



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

DIPLOMARBEIT

Neutronenradiographische Analyse des Trocknungsverhalten von ausgewählten Estrichbaustoffen

Ausgeführt am

Atominstitut der TU Wien

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Phys. Dr.rer.nat. Hartmut Abele

und

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Zawisky

von

Lorenz KAPRAL

12. Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Motivation	6
1.2	Überblick	6
1.2.1	Calciumcarbid-Verfahren (CM-Messung)	7
1.2.2	Elektronisches Verfahren	7
1.2.3	Gravimetrische Feuchtemessung (Darr-Methode)	8
2	Physikalischer Hintergrund	9
2.1	TRIGA Mark-II Forschungsreaktor	9
2.2	Neutronenradiographie	10
2.3	Diffusionsgesetz	12
3	Versuchsaufbau	13
3.1	Aufbau der Neutronen-Radiographie-Anlage	13
3.2	Probenpositionierung	14
3.3	Proben und Präparation	15
3.3.1	Lafarge CEM I, Portland-Zement	15
3.3.2	Ardex A38, 4-Stunden-Estrichbindemittel	16
3.3.3	Knauf FE50 Largo, Calciumsulfat-Fließestrich	16
3.3.4	Probenpräparation	17
3.4	Lagerung	19
4	Messung und Auswertung	20
4.1	Neutronenradiographie	21
4.1.1	Verarbeitung der Daten	21
4.1.2	Messgenauigkeit der neutronenradiographischen Messung	23
4.1.3	Messdaten der radiographischen Messung	25
4.2	Messdaten der CM-Methode	34
4.3	Messdaten der gravimetrischen Methode	35
4.4	Messdaten der elektronischen Messung	35
4.5	Gegenüberstellung der Messmethoden	39
4.5.1	Darr-Methode im Vergleich zur CM-Methode	40
4.5.2	Darr-Methode im Vergleich zur radiographischen Messung	41
4.5.3	Radiographische Messung im Vergleich zur Messung mit den elektronischen Feuchtigkeitssensoren	41
5	Alternative Messmethoden	44
5.1	3D-Tomographie	44
5.1.1	Tomographische Messung	44
5.1.2	Interpretation der tomographischen Aufnahmen	47
5.2	Imaging Plate	47

6	Conclusio	49
7	Limitationen	49
7.1	Positionierung der Probe	49
7.2	Niedriger Wasserzementwert der CEM I-Proben des Januar 2018	52
7.3	Veränderung der Stahlrohr-Position in der Aufnahme	52
7.4	Defekter Feuchtigkeitssensor in der FE50-Probe	53
7.5	Probengröße bei tomographische Aufnahme	53
8	Anhang	55
8.1	Zusätzliches Bildmaterial	55
8.1.1	Tomographie	55
8.2	Messergebnisse vom Januar 2018	57
8.2.1	Neutronenradiographische Aufnahmen vom Januar 2018	57
8.2.2	Messergebnisse der elektronischen Messung vom Januar 2018	61
8.2.3	Gravimetrische Messung vom Januar 2018	63
8.2.4	CM-Messung vom Januar 2018	64
8.3	Datenblätter	64
8.3.1	Arbeitsanweisung des CM-Messgeräts	65
8.3.2	Datenblatt des Feuchtigkeitssensors	66
8.3.3	Datenblatt des CEM I - Portlandzements	74
8.3.4	Datenblatt des Knauf FE50 - Fließestrichs	75
8.3.5	Datenblatt des Ardex A38 - Estrichbindemittels	79
8.4	Verwendete Programmcodes zur Auswertung der gemessenen Daten	83
8.4.1	Ausrichtung der radiographischen Aufnahmen	88
8.4.2	Berechnung der Feuchtigkeitsverteilung	93
8.4.3	Erstellung der eingefärbten Bilder zur Visualisierung der Feuchtigkeitsverteilung	97

Abbildungsverzeichnis

1	Beschreibung der elektronischen Messung	8
2	Schematischer Aufbau der Radiographie-Anlage	13
3	Erklärung der Positionierung der Proben	14
4	Holzschalung zur Präparation der Proben	17
5	Position der Feuchtigkeitssensoren in der Probe	18
6	Relative Luftfeuchtigkeit der Proben nach dem Trocknungsprozess	19
7	Proben im Klimaschrank	20
8	Unbearbeitete Aufnahme	21
9	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)	22
10	Erklärung der verwendeten Werte für die Berechnung der Feuchtigkeitsverteilung	23
11	Abschätzung der Neutronenvielfachstreuung	24

Abbildungsverzeichnis

12	Feuchtigkeitsverlauf in der A38-Probe	25
13	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 11.12.2018	26
14	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 13.12.2018	26
15	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe) vom 17.12.2018	27
16	Feuchtigkeitsverlauf in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe	28
17	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe vom 11.12.2018 .	28
18	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe vom 13.12.2018 .	29
19	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1) vom 17.12.2018	29
20	Feuchtigkeitsverlauf in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe	30
21	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 11.12.2018 .	30
22	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 13.12.2018 .	31
23	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 17.12.2018 .	31
24	Feuchtigkeitsverlauf in der FE50-Probe	32
25	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 11.12.2018	32
26	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 13.12.2018	33
27	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 17.12.2018	33
28	Visualisierung der Messergebnisse der CM-Methode	34
29	Visualisierung der gravimetrischen Messung bzgl. der Masse der Probe .	35
30	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe gemessen durch Feuchtigkeits- sensoren	36
31	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=5/1)-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren	37
32	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=6/1)-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren	38
33	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Feuchtigkeits- sensoren	39
34	Darr-Methode im Vergleich zur CM-Methode	40
35	Darr-Methode im Vergleich zur radiographischen Messung	41
36	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe gemessen durch Neutronenra- diographie	42
37	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=5/1)-Probe gemessen durch Neutronenradiographie	42
38	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=6/1)-Probe gemessen durch Neutronenradiographie	43
39	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Neutronenra- diographie	43
40	3D-Darstellung der CEM I-Probe (G/Z=6/1)	45
41	Vertikaler Schnitt durch die 3D-Darstellung	45
42	Doppelter vertikaler Schnitt durch die 3D-Darstellung	46
43	Horizontaler Schnitt durch die 3D-Darstellung	46
44	Messung durch Imaging Plate der CEM I (G/Z=6/1)-Probe	48
45	Linienprofil der Messung durch Imaging Plate der CEM I (G/Z=6/1)-Probe	48
46	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe mit Positionie- rungsfehler	50

Abbildungsverzeichnis

47	Auswirkung einer Verdrehung des Bildes auf das Histogramm	51
48	Auswirkung einer Verdrehung des Bildes	51
49	Differenz zwischen zwei tomographischen Aufnahmen	52
50	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Feuchtigkeits- sensoren ohne Sensorfehler	53
51	Erklärung des Fehlers während der tomographischen Messung	54
52	Bearbeiteter horizontaler Schnitt durch die Probe	55
53	3D-Darstellung der CEM I-Probe	55
54	3D-Darstellung der CEM I-Probe	56
55	Vertikaler Schnitt durch die 3D-Darstellung unter Anwendung eines Gauß- Filters	56
56	Vertikaler und Horizontaler Schnitt durch die 3D-Darstellung	56
57	Vertikaler Schnitt durch die 3D-Darstellung	57
58	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 11.01.2018	57
59	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 12.01.2018	58
60	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 18.01.2018	58
61	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 19.01.2018	59
62	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 11.01.2018	59
63	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 12.01.2018	60
64	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 18.01.2018	60
65	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 19.01.2018	61
66	Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom Januar 2018	61
67	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=/5/1)-Probe vom Januar 2018	62
68	Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=/6/1)-Probe vom 19.01.2018	62
69	Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom Januar 2018	63
70	Visualisierung des Masseverlust der Proben vom Januar 2018	63
71	Visualisierung der Messergebnisse der CM-Methode	64

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die experimentelle Untersuchung der Desorption und Absorption von Flüssigkeiten in Baustoffen ist Kernthema der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Bauklebstoffe (IVK). Aus diesem Grund motivierte die TKB dieses Projekt. Die Evaluierung einer genaueren Belegreife der Estriche resultiert in kürzeren Bauzeiten und einer Reduktion von auftretenden Fehlern.

[12] Ein Zementestrich ist belegreif, wenn dieser eine Restfeuchte kleiner 2,0 %CM aufweist. Für beheizte, bzw. unbeheizte Calciumsulfatestriche ($CaSO_4$) liegt dieser Wert bei maximal 0,3 %CM bzw. 0,5 %CM. Auf die Ermittlung der Restfeuchte wird in Kapitel 1.2.1 eingegangen.

Einige Faktoren bestimmen die Zeit bis zur Belegreife eines Estrichs:

- Luftfeuchtigkeit
- Umgebungstemperatur
- Eigenschaften des verwendete Bindemittel
- Fließmittel oder Luftporenbildner

Der Fokus dieses Projektes ist die Testung der Neutronenradiographie als alternative Methode zur Analyse der Feuchtigkeit einer Baustoffprobe und ein Vergleich dieser Methode mit den bisher verwendeten Methoden soll die Verlässlichkeit der neuen Methode beurteilen.

Im Atominstitut der TU Wien befindet sich ein TRIGA Mark-II Forschungsreaktor, welcher in Kapitel 2.1 beschrieben wird. Während eines Kernspaltungsprozesses werden Neutronen frei, die durch optische Elemente auf eine Probe kollimiert werden. Anschließend werden die Neutronen abhängig von den Neutronenwirkungsquerschnitten der Bestandteile des Probenmaterial gestreut. Ein zweidimensionaler Neutronen-Detektor misst die Anzahl der transmittierten Neutronen, somit kann ein Bild der Probe erstellt werden. Wasserstoff weist einen sehr hohen Neutronenstreuquerschnitt auf und kann daher durch diese Methode gut detektiert werden. Daher kann mit Hilfe der Neutronenradiographie die Wasserstoff-, bzw. die Feuchtigkeitsverteilung in einer Probe sichtbar gemacht werden. Eine örtliche Verteilung des Wasser in der Estrich-Probe gibt Auskunft, wie viel Wasser während des Trocknungsprozesses sich im Baustoff fest bindet, bzw. wie viel Wasser noch potentiell verdunsten kann. Daraus wird der Feuchteanteil der Probe ermittelt.

1.2 Überblick

Um die bestehende Feuchtigkeit im Estrich zu überprüfen, werden folgende Methoden derzeit bevorzugt angewendet:

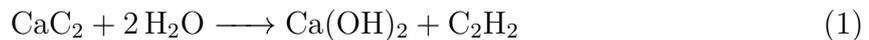
- Calciumcarbid-Verfahren
- Elektronisches Verfahren
- Darr-Methode

1.2.1 Calciumcarbid-Verfahren (CM-Messung)

[2] Das Calciumcarbid-Verfahren ist eine zuverlässige Feldmethode zur Feuchtemessung und somit auch zur Feststellung der Belegereife.

[8] Eine Arbeitsanweisung zur richtigen Durchführung einer CM-Messung befindet sich im Anhang im Kapitel 8.3.1.

Vor der Messung muss eine bestimmte Menge der feuchten Probe zerkleinert werden. [9] Anschließend wird die Probe in einem Druckbehälter, der meist eine stabile Stahlflasche ist, mit mehreren Stahlkugeln und einer Calciumcarbid-Glaskapsel luftdicht verschlossen. Durch Schütteln des Druckbehälters brechen die dünnwandige Calciumcarbid-Glaskapsel, wodurch das Calciumcarbid mit dem vorkommenden Wasser gemäß Gleichung 1 reagiert:



CaC_2 ... Calciumcarbid

H_2O ... Wasser

$\text{Ca}(\text{OH})_2$... Calciumhydroxid

C_2H_2 ... Acetylen

Es bildet sich gasförmiges Acetylen abhängig von der Wassermenge in der Probe. Der daraus folgende Druckanstieg wird über ein Manometer bestimmt und mit einer Wertetabelle einem Feuchtegehalt in M% zugeteilt.

