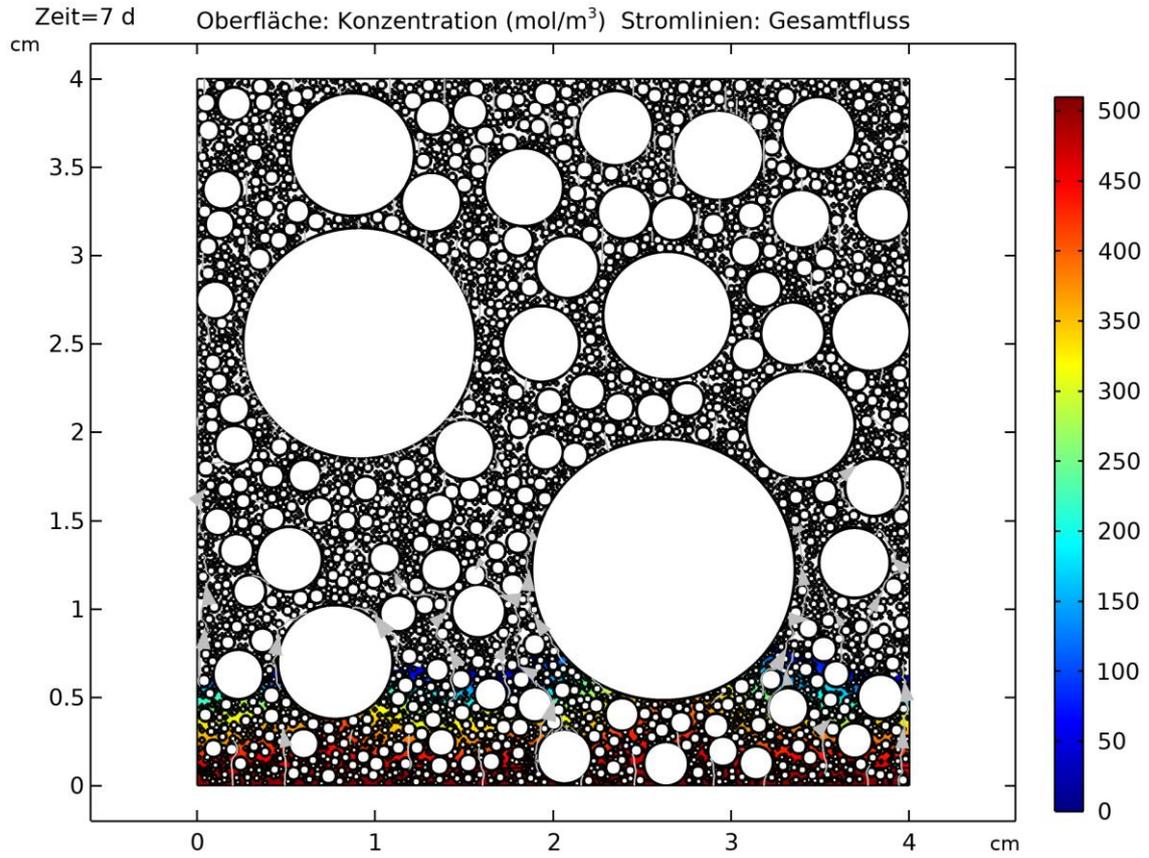


Abbildung B 17 Variante 1 – PK9 7d

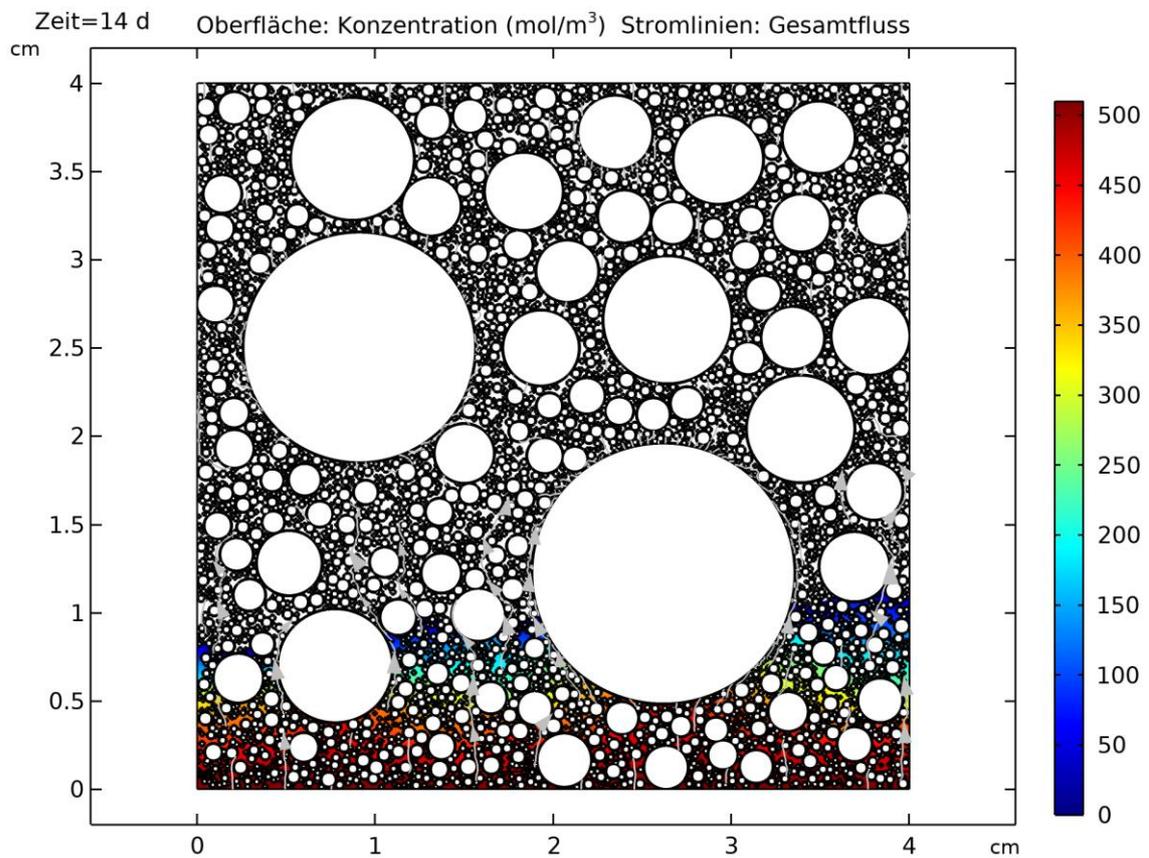


Abbildung B 18 Variante 1 – PK9 14d

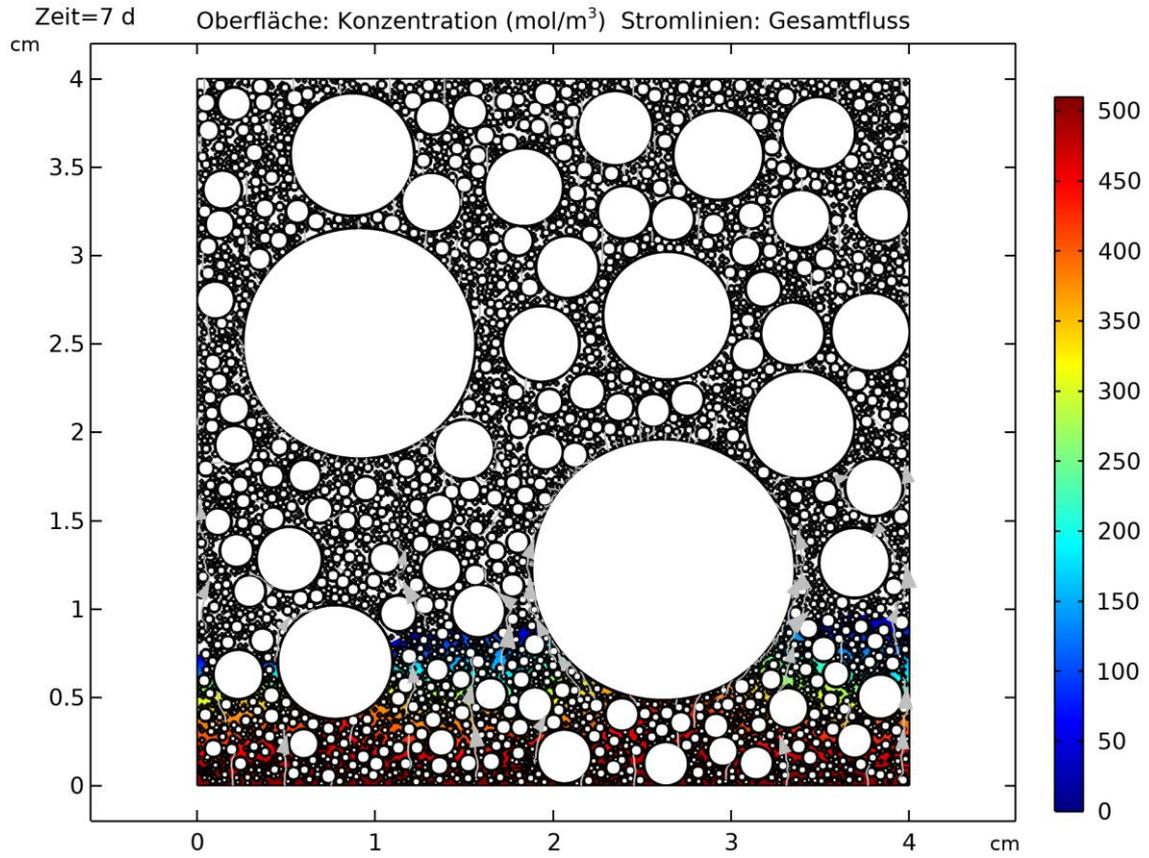


Abbildung B 19 Variante 1 - PK10 7d

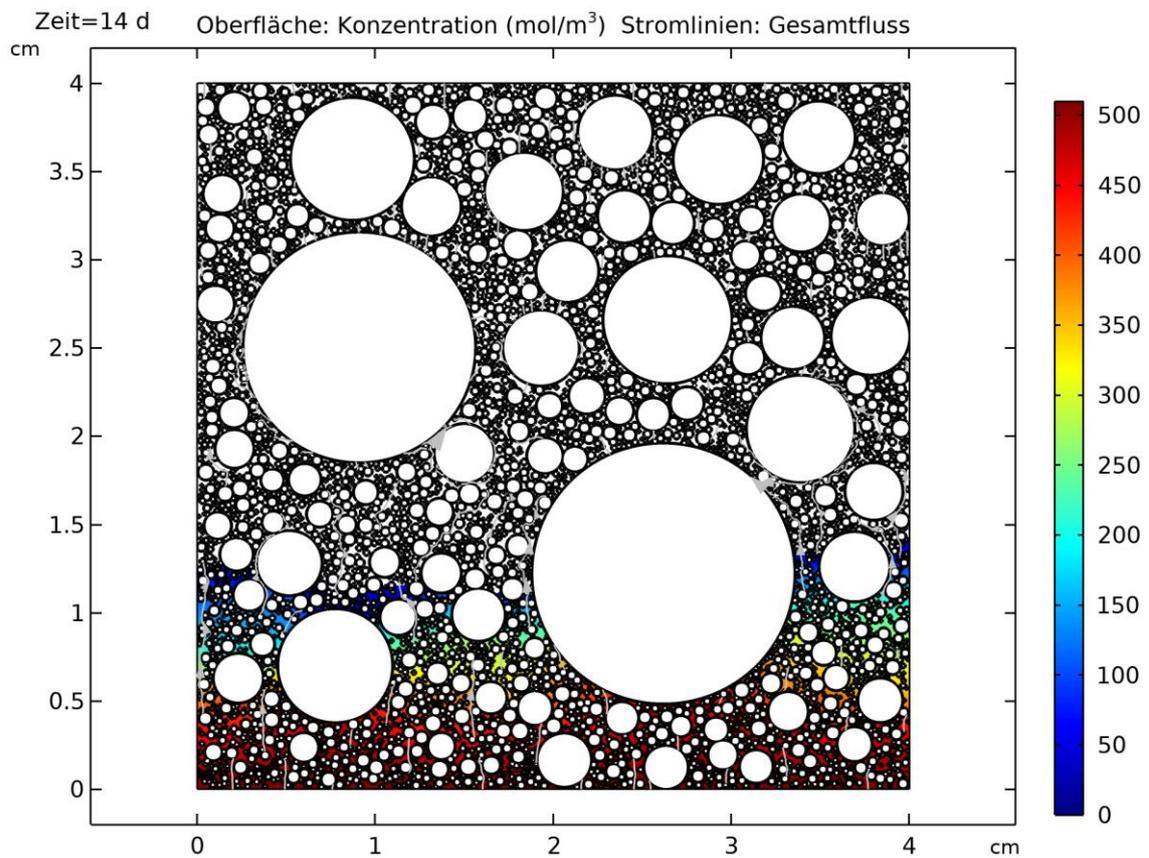


Abbildung B 20 Variante 1 - PK10 14d

ANHANG C. COMSOL-DIAGRAMME – VARIANTE 2 CDF

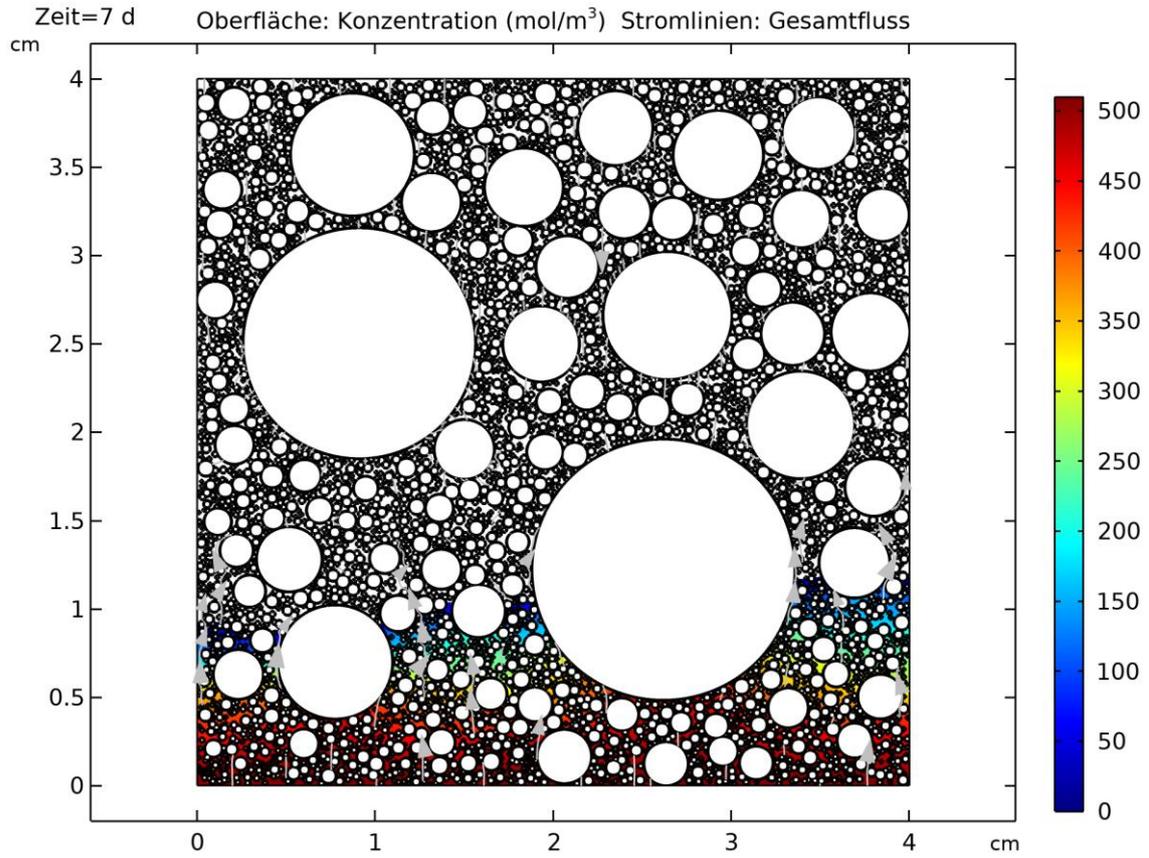


Abbildung C 1 Variante 2 - PK1 7d

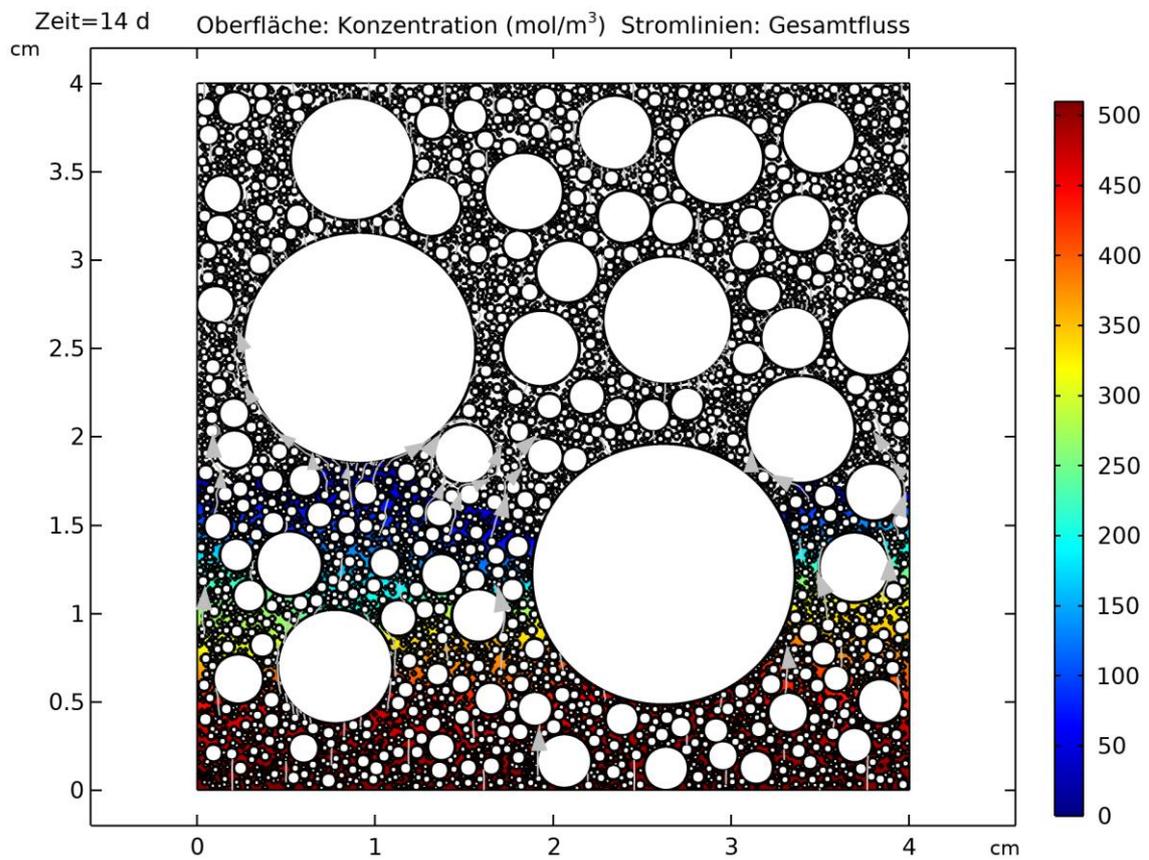


Abbildung C 2 Variante 2 - PK1 14d

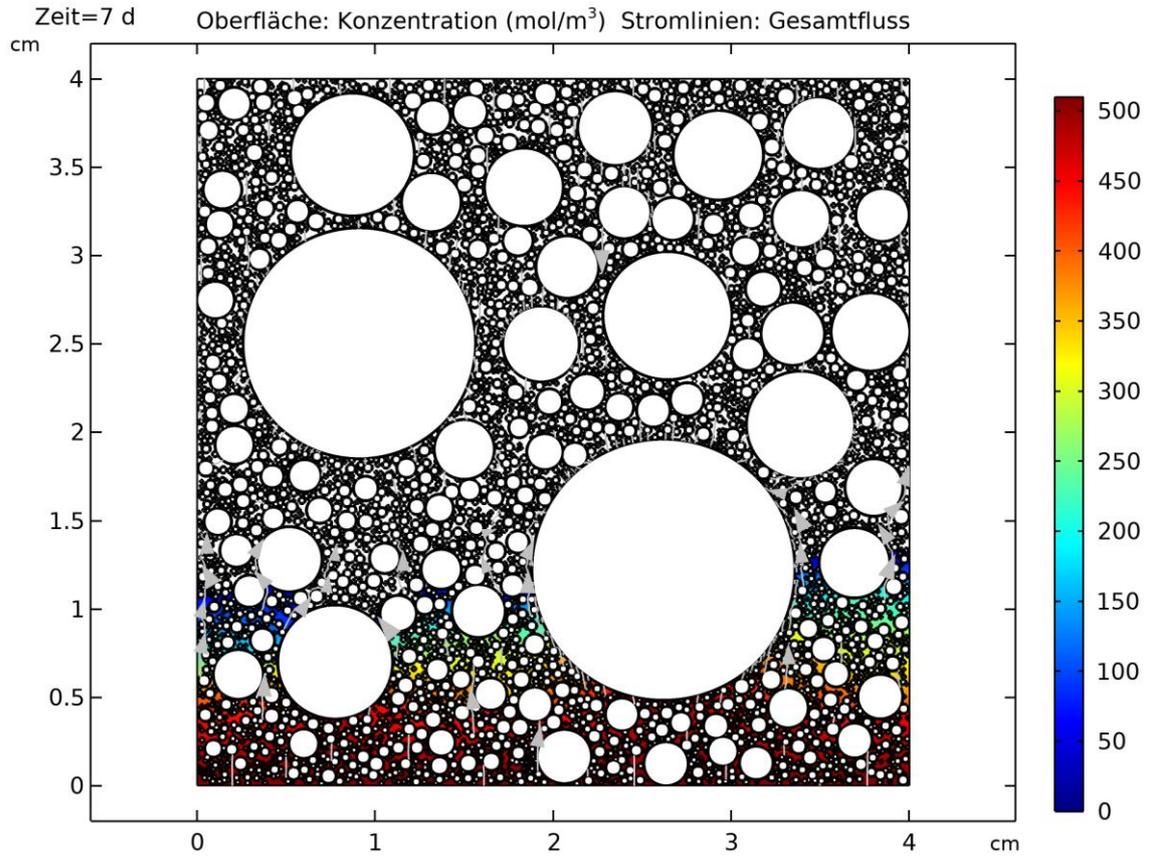


Abbildung C 3 Variante 2 – PK2 7d

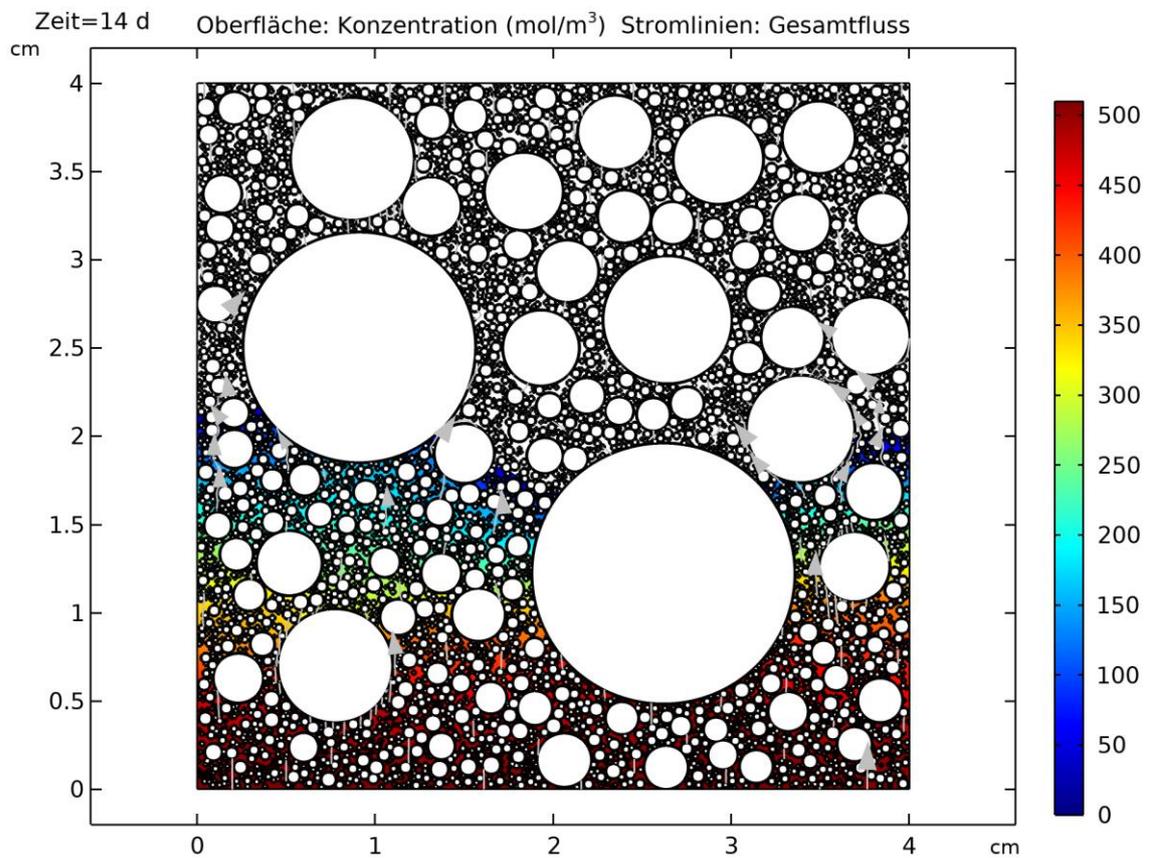


Abbildung C 4 Variante 2 – PK2 14d

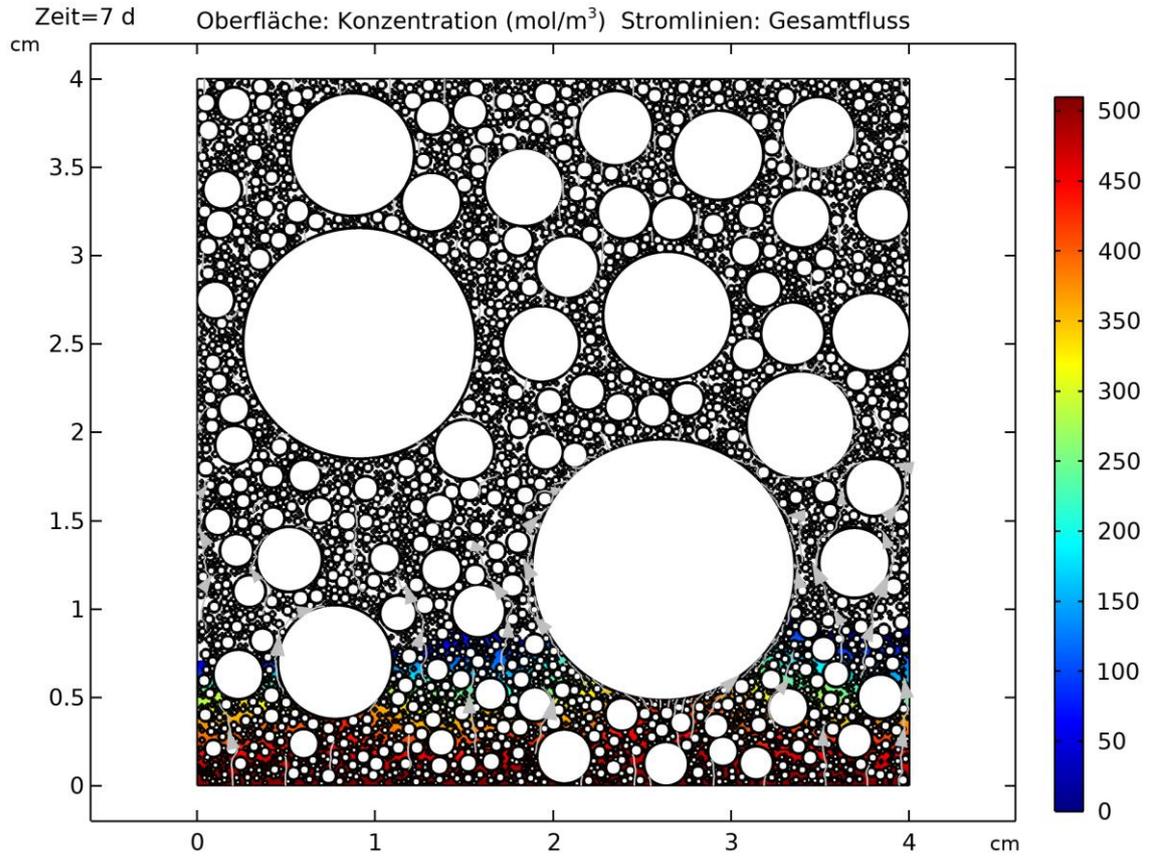


Abbildung C 5 Variante 2 – PK3 7d

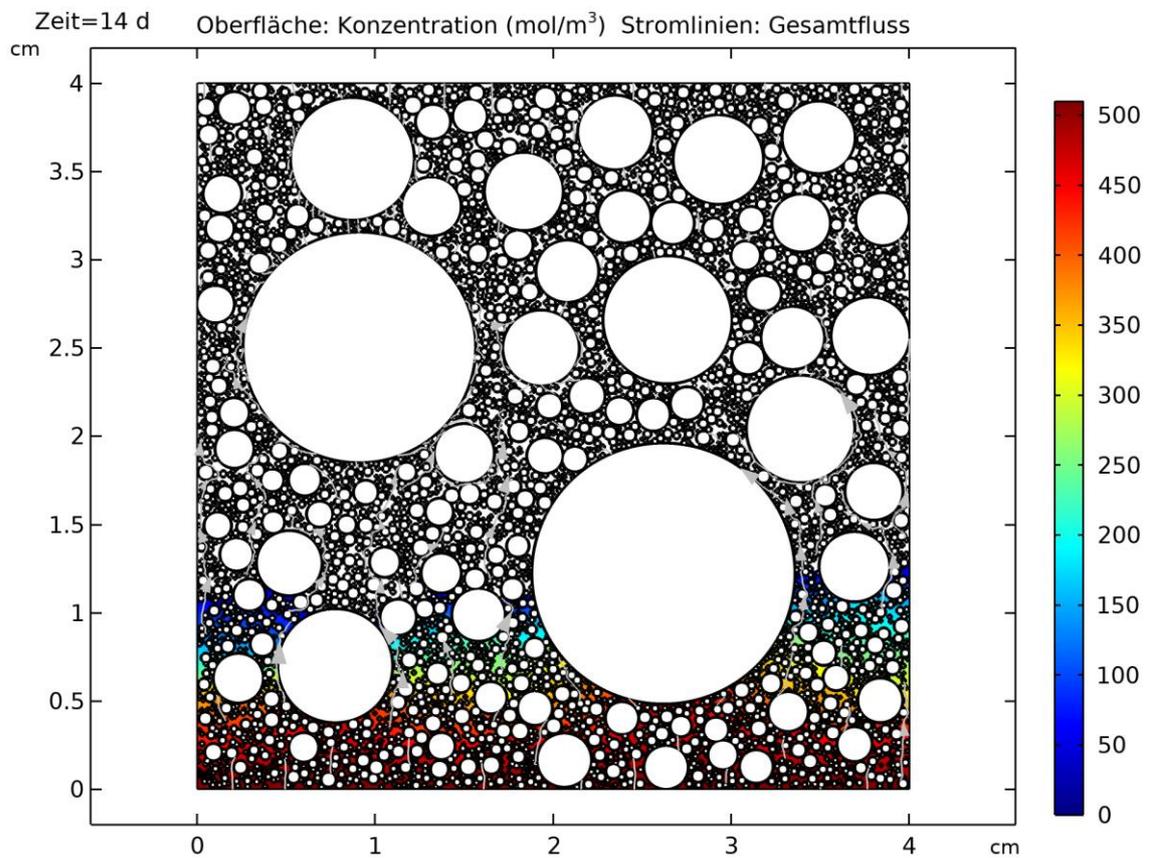


Abbildung C 6 Variante 2 – PK3 14d

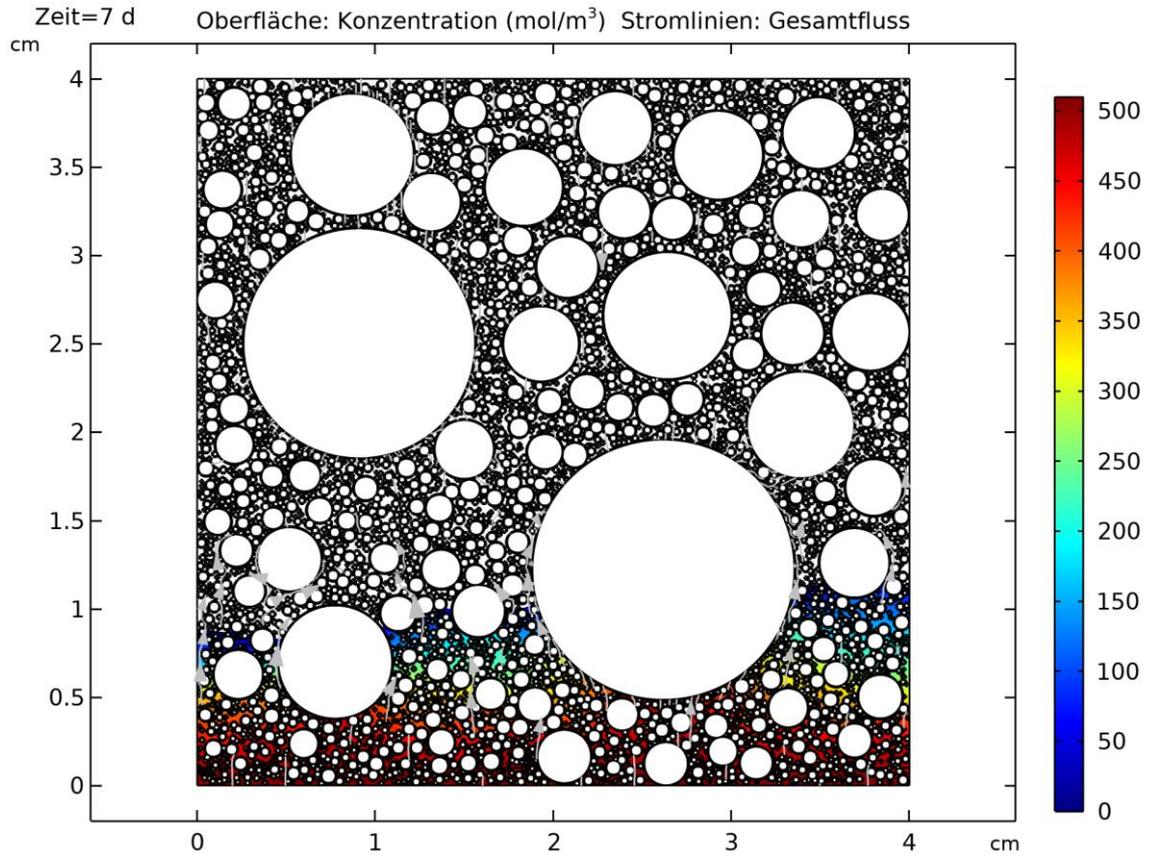


Abbildung C 7 Variante 2 – PK4 7d

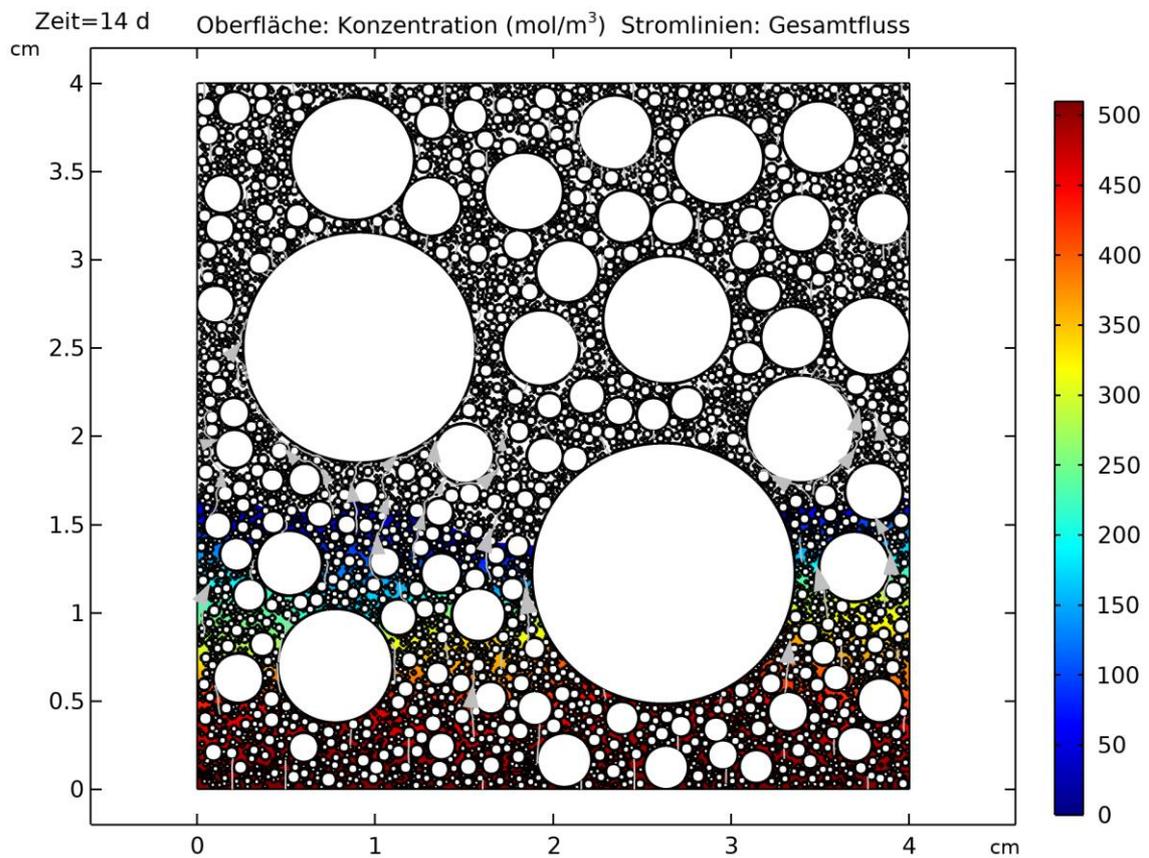


Abbildung C 8 Variante 2 – PK4 14d

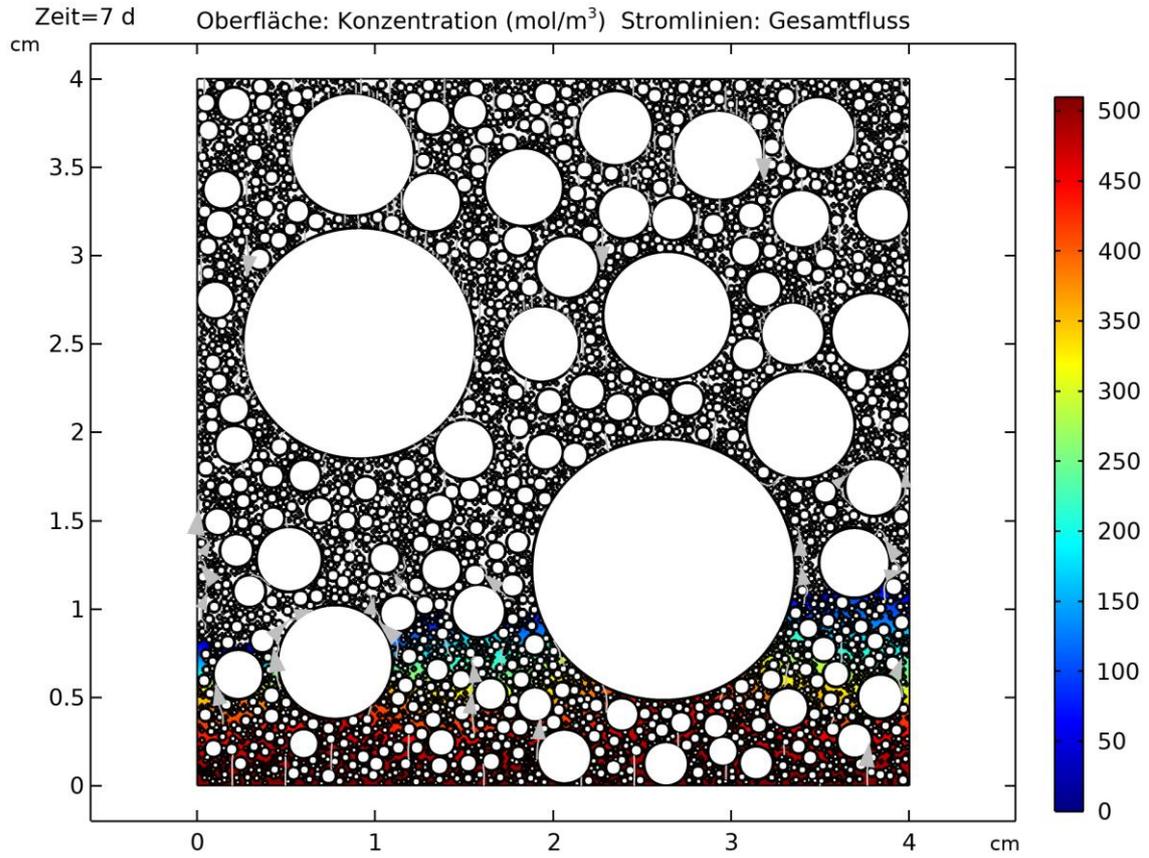


Abbildung C 9 Variante 2 – PK5 7d

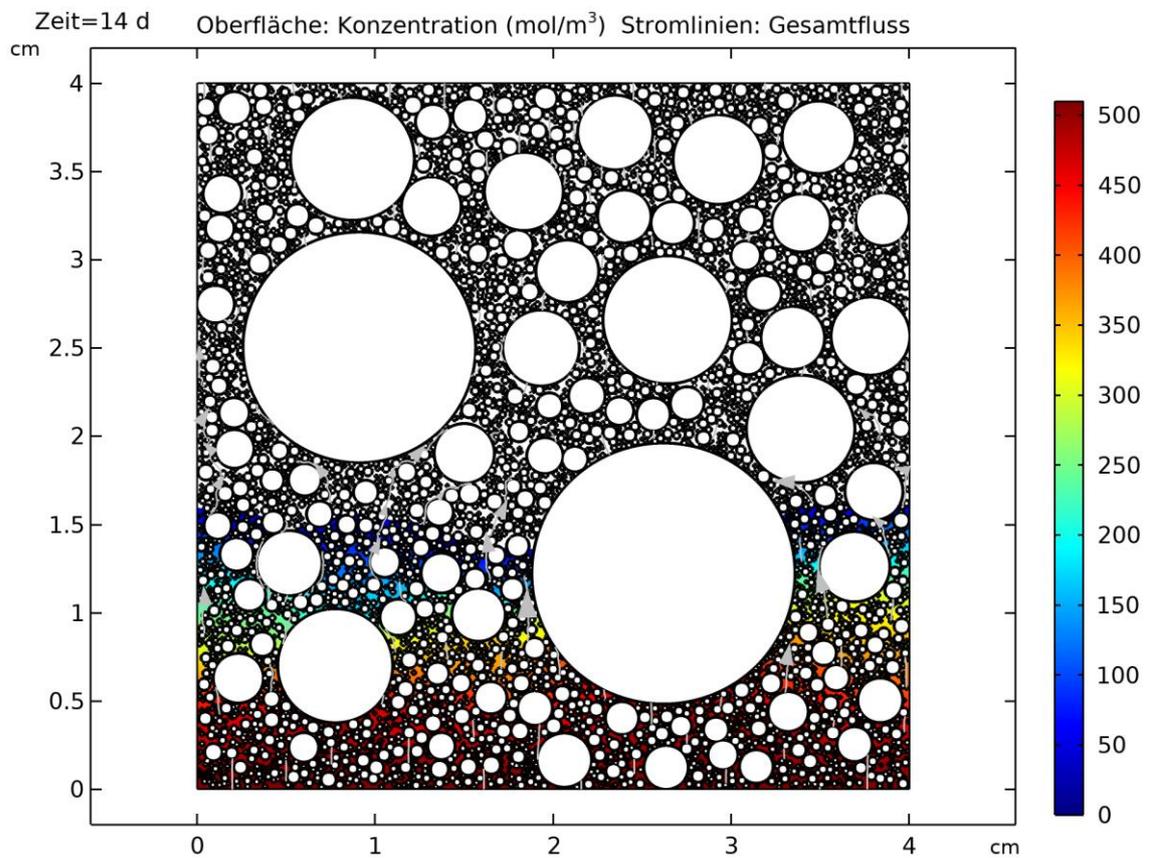


Abbildung C 10 Variante 2 – PK5 14d

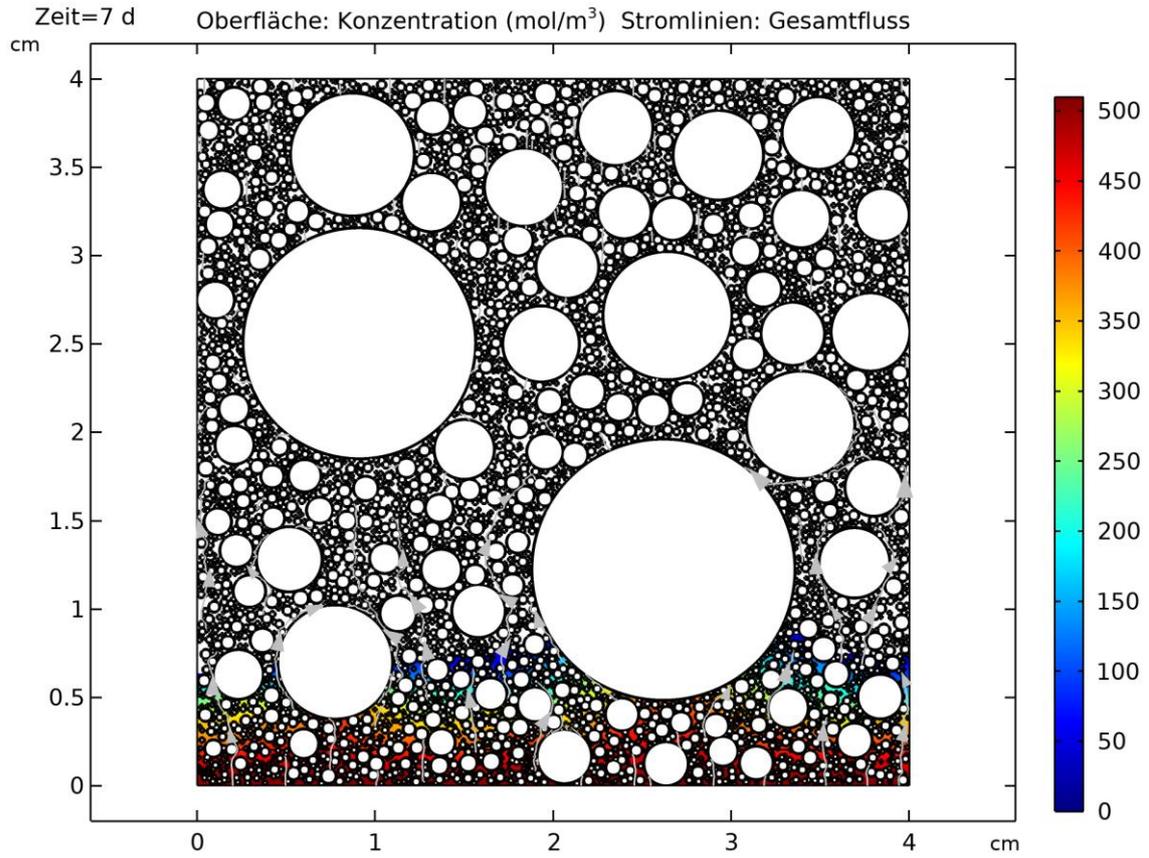


Abbildung C 11 Variante 2 – PK6 7d