Für dieses Experiment wurde das CM-Gerät von der Firma 'Riedel-de Haen' verwendet.

1.2.2 Elektronisches Verfahren

Es werden für die elektronische Bestimmung der Feuchte in Estriche meist zwei verschiedene Methoden angewendet.

1.2.2.1 Elektronische Widerstandsmessung zur Feuchtemessung

Bei der Widerstandsmessung werden zwei Elektroden im Estrich angebracht. Der Widerstand zwischen den Elektroden wird anschließend gemessen. Da Wasser und Estrich verschiedene elektrische Widerstände aufweisen, kann auf die relative Feuchtigkeit rückgeschlossen werden.

1.2.2.2 Kapazitive Feuchtemessung

Die kapazitive Feuchtemessung nutzt die Änderung der Kapazität der Kondensatorplatten, wenn sich Wasser im Streufeld des Kondensator befindet. Ein Material mit hohem Feuchtegehalt weist ebenso eine höhere Dielektrizitätskonstante auf. Ein Dielektrikum in der Nähe eines Kondensators verändert dessen Kapazität, aus welcher die relative Feuchtigkeit der Probe berechnet wird. [24] Für die elektronische Messung wurde für dieses Projekt die kapazitive Methode bevorzugt. Es wurden der Low Voltage Humidity Sensor der Serie HIH-5030 bei einer Versorgungsspannung von 5 V verwendet. Das zugehörige Datenblatt befindet sich im Anhang Kapitel 8.3.2

Der Messvorgang erfolgt durch Spannungsmessung an den Sensorausgängen. Aus dem gemessenen Wert kann mit Hilfe des technischen Datenblatts ein relativer Feuchtigkeitswert mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%RH$ berechnet werden. Außerdem ist zu beachten, dass dieser Sensor für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 11 % RH und 89 %RH optimiert ist.

In Abbildung 1 ist die elektronische Messung einer Probe zu sehen:



Abbildung 1: Die im Estrich eingebauten Feuchtigkeitssensoren werden mit einem Labornetzteil mit einer Spannung von 5 V versorgt und mit einem Multimeter wird deren Spannungsabfall, der proportional zur Kapazität der Sensoren ist, gemessen.

1.2.3 Gravimetrische Feuchtemessung (Darr-Methode)

[5] Die Darr-Methode ist ein exaktes Verfahren zur gravimetrischen Messung der Feuchte von Baustoffen.

Aus dem Baustoff wird eine Probe entnommen und anschließend im Trockenschrank bei einer materialabhängigen Temperatur (in diesem Experiment $45^\circ C$) getrocknet, sodass das freie Wasser vollkommen desorbiert ist. Gleichzeitig wird das Gewicht der Probe in regelmäßigen Abständen bestimmt, bis die Masse der Probe nicht mehr variiert. Aus der Differenz zwischen der Masse der entnommenen Probe zur getrockneten wird der Feuchtigkeitsgehalt der Probe bestimmt.

[7] Zur Berechnung des Feuchteanteils der Probe wird Gleichung 2 verwendet.

$$\psi_m = \frac{m_w}{m_{tr}} \cdot 100 = \frac{m - m_{tr}}{m_{tr}} \cdot 100 \quad (2)$$

ψ_m ... Feuchteanteil des Wasser in [M%]

m ... Gesamtmasse der Probe in [g]

m_w ... Masse des Wasseranteils der Probe in [g]

m_{tr} ... Masse der trockenen Probe in [g]

In Gleichung 2 wird das Verhältnis der Masse des im Stoff enthaltenen Wasser zur Gesamtmasse gebildet. Um den Anteil des Wassers vom Volumen der Probe zu berechnen wird Gleichung 3 verwendet:

$$\psi_V = \frac{m_w}{V} \cdot 100 \quad (3)$$

ψ_V ... Feuchteanteil des Wasser in [V%]

m_w ... Masse des Wasseranteils der Probe in [g]

V ... Volumen der Probe in [cm^3]

Diese Verhältnisse werden mit 100 multipliziert und als %-Angaben dargestellt. Die Messung des Feuchteanteils bezogen auf die Masse der Probe ist jedoch genauer, weil die Masse eines Estrichs bei gleichen Außenmaßen leicht variiert, weil der Probekörper inhomogen ist.

2 Physikalischer Hintergrund

2.1 TRIGA Mark-II Forschungsreaktor

[1] TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) ist ein Forschungsreaktor im Schwimmbad-Design, der von General Atomics angefertigt wird.

Ein Atomreaktor erzeugt Neutronen durch Kernspaltungsprozesse. Protonen und Neutronen eines Atomkerns sind durch die starke Wechselwirkung, die nur eine sehr begrenzte Reichweite hat, gebunden. Solange die Kernkraft der Coulombkraft überwiegt, ist ein Atom stabil.

Wird ein Neutron jedoch in einem sehr schweren Kern, wie z.B. Uran ^{235}U , eingefangen, so wird dieser durch die gewonnene Energie zu einem hochenergetischen, instabilen Zustand angeregt. Nach kürzester Zeit regt sich der Atomkern ab und das Atom zerfällt in stabilere Bestandteile, wobei meist neue, freie Neutronen entstehen. Dabei wird Energie abhängig von der Differenz der Bindungsenergie vor und nach dem Zerfall ebenfalls frei. Diese Neutronen können wiederum weitere Kernspaltungen auslösen, was die Grundlage der nuklearen Kettenreaktion ist.

Im Atominstitut der TU Wien wird ein Teil dieser thermischen Neutronen für Forschungszwecke durch neutronenoptische Systeme gebündelt. Der Reaktor in Wien ist

bereits 35 Jahre im Einsatz und wird mit einer Leistung von 250 kW betrieben. Ein thermaler Neutronenfluss von $1,3 \cdot 10^5$ Neutronen/(cm^2s) gewährleistet stabile Messvorgänge.

2.2 Neutronenradiographie

[1] Neutronenradiographie bietet ein effizientes Werkzeug für die zerstörungsfreie Analyse von Proben. Ein Neutronenstrahl wird auf das Probenmaterial gerichtet und von einer zweidimensionalen Fotoplatte aufgenommen. Das aufgenommene Bild enthält Informationen von der inneren Struktur der Probe. Vorteilhaft dabei ist, dass Neutronen von vielen leichten Stoffen, wie Wasserstoff oder Bor gestreut werden, aber durch viele schwerere Materialien transmittieren.

Die Absorption der Neutronen folgt dem Absorptionsgesetz, das auch bei elektromagnetischen Wellen und anderen Teilchenströmung verwendet wird. Im zweidimensionalen Fall wird das Absorptionsgesetz als Gleichung 4 geschrieben.

$$\Phi(x, y, E) = \Phi_0(x, y, E) \cdot e^{-\sum(x, y, E) \cdot d} \quad (4)$$

$\Phi(x, y, E)$... Neutronenflussdichte nach der Probe in [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

$\Phi_0(x, y, E)$... Neutronenflussdichte vor der Probe in [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

d ... Dicke der Probe in [cm]

$\sum(x, y, E)$... Summe der makroskopischen Neutronenstreuquerschnitte in [cm^{-1}]

wobei:

$$\sum(x, y, E) = \sum_i \Sigma_i \quad (5)$$

und:

$$\Sigma_i = \frac{N_A \sigma}{A} \cdot \rho_i \quad (6)$$

N_A ... Avogadro-Konstante = $6,022\,140\,857 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1}$

σ ... Neutronenquerschnitt in [cm^2]

A ... Moleare Masse in [mol g^{-1}]

ρ_i ... Dichte in [gcm^{-3}]

Dabei ist zu beachten, dass der Neutronenstreuquerschnitt nicht nur von dem chemischen Element, sondern auch von den spezifischen Isotop abhängig ist.

Da Wasserstoff Neutronen aufgrund seiner ähnlichen Masse stark streut, ist dieser bei neutronenradiographischen Aufnahmen gut zu erkennen. Daher eignet sich diese Methode zur Analyse der Feuchtigkeitsverteilungen in Probenmaterial. Da Wasser aus zwei Teilen Wasserstoff und einem Teil Sauerstoff besteht, gilt dies ebenfalls für Wasser.

2 Physikalischer Hintergrund

Beim Trocknungsvorgang von Estrich desorbiert ein Anteil des ursprünglich beinhaltenen Wassers. Jedoch bleibt ein Restanteil als freies und gebundenes Wasser im Material. Die trockene Probe streut Neutronen aufgrund dieses Wassers, aber auch zum geringen Teil wegen des restlichen Materials. Um ein Bild ausschließlich von der Verteilung des desorbierten Wassers zu erstellen, muss also der Anteil, der nach der Trocknung in der Probe bleibt, entfernt werden. Aus diesem Grund wird das aufgenommene Bild durch eine Aufnahme der getrockneten Probe in gleicher Positionierung dividiert, um die Feuchtigkeitsverteilung der Probe zu erhalten. Aus Gleichung 4 folgt Gleichung 7, die die gemessene Neutronenflussdichte der Feuchtigkeitsverteilung des desorbierten Wassers darstellt:

$$\Phi_{desorb}(x, y, E) = e^{-\sum(x,y,E)_{desorb} \cdot d} = \frac{\Phi_0(x, y, E) \cdot e^{-\sum(x,y,E)_{desorb+} - desorb \cdot d}}{\Phi_0(x, y, E) \cdot e^{-\sum(x,y,E)_{-desorb} \cdot d}} \quad (7)$$

$\Phi_{desorb}(x, y, E)$... berechnete Intensität des desorbierten Wassers in [$cm^{-2}s^{-1}$]

$\Phi_0(x, y, E)$... Neutronenflussdichte vor der Probe in [$cm^{-2}s^{-1}$]

d ... Dicke der Probe in [cm]

$\sum(x, y, E)_{desorb}$... Summe aller Streuquerschnitte des desorbierten Wassers in [cm^{-1}]

$\sum(x, y, E)_{desorb+} - desorb$... Summe aller Streuquerschnitte des gesamten Wassers in [cm^{-1}]

$\sum(x, y, E)_{-desorb}$... Summe aller Streuquerschnitte des nicht desorbierten Wassers in [cm^{-1}]

Diese Gleichung liefert eine zweidimensionale Intensitätsverteilung proportional zum Wasser, das im Trocknungsprozess desorbiert ist.

Nach der Bildung des Logarithmus folgt aus Gleichung 7 mit Hilfe von Gleichung 6:

$$\ln(\Phi_{desorb}(x, y, E)) = -\frac{N_A \sigma}{A} \cdot \rho_i \cdot d \quad (8)$$

Daraus kann die gemessene Dichte des Wassers im Materialstoff berechnet werden:

$$\rho_i = -\frac{\ln(\Phi_{desorb}(x, y, E)) \cdot A}{N_A \sigma \cdot d} \quad (9)$$

Das Verhältnis der gemessenen Wasserdichte zur tatsächlichen Dichte von Wasser ρ_{H_2O} gibt den Wasseranteil bezüglich der Masse der Probe an:

$$\Psi_m = \frac{\rho_i}{\rho_{H_2O}} \quad (10)$$

[3] Es wurde für die Berechnung der Neutronenwirkungsquerschnitt σ von Wasser von 168,12 barn verwendet.

Molare Masse A von Wasser beträgt 18 g/mol.

2.3 Diffusionsgesetz

Auch ohne Energiezufuhr findet in einem System ein Teilchenaustausch passiv statt. Die Diffusion beruht auf der thermischen Bewegung und dem entropischen Prinzip.