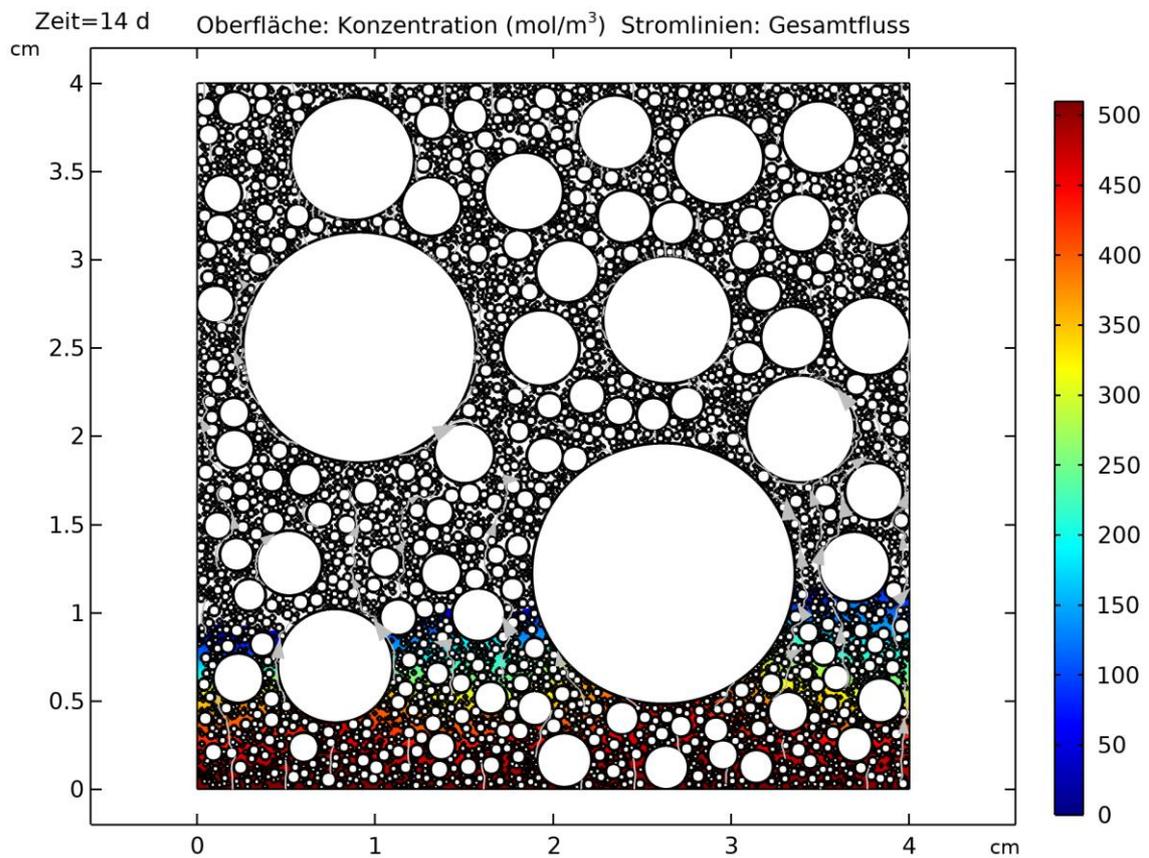


Abbildung C 12 Variante 2 – PK6 14d

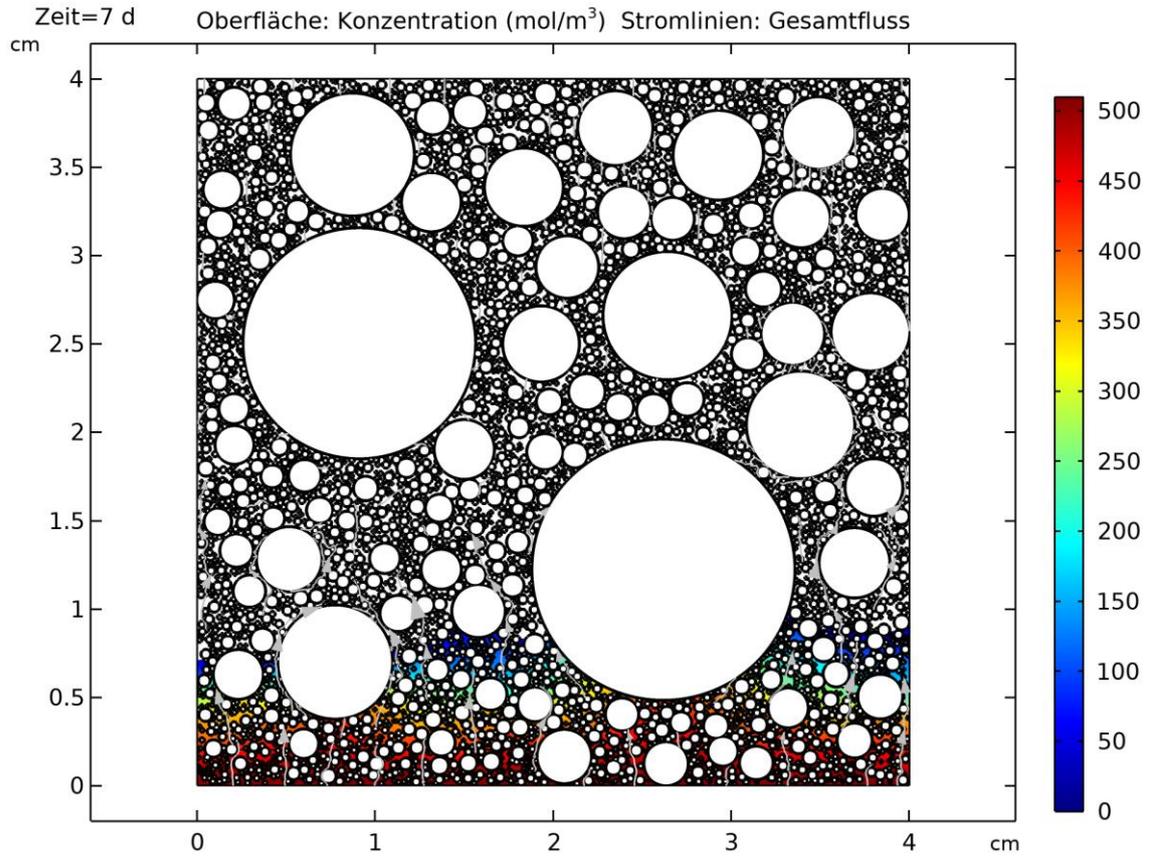


Abbildung C 13 Variante 2 – PK7 7d

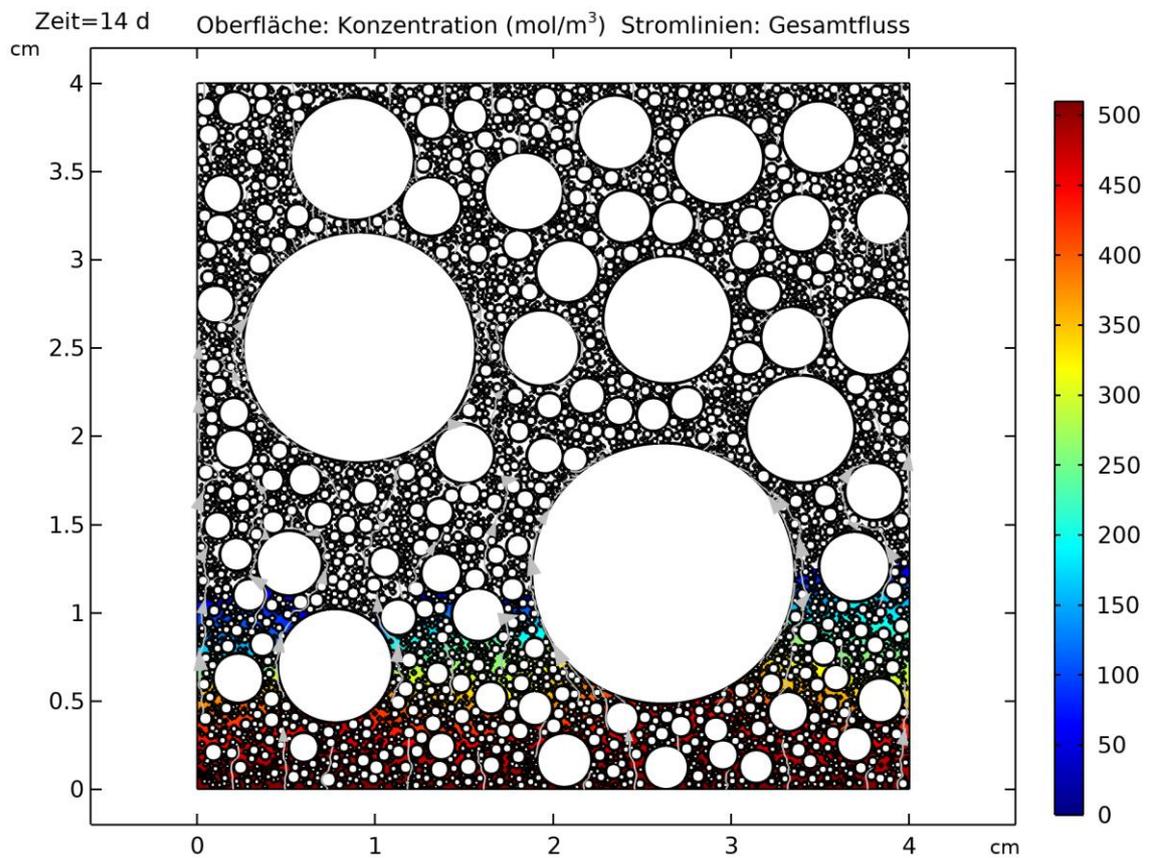


Abbildung C 14 Variante 2 – PK7 14d

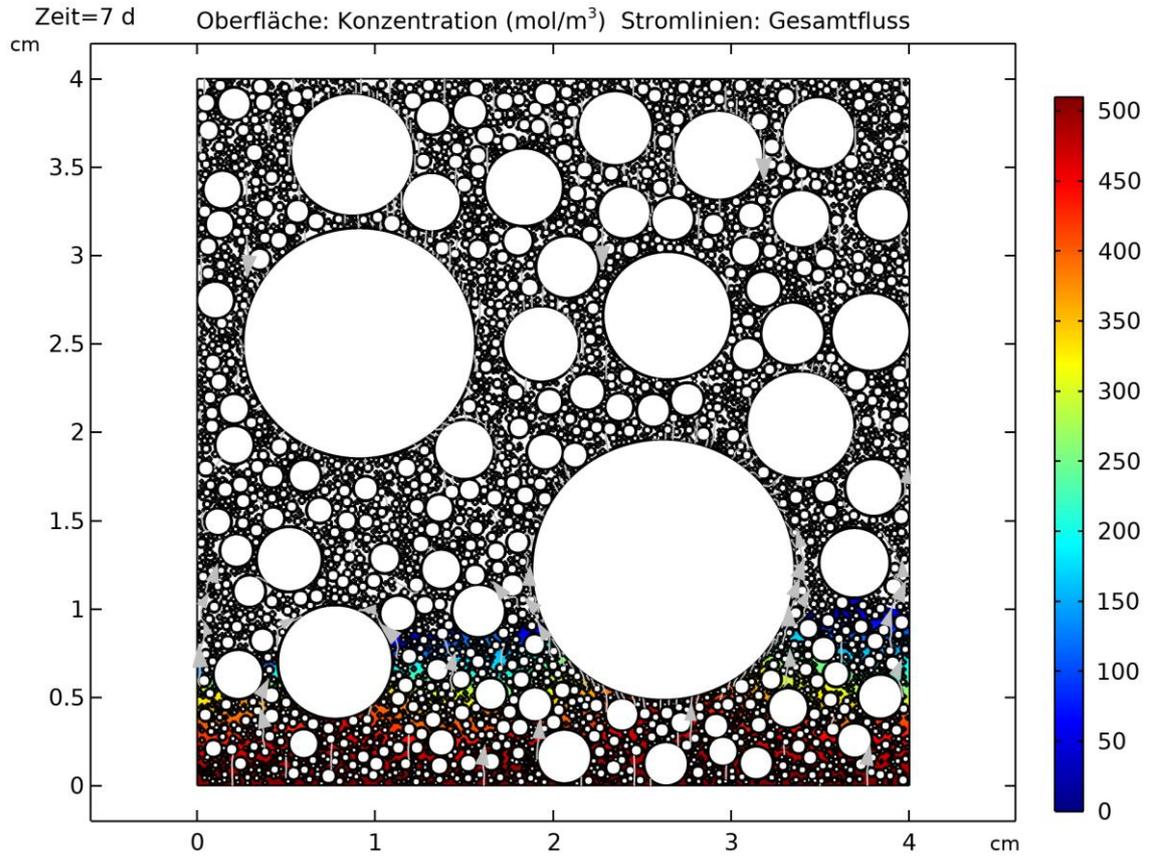


Abbildung C 15 Variante 2 – PK8 7d

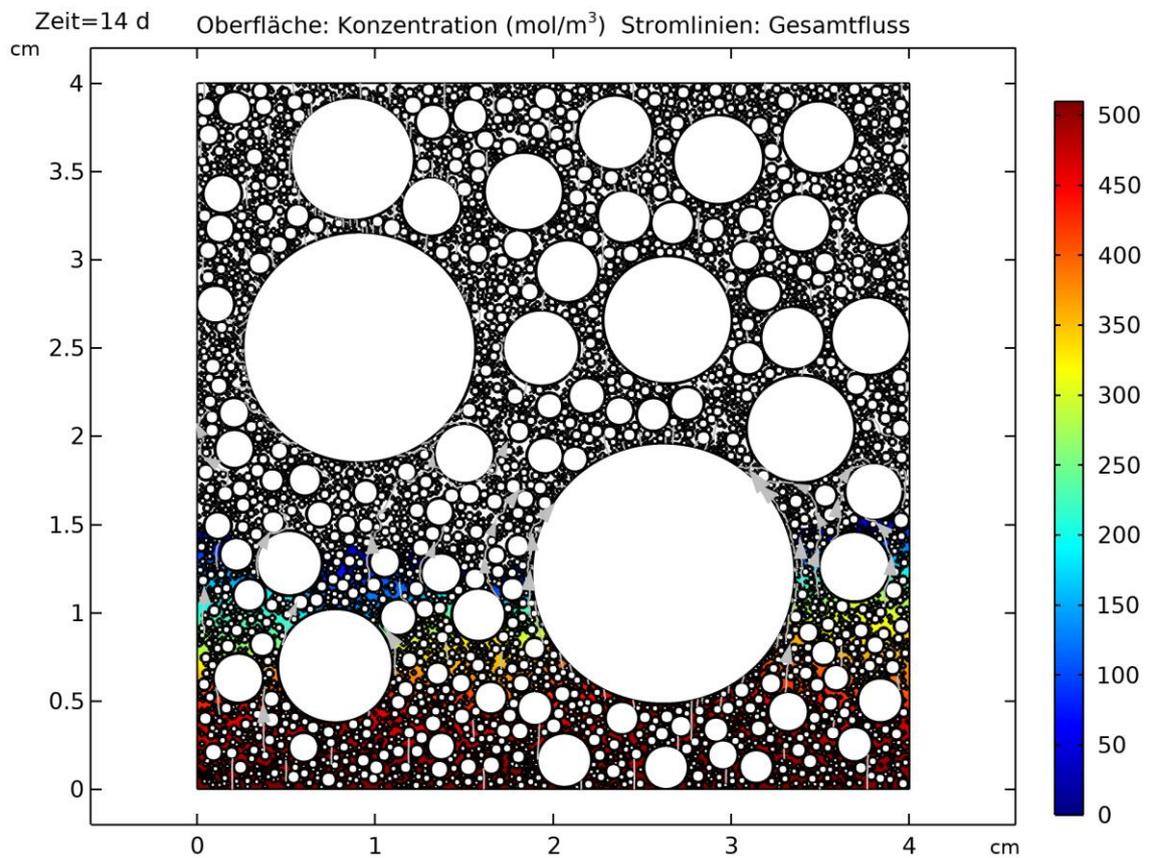


Abbildung C 16 Variante 2 – PK8 14d

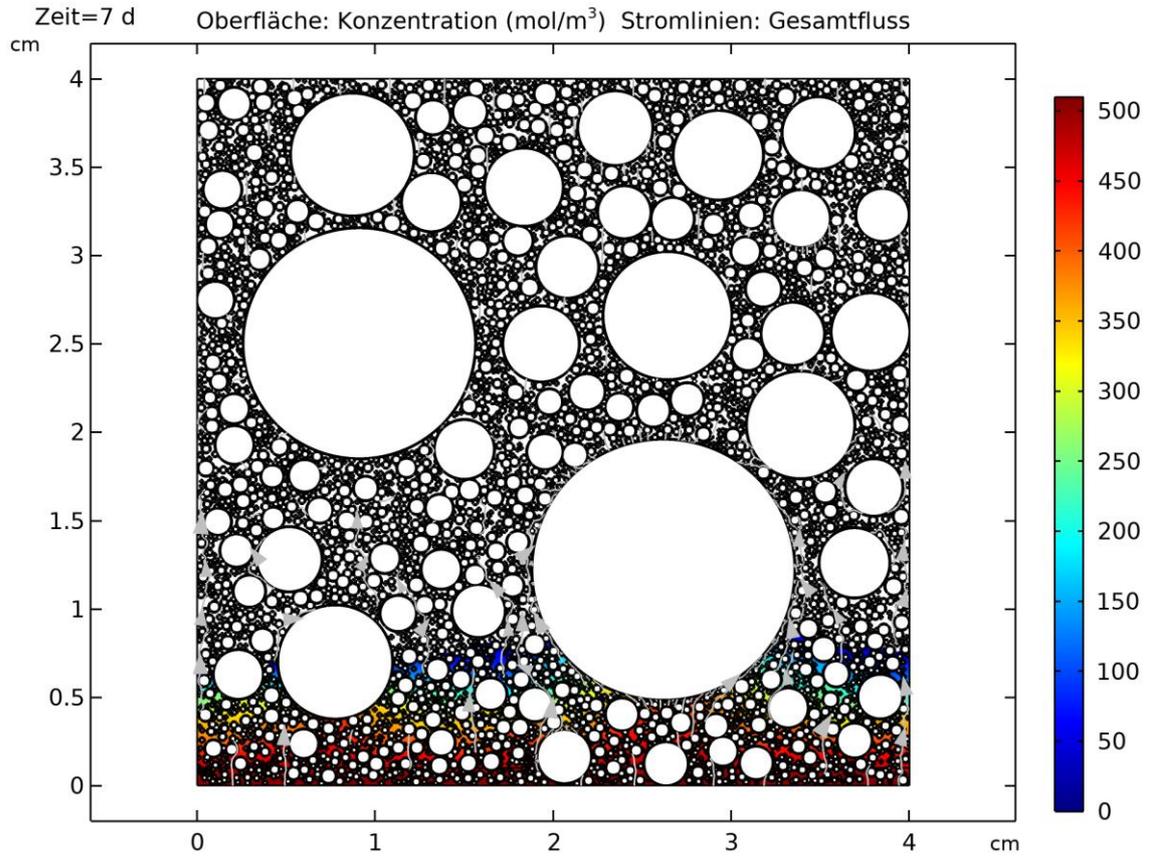


Abbildung C 17 Variante 2 – PK9 7d

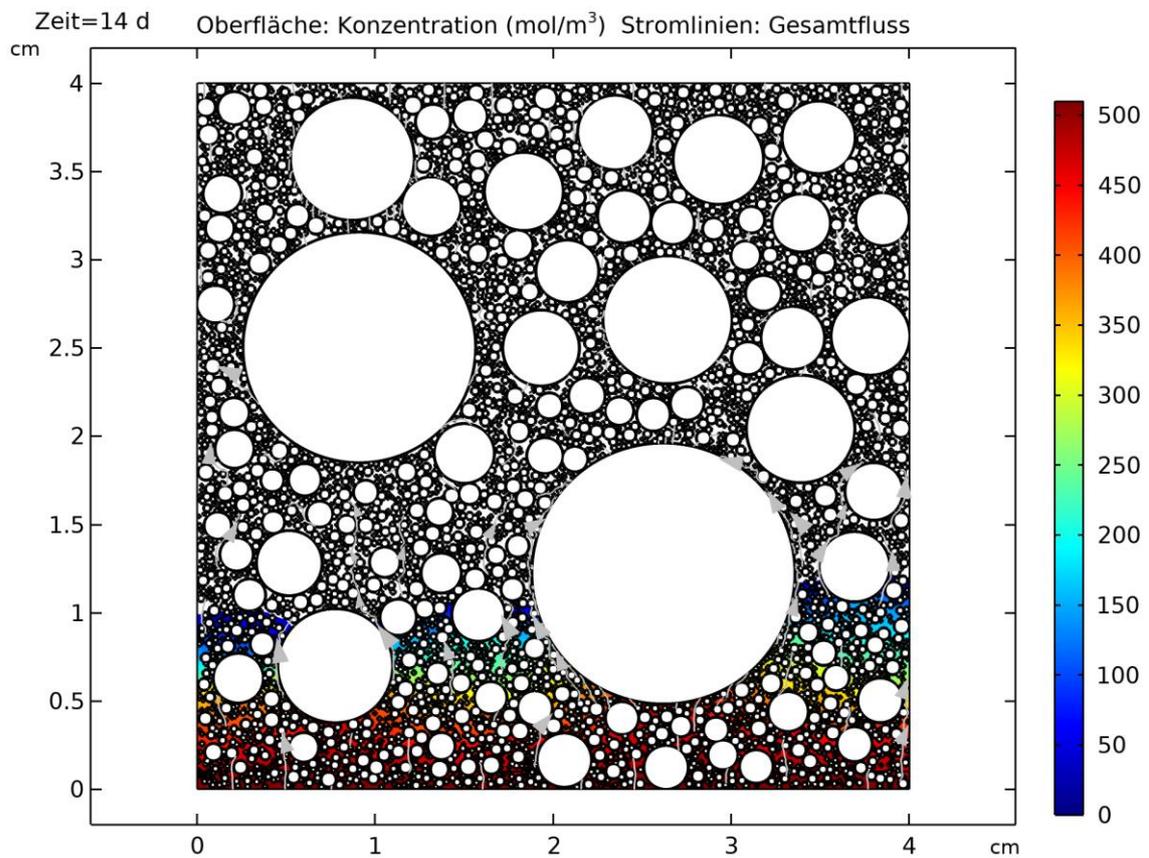


Abbildung C 18 Variante 2 – PK9 14d

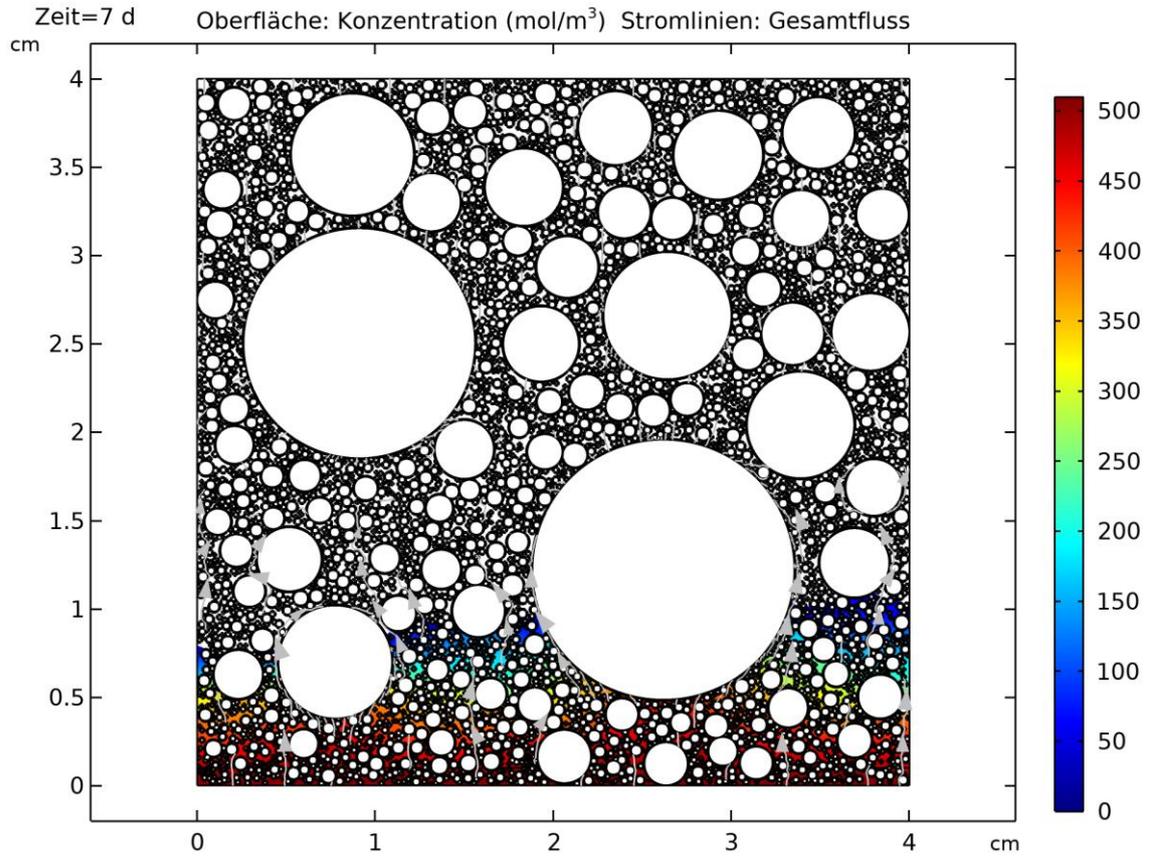


Abbildung C 19 Variante 2 - PK10 7d

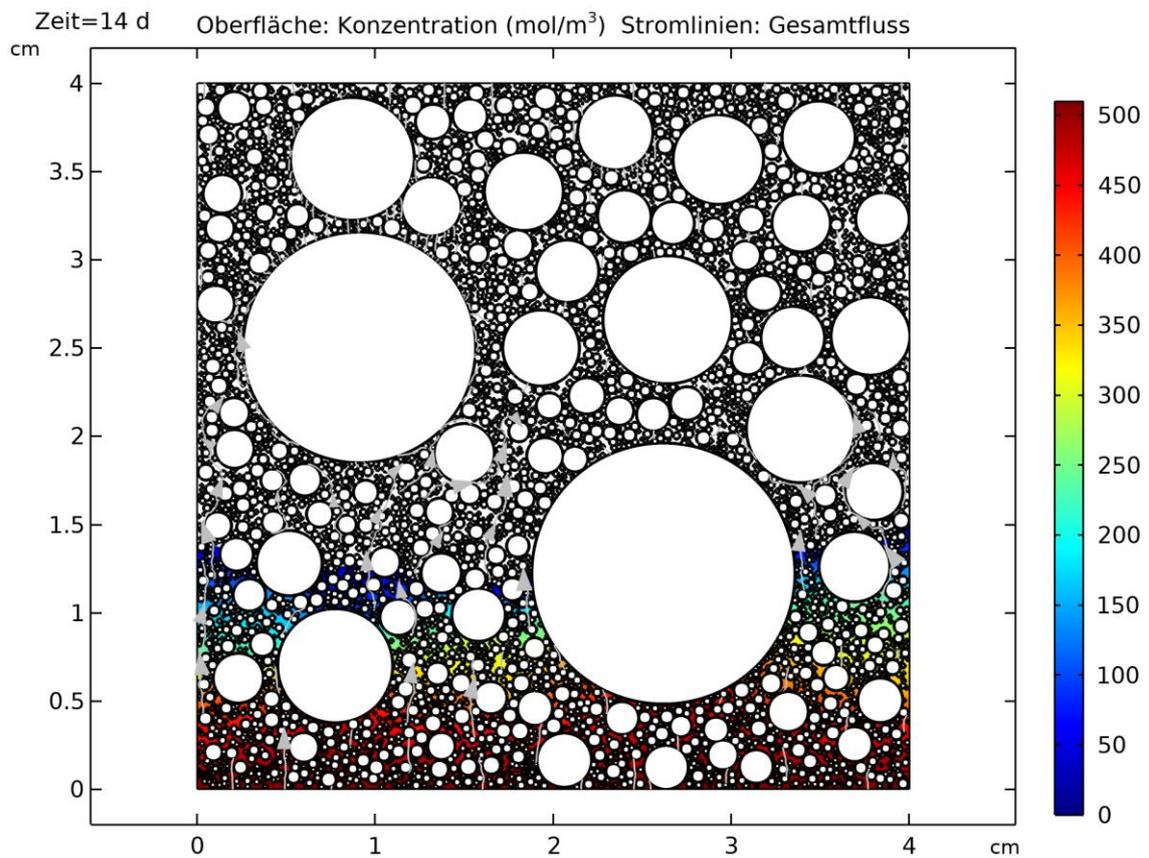


Abbildung C 20 Variante 2 - PK10 14d

ANHANG D. COMSOL-DIAGRAMME – VARIANTE 3 CDF

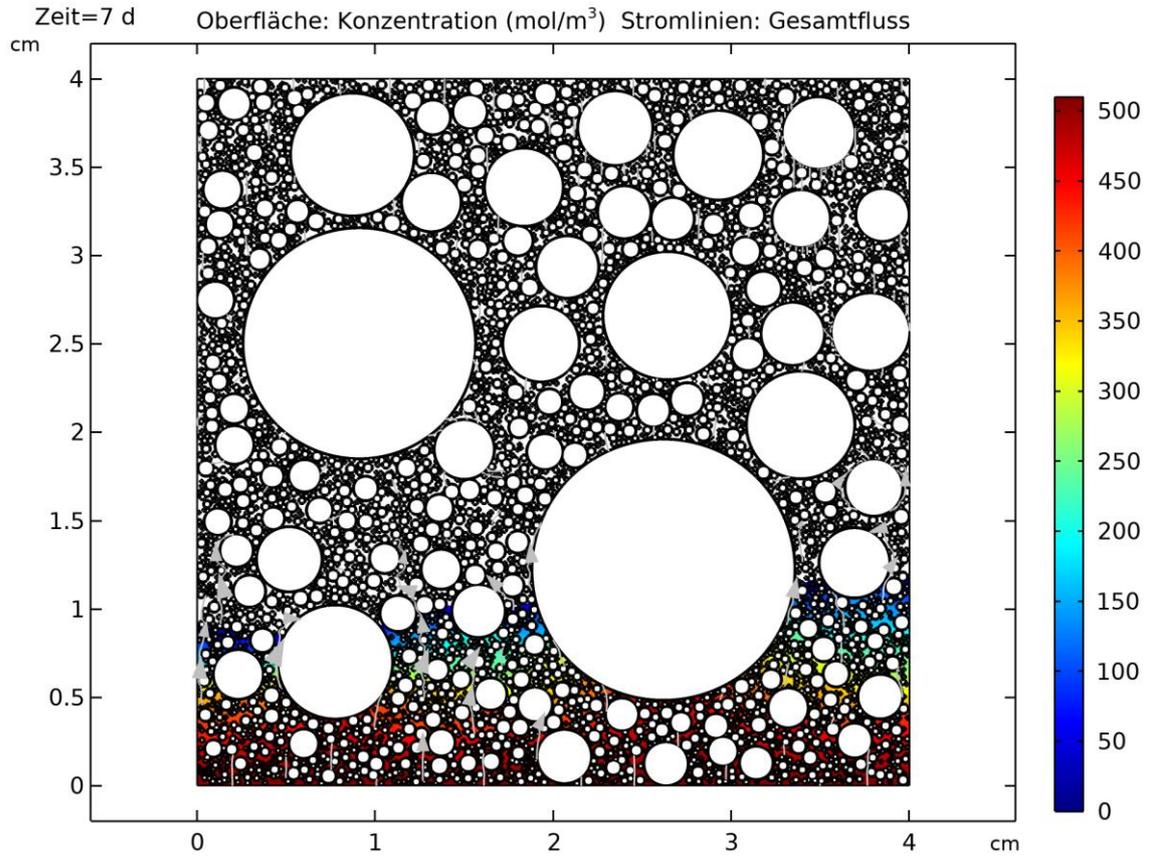


Abbildung D 1 Variante 3 - PK1 7d

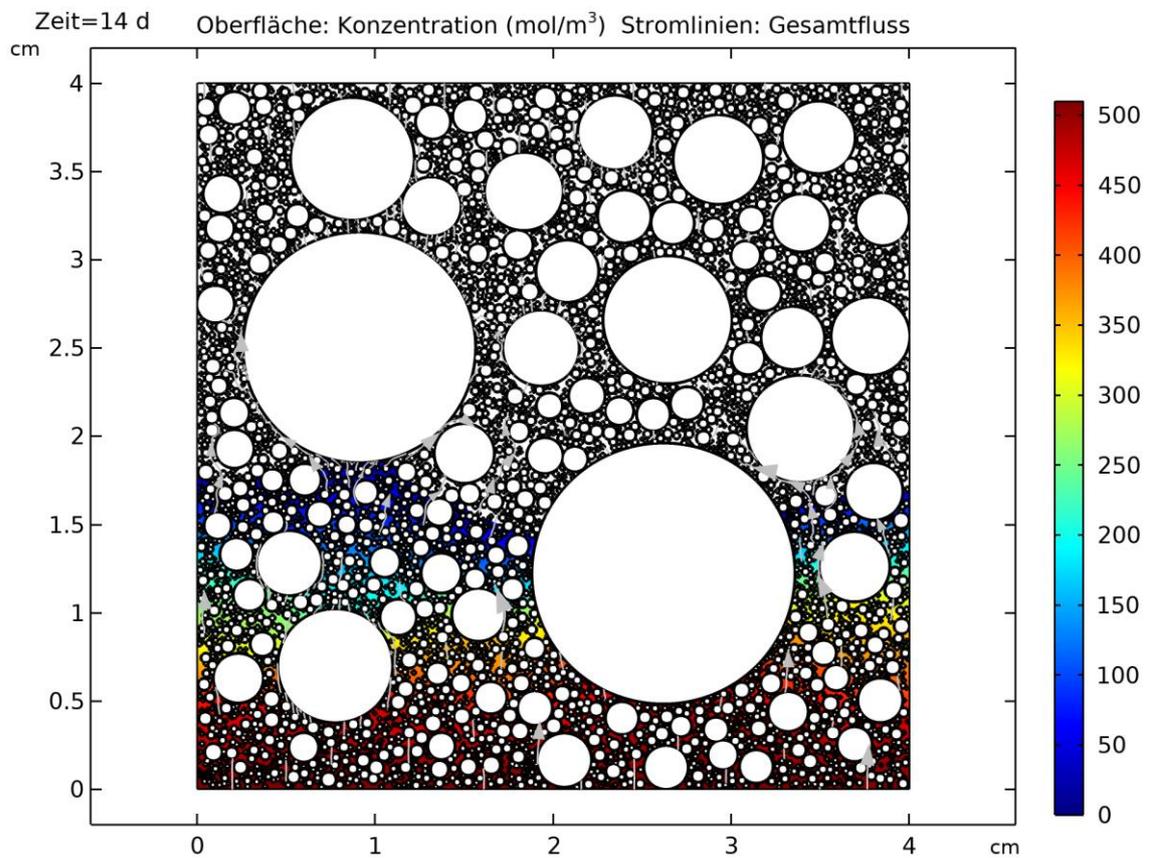


Abbildung D 2 Variante 3 - PK1 14d

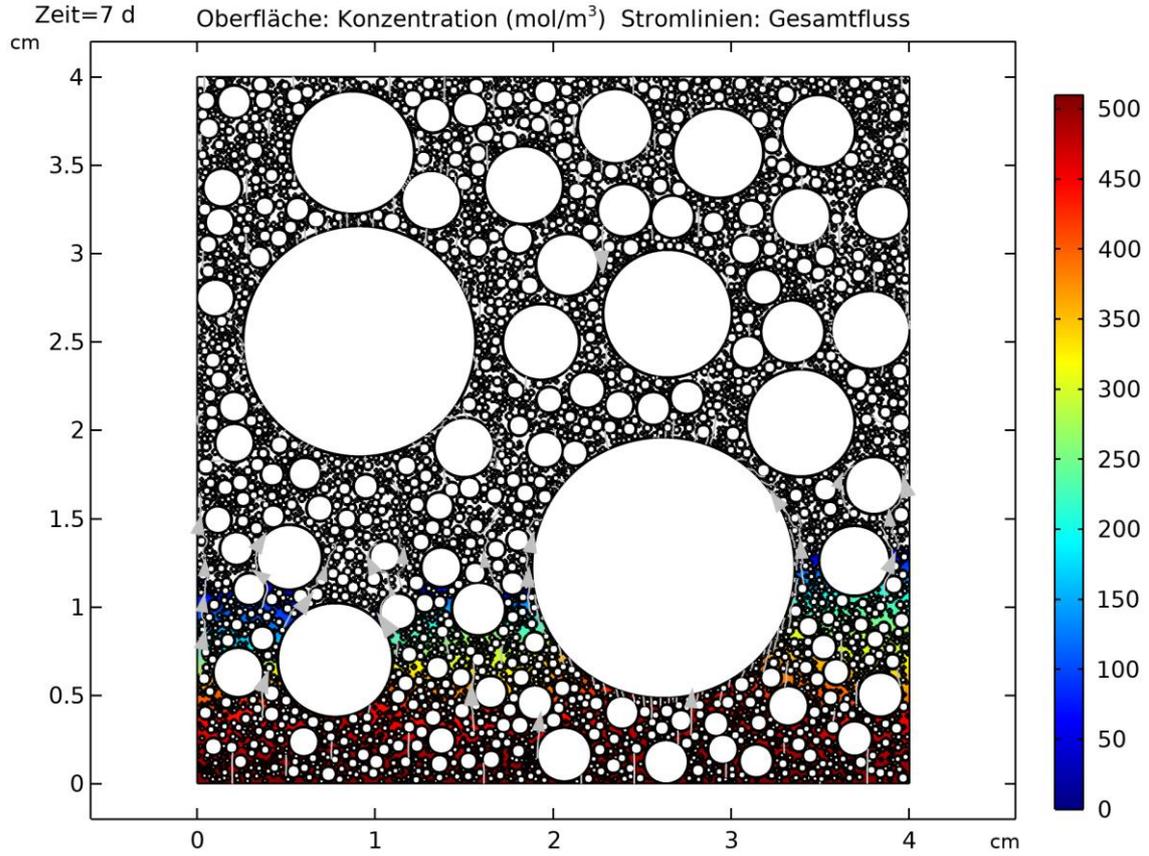


Abbildung D 3 Variante 3 – PK2 7d

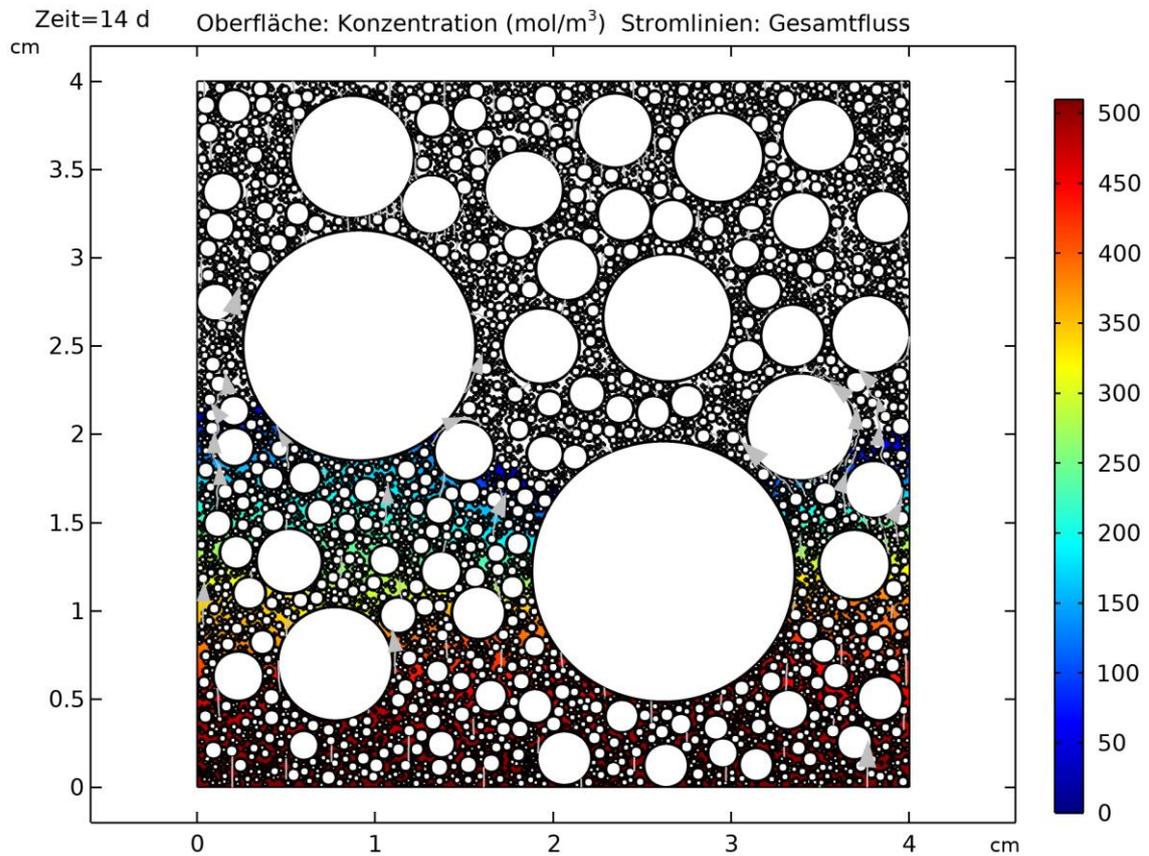


Abbildung D 4 Variante 3 – PK2 14d

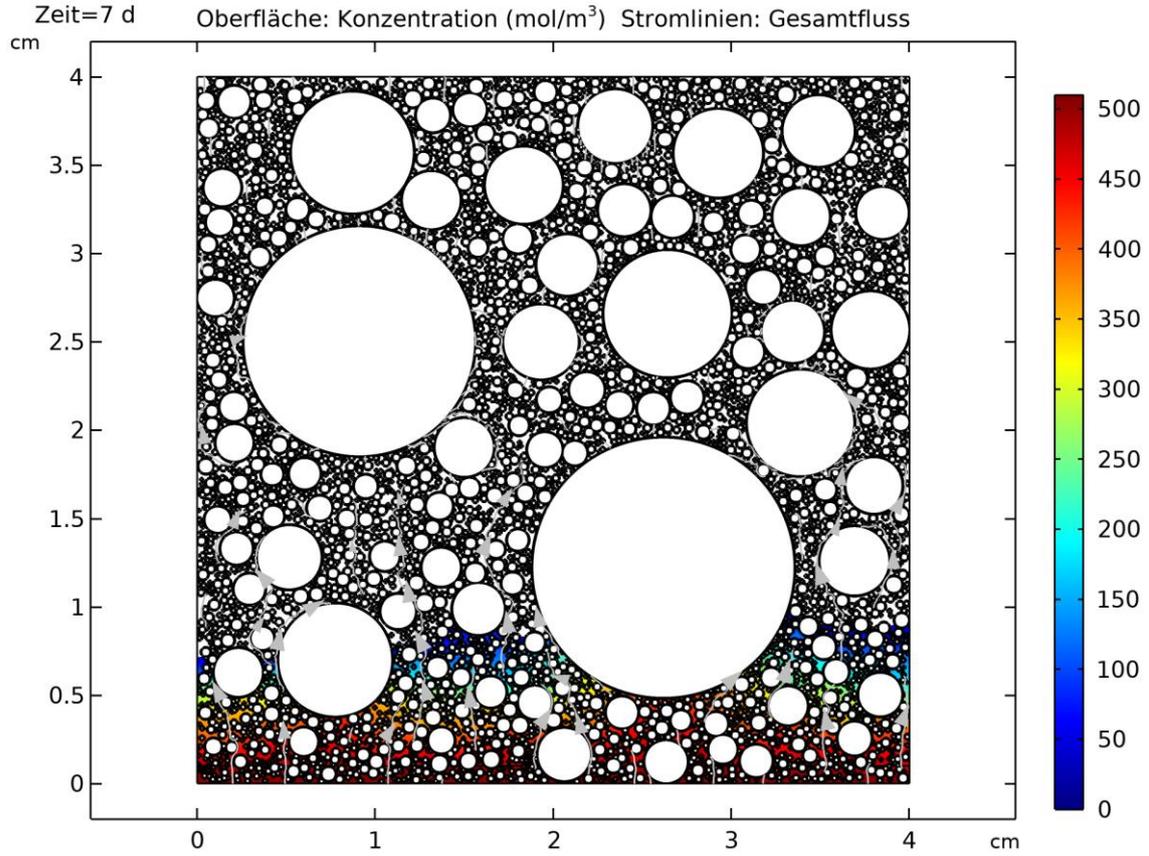


Abbildung D 5 Variante 3 – PK2 7d

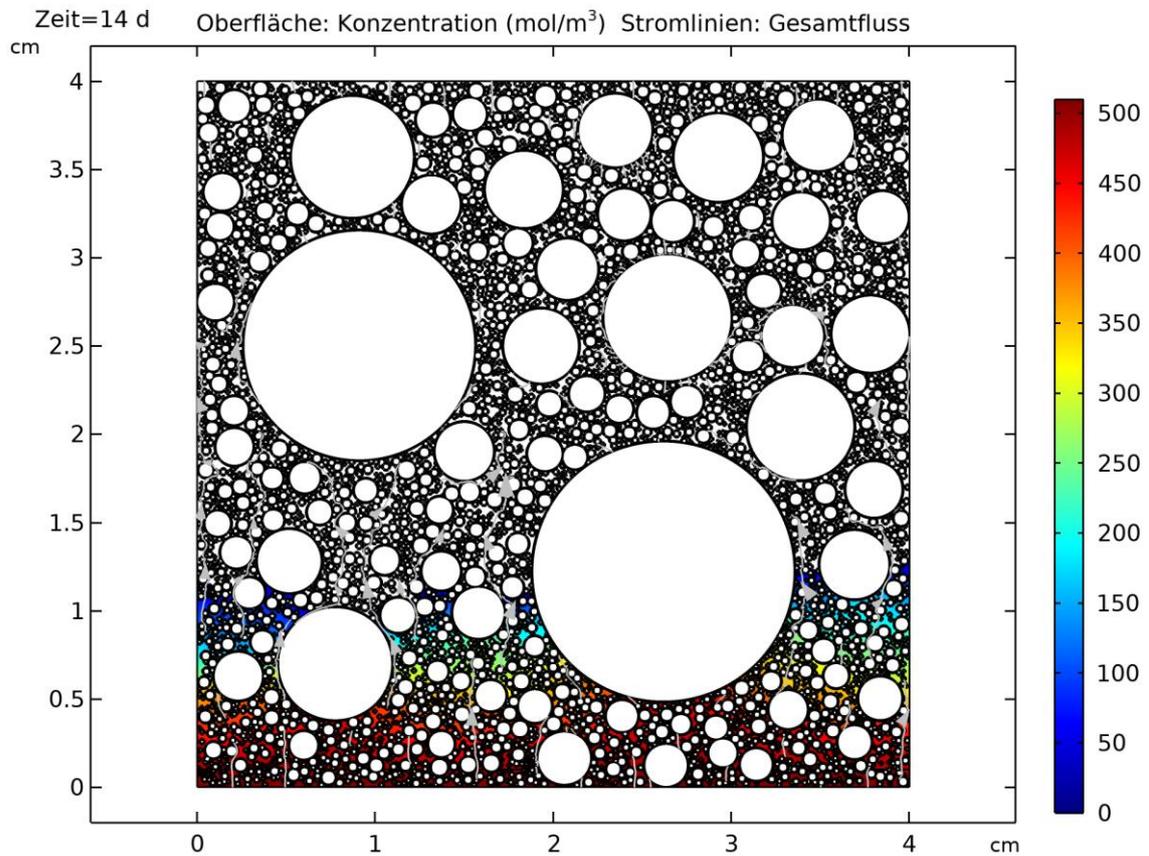


Abbildung D 6 Variante 3 – PK2 14d