Die thermische Bewegung, die auch Brownsche Bewegung genannt wird, beschreibt den ständigen Energieaustausch durch Stöße in der Materie und den ununterbrochenen Ortswechsel der Teilchen. Temperatur und Aggregatzustand beeinflussen das Ausmaß dieser Bewegungen.

Die Bewegung eines einzelnen Teilchen ist zufällig, da durch die zahlreichen Stoßprozesse die Richtung des Teilchen ständig geändert wird. Jedoch kann der Mittelwert der Teilchen in eine bestimmte Richtung driften. Folglich kann ein Teilchenfluss in eine Richtung entstehen, bis das thermodynamische Gleichgewicht erreicht ist. Der zweite Satz der Thermodynamik besagt, dass Systeme Zustände mit maximaler Entropie anstreben. Die Entropie ist eine fundamentale thermodynamische Zustandsgröße, die in der statistischen Mechanik als Zahl der energetisch gleichwertigen Mikrozustände in einem Makrozustand beschrieben wird. Ein hohe Zahl der Mikrozustände entspricht einer hohen Entropie. Je höher also die Zahl der Mikrozustände in einem Makrozustand ist, desto statistisch wahrscheinlicher ist dieser, da es mehr Möglichkeiten für dieses Fall gibt. Aus diesem Grund pendelt sich das Gleichgewicht meist bei Gleichverteilung der Konzentration der Teilchen ein, da geordnete Systeme eine niedrigere Entropie als ungeordnete Systeme aufweisen. Diffusion führt zu einer Entropiezunahme im System.

Das erste Fick'sche Gesetz beschreibt die dadurch entstehende Teilchenstromdichte:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (11)$$

J ... Teilchenstrom in $[mol\ m^{-2}\ s^{-1}]$

D ... Diffusionskonstante in $[m^2\ s^{-1}]$

$\frac{\partial c}{\partial x}$... örtliche Änderung der Teilchenkonzentration in $[mol\ m^{-4}]$

Mithilfe der Kontinuitätsgleichung $\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x}$ aus Gleichung 11 das Diffusionsgesetz hergeleitet werden:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (12)$$

$\frac{\partial c}{\partial t}$... zeitliche Änderung der Konzentration $[mol\ m^{-3}\ s^{-1}]$

D ... Diffusionskonstante in $[m^2\ s^{-1}]$

$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$... quadratische örtliche Änderung der Teilchenkonzentration in $[mol\ m^{-5}]$

3 Versuchsaufbau

Die Neutronen-Radiographie-Station des Atominstutts der TU Wien befindet sich an der Thermalsäule des TRIGA- Reaktors. Ein Kollimator führt durch einen 1,2 m langen Graphit-Würfel und misst einen Querschnitt von (10 cm x 10 cm). Die Schutzhülle des Kollimators besteht aus Kadmium, das ein starker Neutronenabsorber ist. Der zweite Teil des Kollimators ist an der Betonöffnung an der Thermalsäule befestigt; dieser ist zylinderförmig mit einem Durchmesser von 8 cm. Aus sicherheitstechnischen Gründen ist das Kollimatorrohr außerhalb des Betriebs mit einem Shutter verschlossen.

3.1 Aufbau der Neutronen-Radiographie-Anlage

Abbildung 2 zeigt einen Neutronen-Radiographie-Anlage der TU Wien.

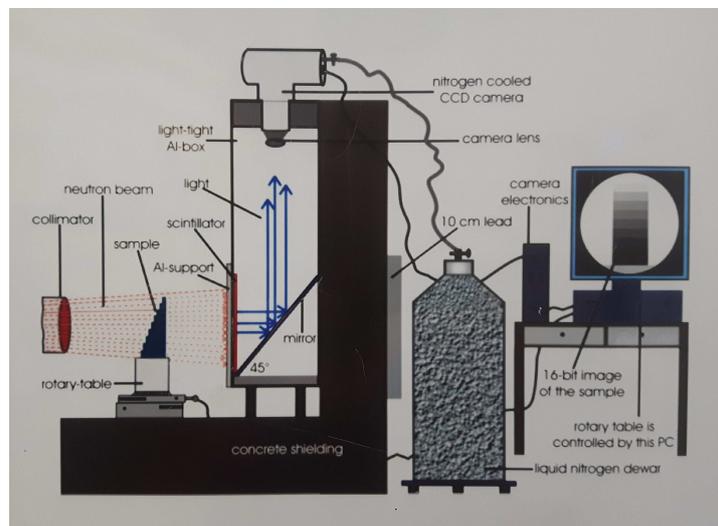


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Neutronen-Radiographie-Anlage der TU Wien

Durch die Kernspaltungsreaktionen im TRIGA-Reaktor entstehen Neutronen, die durch ein optisches System auf den Probenkörper kollimiert werden. Die Probe wird auf ein verdrehbares Goniometer aus Aluminium gestellt, das ausschließlich für die Tomographie in Verwendung ist. In der Probe werden die Neutronen abhängig vom Streuquerschnitt des Probenmaterials gemäß Gleichung 4 gestreut. Anschließend treffen die transmittierten Neutronen auf einen zweidimensionalen Szintillationsdetektor mit einer Auflösung von $200 \mu\text{m}$. Üblicherweise besteht dieser aus Lithiumiodid, das einen sehr hohen Neutronenwirkungsquerschnitt aufweist. Nach der Aufnahme der transmittierten Neutronen im Detektor entstehen geladene Teilchen durch Kernreaktionsprozesse, die über hohe Spannung in ein Lichtsignal umgewandelt werden. Dieses Licht wird durch einen Spiegel in die Linse einer Astro-CCD-Kamera umgelenkt. Das Bild verfügt über eine Auflösung von 512×512 Pixel mit 16 Bit pro Pixel, was ungefähr 65000 Graustufen entspricht. Eine Langzeitaufnahme von 5 min ermöglicht, ein scharfes Bild der transmittierten Neutronen.

In diesen Bildern ist die Lichtstärke direkt proportional zu den detektierten Neutronen im Detektor. Aufgrund des thermischen Rauschens muss die CCD-Kamera mit flüssigem Stickstoff auf -130°C gekühlt werden. Die Kamera wird mit einem Computer verbunden und über das Programm 'Ultra Plus' gesteuert. Das aufgenommene Bild wird zu einem Computer gesendet, um eine Weiterverarbeitung zu gewährleisten.

3.2 Probenpositionierung

Eine genaue Ausrichtung der Proben im Neutronenstrahl ist in diesem Experiment von großer Bedeutung, da laut Gleichung 7 das Ursprungsbild durch ein Bild der getrockneten Probe dividiert werden muss, um die Wasserverteilung in der Probe zu erhalten. Je ähnlicher die Positionierung der Probe in den Bildern ist, desto leichter lassen sich diese vergleichen.

Daher wurde am Probetisch ein Metallblock angebracht, dessen Position auch farblich markiert wird. Dies gewährleistet, dass der Block weiterhin richtig positioniert ist. Die Proben werden auf den Metallblock gelegt, sodass ein direkter Übergang von der Seitenkante des Blocks zur Seitenkante der Probe gewährleistet ist.

Der Metallblock wird durch einige Testversuche so positioniert, dass die Probe in der Mitte des Bildes der CCD-Kamera erscheint und anschließend fixiert. Millimetergenaue Positionierung ist damit sichergestellt, da der Metallblock an der Detektorschutzplatte anliegt und daher nur eindimensional ausgerichtet werden muss.

Abbildung 3 veranschaulicht das Positionierungsverfahren:

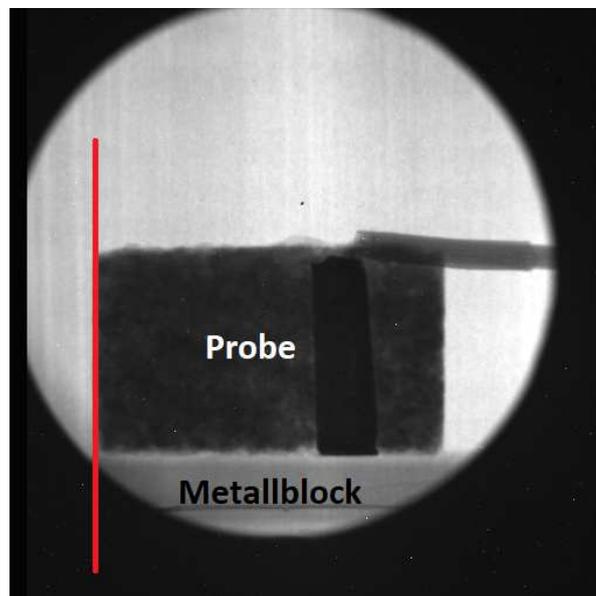


Abbildung 3: Die rote Linie zeigt die Übereinstimmung der Seitenkanten von Probe und Metallblock.

3.3 Proben und Präparation

Es wurden drei verschiedene Baustofftypen für dieses Experiment ausgewählt, um vergleichbare Daten zu gewinnen. Dabei handelt es sich um gut untersuchte Estriche, die von der TKB ausgewählt wurden.

Für die Untersuchung wurden folgende Baustoffe verwendet:

- Lafarge CEM I, Portland-Zement
- Ardex A38, 4-Stunden-Estrichbindemittel
- Knauf FE 50 Largo, Calciumsulfat-Fließestrich

Aus den drei verschiedenen Baustoffen wurden vier verschiedene Proben angerührt, wobei der CEM I Portland-Zement mit zwei verschiedenen Zuschlag-Bindemittelverhältnissen verwendet wurde.

3.3.1 Lafarge CEM I, Portland-Zement

[18] Laut Datenblatt, das sich im Anhang Kapitel 8.3.3 befindet, handelt es sich bei dieser Probe um den Lafarge EN 197-1 CEM I 52,5 R - Portland-Zement.

Aus dem Lafarge CEM I Portland-Zement wurden für dieses Experiment zwei verschiedene Proben erstellt. Diese unterscheiden sich im Mischverhältnis von Produktmenge zu Sandmenge. Es wurde ein Zuschlag-Bindemittelverhältnis von 1:5 ($G/Z=5/1$) und 1:6 ($G/Z=6/1$) gewählt, was einer fünffachen bzw. sechsfachen Sandmenge der Produktmenge entspricht.

Außerdem wurden die zwei Proben mit unterschiedlicher Wassermenge angerührt.

Der CEM I Portland-Zement mit einem Zuschlag-Bindemittelverhältnis 1:5 benötigt Wasser in der Menge von 55% der Masse des reinen Zements. Dies entspricht einem Wasserzementwert (w/z) von 0,55. Der CEM I mit einem G/Z -Wert von 6/1 weist einen w/z -Wert von 0,58 auf.

Folgende Tabelle zeigt die absoluten Mengen in [g] für die Erstellung der CEM I Zementproben:

	CEM I 1:5	CEM I 1:6
Masse des Zements in [g]	150	150
Masse des Sandes in [g]	750	900
Masse des Wassers in [g]	82,5	87
Gesamtmasse in [g]	982,5	1137
w/z	0,55	0,58
G/Z	5/1	6/1

Tabelle 1: Verwendete Mengen für die Erstellung der CEM I Portland-Zementproben.
Die Proben wurden am 10.12.18 um 18:00 Uhr hergestellt.

Es wurde Estrichsand mit einer Körnung von 5,0-8,0 mm verwendet. Dieser war ebenfalls für die Herstellung des Ardex A38 4-Stunden-Estrichbindemittels in Verwendung.

Im weiteren Verlauf des Protokolls wird die Probe vom Portland-Zement Lafarge CEM I mit einem Zuschlag-Bindemittelverhältnis von 1:6 als CEM I (G/Z=6/1) bezeichnet. Ebenso wird die Probe vom Portland-Zement Lafarge CEM I mit einem Zuschlag-Bindemittelverhältnis von 1:5 als CEM I (G/Z=5/1) bezeichnet.

3.3.2 Ardex A38, 4-Stunden-Estrichbindemittel

[19] Es wurde eine Probe vom Ardex A38 Estrichbindemittel gemäß dem Datenblatt, das sich im Anhang Kapitel 8.3.5 befindet, angerührt. Dieses schreibt ein Zuschlag-Bindemittelverhältnis von 1:5 und einen w/z-Wert von 0,44 vor. Es wurde hier ebenfalls ein Estrichsand mit einer Körnung von 5,0-8,0 mm verwendet.

	Ardex A38
Masse des Estrichs in [g]	150
Masse des Sandes in [g]	750
Masse des Wassers in [g]	66
Gesamtmasse in [g]	966
w/z	0,44
G/Z	5/1

Tabelle 2: Verwendete Mengen für die Erstellung der Ardex A38 4-Stunden-Estrichbindemittel-Probe. Die Proben wurden am 10.12.18 um 18:00 Uhr hergestellt.

Die Probe vom Ardex A38 Estrichbindemittel wird im restlichen Protokoll als A38 bezeichnet.

3.3.3 Knauf FE50 Largo, Calciumsulfat-Fließestrich

[17] Der Knauf FE 50 Largo ist ein Calciumsulfat-Fließestrich CAF-C25-F5. Zu diesem muss kein Sand hinzugefügt werden, da dieser schon ein Fertigmisch ist. Laut technischen Datenblatt, welches im Anhang Kapitel 8.3.4 zu finden ist, müssen auf 40 kg Trockenmaterial 6,5 l Wasser hinzugefügt werden; dies entspricht einem Wasser/Trockenmittel-Wert von 0,1625:

	Knauf FE50
Masse des Estrichs in [g]	640
Masse des Sandes in [g]	0
Masse des Wassers in [g]	104
Gesamtmasse in [g]	704
w/z	0,1625
G/Z	—

Tabelle 3: Verwendete Mengen für die Erstellung der Knauf FE50 Largo-Probe. Die Proben wurden am 10.12.18 um 18:00 Uhr hergestellt.

Die Probe vom Calciumsulfat-Fließestrich CAF-C25-F5 Knauf FE 50 Largo wird im restlichen Protokoll als FE50 bezeichnet.

3.3.4 Probenpräparation

Die Proben wurden am 10.12.18 um 18:00 Uhr, einen Tag vor der Messung, angerührt. Dadurch konnte eine ausreichende Festigkeit am ersten Messtag erreicht werden, um die Proben aus der Schalung entfernt zu können.

Abbildung 4 zeigt die Holzschalung, die verwendet wurde, um die Proben in ihre Form zu bringen:

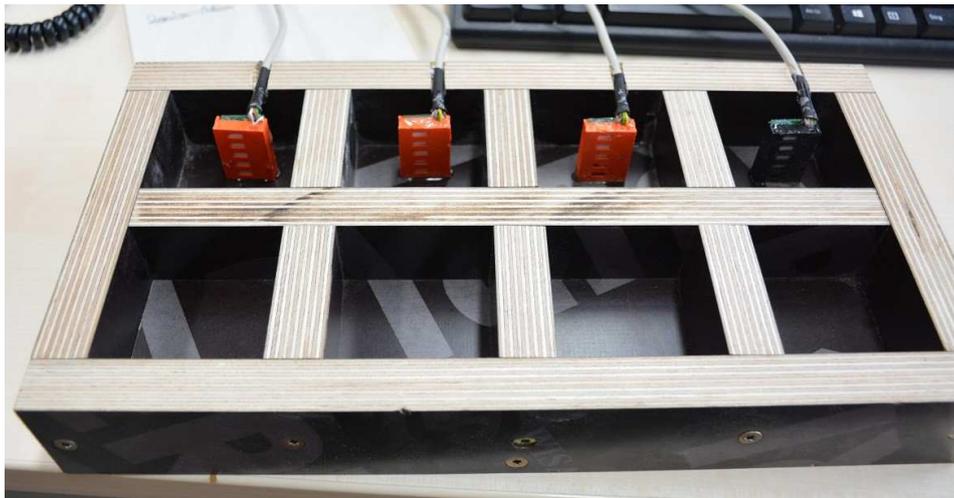


Abbildung 4: Holzschalung zur Erstellung der Proben

Es werden jeweils zwei gleich große Proben pro Probentyp hergestellt, damit eine Zweitprobe für die Gewichtsmessung, die in Kapitel 1.2.3 besprochen wird, zu Verfügung gestellt wird. Nach der Trocknung weist eine Probe Maße von 6 cm x 6 cm x 3,5 cm auf. In Abbildung 4 sind die Feuchtigkeitssensoren, die in den Proben befestigt wurden, gut zu erkennen. Es wurden die Sensoren, die im Kapitel 1.2.2 besprochen werden, verwendet. Die Proben mit den eingebauten Feuchtigkeitssensoren waren ebenfalls für die radiographische Messung in Verwendung. Jede Probe wurde mit fünf Sensoren versehen, die

auf unterschiedlichen Höhen angebracht wurden. Der unterste Sensor ist auf einer Höhe von ca. 5 mm vom Boden der Probe weg gemessen, befestigt. Der Abstand zwischen den Sensoren beträgt ebenfalls 5 mm, d.h. der oberste Sensor befindet sich auf einer Höhe von 25 mm. Dies wird in Abbildung 5 veranschaulicht.

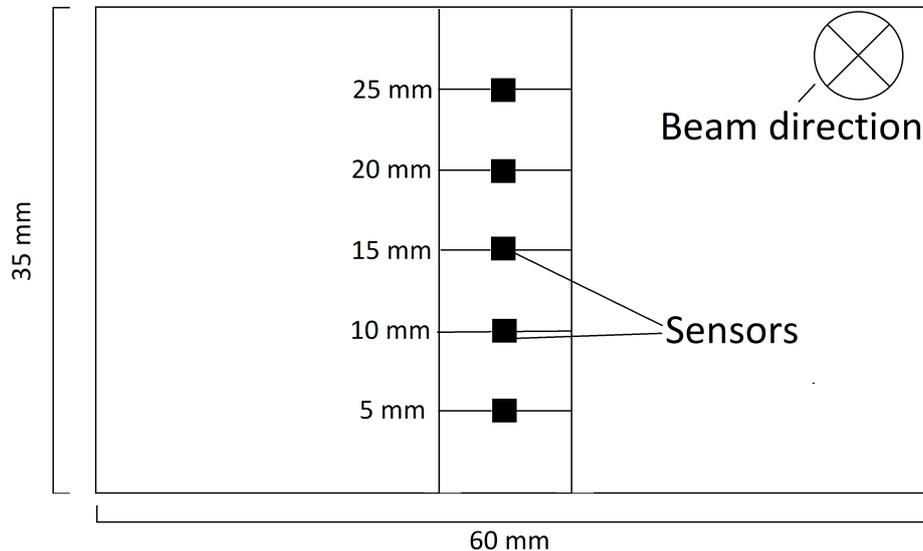


Abbildung 5: Position der Feuchtigkeitssensoren in der Probe

Außerdem wird das Material, das für die Erstellung der acht Proben nicht verwendet wurde, in Plastikbechern gelagert. Dabei wurde das Material direkt nach der Präparation etwa 3 cm hoch in mehrere Plastikbecher mit einem Durchmesser von ca. 6 cm geleert, sodass auch diese Proben nur an der oberen Deckfläche Luftkontakt hatten. Die CM-Methode benötigt für jede Messung ein Teil des Materials, daher sind zusätzliche Proben notwendig.

Vor der ersten Messung wurden auch die Zweitproben für die Gewichtsmessung ebenfalls in Bechern gelagert, um Verfälschung der Daten durch einen möglichen Verlust des Materials zu verhindern.

Nach der letzten Messung, die am 17.12.2018 stattfand, wurden die Proben bei 45° C in einem Ofen über neunzehn Stunden bei einer Luftfeuchtigkeit von 39 %RH außerhalb des Ofens getrocknet. Dadurch kann ein normierter Trockenwert für die Darr-Methode, die in Kapitel 1.2.3 angeführt ist, gewonnen werden. Außerdem ist ein Bild der getrockneten Probe für die genaue Bestimmung des Feuchteanteils der Probe für die Neutronenradiographie ebenfalls notwendig.

Eine Probe, die derartig getrocknet wurde, wird im weiteren Verlauf des Protokolls als 'Darr-45' bezeichnet.

Außerhalb des Trocknungsofens herrschte eine Luftfeuchtigkeit von 39 %RH bei einer Temperatur von 22° C. Daraus lässt sich ein Schätzwert für die erwartete relative Luftfeuchtigkeit in den Proben nach dem Trocknungsprozess berechnen.

[6] Laut Abbildung 6 kann man einen relative Luftfeuchtwert von knapp über 10 %RH, nach dem Trocknungsprozess erwarten.

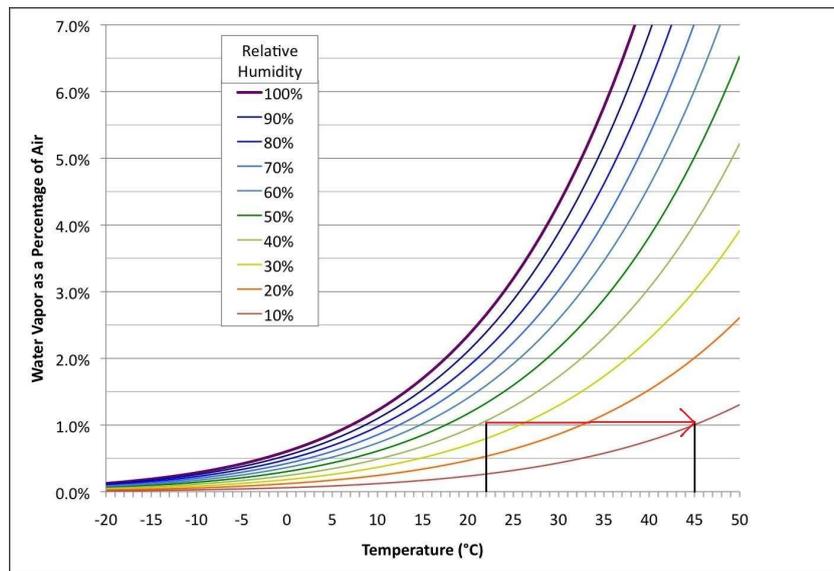


Abbildung 6: Relative Luftfeuchtigkeit der Proben nach dem Trocknungsprozess

Der rote Pfeil in Abbildung 6 zeigt die Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Probe während des Trocknungsprozesses. Die Temperatur wurde bei einer Ausgangsluftfeuchtigkeit von 39 %RH von 22° C auf 45° C erhöht.

Die Tabellen in Kapitel 4.4 bestätigen diesen Ergebnisse, da die relative Luftfeuchtigkeit nach dem Trocknungsprozess in allen Proben bei knapp über 10 %RH liegt.

3.4 Lagerung

Direkt nach dem Anrühren der Baustoffe am 10.12.18 um 18:00 Uhr, wurden diese bei ca. 23° C in der Schalung, die in Abbildung 4 zu sehen ist, über die Nacht bei einer Luftfeuchtigkeit von 42 % gelagert.

Nach der ersten Messung wurden die Proben in einem Klimaschrank bei 22° C und einer Luftfeuchtigkeit von 45 % untergebracht. Abbildung 7 zeigt die Proben an ihrem Lagerort zwischen den Messungen.



Abbildung 7: Alle Proben wurden gemeinsam unter den selben Bedingungen in einem Klimaschrank untergebracht.