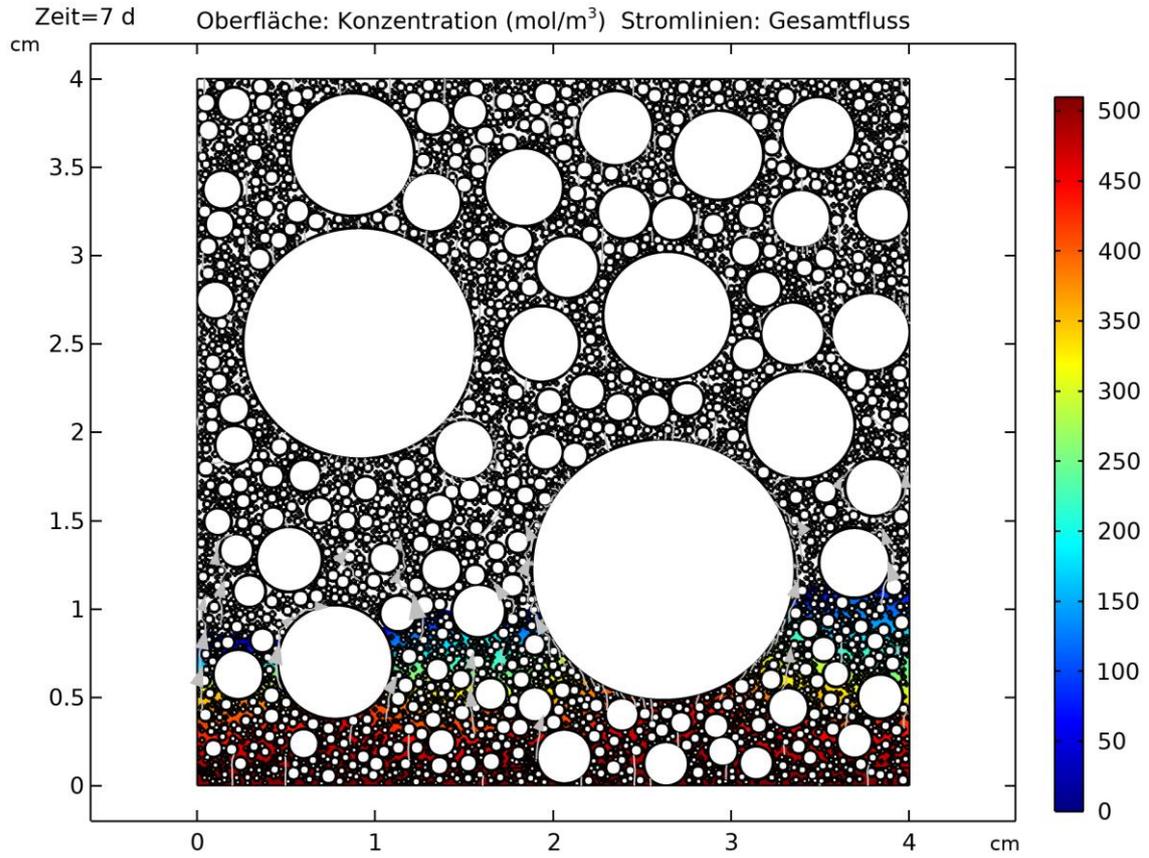


Abbildung D 7 Variante 3 – PK4 7d

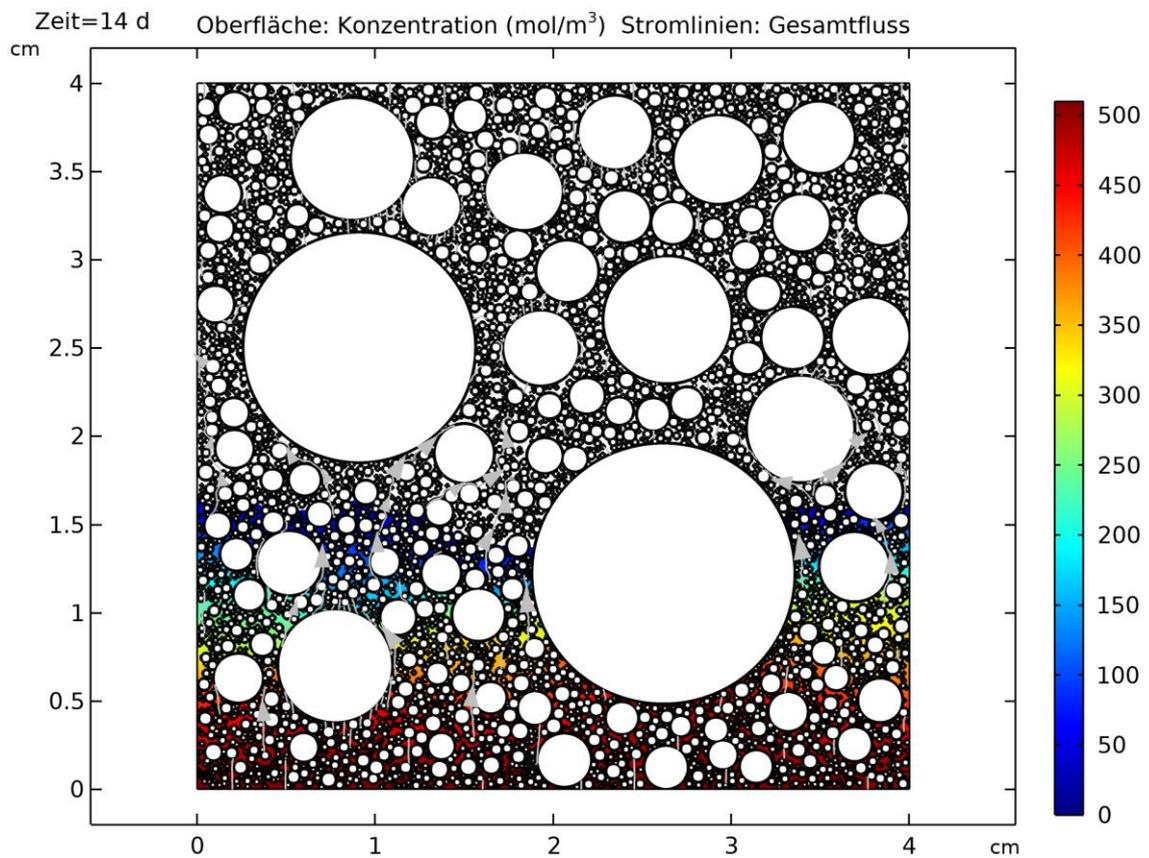


Abbildung D 8 Variante 3 – PK4 14d

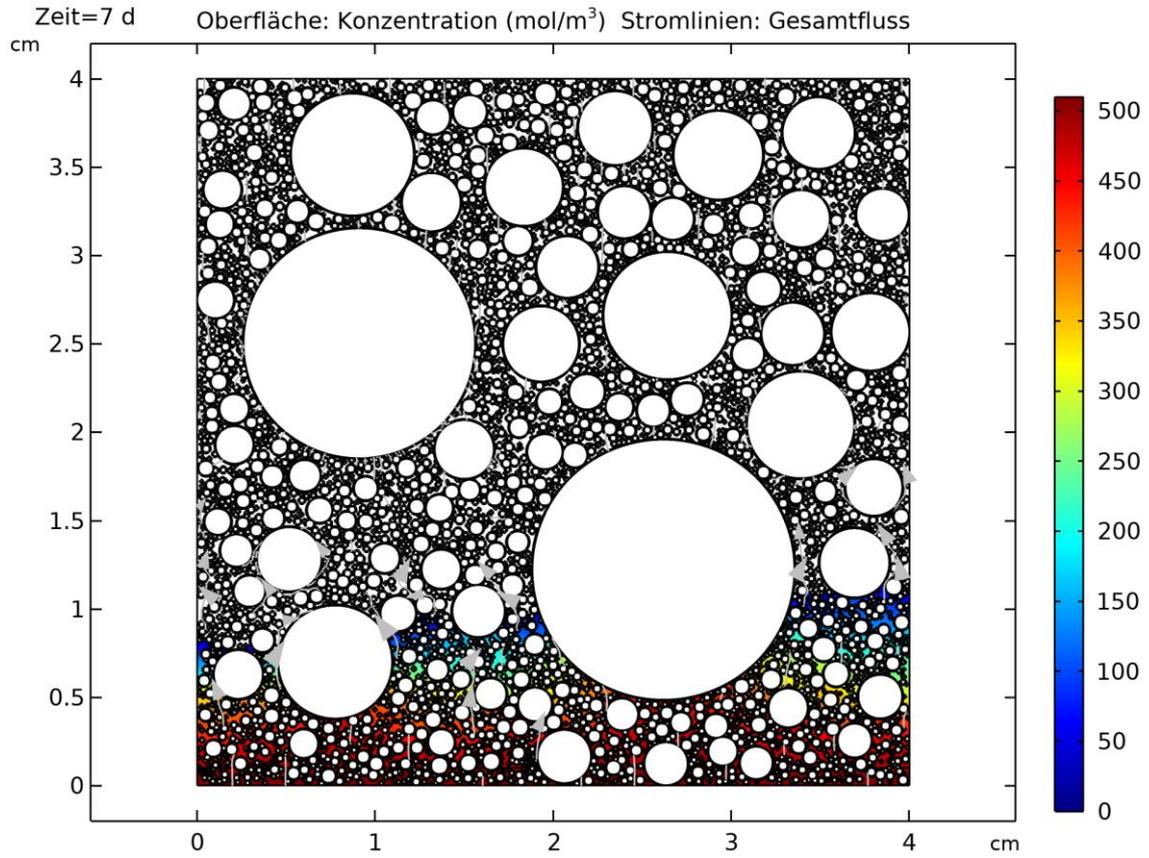


Abbildung D 9 Variante 3 – PK5 7d

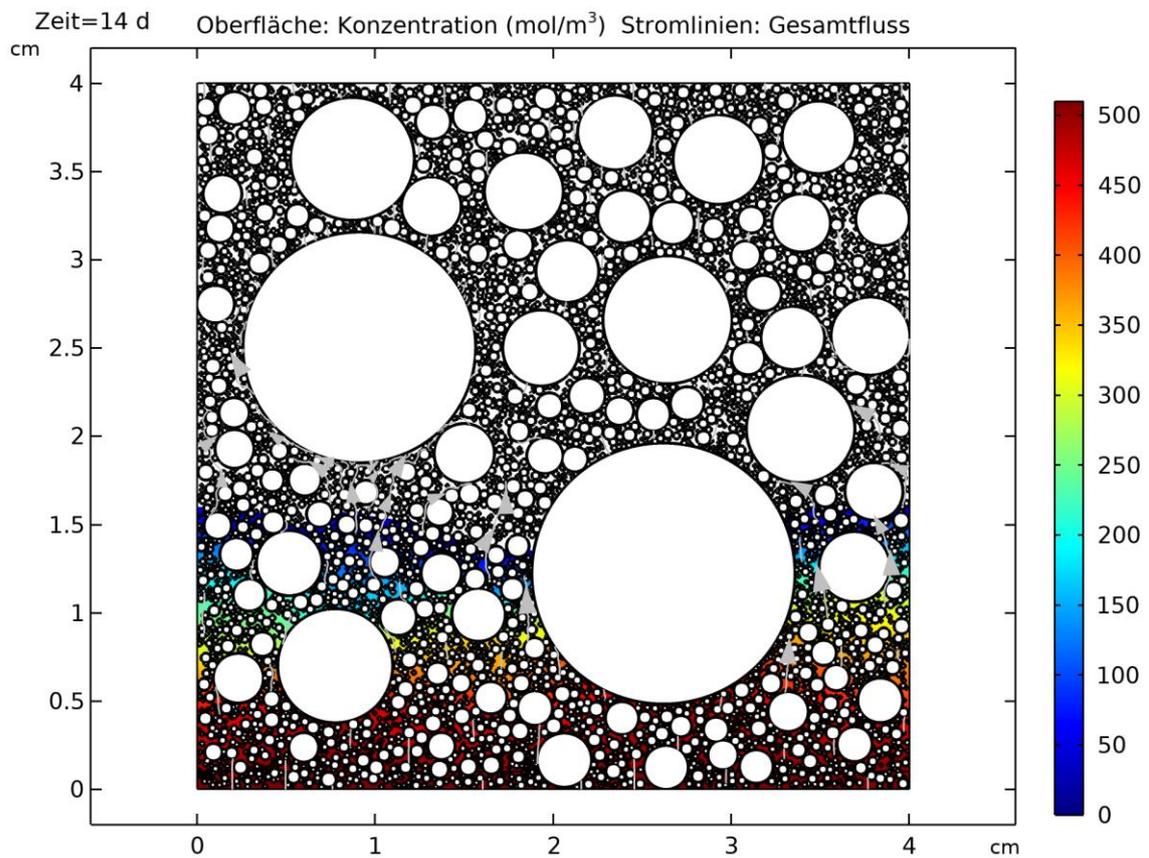


Abbildung D 10 Variante 3 – PK5 14d

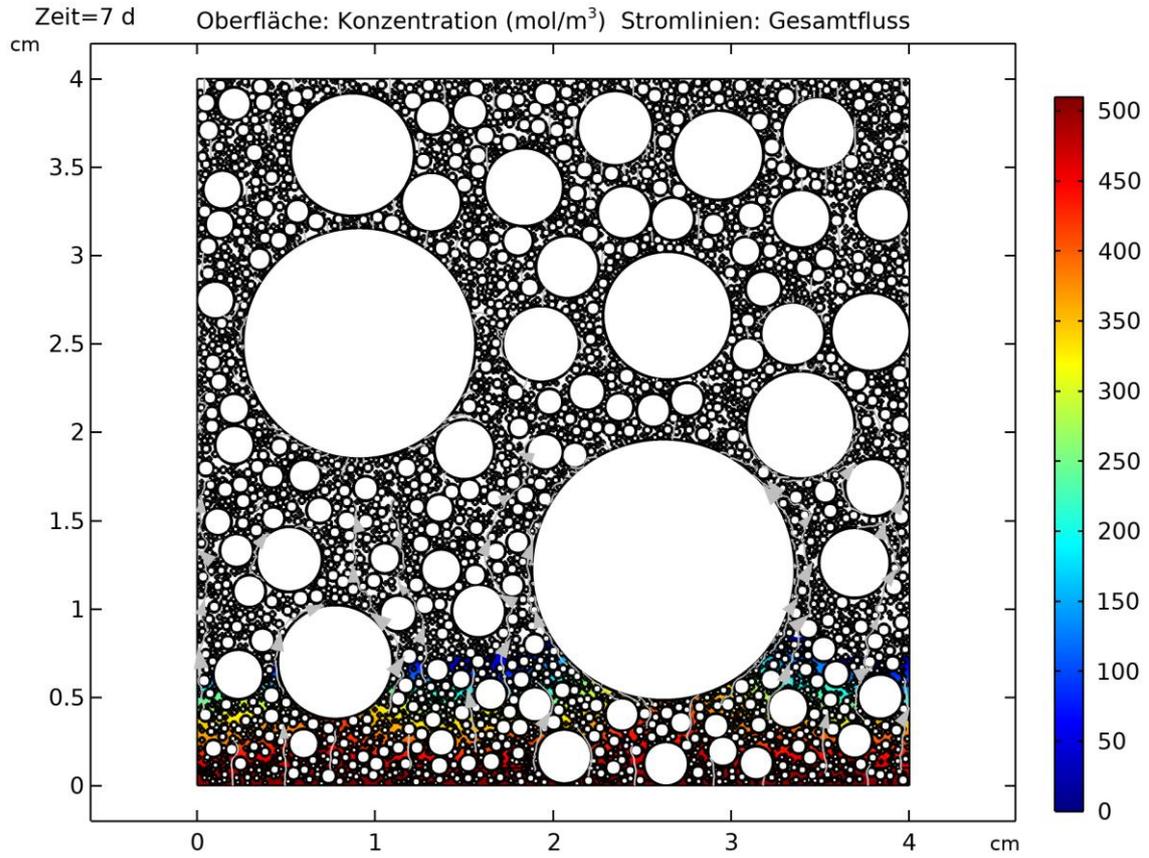


Abbildung D 11 Variante 3 – PK6 7d

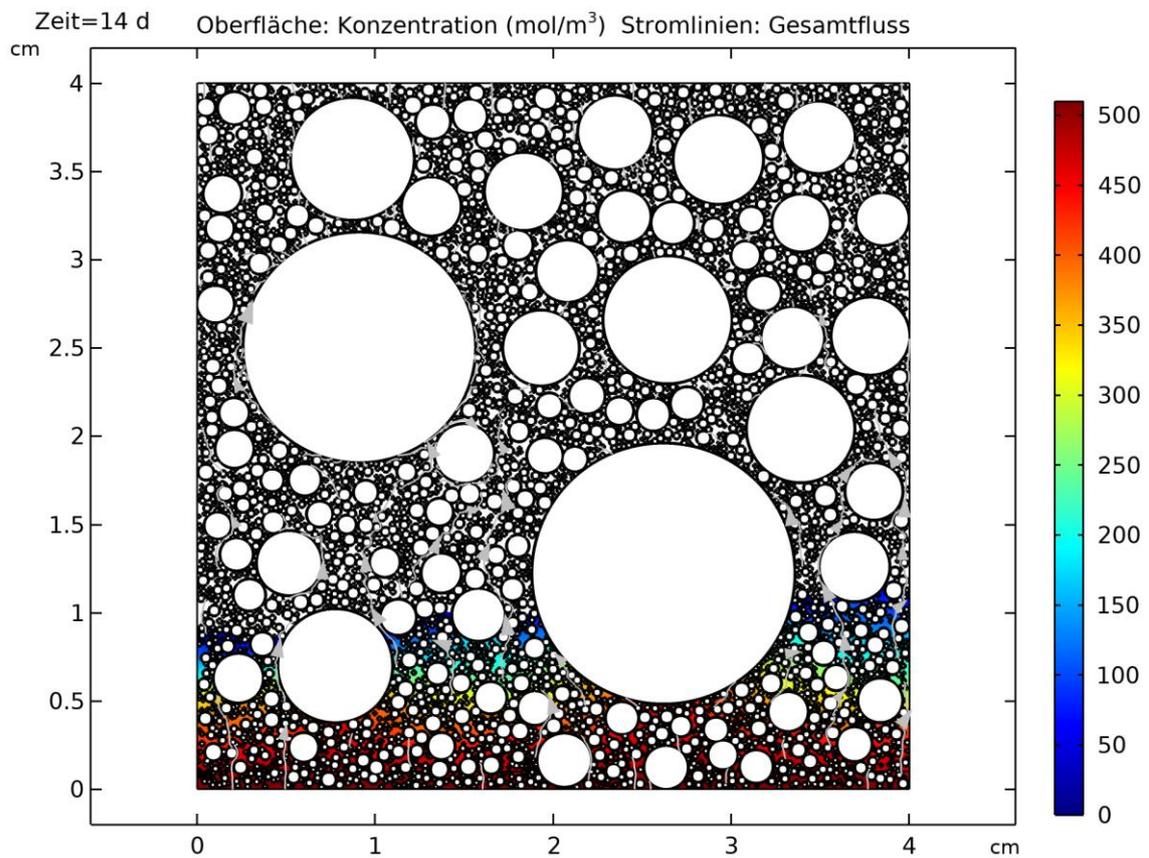


Abbildung D 12 Variante 3 – PK6 14d

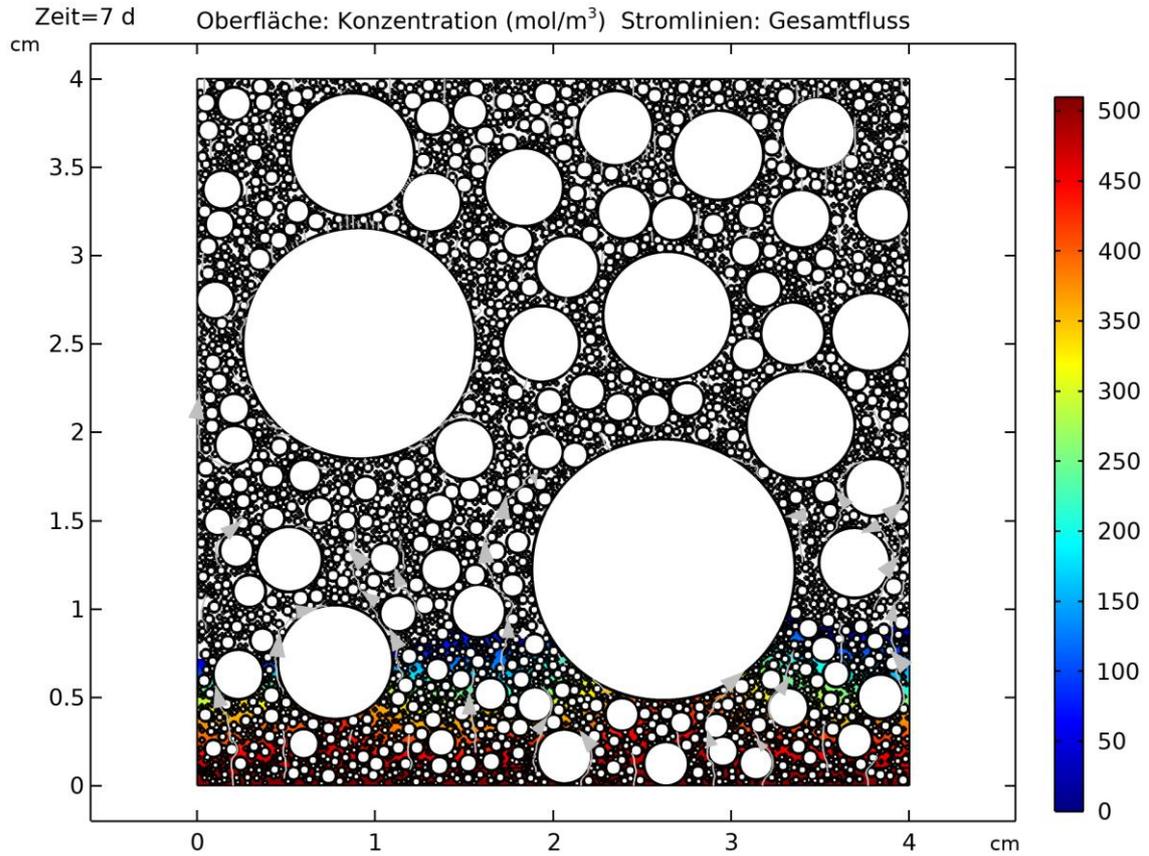


Abbildung D 13 Variante 3 – PK7 7d

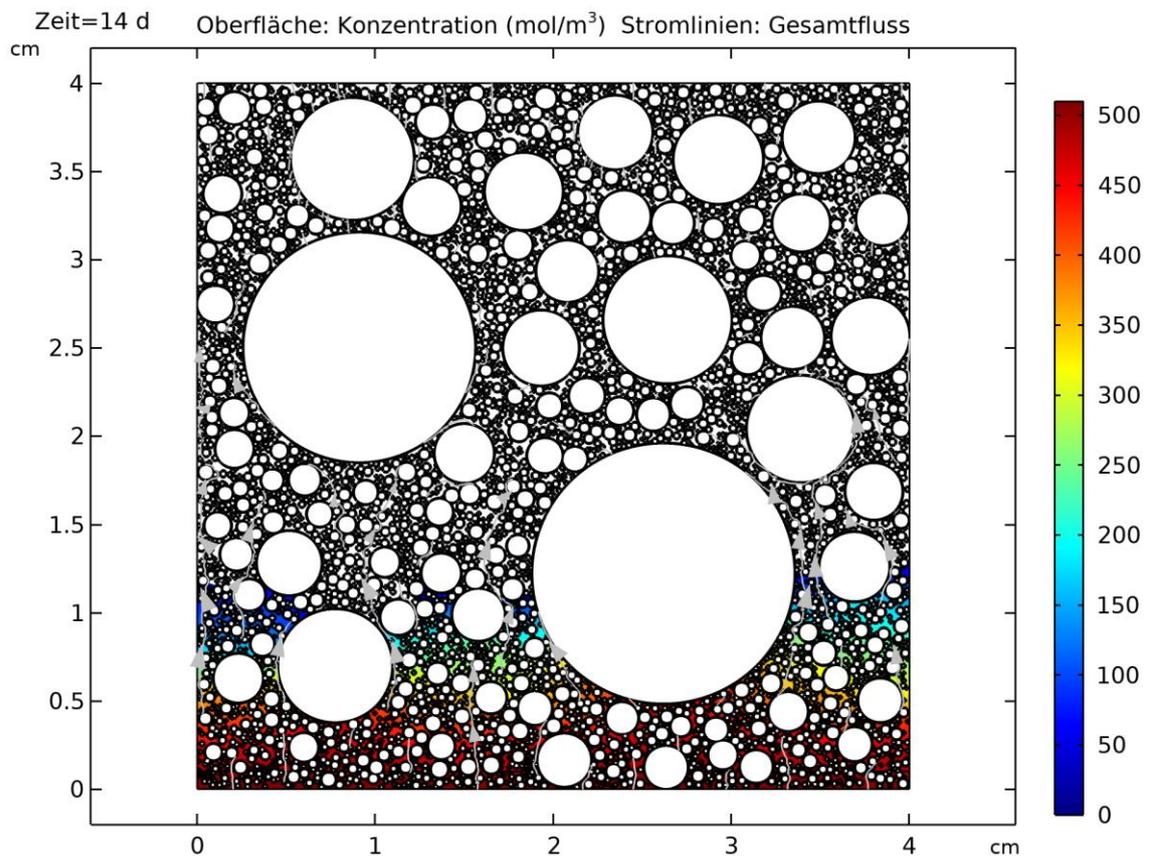


Abbildung D 14 Variante 3 – PK7 14d

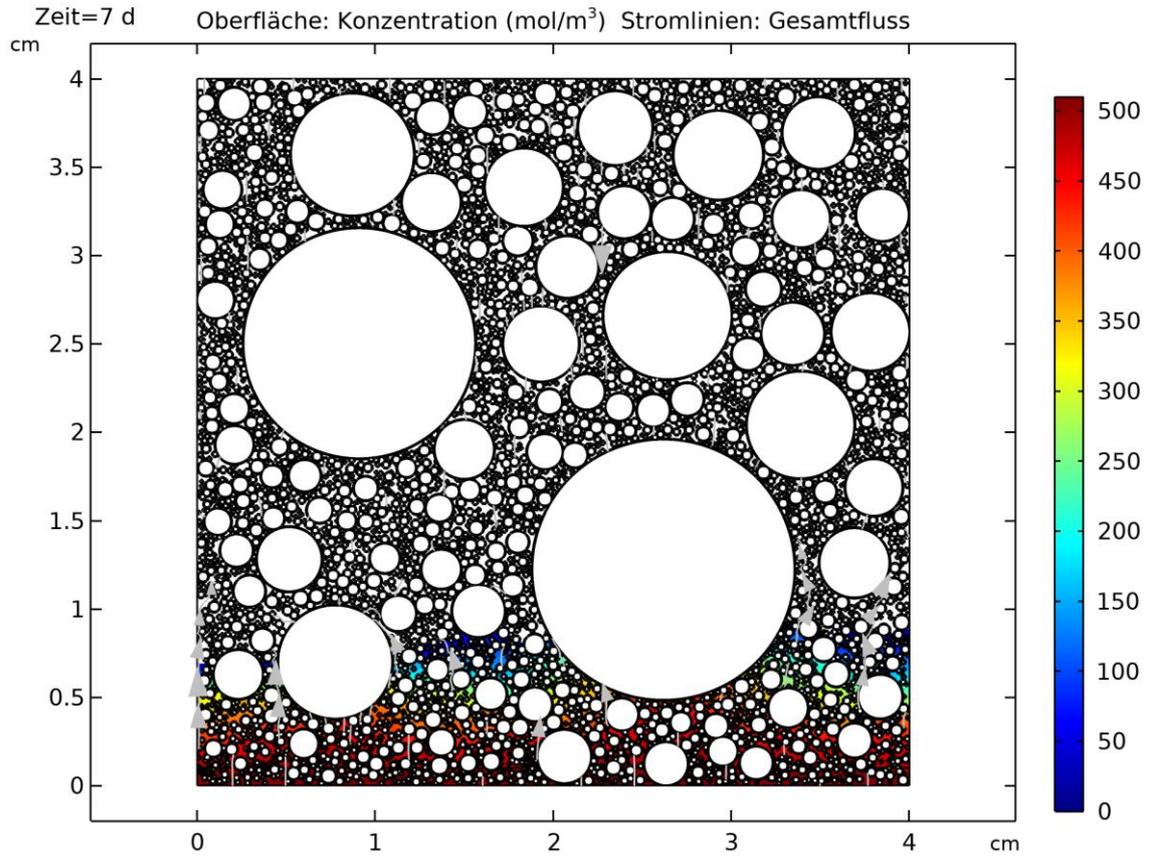


Abbildung D 15 Variante 3 – PK8 7d

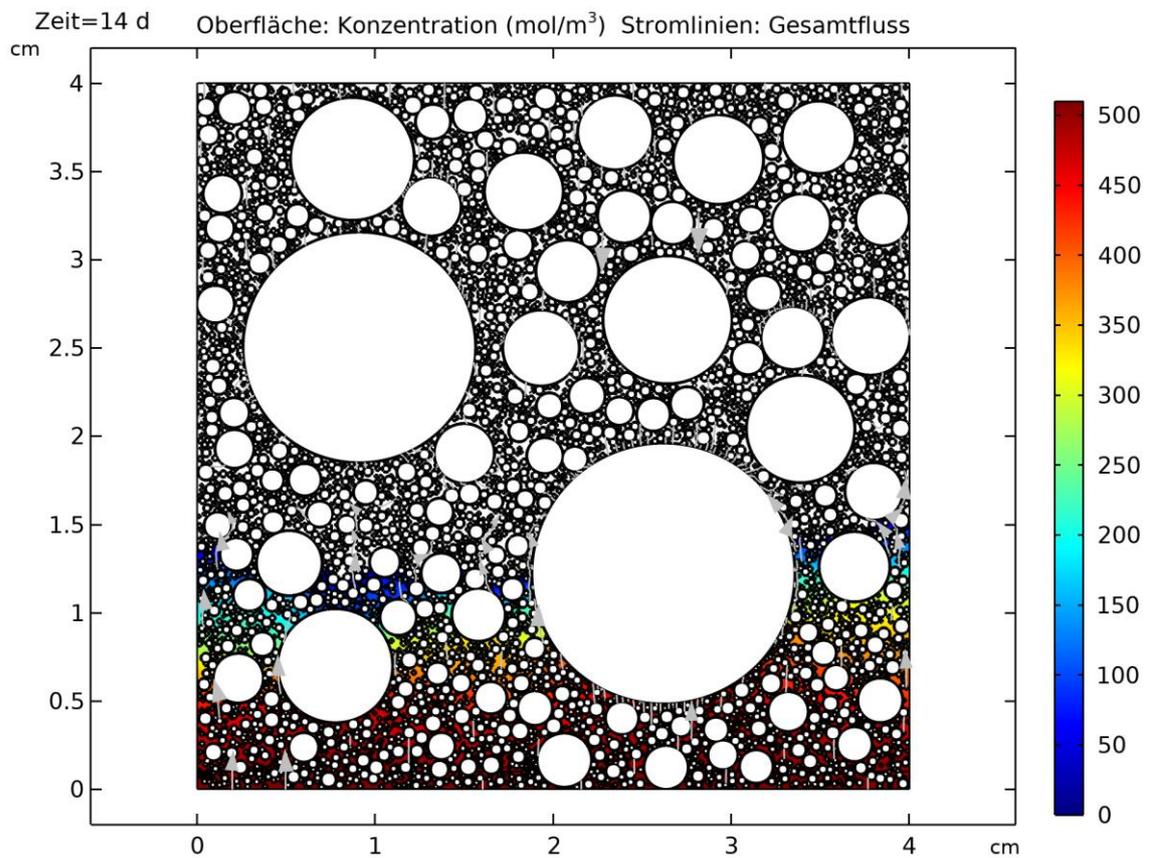


Abbildung D 16 Variante 3 – PK8 14d

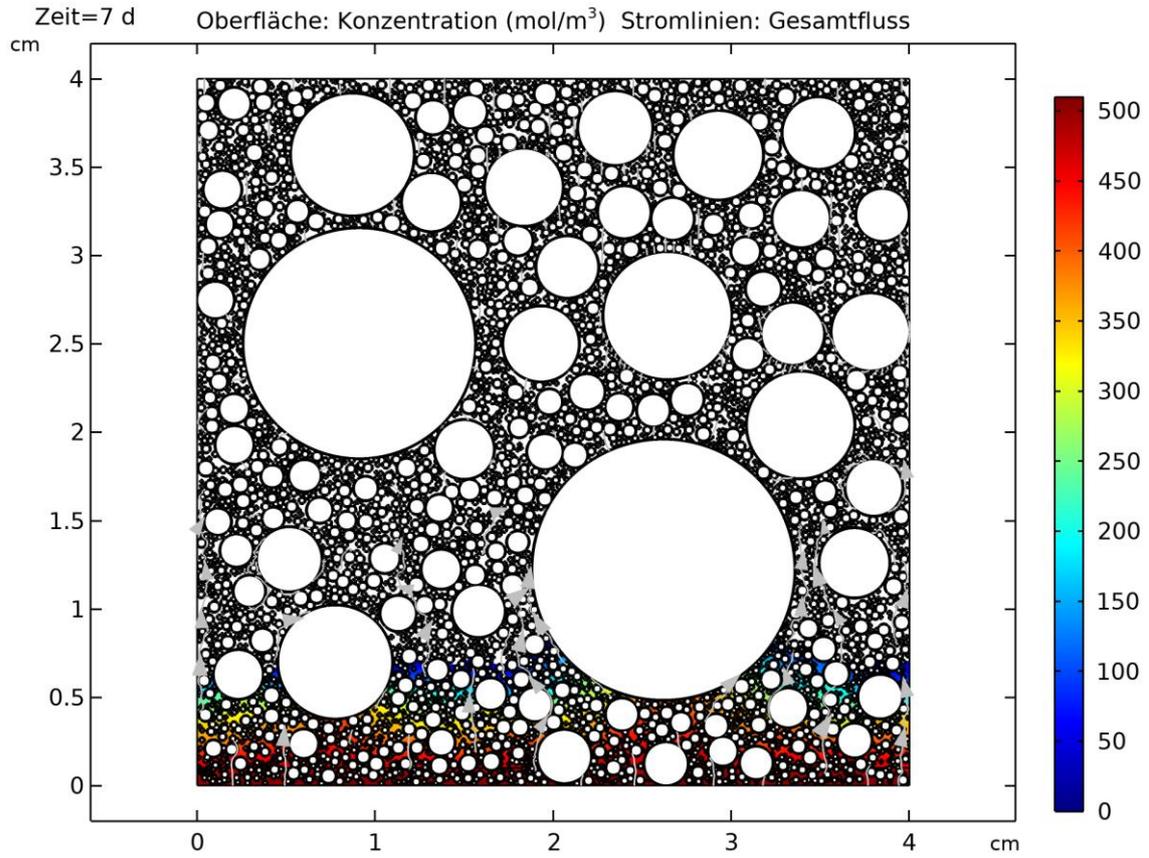


Abbildung D 17 Variante 3 – PK9 7d

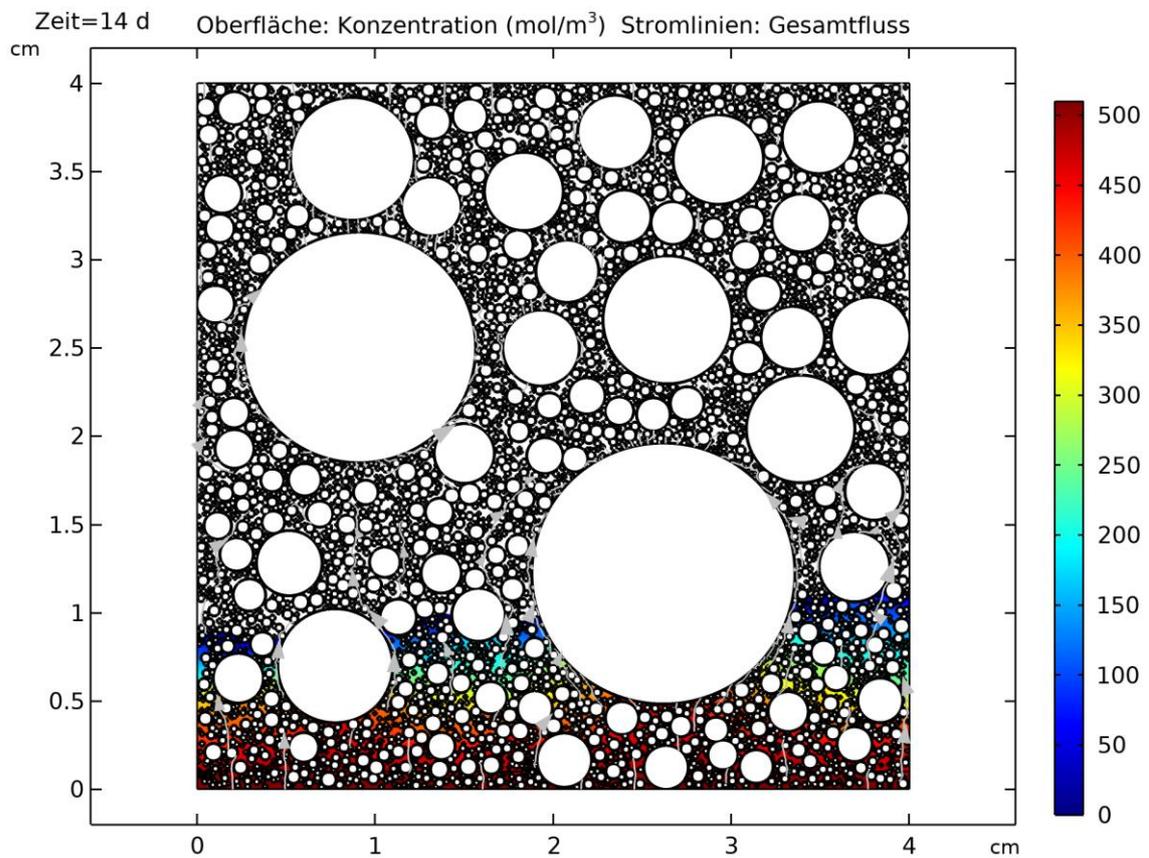


Abbildung D 18 Variante 3 – PK9 14d

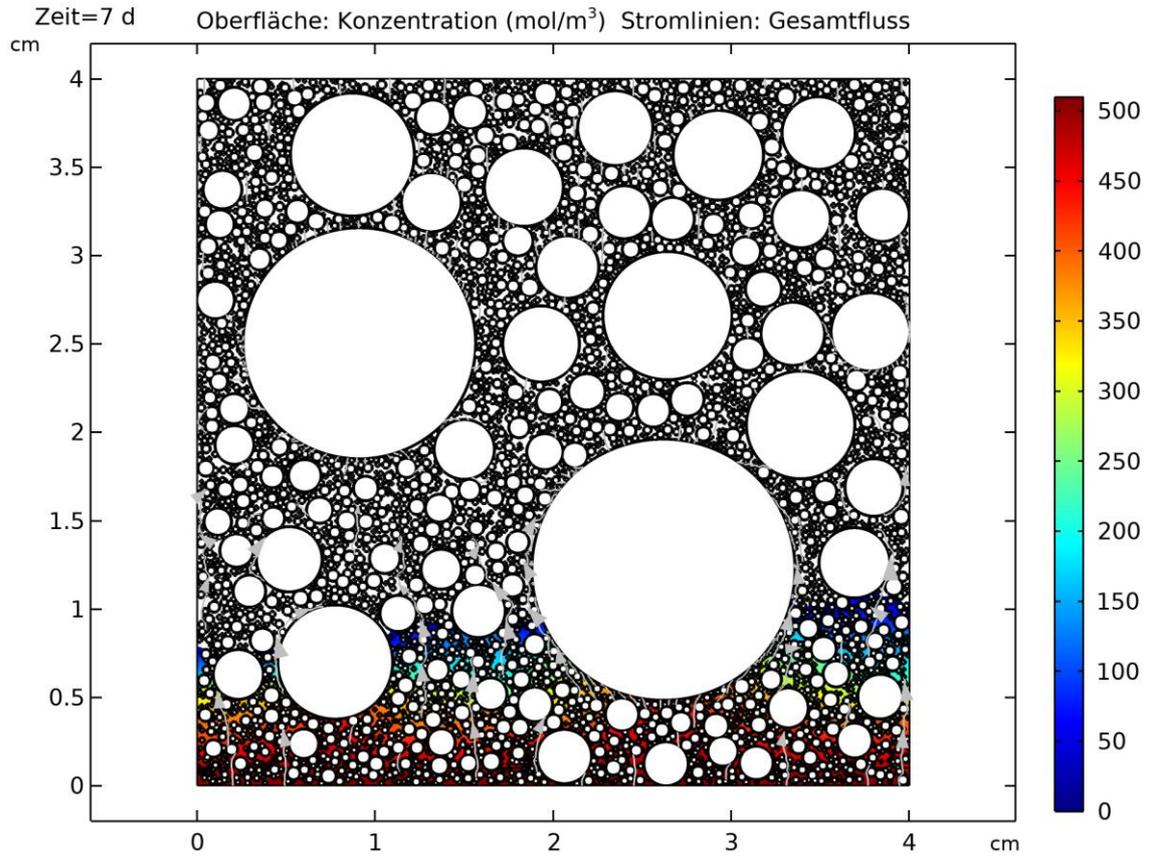


Abbildung D 19 Variante 3 - PK10 7d

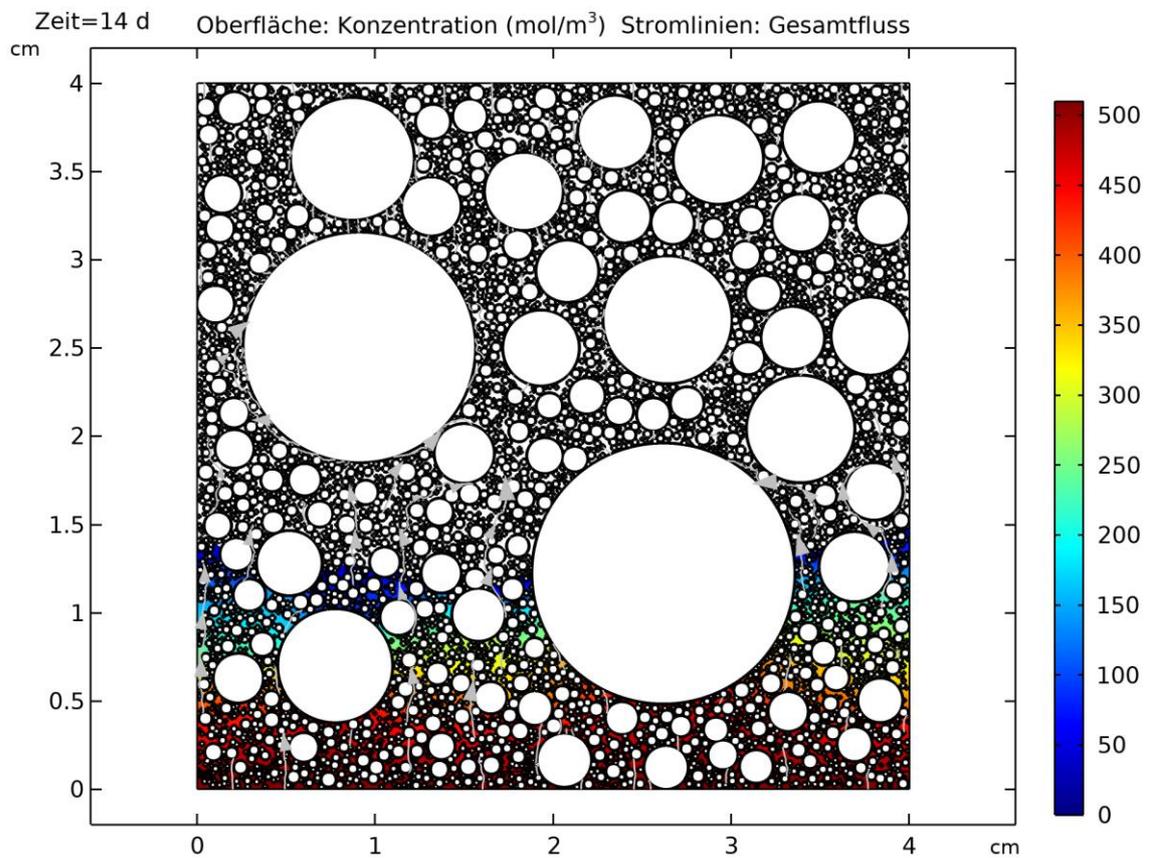


Abbildung D 20 Variante 3 - PK10 14d

ANHANG E. COMSOL-DIAGRAMME – VARIANTE 4 CDF

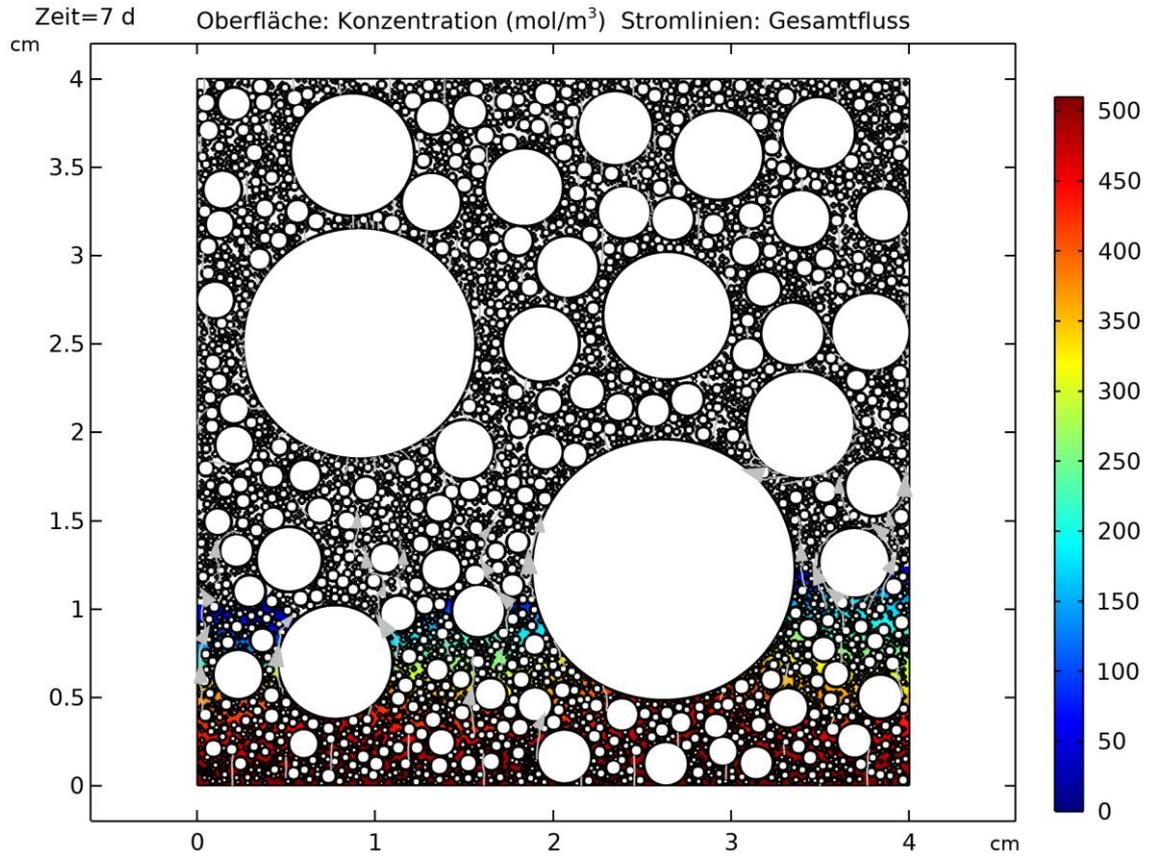


Abbildung E 1 Variante 4 - PK1 7d

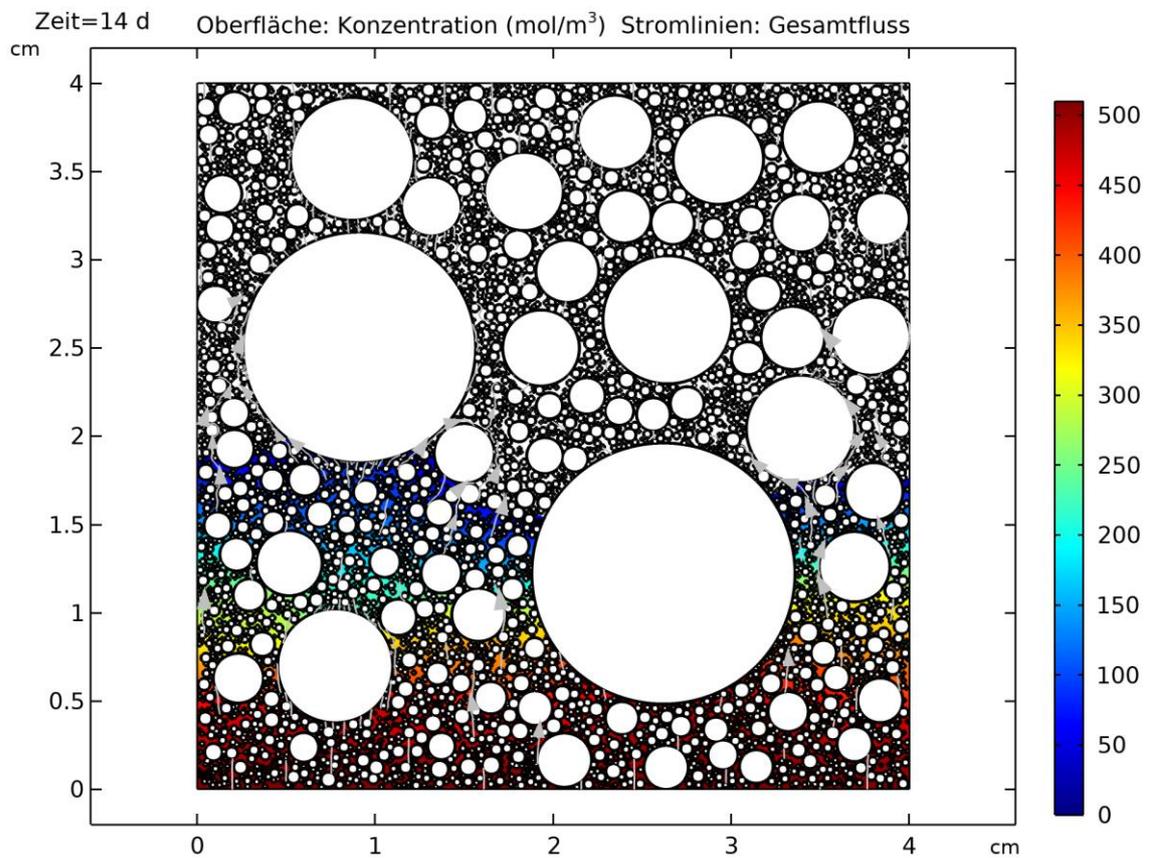