Alle Proben wurden sorgfältig nach Entfernung der Schalung in Adhäsionsfolie gewickelt, sodass nur die obere Deckfläche der Probenkörper frei geblieben ist. Da Estrich unter normalen Bedingungen nur an der oberen Deckfläche desorbieren kann, wurden diese Bindungen mit der Adhäsionsfolie angenähert.

Jedoch muss die Folie bei jeder radiographischen Messung entfernt und anschließend wieder angebracht werden, da Adhäsionsfolie aus Kohlenwasserstoffen besteht. Der Wasserstoff in der Adhäsionsfolie absorbiert ebenfalls Neutronen und würde die Messergebnisse verändern.

In den Plastikbechern in Abbildung 7 befindet sich das Probenmaterial, das für die CM-Messung verwendet wurde.

4 Messung und Auswertung

Der erste Messtag dieser Messreihe fand am 11.12.18 um 11:00 Uhr statt, da vor der ersten Messung die CCD-Kamera ungefähr drei Stunden lang gekühlt werden musste. Es wurden Messungen an den Proben nach einem, nach drei und nach sieben Tagen nach dem Erstellen der Proben durchgeführt.

Jede Probe wurde dabei durch vier verschiedene Messungen analysiert:

- Neutronenradiographie
- Gewichtsmessung
- CM-Methode
- Elektronische Messung

4.1 Neutronenradiographie

4.1.1 Verarbeitung der Daten

Abbildung 8 zeigt die Aufnahme der CCD-Kamera von der FE50-Probe am ersten Mess- tag:

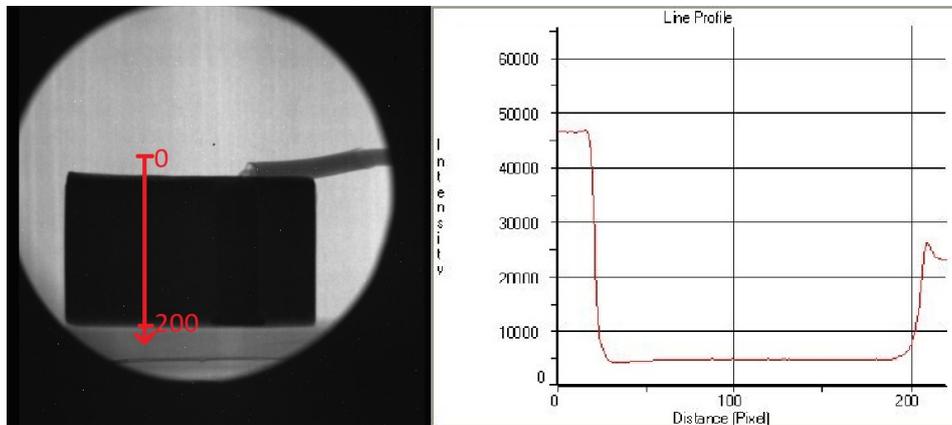


Abbildung 8: Unbearbeitete Aufnahme der FE50-Probe am ersten Messtag

Das durch die CCD-Kamera erstellte Bild, mit einer Auflösung von 512 x 512 Pixel, verfügt über 16 Bit pro Pixel und somit 65000 Graustufen pro Pixel. Der Zählwert (Counts) pro Pixel ist direkt proportional zur Anzahl der detektierten Neutronen an dieser Position. Je dunkler ein Bildpunkt ist, desto weniger Neutronen sind auf die Detektorplatte an dieser bestimmten Stelle getroffen. Dunkle Flächen im Bild entstehen, wenn Neutronen durch die Probe gestreut, bzw. absorbiert worden sind. Dies ist in Abbildung 8 deutlich zu erkennen; die Probe ist dunkler als ihre Umgebung, weil viel weniger Neutronen durch die Probe transmittieren können als außerhalb der Probe.

Der Graph in Abbildung 8 zeigt die Counts, die der Anzahl der detektierten Lichtblitze an der zweidimensionalen Pixelfläche der Kamera entsprechen. Die x-Achse entspricht dem roten Pfeil in der Abbildung, wobei jedes Pixel einen x-Wert zugeordnet ist. Die y-Achse entspricht den Mittelwert der Counts entlang der x-Achse. Dieser Mittelwert wurde mit Nachbarpixel des selben x-Wertes gebildet. Dabei wurden jedoch nur Pixel innerhalb der Probe verwendet.

Die Messung bestätigt, dass die Feuchtigkeit am ersten Tag fast gleichmäßig in der Probe verteilt war.

Um die Verteilung des desorbierten Wassers zu visualisieren, muss die Aufnahme durch eine Aufnahme von der getrockneten Probe dividiert werden; dies wird in Kapitel 3.1 erklärt. In diesem Experiment wurde die Probe bei 45° C über 19 Stunden getrocknet, um ein trockene Probe zu erhalten.

Abbildung 9 zeigt die Auswertung der Bilddaten anhand des Beispiels des CEM I-Zements (G/Z=6/1).

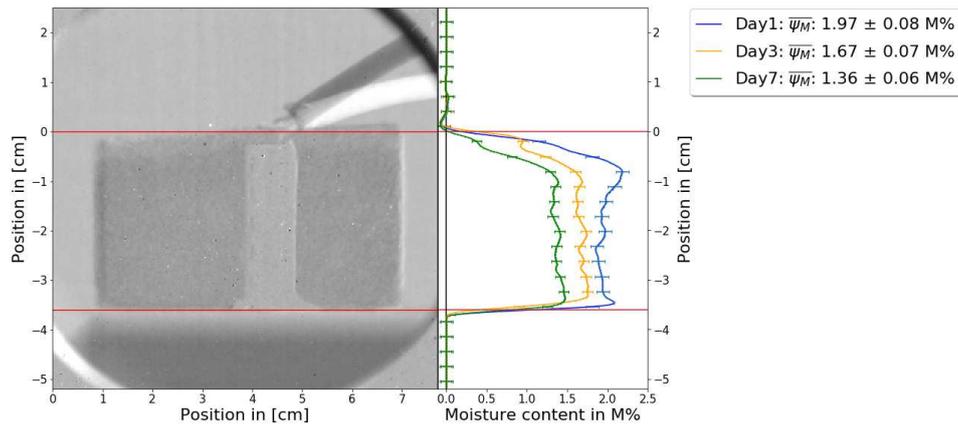


Abbildung 9: Feuchtigkeitsverlauf in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe

Dieses Bild in Abbildung 9 ist bereits bearbeitet und zeigt die Feuchtigkeitsverteilung in der Probe, die gemäß Gleichung 10 ermittelt wird, am ersten Messtag in Graustufen. Dunkle Pixel weisen auf einen positiven Neutronenwirkungsquerschnitt bzw. auf Wasserverlust hin, diese sind im Histogramm als Werte größer 0 zu erkennen. Für eine anschaulichere Darstellung der Abbildung 9 wurden rote Orientierungslinien an der Position der oberen und unteren Deckflächen der Probe platziert, um die Probe leichter von der Umgebung differenzieren zu können. Der Ursprung der y-Achse wurde auf die obere Deckfläche der Probe gesetzt. Außerdem wurde die Größe des Histogramms an die des erstellten Bildes angepasst.

In allen Histogrammen zeigt der blaue Graph die Feuchtigkeitsverteilung am ersten Messtag, der orange Graph die Feuchtigkeitsverteilung am dritten Messtag und der grüne Graph die Feuchtigkeitsverteilung am siebten Messtag. In der Legende des Histogramms ist der gemittelte Feuchtegehalt bezüglich des Volumens des jeweiligen Tag angeführt. Für die Erstellung des Histogramms wird die Wasserdichte im Material laut Gleichung 9 berechnet und daraus der Feuchtegehalt ermittelt. Das Histogramm entspricht der eindimensionalen Messung des Feuchteanteils der Probe von oben nach unten.

Große Werte von Ψ_m bedeuten, dass viel Wasser an dieser Stelle desorbiert ist.

Ein Ψ_m von 0 bedeutet, dass sich an dieser Stelle nichts verändert hat. Daher ist außerhalb der Probe Ψ_m ungefähr bei 0, da $\ln(\exp(0)) = 0$ ist.

Auch das Histogramm verwendet Mittelwerte zur Erstellung der Feuchtigkeitsverteilung. Abbildung 10 veranschaulicht diesen Vorgang:

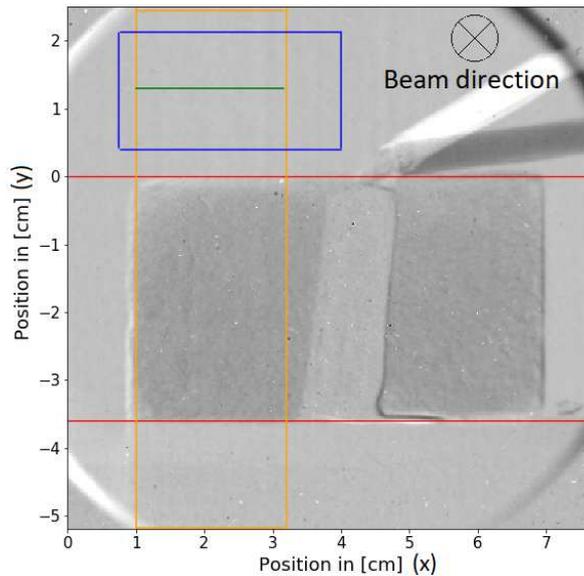


Abbildung 10: Für die Berechnung des Mittelwertes wurden bestimmte Werte der Aufnahme verwendet.

Ein eigens angefertigter Algorithmus, der im Anhang 8.4.2 zu finden ist, liest alle Zählwerte der Pixel im orange markierten Bereich in Abbildung 10 neben dem Feuchtigkeitssensor ein. Dadurch verfälscht der eingebaute Sensor die Messung nicht. Entlang der horizontalen Ebene, die in Abbildung 10 grün dargestellt ist, werden die Graustufen-Werte gemittelt. Dieser Mittelwert wird als Graustufenwert für die Berechnung der Wasserstoffverteilung verwendet. Anschließend werden die Werte im blauen Bereich verwendet, um das Datenset zu normieren und damit mögliche Schwankungen des Reaktors zu vernachlässigen.

Da am 28.06.19 wurde ein anderer Probenstisch verwendet. Aus diesem Grund ist die Transmission-Differenz der Probenstische auch gemessen worden. Daher wurden die Werte unter der Probe, die der Position des Probenstisches entsprechen, auf 0 gesetzt, um den Graphen übersichtlicher zu gestalten.

Für die eingefärbten Bilder, wie zum Beispiel in Abbildung 13, wurde jedes Pixel des Bildes gemäß Gleichung 10 berechnet. Bestimmte Anteile des Bildes wurden eingefärbt, andere wurden ausgeblendet, sodass das desorbierte Wasser in der Probe möglichst sichtbar gemacht wurde. Im Anhang 8.4.3 befindet sich der Programmcode zu diesem Algorithmus.

4.1.2 Messgenauigkeit der neutronenradiographischen Messung

Der orange markierte Bereich in Abbildung 10 wurde zur Berechnung des Fehlerbalkens verwendet. Hierbei handelt es sich um die Neutronenzählwerte des ungestörten Reaktorstrahls. Die Streuung dieser Werte gibt Auskunft über die Genauigkeit der neutronenradiographischen Messung.

Eine zusätzliche Fehlerquelle für diese Methode ist die Neutronenvielfachstreuung und

Rückstreuung. Dabei handelt es sich um gestreute Neutronen, die dennoch auf die Detektoroberfläche gelangen und deshalb fälschlicherweise als transmittierte Neutronen gezählt werden.

Wenn die Dicke der Probe ähnlich der durchschnittlichen Weglänge $L = \frac{1}{\Sigma_{tot}}$ ist, tritt dieser Effekt vermehrt auf. Die durchschnittliche Weglänge L kann für derartige Proben auf 32 cm geschätzt werden, daher kann dieser Effekt vernachlässigt werden.

Die Anzahl der mehrfach gestreuten Neutronen ist abhängig von der Distanz der Probe zum Detektor, da die Neutronen nach der Streuung einen gewissen Streuwinkel aufweisen. Aus diesem Grund ist ein Auftreffen der mehrfach gestreuten Neutronen auf dem Detektor bei höherem Abstand unwahrscheinlicher. Deswegen wurden Messungen unterschiedlichen Proben-zu-Detektor-Abständen durchgeführt, um diese Fehlerquelle abschätzen zu können.

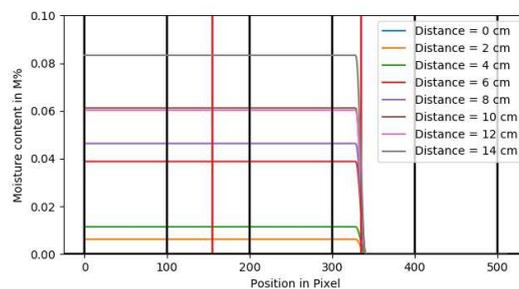


Abbildung 11: Abschätzung der Neutronenvielfachstreuung

Abbildung 11 zeigt die Differenz zwischen der ursprünglichen Messung und einer Messung mit erhöhtem Detektorabstand. Hierfür wurde die CEM I ($G/Z=6/1$)-Probe verwendet. Abbildung 11 zeigt deutlich, dass Neutronenvielfachstreuung auftritt, jedoch ist der Effekt bei unter $0,1\%$ sehr klein. Hierbei ist auch zu bemerken, dass der Effekt sehr gleichmäßig über die ganze Probe verteilt ist, was für eine sehr hohe Messgenauigkeit spricht. Ein Teil dieses Fehlers kann auch durch den Positionierungsalgorithmus entstanden sein, da die Probe bei höherem Abstand weiter verschoben werden musste, um die Bilder genau aufeinander ausrichten zu können.

4.1.3 Messdaten der radiographischen Messung

4.1.3.1 Ardex A38

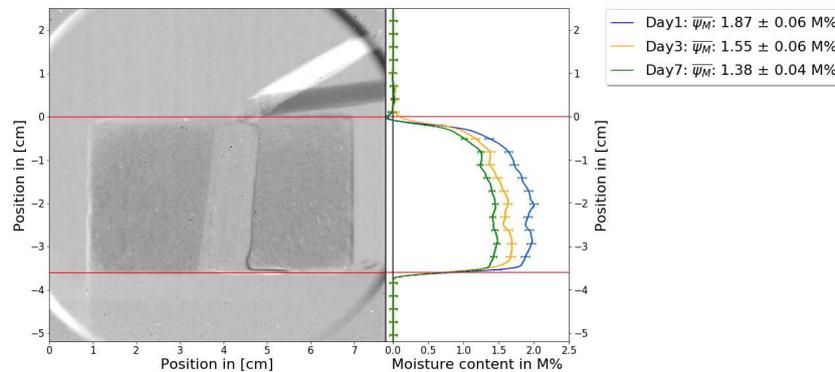


Abbildung 12: Feuchtigkeitsverteilung in der Ardex A38-Probe

Abbildung 12 zeigt, dass je später die Probe gemessen wurde, desto trockener diese war, da der blaue Graph einen höheren Feuchtegehalt als die anderen Graphen aufweist. Die Feuchtigkeit in allen Messungen nimmt Richtung Unterseite der Probe zu, da aufgrund der Adhäsionsfolie das Wasser nur nach oben entweichen konnte. An der Oberfläche war die Probe immer deutlich trockener als in tieferen Schichten der Probe. Diese deutlich trockenere Schicht wird über die Zeit um wenige Millimeter breiter. Die Steigung der Feuchtigkeitsverteilung beim Eintritt in die Deckfläche ist am ersten Messtag höher als an den späteren Messtagen. Dies resultiert aus der immer breiter gewordenen Schicht, die deutlich trockener ist als der Rest der Probe. Der Grund für die Entstehung dieser Schicht ist auf zwei verschiedene Diffusionsgeschwindigkeiten in der Probe zurückzuführen. Die Diffusion in der Probe weist eine andere Geschwindigkeit auf als die Diffusion zwischen Luft und Probe.

Im Kapitel 4.5 wird der zeitliche Verlauf der Trocknung durch drei gereimte Bilder farblich dargestellt.

Aus der Ardex A38-Probe desorbierte das beinhaltete Wasser am langsamsten. Dies ist auf die höhere Wasserbindung der Ardex A38-Probe rückzuführen.

Die Neutronenradiographie eignet sich gut für die dynamische Darstellung von Austauschwechselwirkungen in Stoffen. Die Verteilung der Feuchtigkeit in der A38-Probe wird in folgenden Abbildungen farblich dargestellt.

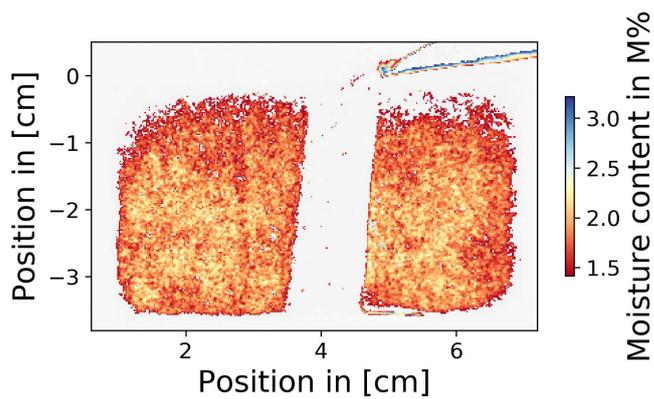


Abbildung 13: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 11.12.2018

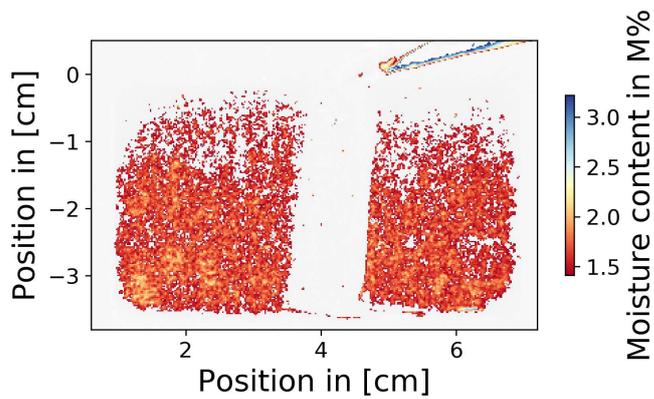


Abbildung 14: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 13.12.2018

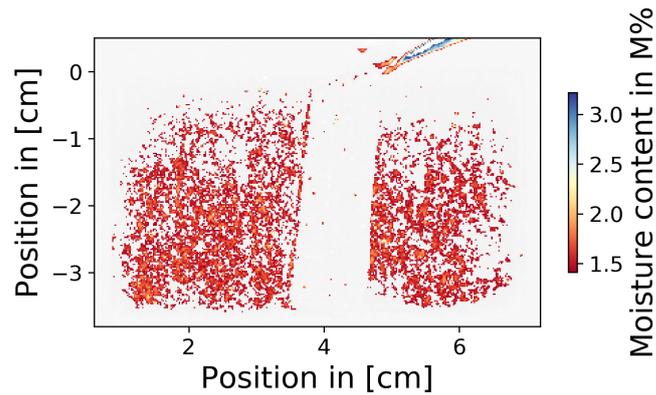


Abbildung 15: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 17.12.2018

Diese Abbildungen zeigen farbliche Darstellungen des Feuchteanteils der Proben in Prozent der Masse. Die erste der drei Abbildungen entspricht einer eingefärbten Version des Bildes in Abbildung 12. Der Feuchteanteil wurde hier ebenfalls mittels Gleichung 10 ermittelt, nur wurde hier jeder Pixelwert mit dem des Trockenbilds verglichen, um den Feuchteanteil pro Pixel zu erhalten. In den Abbildungen ist in der Mitte der Probe der Feuchtigkeitssensor leicht zu erkennen, da an dessen Position deutlich weniger Wasser desorbiert ist und dieser daher weiß im Bild erscheint. Diese Region ist weiß, weil Feuchteanteile unter 1% ausgeblendet wurden. Für alle Abbildungen eines Probenotyps wurden dieselben Filter verwendet, um eine Vergleichbarkeit der zeitlichen Desorption zu gewährleisten.

Außerhalb der Probe sind manchmal eingefärbte Stellen zu sehen. Unter der Probe ist der Probetisch zu erkennen, da für die Messung am 28.06.19 ein anderer Aluminium-Block für die Positionierung verwendet wurde. Das Kabel zu den elektronischen Sensoren war frei beweglich und daher während der Messung nicht immer genau an der selben Stelle positioniert, deswegen kann man dieses auf manchen Bildern über der Probe erkennen. Manche eingefärbten Flächen sind jedoch auch durch den Positionierung-Algorithmus entstanden, weil Drehungen bei geringen Pixelzahlen Bildfehler verursachen. An den Seitenflächen sind die Werte manchmal besonders hoch, da die Proben während der Trocknung leicht geschrumpft sind und daher die Bilder nicht pixelgenau angeglichen werden konnten.

Außerdem tritt ein Fehler bei ungleicher Positionierung auf, der in Kapitel 7.1 behandelt wird. Der Vergleich der obigen Abbildungen macht das Desorptionsverhalten der A38-Probe sichtbar.

4.1.3.2 Lafarge CEM I (G/Z=5/1)

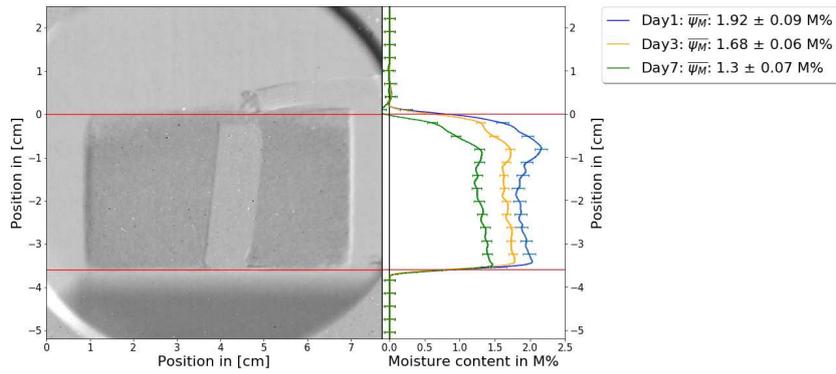


Abbildung 16: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM1 (G/Z=5/1)-Probe

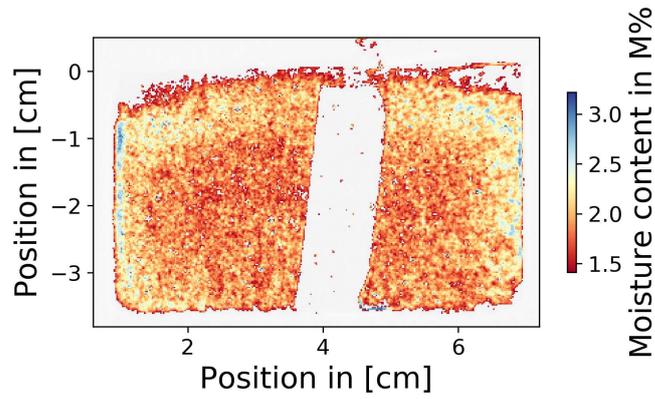


Abbildung 17: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1) vom 11.12.2018