Abbildung E 2 Variante 4 - PK1 14d

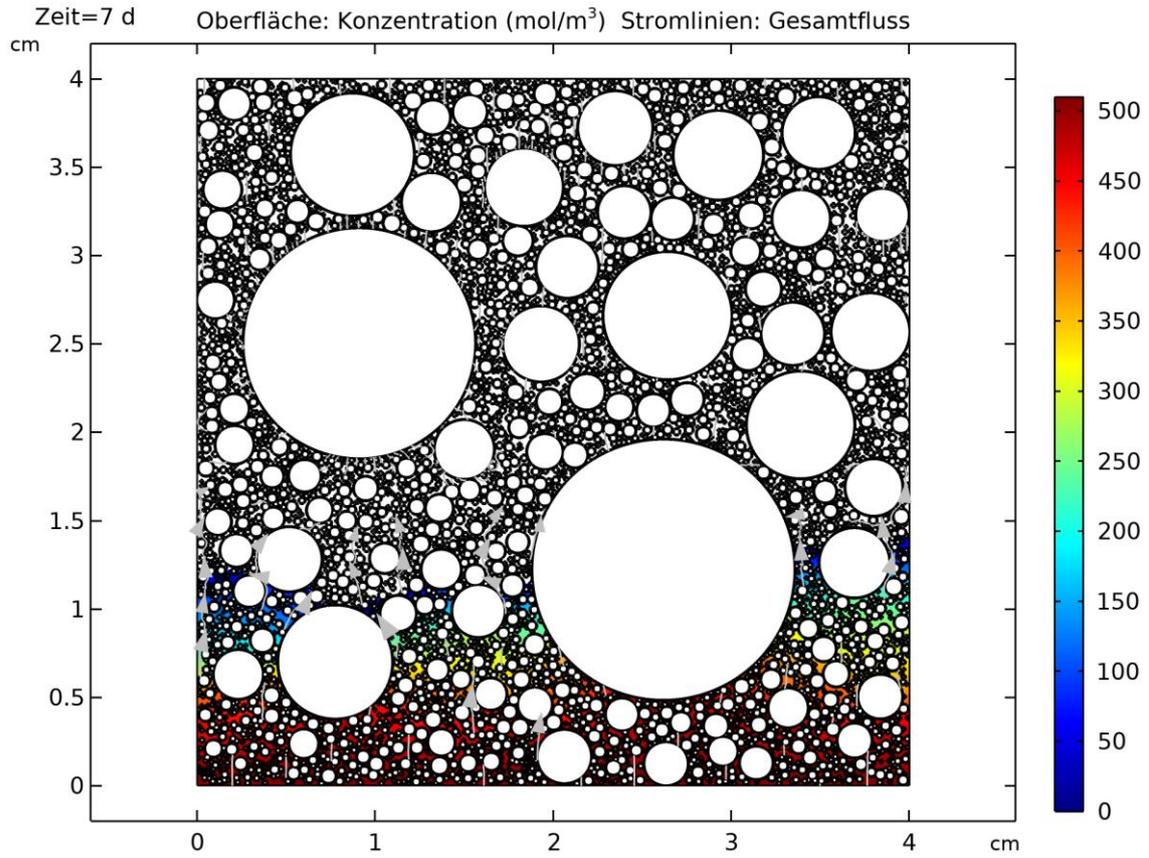


Abbildung E 3 Variante 4 – PK2 7d

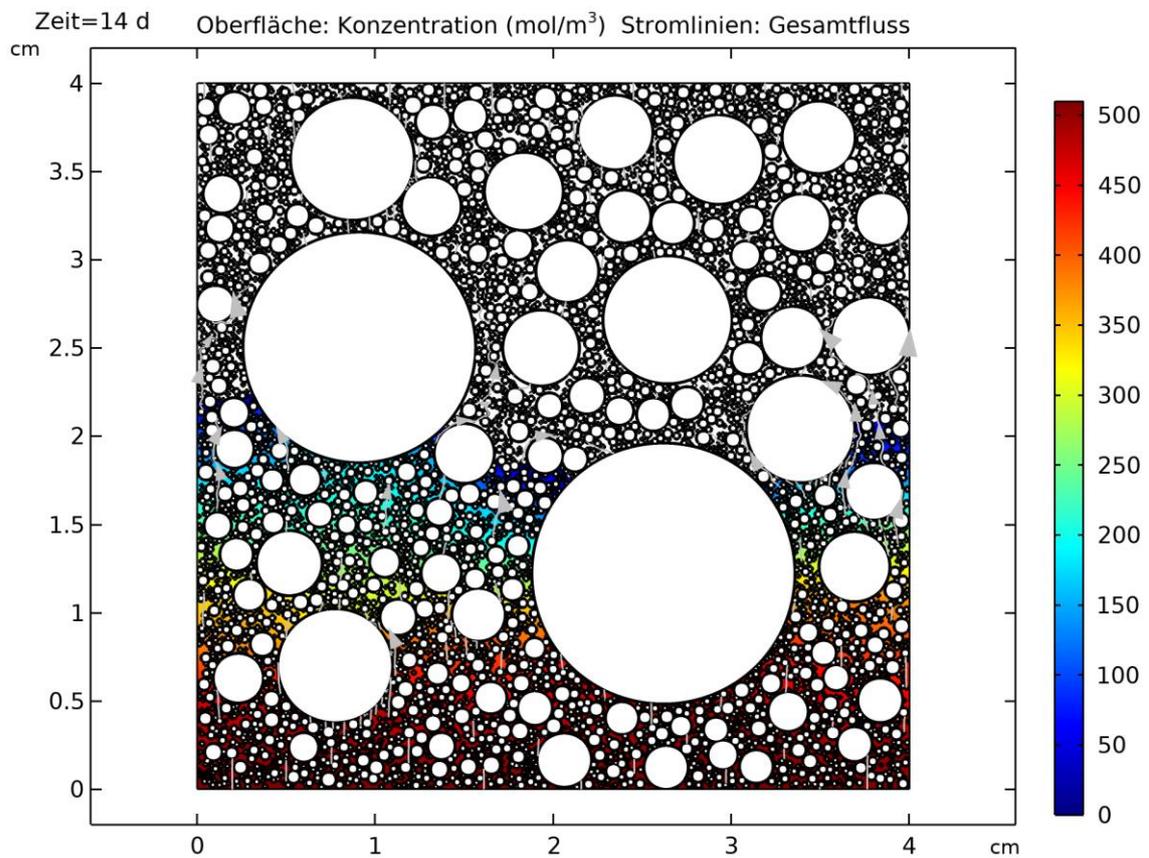


Abbildung E 4 Variante 4 – PK2 14d

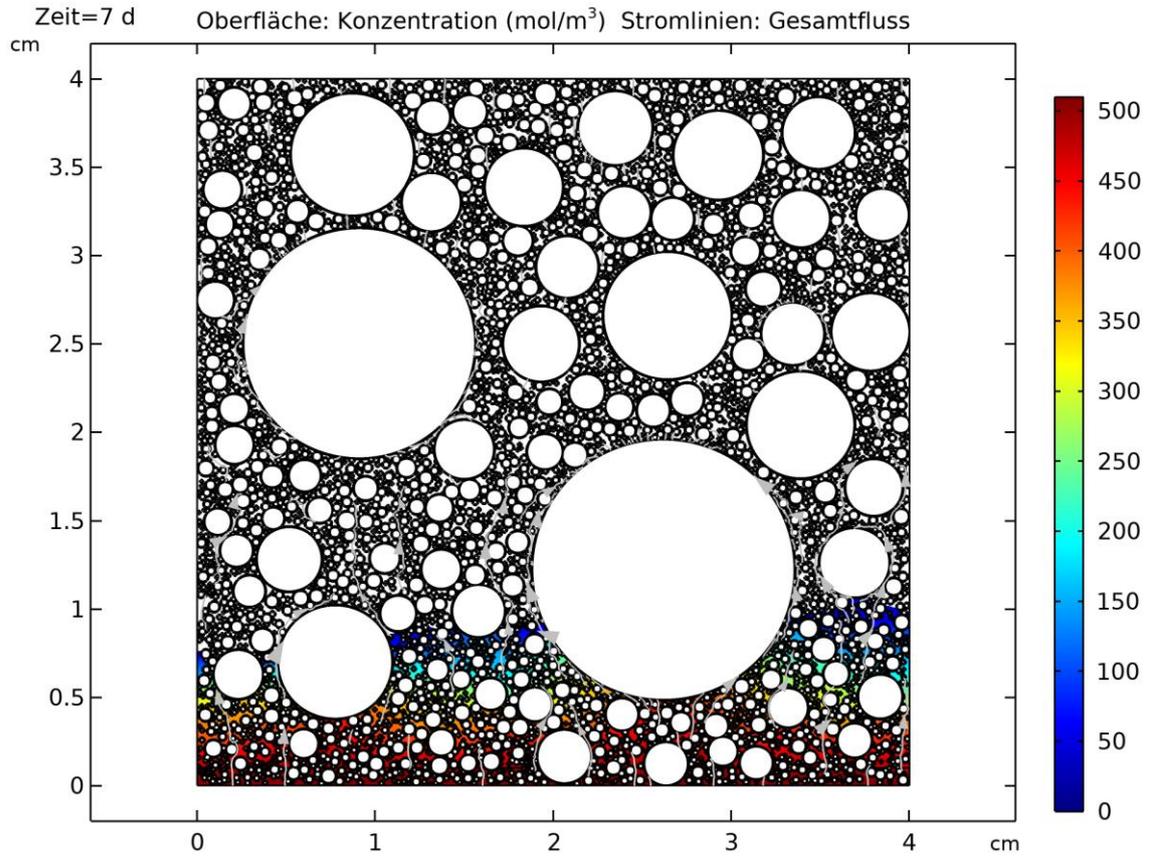


Abbildung E 5 Variante 4 – PK3 7d

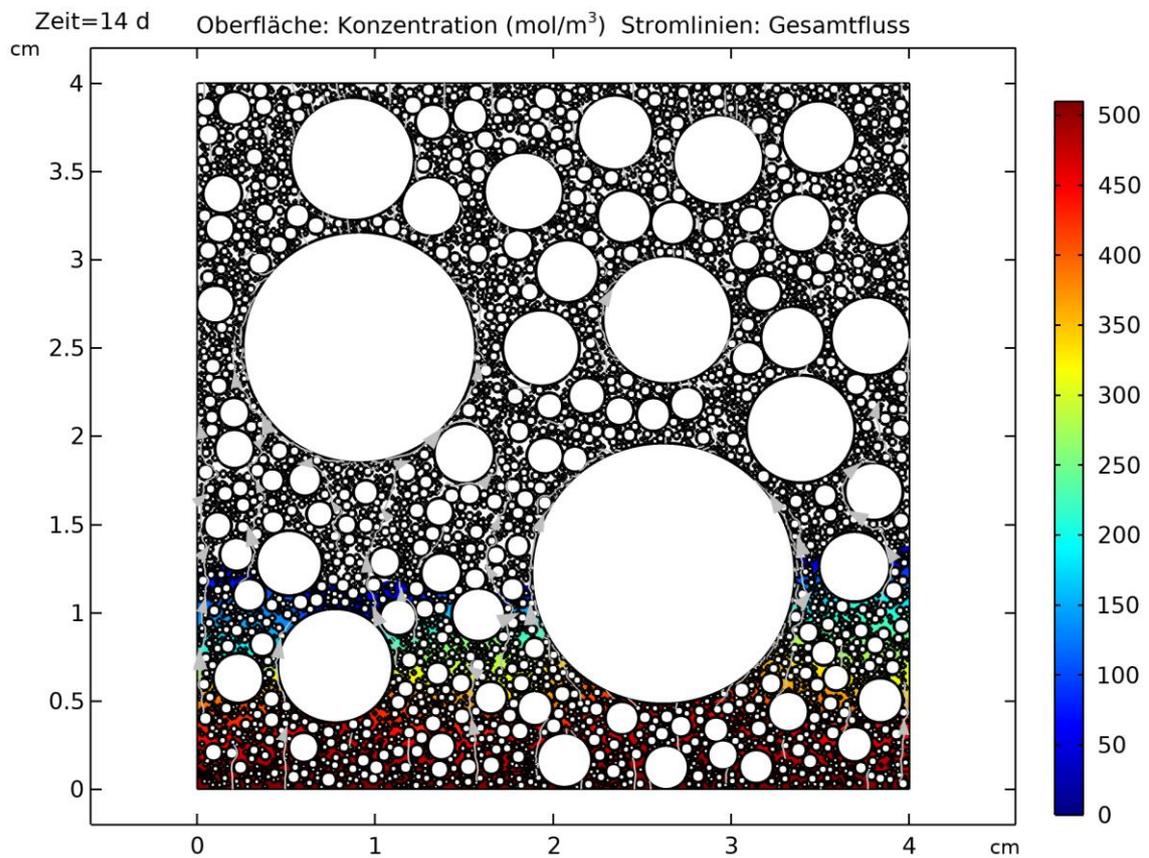


Abbildung E 6 Variante 4 – PK3 14d

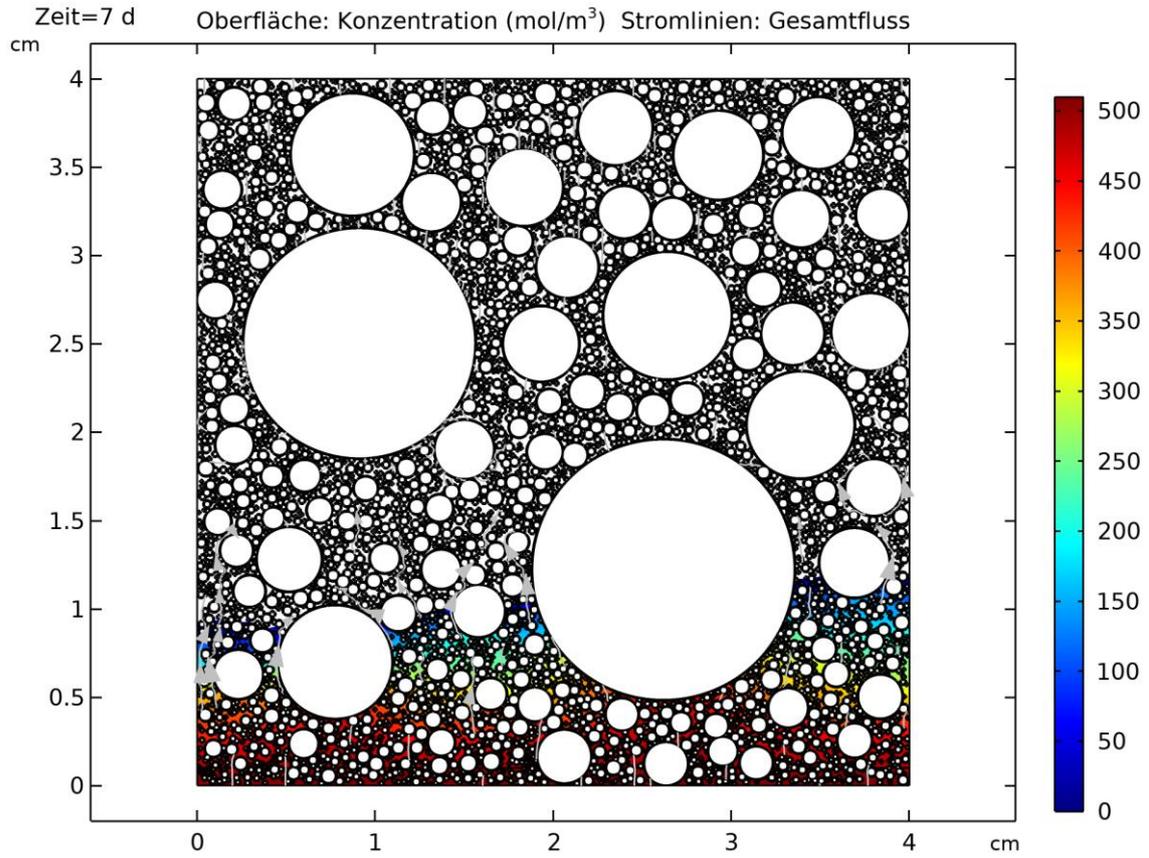


Abbildung E 7 Variante 4 – PK4 7d

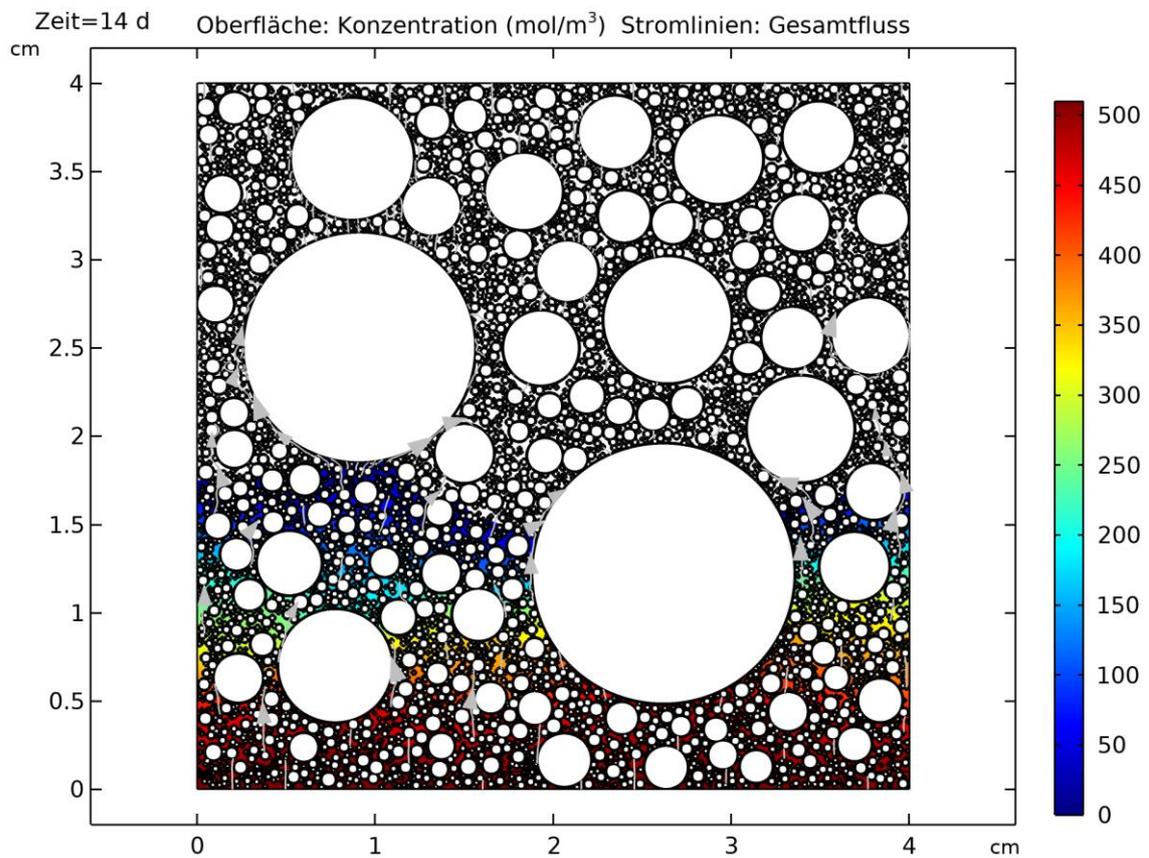


Abbildung E 8 Variante 4 – PK4 14d

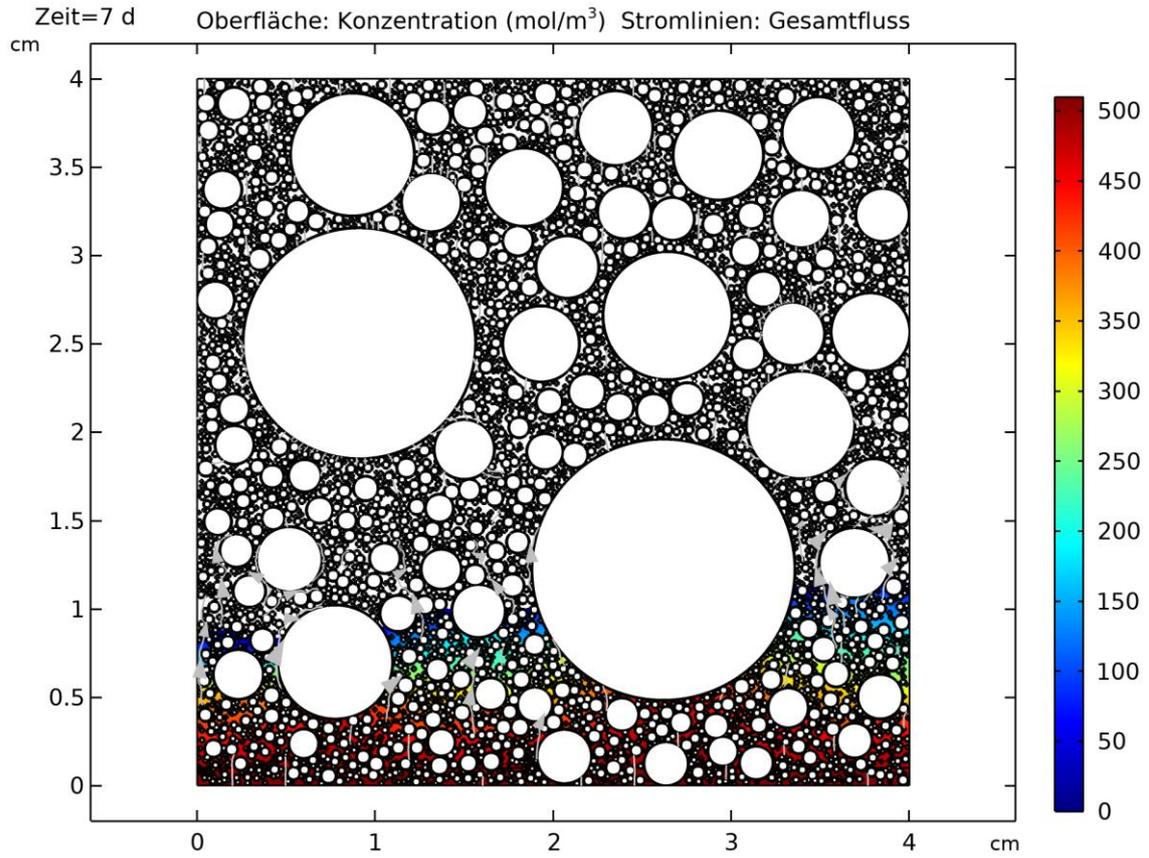


Abbildung E 9 Variante 4 – PK5 7d

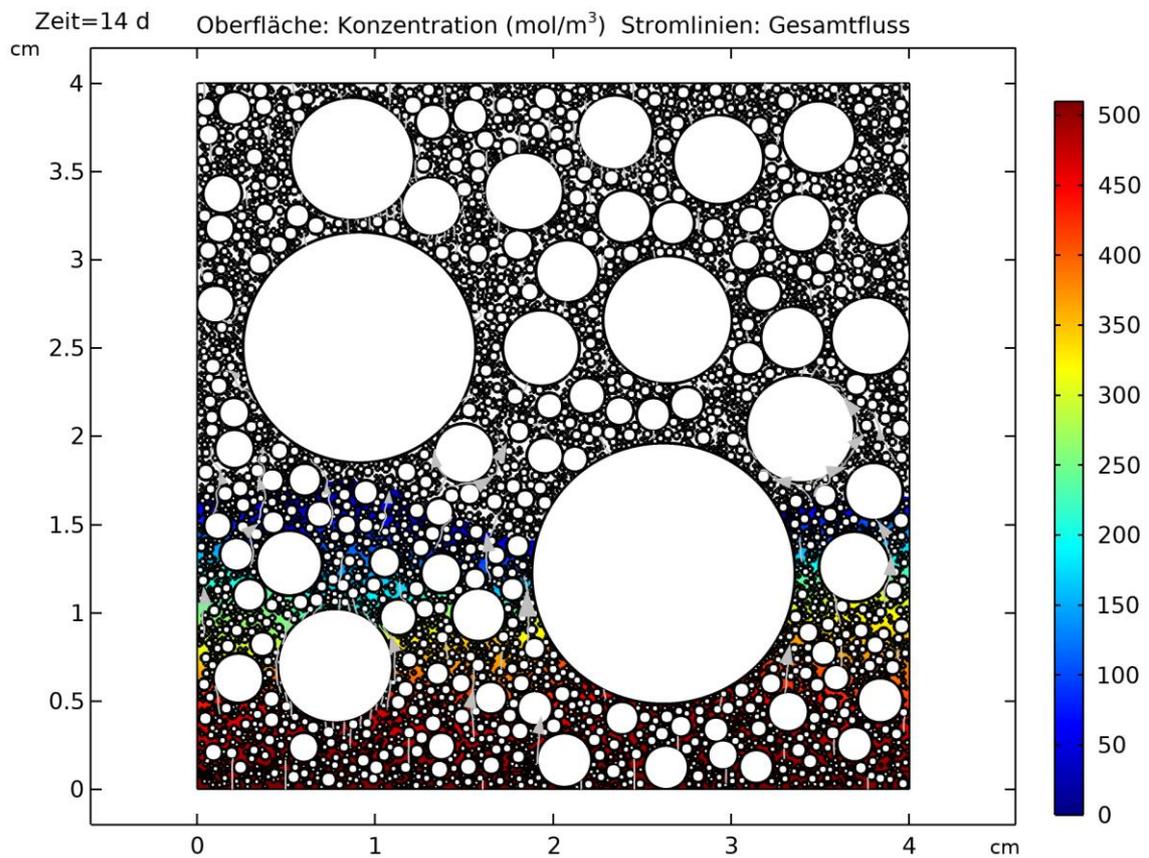


Abbildung E 10 Variante 4 – PK5 14d

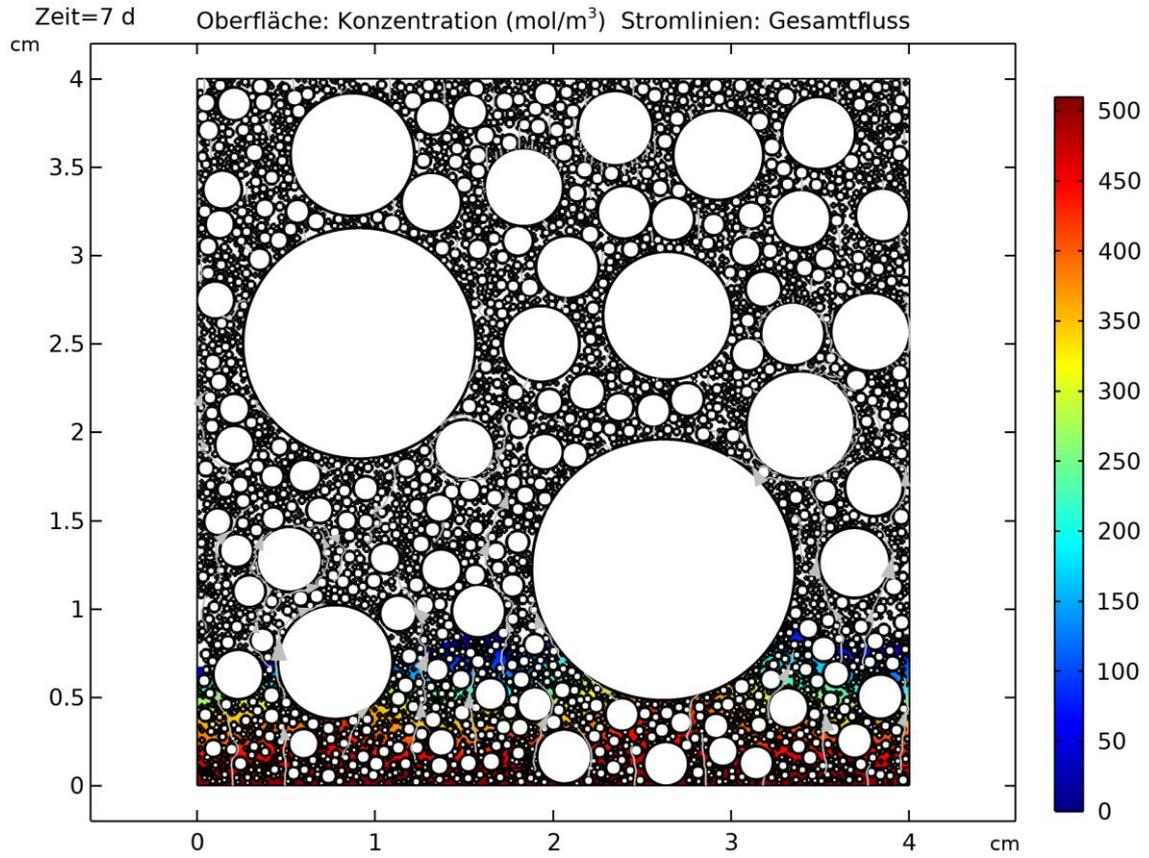


Abbildung E 11 Variante 4 – PK6 7d

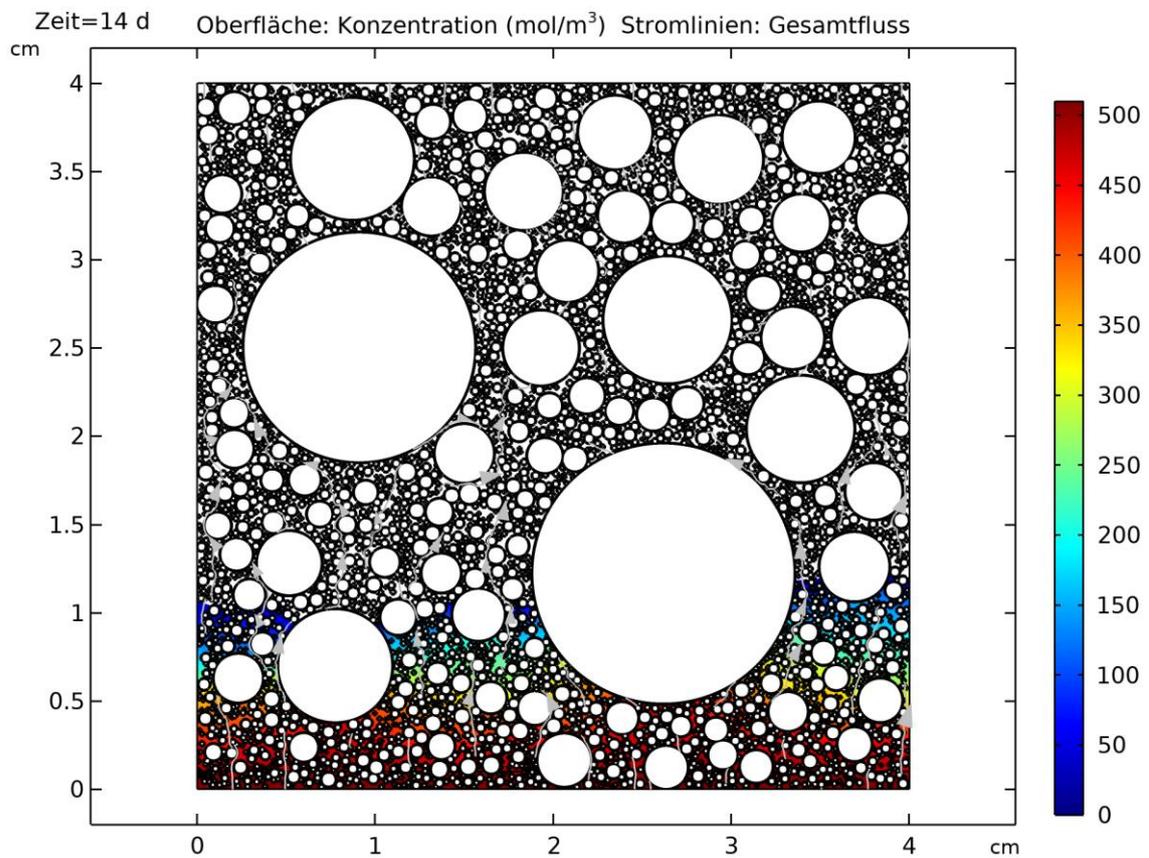


Abbildung E 12 Variante 4 – PK6 14d

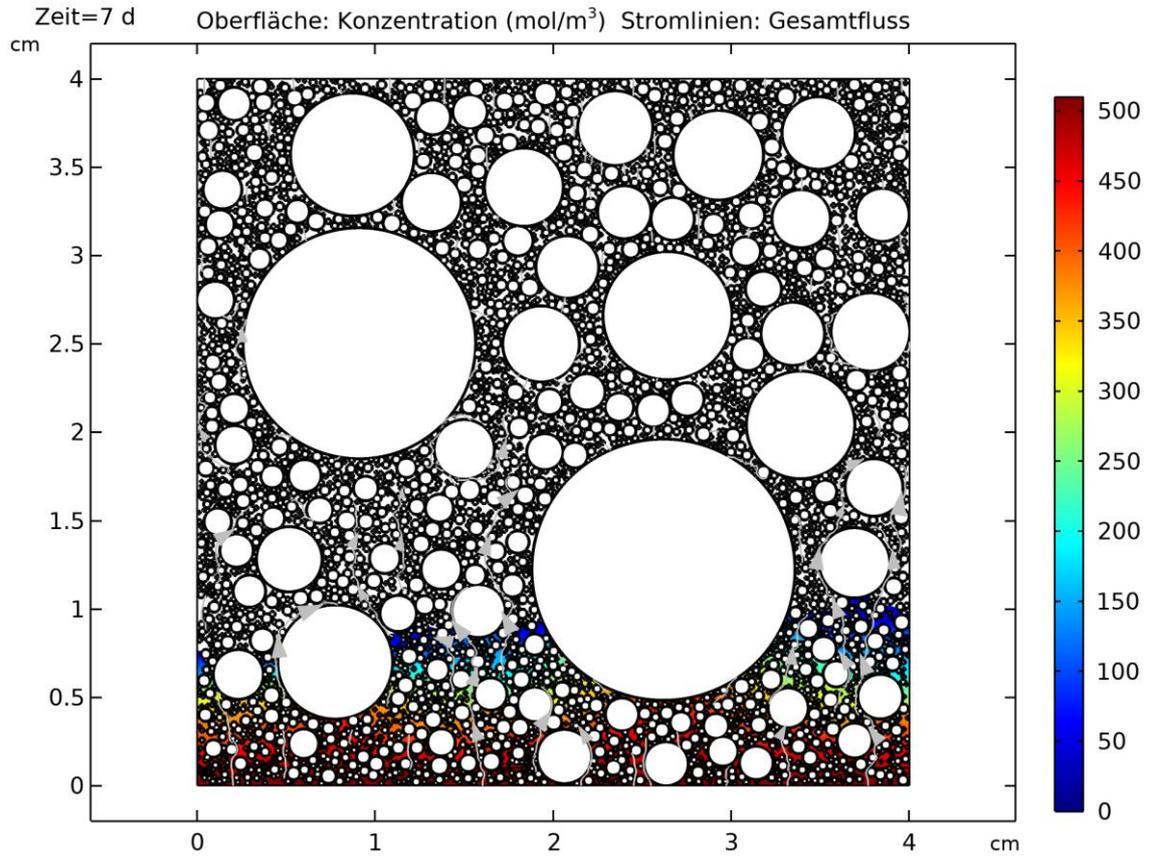


Abbildung E 13 Variante 4 – PK7 7d

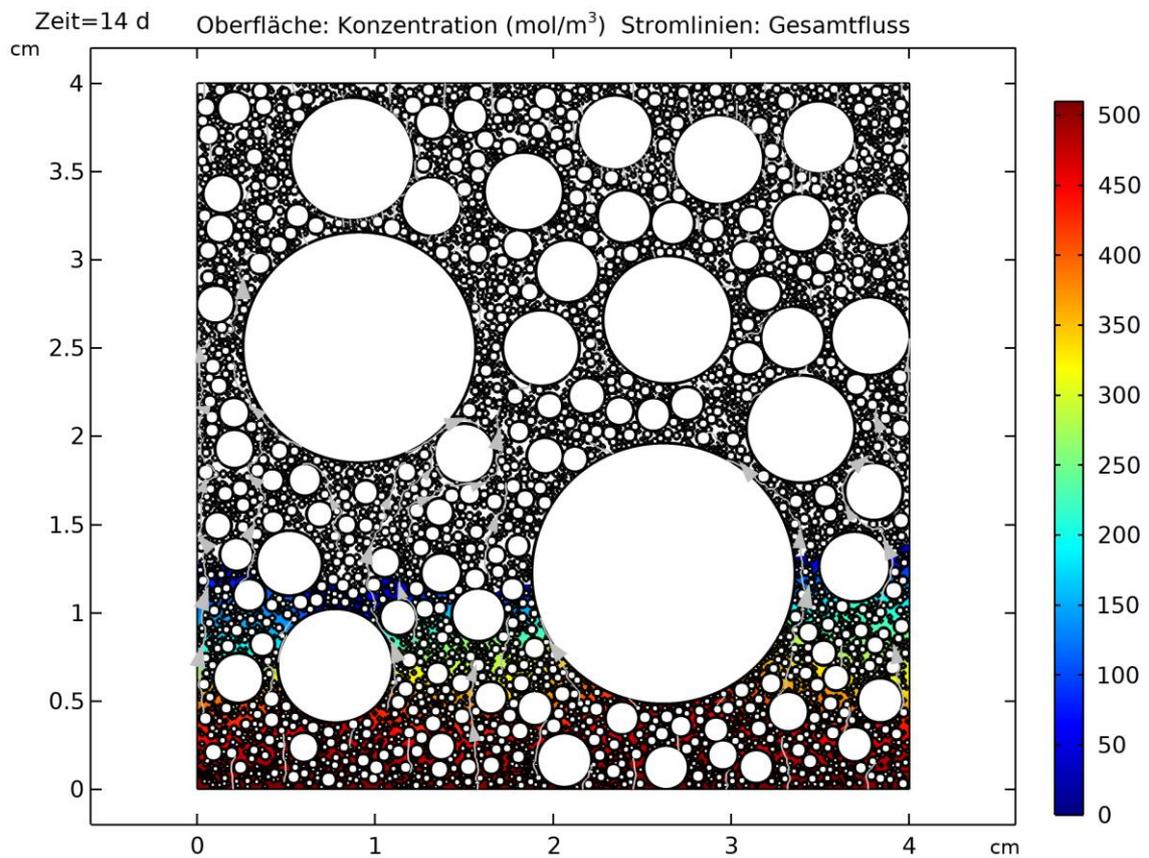


Abbildung E 14 Variante 4 – PK7 14d

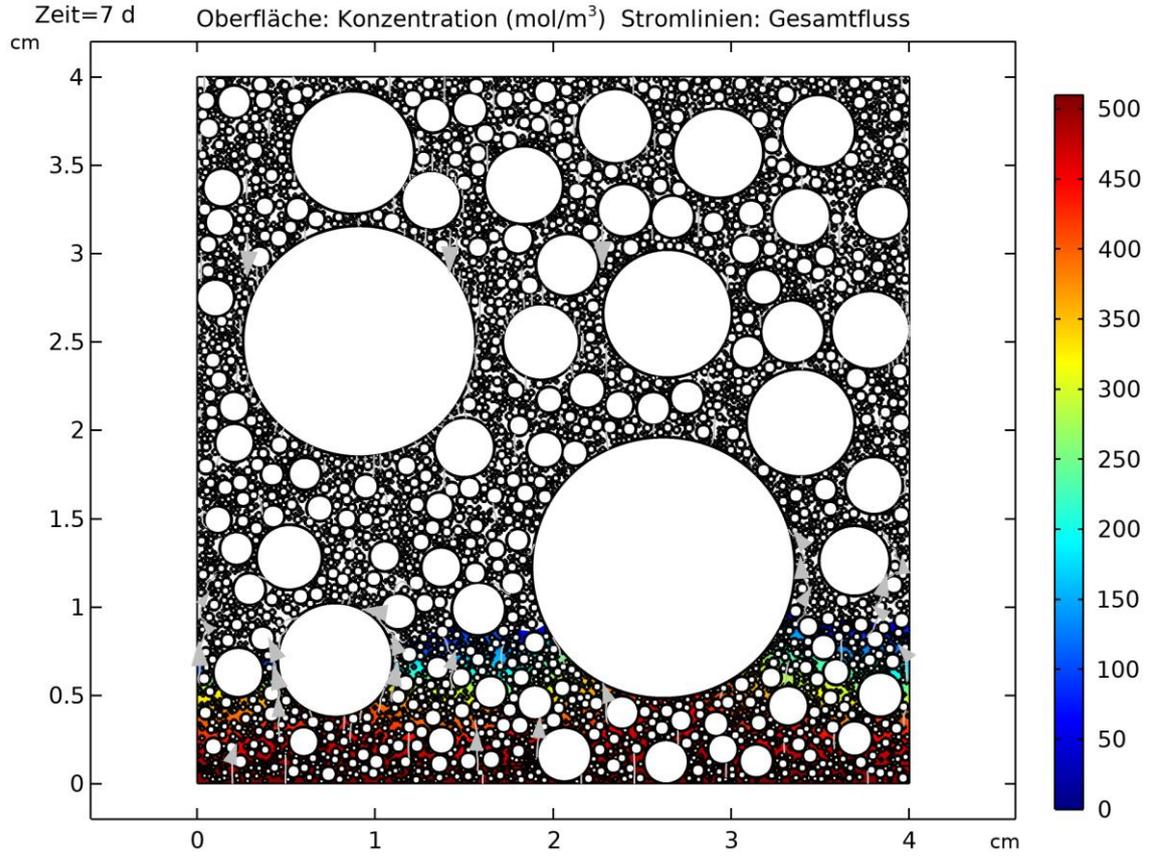


Abbildung E 15 Variante 4 – PK8 7d

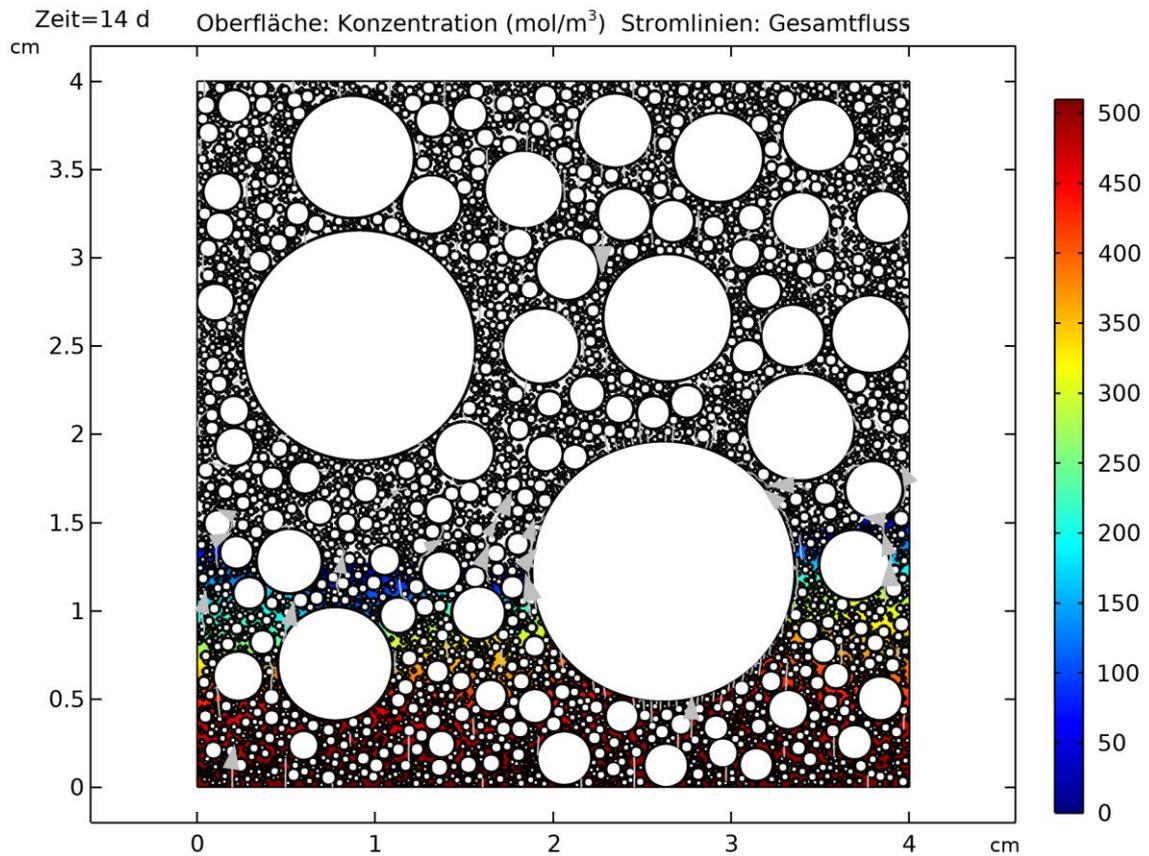


Abbildung E 16 Variante 4 – PK8 14d

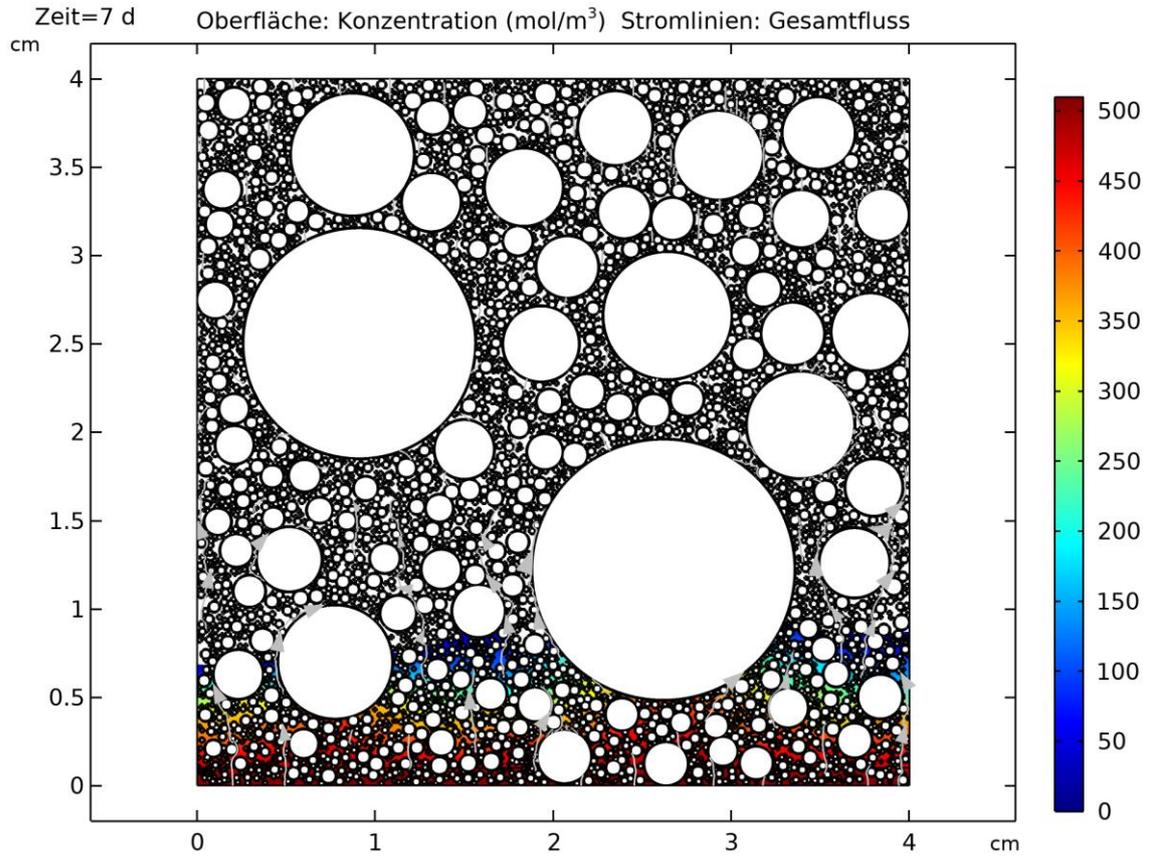


Abbildung E 17 Variante 4 – PK9 7d

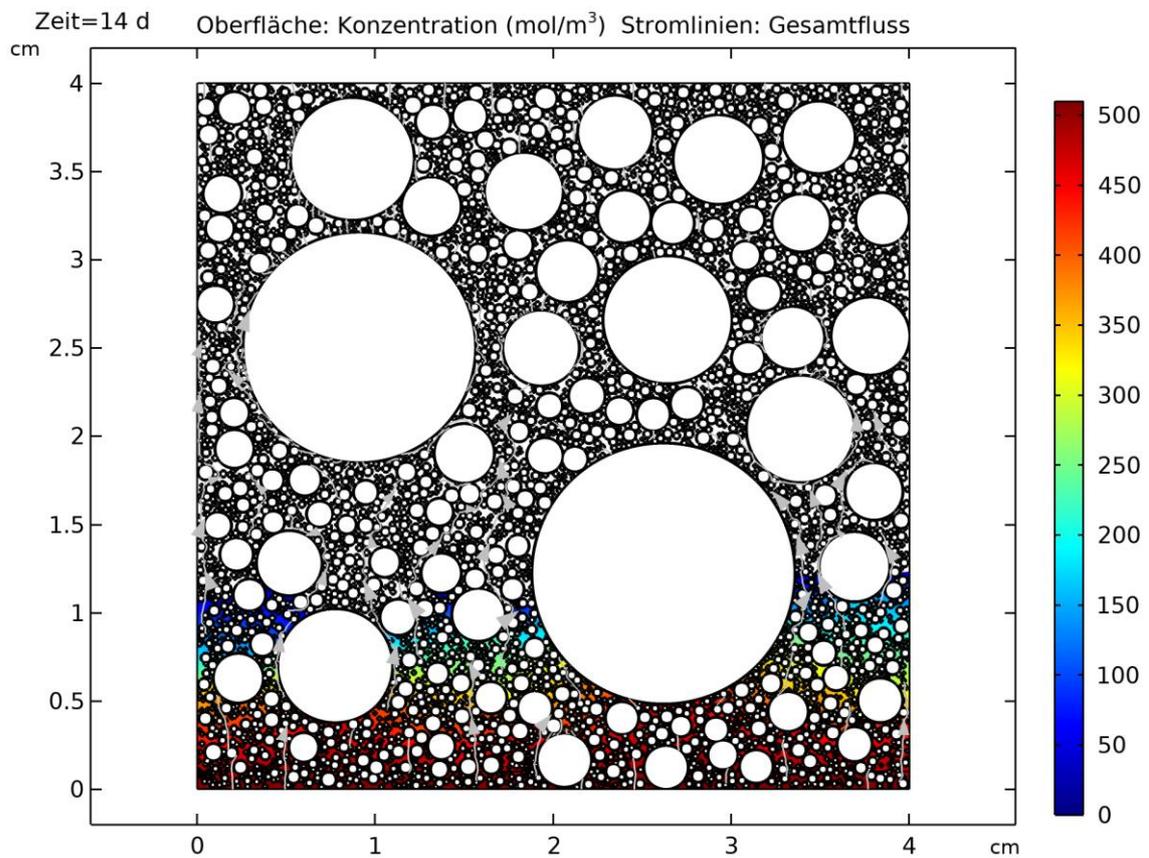


Abbildung E 18 Variante 4 – PK9 14d

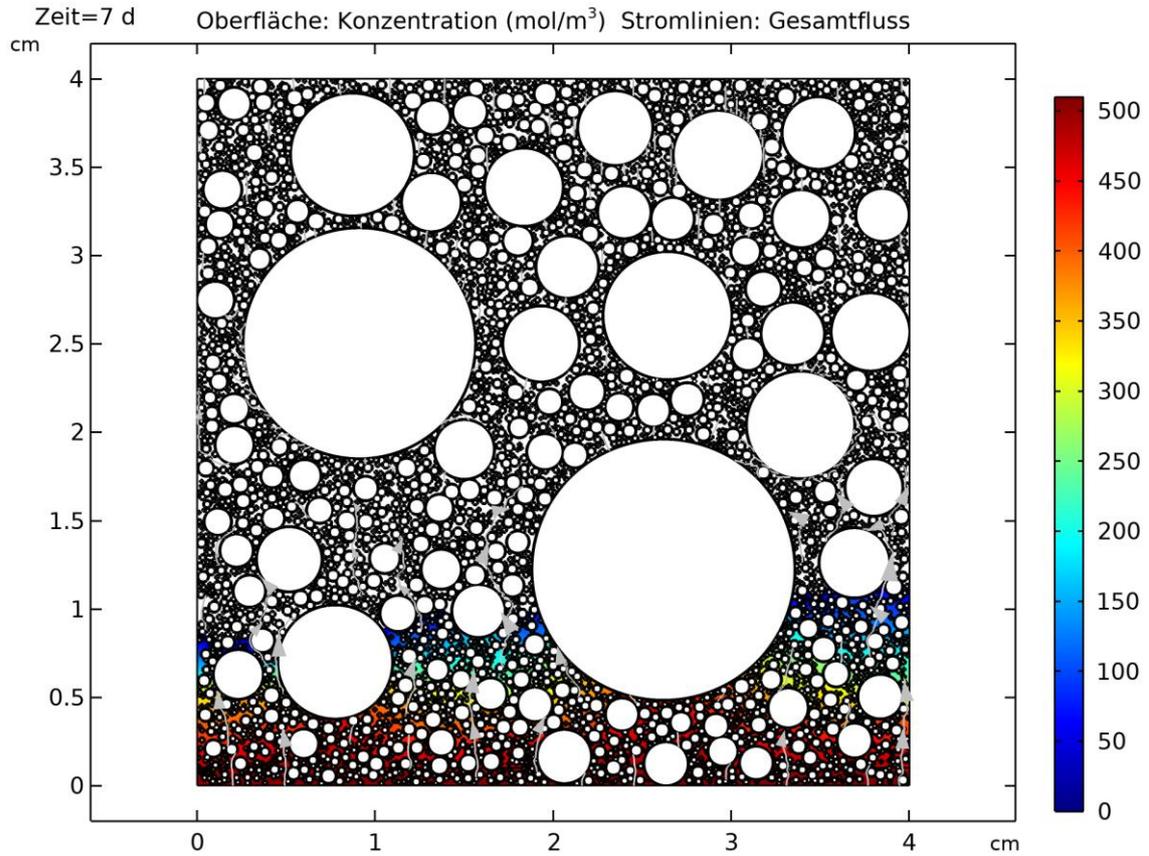


Abbildung E 19 Variante 4 - PK10 7d

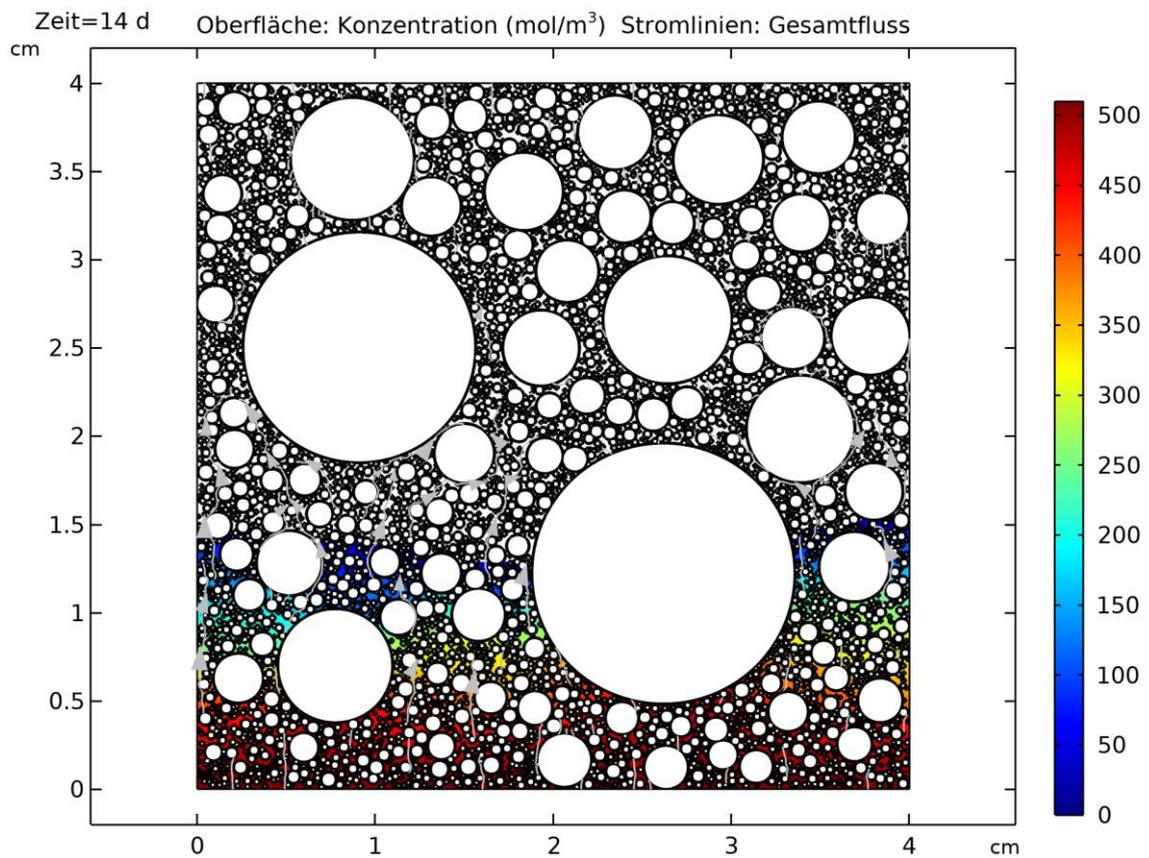


Abbildung E 20 Variante 4 - PK10 14d

ANHANG F. COMSOL-DIAGRAMME – MIGRATION

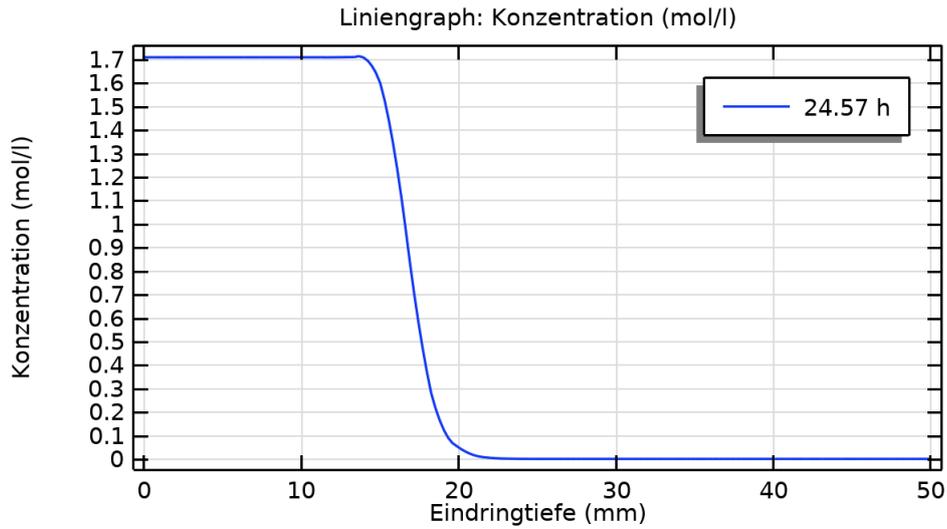


Abbildung F 1 Migration PK1 – 0d

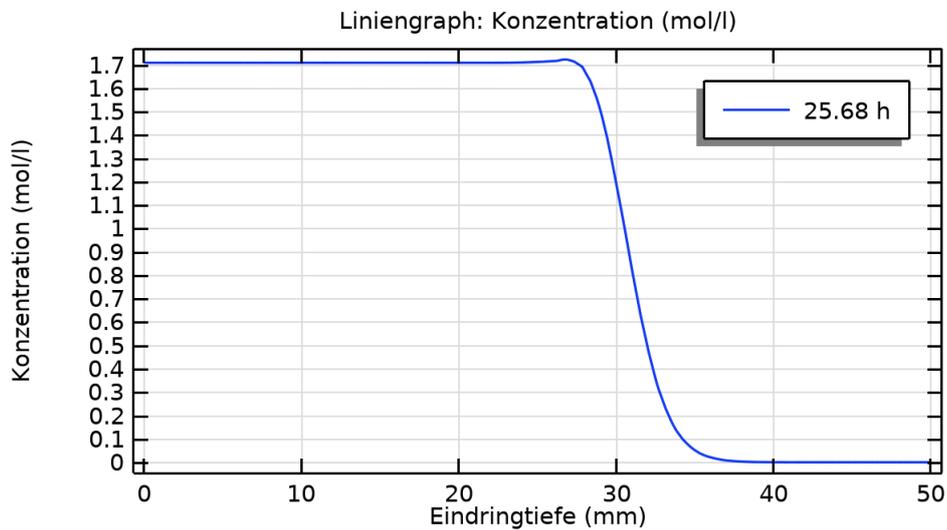


Abbildung F 2 Migration PK1 – 7d

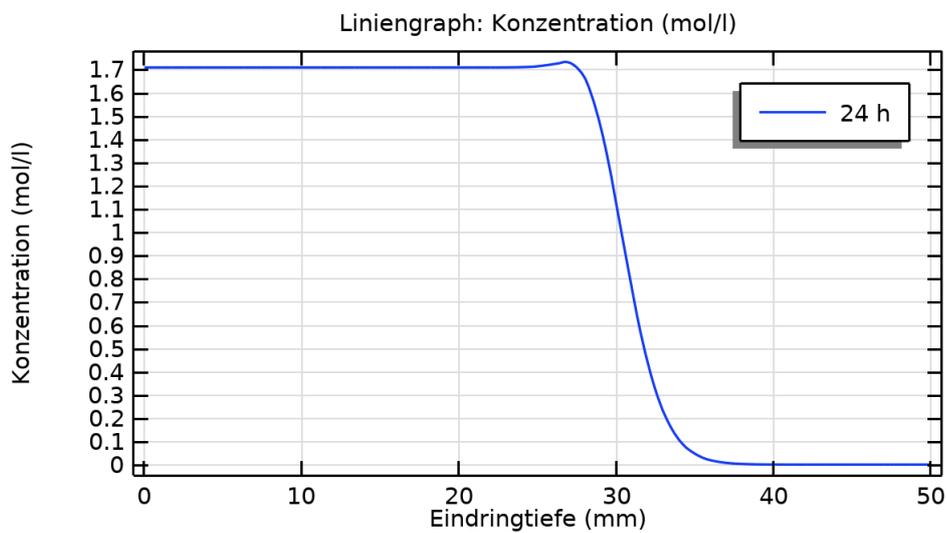


Abbildung F 3 Migration PK1 – 14d

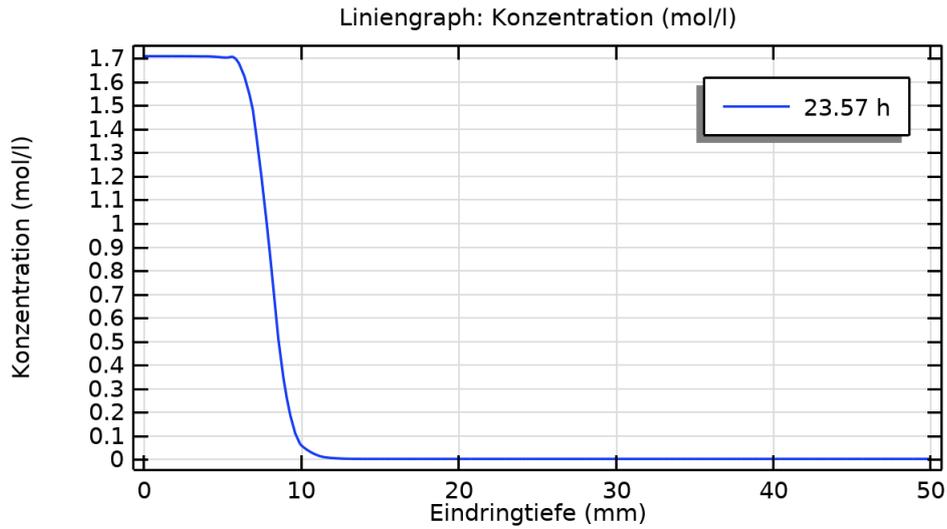


Abbildung F 4 Migration PK2 – 0d

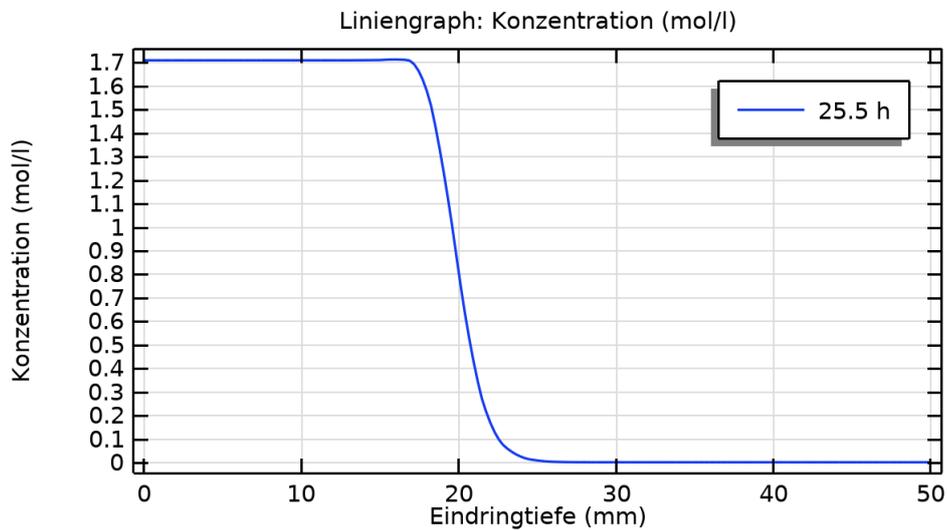


Abbildung F 5 Migration PK2 – 7d

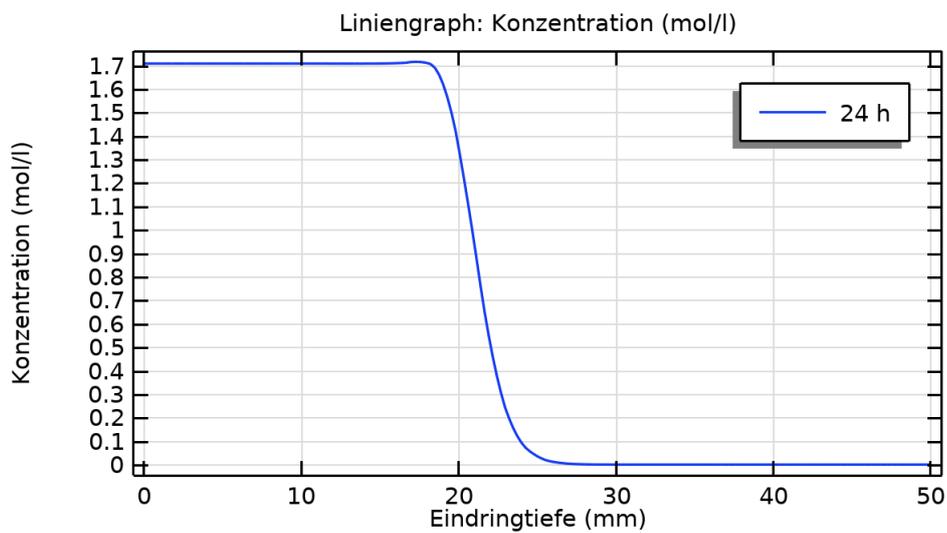


Abbildung F 6 Migration PK2 – 14d

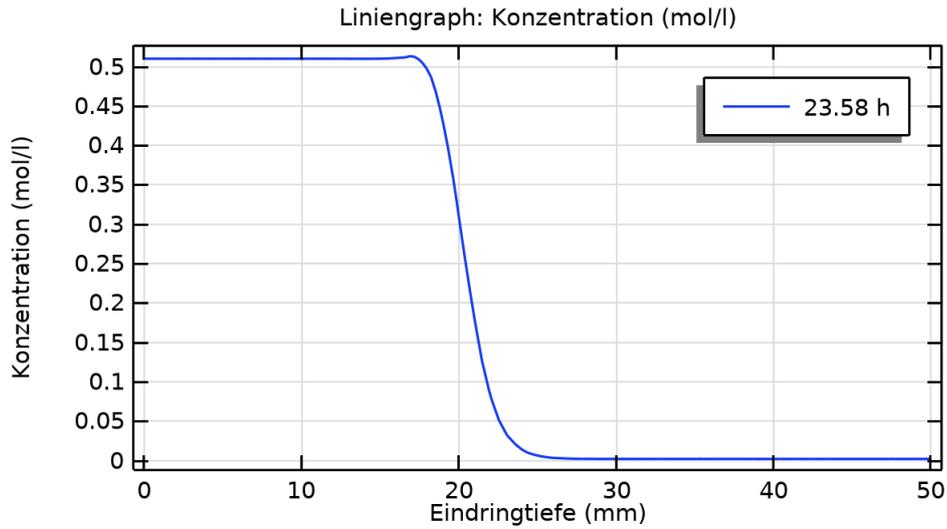


Abbildung F 7 Migration PK3 – 0d

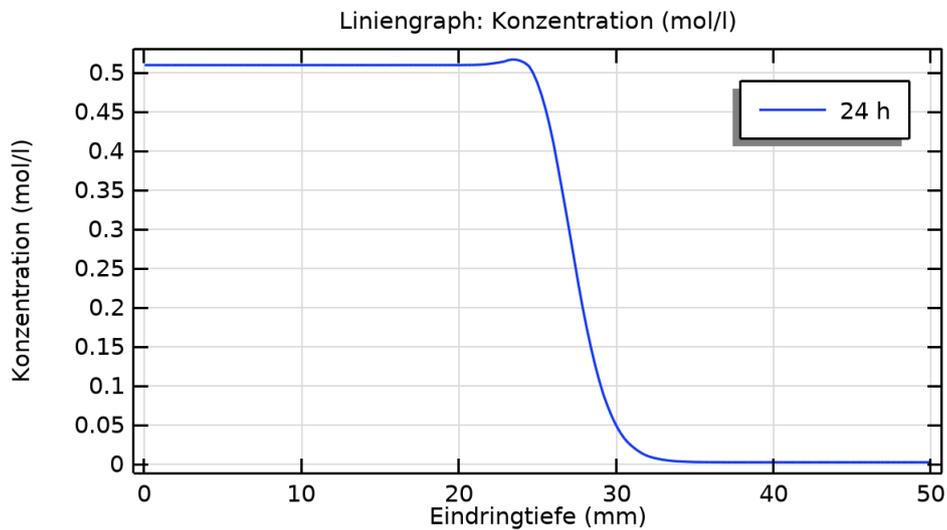


Abbildung F 8 Migration PK3 – 7d

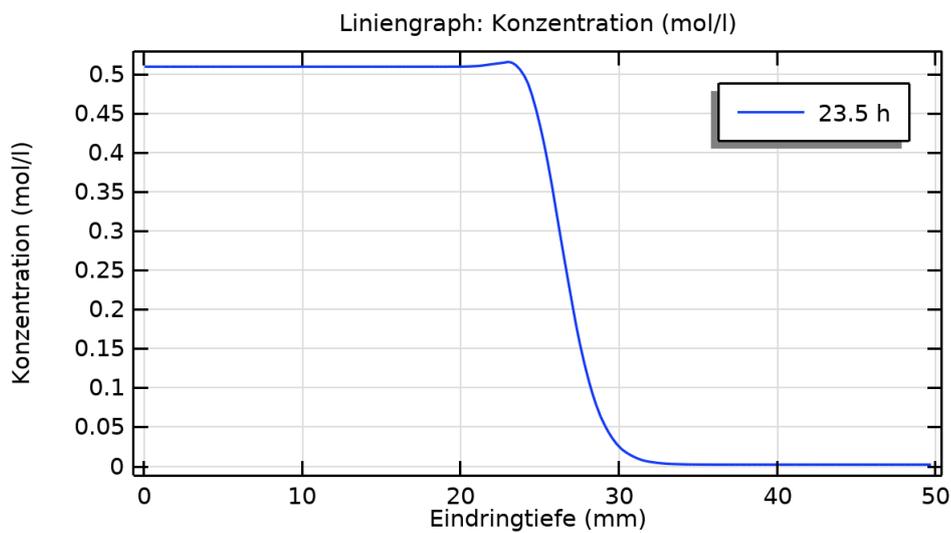


Abbildung F 9 Migration PK3 – 14d

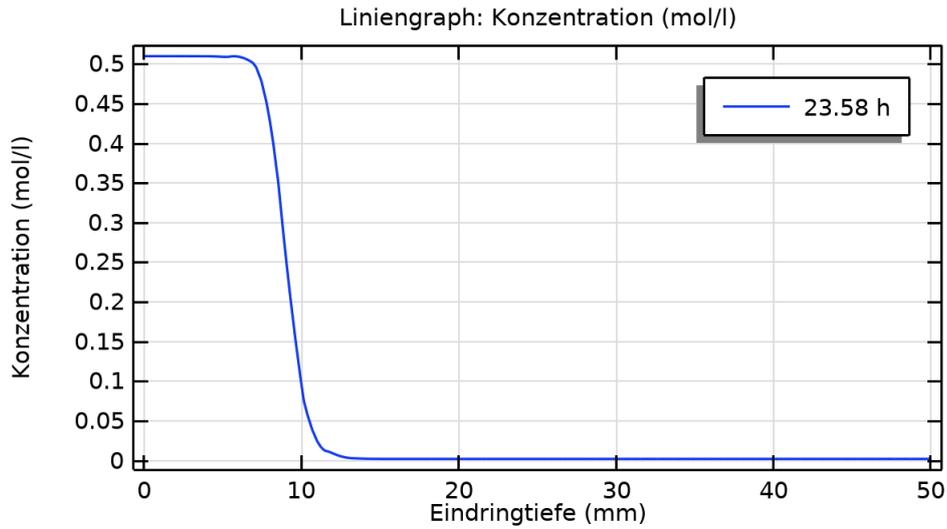


Abbildung F 10 Migration PK4 – 0d

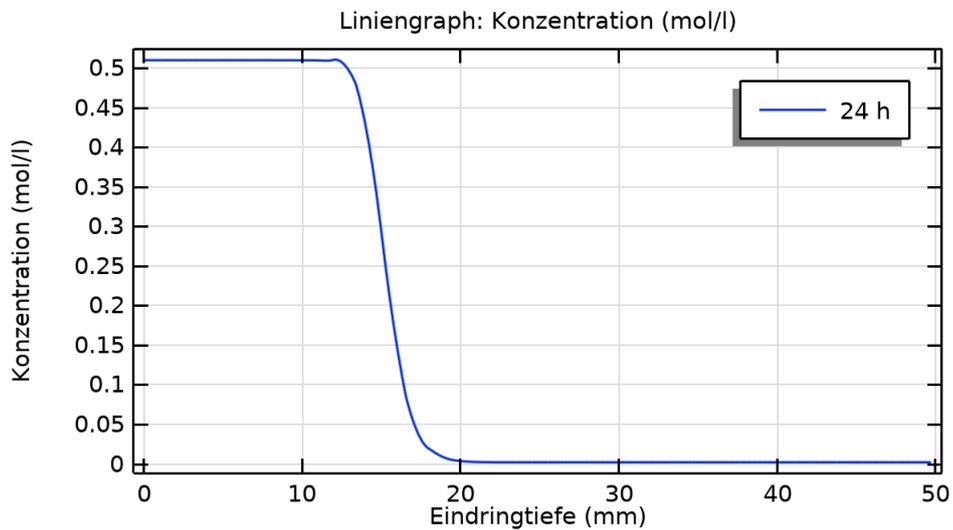


Abbildung F 11 Migration PK4 – 7d

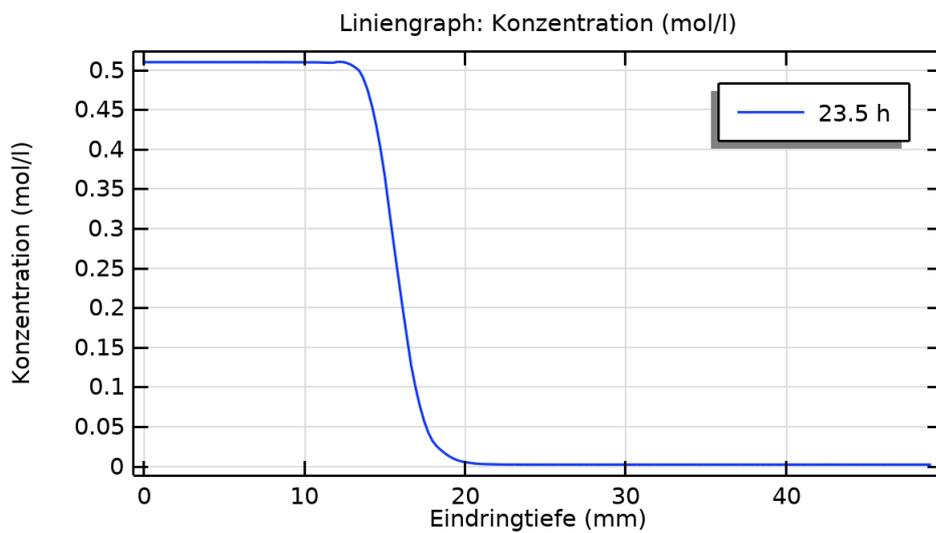


Abbildung F 12 Migration PK4 – 14d

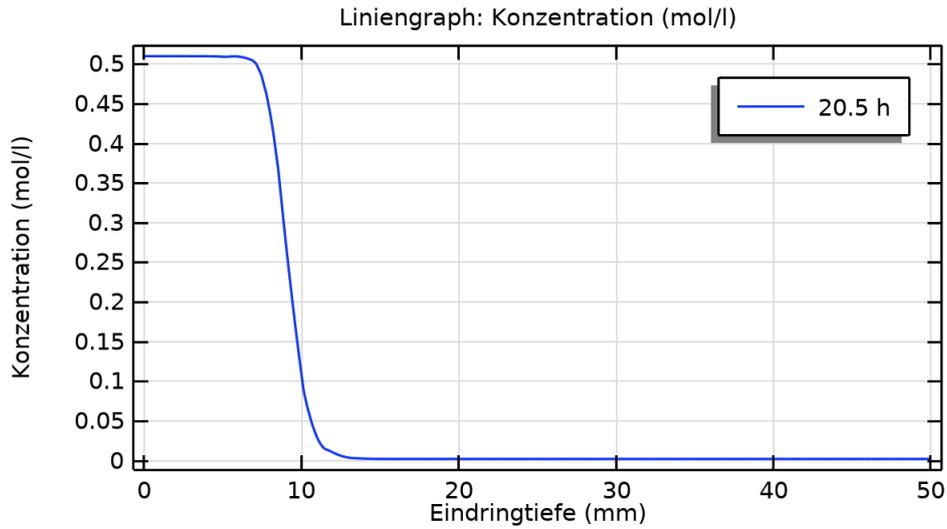