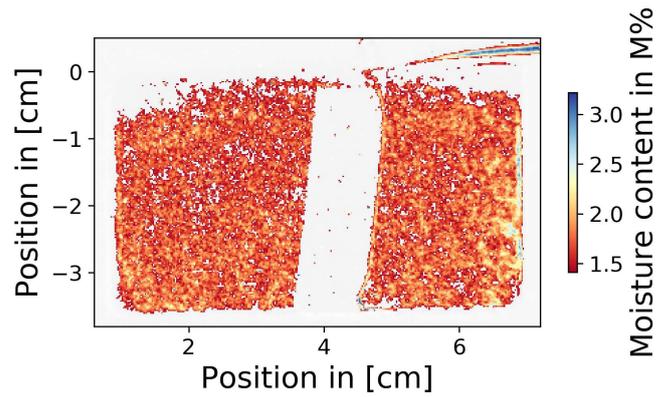


Abbildung 18: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1) vom 13.12.2018

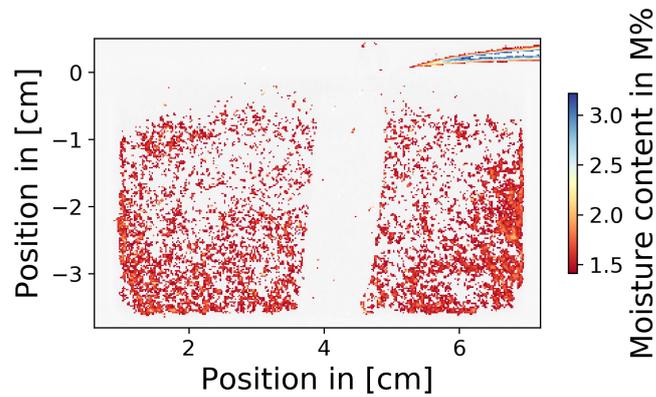


Abbildung 19: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe vom 17.12.2018

In der CEM I-Probe (G/Z=5/1) ist das Wasser an der Oberseite zuerst verdunstet, sodass sich auch bei dieser Messung eine überproportional trockene Schicht an der Oberseite bildete. Die Probe blieb an den Rändern feuchter, besonders an der Unterseite. Dies liegt daran, dass die Diffusion im Probenmaterial zu langsam stattfindet, um diesen Feuchtigkeitsunterschied ausgleichen zu können.

4.1.3.3 Lafarge CEM I (G/Z=6/1)

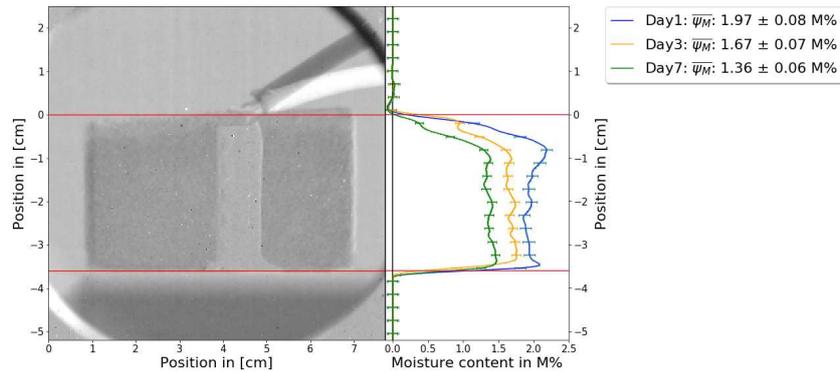


Abbildung 20: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM1 (G/Z=6/1)-Probe

Abbildung 20 zeigt einen deutlichen Verlauf der Feuchtigkeitsverteilung. Auch hier ist mehr Wasser in der oberen Hälfte des Probenkörper als in der unteren Hälfte verdunstet. Die neutronenradiographische Messung ergab die höchste Feuchte in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe.

Das Wasser sammelte sich in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vor allem am Rand und an der Unterseite der Probe. Im letzten Bild ist die Deckfläche bereits so trocken wie nach dem Trocknungsvorgang im Ofen.

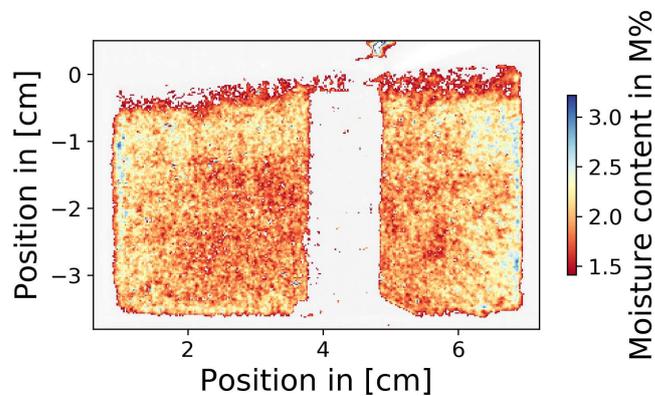


Abbildung 21: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 11.12.2018

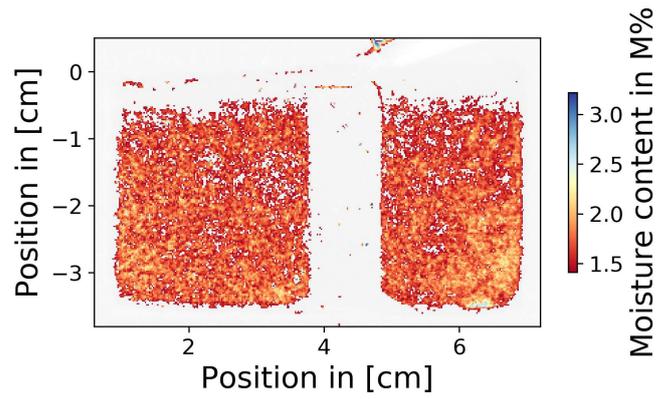


Abbildung 22: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 13.12.2018

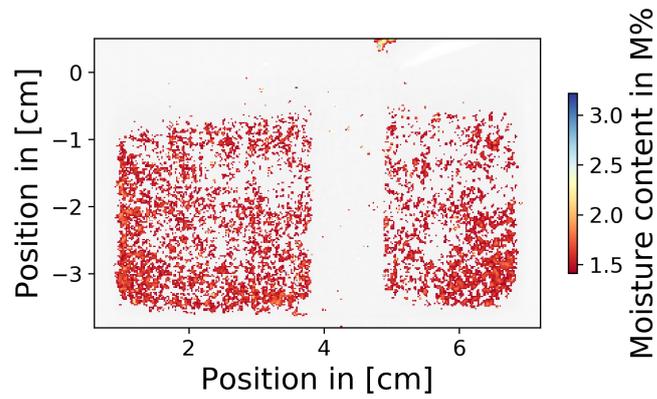


Abbildung 23: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom 17.12.2018

4.1.3.4 Knauf FE50 Largo

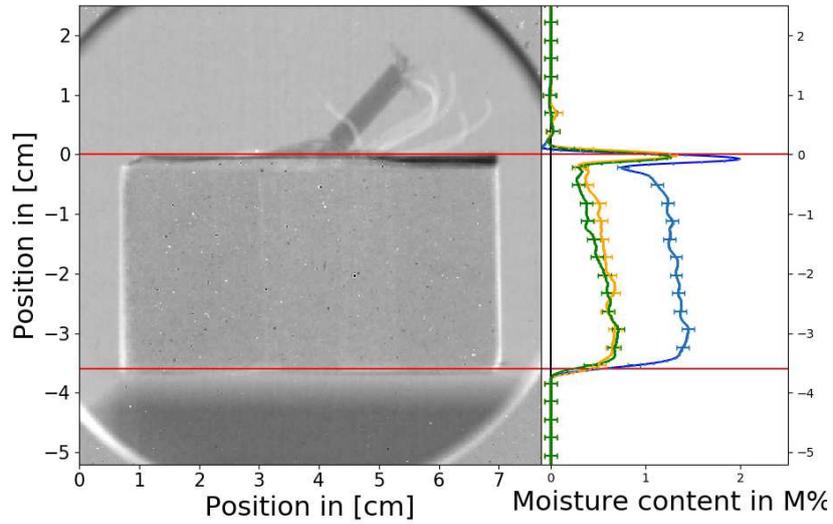


Abbildung 24: Feuchtigkeitsverteilung in der Knauf FE50-Probe

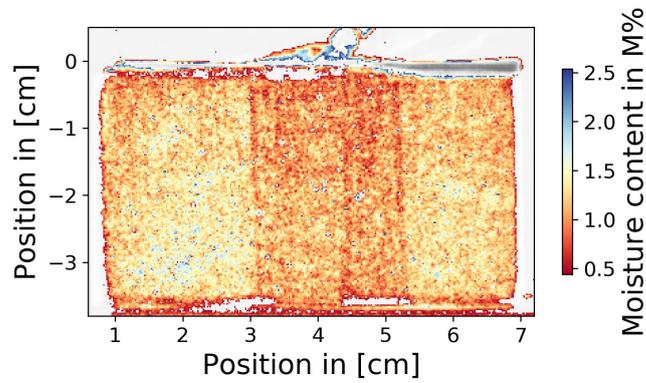


Abbildung 25: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 11.12.2018

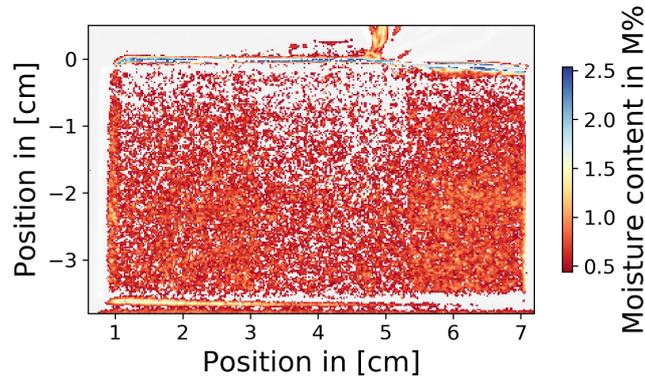


Abbildung 26: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50 vom 13.12.2018

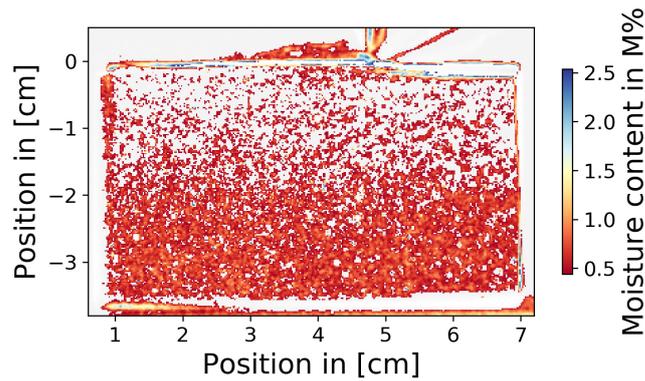


Abbildung 27: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 17.12.2018

In Abbildung 24 zeigt die Messung einen hohen Anstieg an desorbiertem Wasser an der Deckfläche der Probe; dies steht im scheinbaren Widerspruch zu den anderen Messungen. Die FE50-Probe verlor während des Trocknungsprozesses deutlich mehr Wasser als die anderen Proben und schrumpfte dementsprechend. Aus diesem Grund ist die Probe im Trockenbild kleiner als in den vorherigen Aufnahmen, wodurch die Bilder nicht genau aufeinander ausgerichtet werden konnten. Der erhöhte Wert entsteht dadurch, dass anstatt der trockenen Probe der freie Neutronenstrahl für die Deckfläche in die Berechnung des Feuchtegehalts eingeht. Dies ist auch anhand des schwarzes Bereichs an der Oberseite der Probe in Abbildung 24 zu sehen.