Abbildung F 13 Migration PK5 – 0d

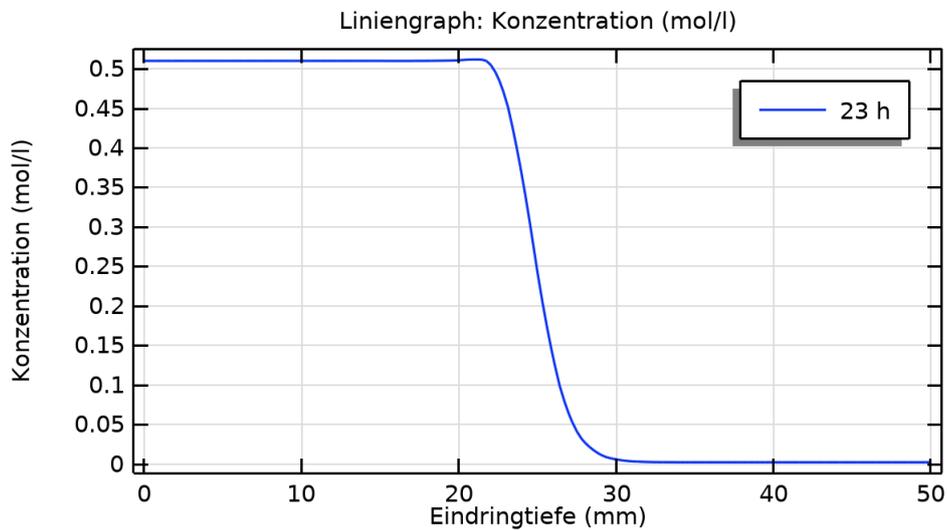


Abbildung F 14 Migration PK5 – 7d

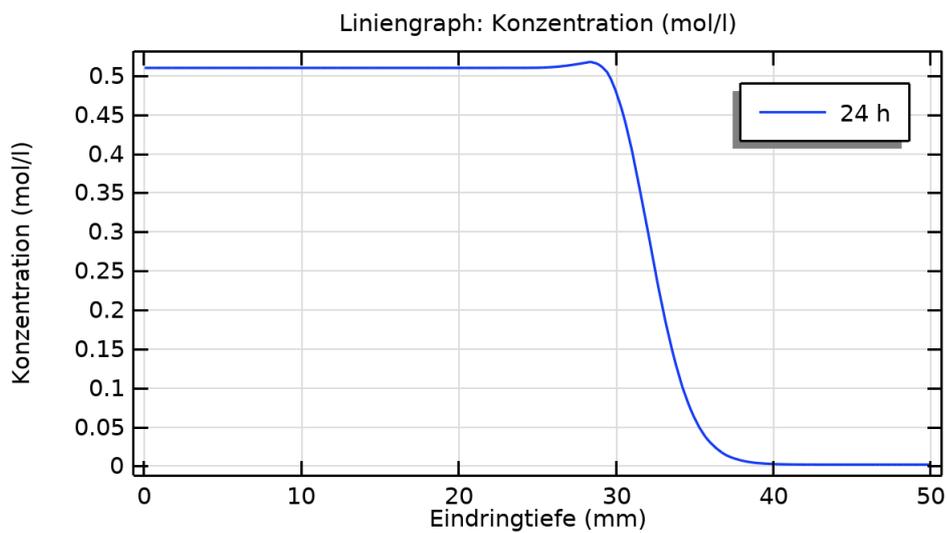


Abbildung F 15 Migration PK5 – 14d

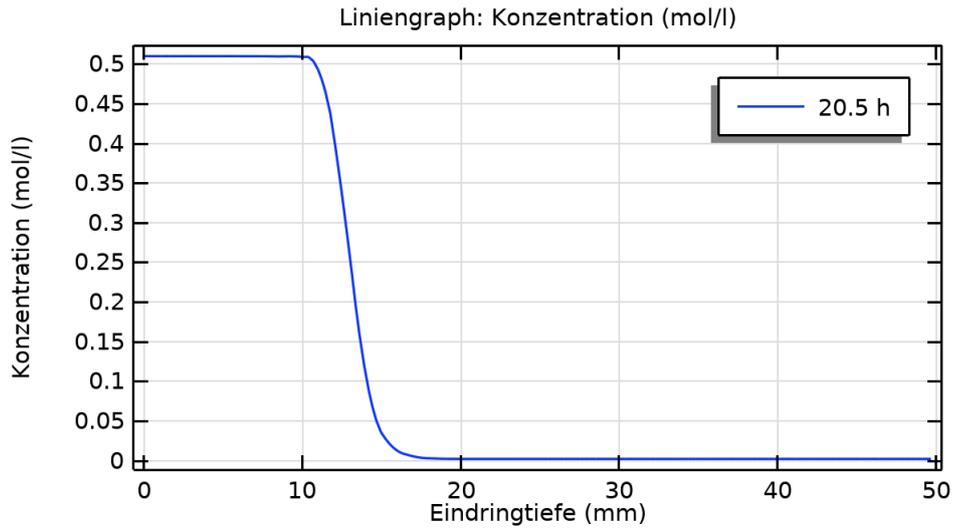


Abbildung F 16 Migration PK6 – 0d

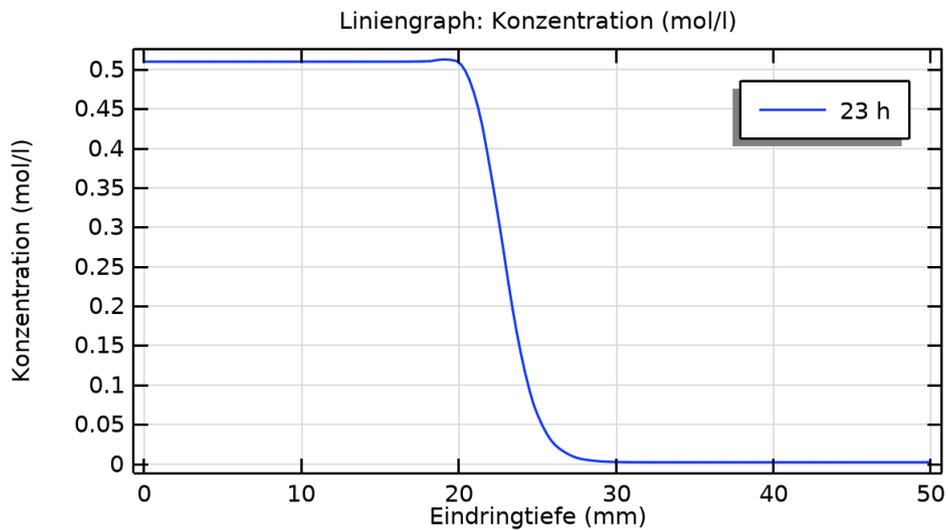


Abbildung F 17 Migration PK6 – 7d

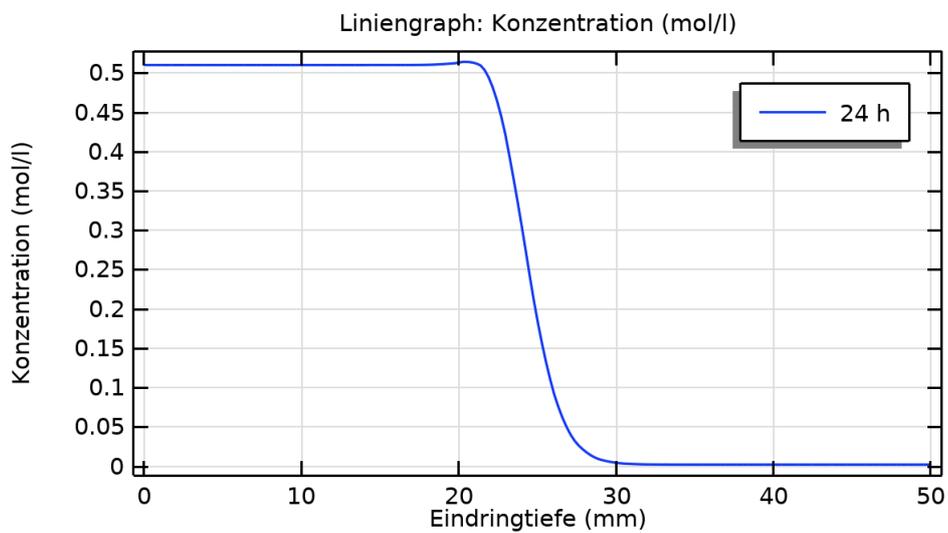


Abbildung F 18 Migration PK6 – 14d

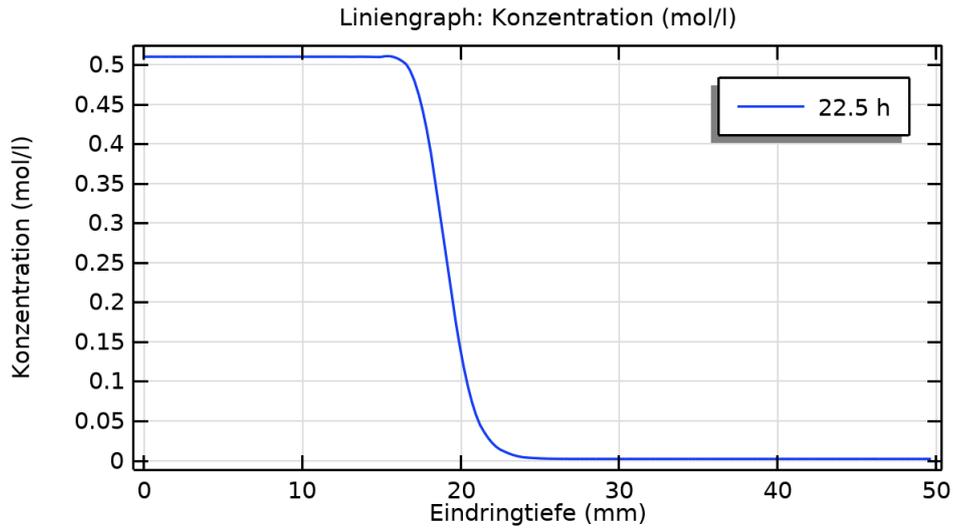


Abbildung F 19 Migration PK7 – 0d

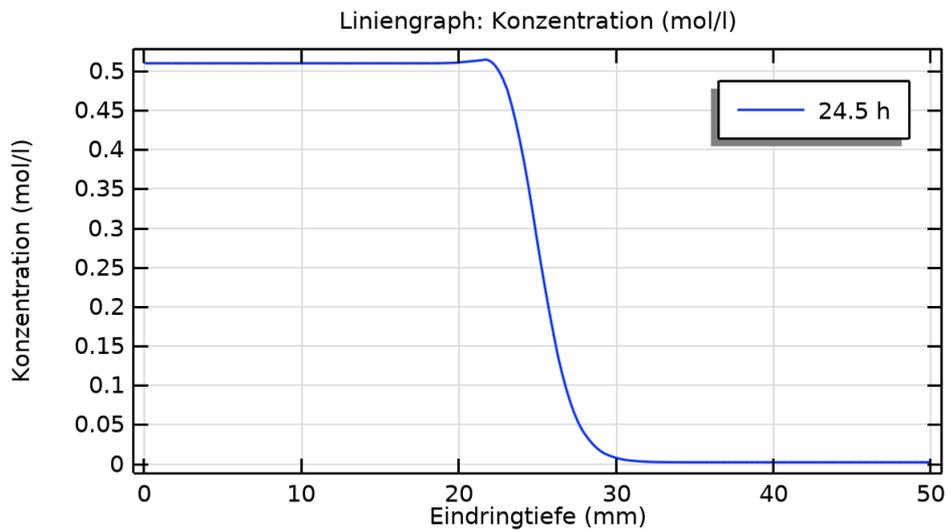


Abbildung F 20 Migration PK7 – 7d

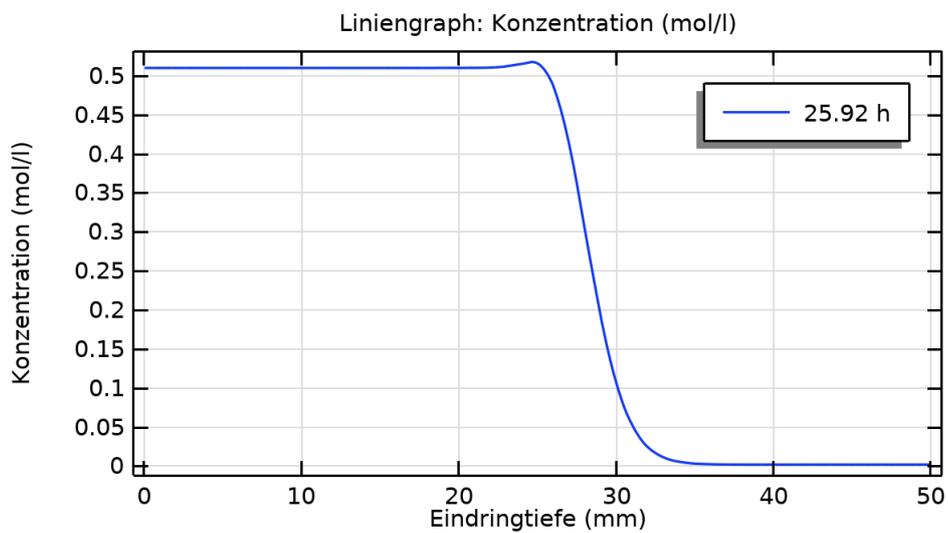


Abbildung F 21 Migration PK7 – 14d

keine Daten

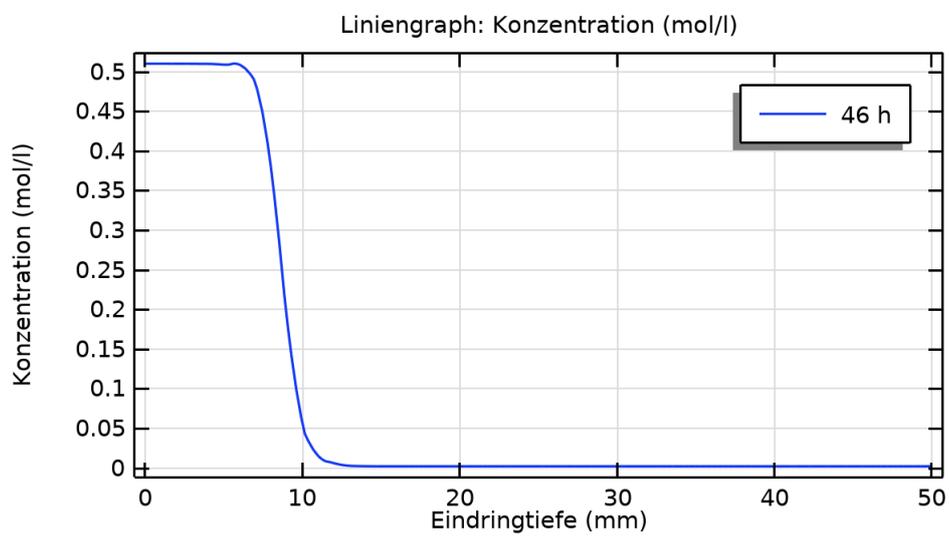


Abbildung F 22 Migration PK8 – 7d

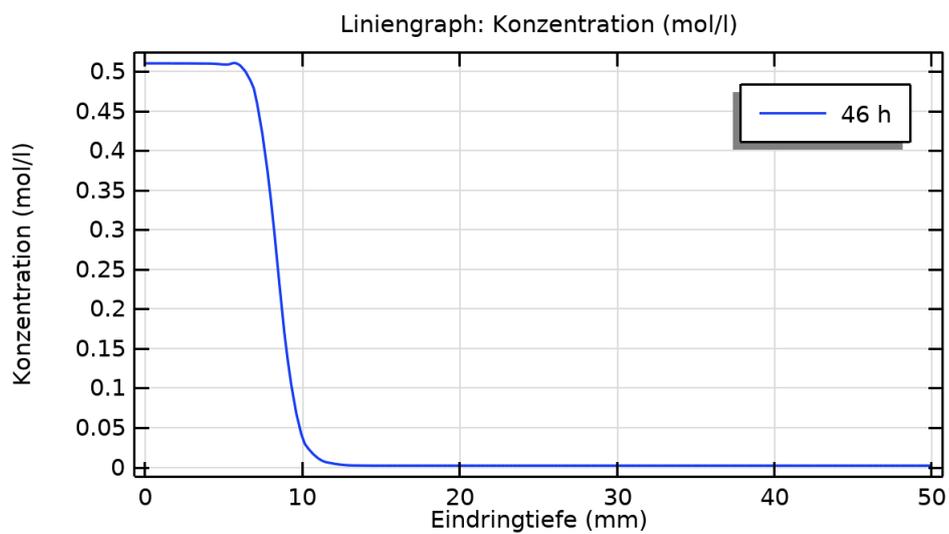


Abbildung F 23 Migration PK8 – 14d

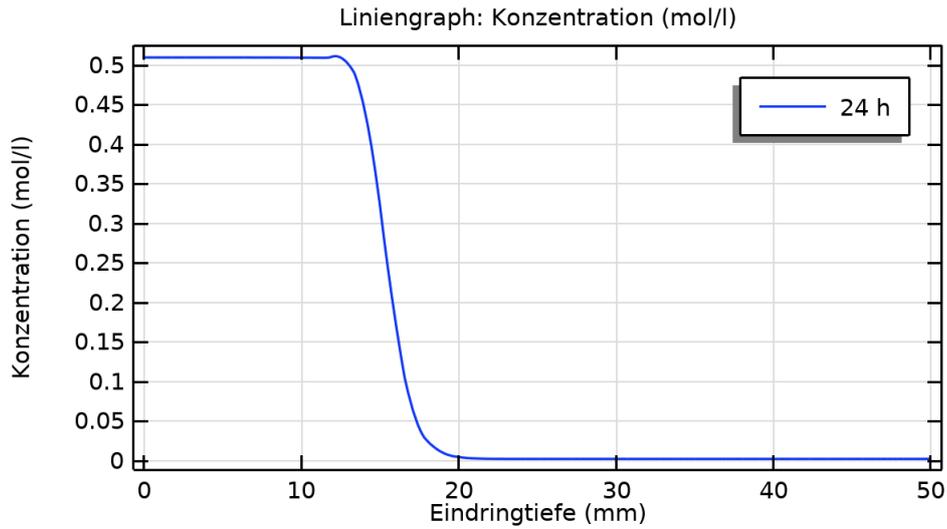


Abbildung F 24 Migration PK9 – 0d

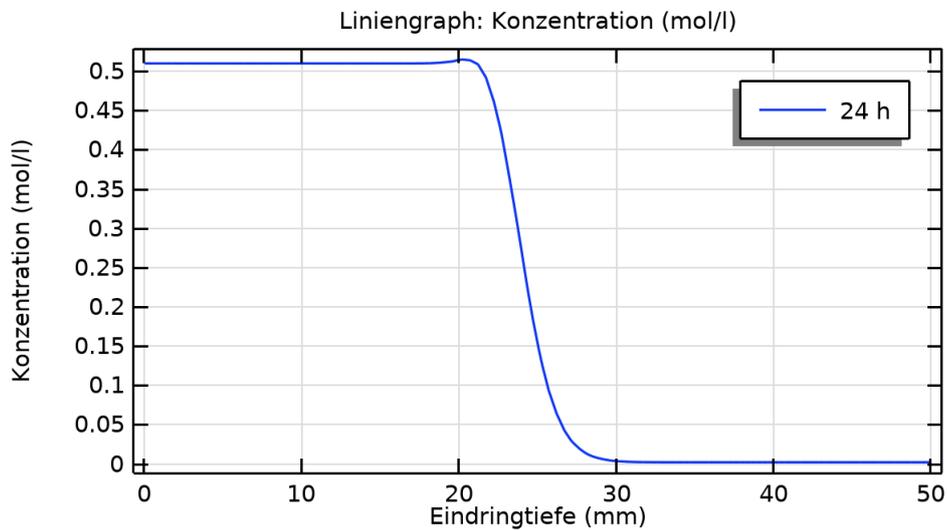


Abbildung F 25 Migration PK9 – 7d

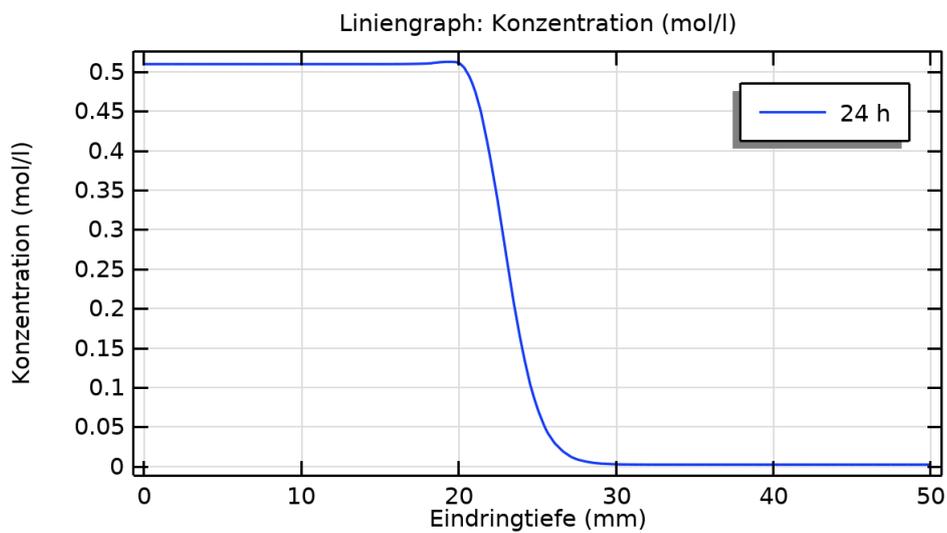


Abbildung F 26 Migration PK9 – 14d

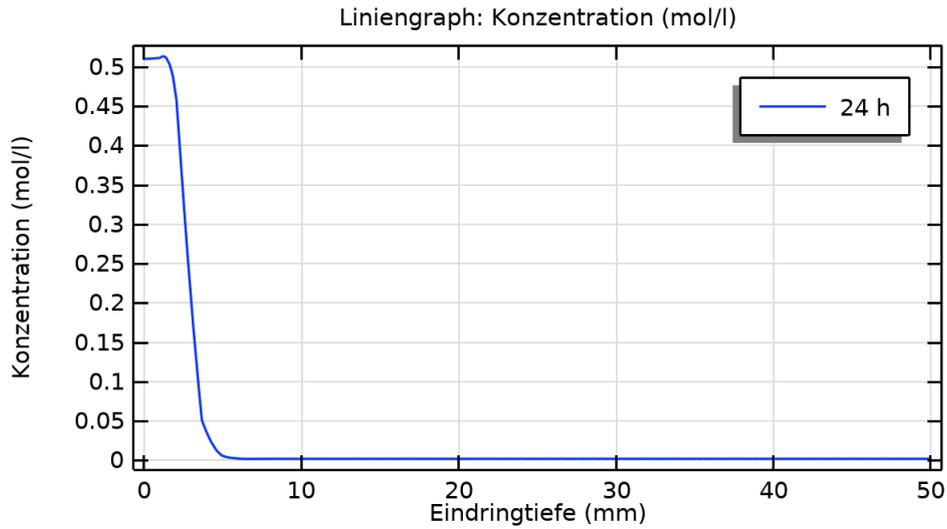


Abbildung F 27 Migration PK10 – 0d

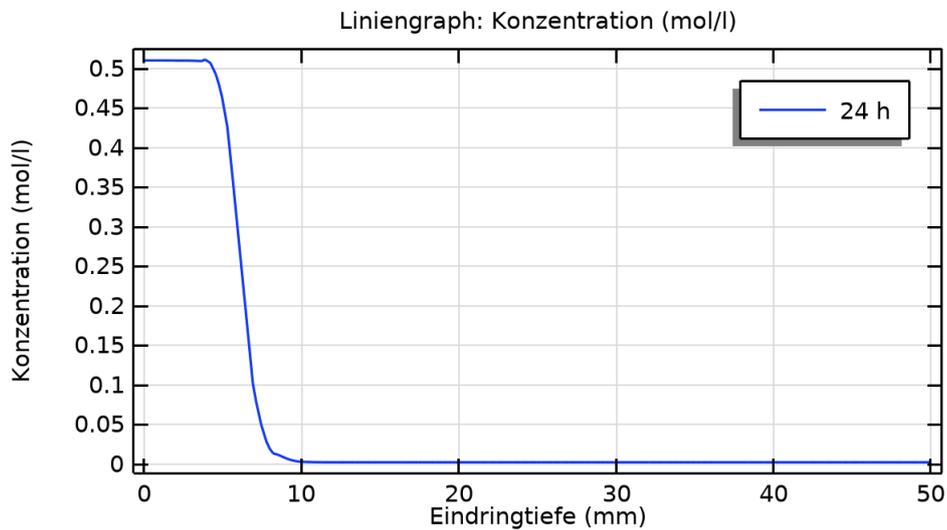


Abbildung F 28 Migration PK10 – 7d

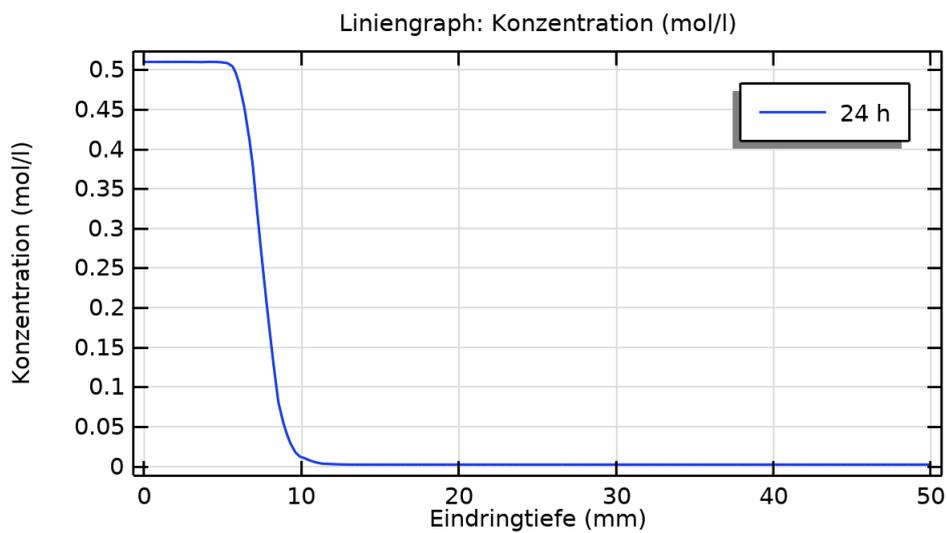


Abbildung F 29 Migration PK10 – 14d

ANHANG G. NUTZUNGS- UND VERWERTUNGSRECHTS

Erklärung des Nutzungs- und Verwertungsrechts der Abschlussarbeit

Abschlussarbeiten eines universitären Studiums unterliegen als selbstständige geistige Schöpfung der Verfasserin oder des Verfassers dem Urheberschutz. Urheber und damit Inhaber des Urheberrechts ist damit ausschließlich die Verfasserin bzw. der Verfasser der Arbeit. Die betreuende Professur ist daher nicht Urheber im urheberrechtlichen Sinn.

Auch das Nutzungs- und Verwertungsrecht an dem urheberrechtlich geschützten Werk obliegt der Verfasserin bzw. dem Verfasser der Arbeit. Damit entscheidet die Inhaberin bzw. der Inhaber des Urheberrechts über Nutzung und Verwertung, also über Vervielfältigung, Verbreitung und Bearbeitung der Abschlussarbeit. Das Recht der Nutzung und Verwertung eines urheberrechtlich geschützten Werkes ist durch den Urheber übertragbar.

Da Ihre Abschlussarbeit im Kontext mit der Forschungs- und Lehrtätigkeit dieser Professur steht, ist es in unserem Sinne mit Ihren Ergebnissen weiter arbeiten zu können. **Daher bitten wir Sie, uns das Nutzungs- und Verwertungsrecht an Ihrer Abschlussarbeit zu übertragen.**

Hiermit übertrage ich der betreuenden Professur Baustofftechnologie (Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina und ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern) an der HafenCity Universität Hamburg das Nutzungs- und Verwertungsrecht an meiner Abschlussarbeit für Lehre, Forschung, Gutachten und Publikationen.

Vorname: Manuel	Nachname: Prischtscheptschuk	Matrikelnummer: 6031181
--------------------	---------------------------------	----------------------------

Titel der Bachelorarbeit:

Modellierung eines Frostangriffes auf Beton als Zweischichtsystem mittels FEM auf Basis von empirischen Daten aus CDF und modifizierten Migrationsprüfungen

Hamburg, 21.12.2021

Ort, Datum



Unterschrift

ANHANG H. SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG**Erklärung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterthesis mit dem Titel

Modellierung eines Frostangriffes auf Beton als Zweischichtsystem mittels FEM auf Basis
von empirischen Daten aus CDF und modifizierten Migrationsprüfungen

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe.

Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Vorname: Manuel	Nachname: Prischtscheptschuk	Matrikelnummer: 6031181
Ort, Datum Hamburg, 21.12.2021	Unterschrift 	