Außerdem folgt aus den Messungen, dass die FE50-Probe etwas schneller als die anderen Proben getrocknet ist. Dies liegt daran, dass bei der Präparation dieser Proben ein höherer Anteil des Wasser nicht fest gebunden wurden.

Da es sich bei der FE50-Probe um einen Fließestrich handelt, ist die Feuchtigkeit in dieser Probe homogener verteilt als in den anderen Proben. Ansonsten sind alle Eigenschaften sehr ähnlich zu den anderen Proben.

4.2 Messdaten der CM-Methode

Der CM-Messvorgang wird in Kapitel 1.2.1 erläutert. Alle Probe wurden zu ähnlichen Messzeitpunkten gemessen.

Probe	1.Messtag Feuchtigkeit in [M%]	3.Messtag Feuchtigkeit in [M%]	7.Messtag Feuchtigkeit in [M%]	Darr-45 Feuchtigkeit in [M%]
A38	1,5	1,28	0,8	<0,1
CEM I (G/Z=/5/1)	2,5	1,47	1,1	<0,1
CEM I (G/Z=/6/1)	3,5	1,65	1,0	<0,1
FE50	3,2	0,7	0,2	<0,1

Tabelle 4: Gemessene Daten der CM-Methode in [M%]

Da für die CM-Messung Material zerkleinert werden muss, ist die dafür verwendete Probe durch die Messungen kleiner geworden, wodurch eventuell der Trocknungsprozess beschleunigt wurde. Außerdem konnten die Proben, die für die CM-Messungen erstellt worden waren, aufgrund der Beschädigung durch die Messung nicht so luftdicht wie die übrigen Proben in Adhäsionsfolie verpackt werden, weil die Seitenflächen durch das Zerkleinern uneben wurden. Es wurde meistens Material vom Rand der Proben verwendet. Dies könnte die auffällig niedrigen Feuchteanteile dieser Messung erklären.

Die Daten aus Tabelle 4 wurden durch Abbildung 28 visualisiert:

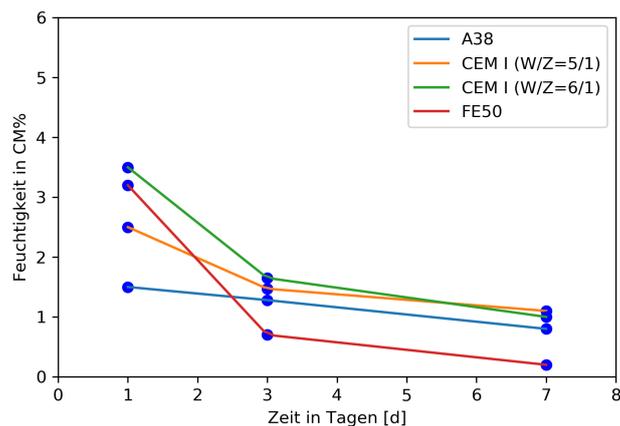


Abbildung 28: Visualisierung der Messergebnisse der CM-Methode

Aufgrund des höheren Wasseranteils in der FE50-Probe verliert dieser deutlich schneller Wasser als die anderen Materialien. Zu beachten ist, dass die FE50-Probe im Testdurchlauf vom Januar 2018 deutlich höhere Werte lieferte; diese Daten sind in Kapitel 8.2 zu finden.

4.3 Messdaten der gravimetrischen Methode

Durch Messung der Masseänderung kann auf den Feuchtegehalt der Probe vor der Trocknung geschlossen werden; dies wird Kapitel 1.2.3 näher erläutert. Tabelle 5 beinhaltet alle gemessenen Massen der Proben über die gesamte Messzeit.

Probe	1.Messtag Masse in [g]	3.Messtag Masse in [g]	7.Messtag Masse in [g]	Darr-45 Masse in [g]
A38	243,09	242,45	241,220	238,85
CEM I (G/Z=/5/1)	246,22	245,01	243,7	240,86
CEM I (G/Z=/6/1)	248,5g	247,15	246,27	243,51
FE50	276,56	271,95	265,11	262,36

Tabelle 5: Gemessene Massen aller Proben

Diese Werte können durch Gleichung 2 einem Feuchtegehalt zugeordnet werden; dies wird durch Abbildung 29 visualisiert:

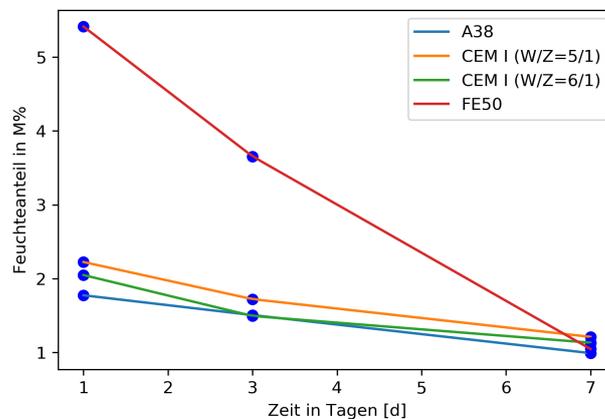


Abbildung 29: Visualisierung der gravimetrischen Messung bzgl. der Masse der Probe

4.4 Messdaten der elektronischen Messung

Die elektronischen Messdaten wurden durch Verfahren, die im Kapitel 1.2.2 näher beschrieben werden, erfasst.

[11]. Um einen zeitlichen Verlauf des Trocknungsvorgangs zu ermöglichen, wurde am x-Wert des achten Tages, der Wert, der nach der Trocknung der Probe gemessen wurden,

positioniert. Diese Position wird auf der x-Achse als 'Darr-45' bezeichnet. Anhand der elektronischen Messdaten lässt sich ein ortsabhängiger Verlauf der Feuchtigkeit in den Proben über die Zeit erstellen. In der Tabelle 6 sind die Positionen der Sensoren von der Unterseite der Probe weg gemessen. 5 mm entspricht dem untersten Sensor, der auf einer Höhe von 5 mm angebracht ist.

A38 Position in [mm]	1.Messtag Feuchte in [% RH]	3.Messtag Feuchte in [% RH]	7.Messtag Feuchte in [% RH]	Darr-45 Feuchte in [% RH]
25	71,24	49,66	33,94	22,37
20	87,68	68,36	52,57	15,75
15	96,53	71,62	55,38	15,22
10	88,76	72,49	56,18	14,97
5	91,08	71,97	55,56	15,13

Tabelle 6: Gemessene Daten der A38-Probe durch das elektronischen Verfahren

Messdatentabelle 6 ist durch Abbildung 30 dargestellt:

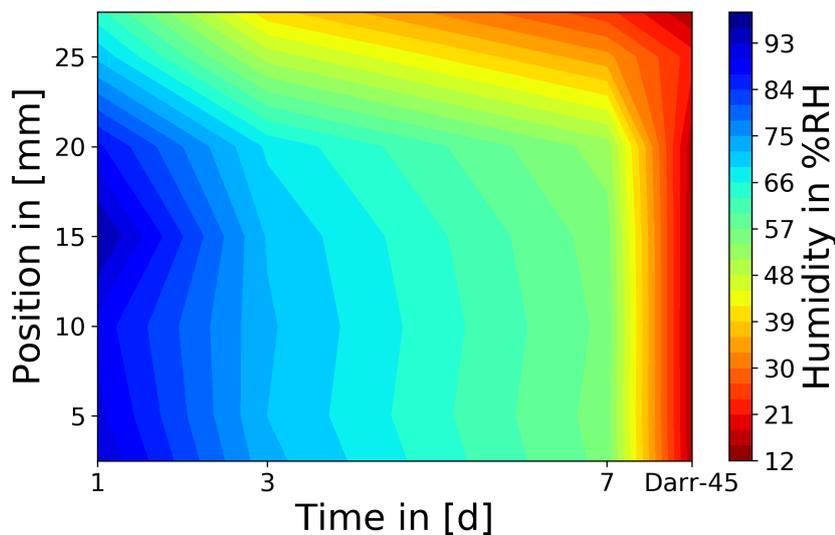


Abbildung 30: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren

Abbildung 30 zeigt, dass die Ardex A38-Estrichprobe von an der Deckfläche schneller Wasser verliert, als an der Unterseite. Dies liegt daran, dass alle Seiten bis auf die Oberseite der Proben in Adhäsionsfolie gewickelt waren.

CEM I (G/Z=5/1) Position in [mm]	1.Messtag Feuchte in [% RH]	3.Messtag Feuchte in [% RH]	7.Messtag Feuchte in [% RH]	Darr-45 Feuchte in [% RH]
25	49,26	61,25	38,08	13,82
20	90,88	71,12	42,67	14,72
15	89,63	80,33	46,60	14,97
10	90,88	79,89	48,07	15,00
5	85,48	79,33	48,51	15,69

Tabelle 7: Gemessene Daten der CEM I-Probe (G/Z=5/1) durch das elektronischen Verfahren

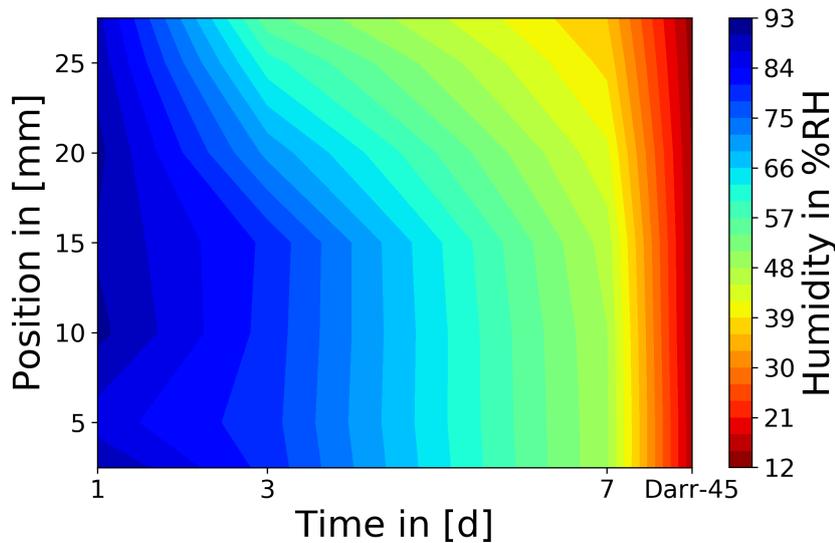


Abbildung 31: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=5/1)-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren

Laut Abbildung 31 ist die CEM I (G/Z=5/1)-Probe im Vergleich zu den anderen Proben an der Deckfläche deutlich schneller getrocknet. Dies ist vermutlich auf ein Kondensat zurückzuführen, das den gemessenen relativen Feuchtigkeitswert des Sensors verfälscht. In Abbildung 67 existiert dieses Phänomen nicht, jedoch handelt es sich ebenfalls um eine CEM I-Probe (G/Z=5/1).

CEM I (G/Z=6/1) Position in [mm]	1.Messtag Feuchte in [% RH]	3.Messtag Feuchte in [% RH]	7.Messtag Feuchte in [% RH]	Darr-45 Feuchte in [% RH]
25	100,02	62,44	38,20	15,53
20	100,02	70,40	44,92	13,07
15	100,02	77,33	49,32	13,29
10	100,02	87,13	51,44	13,60
5	100,02	100,03	51,48	13,94

Tabelle 8: Gemessene Daten der CEM I-Probe (G/Z=6/1) durch das elektronischen Verfahren

Aufgrund des höheren w/z -Wertes war die CEM I (G/Z=6/1)-Probe zu Beginn der Messung feuchter als die CEM I (G/Z=5/1)-Probe.

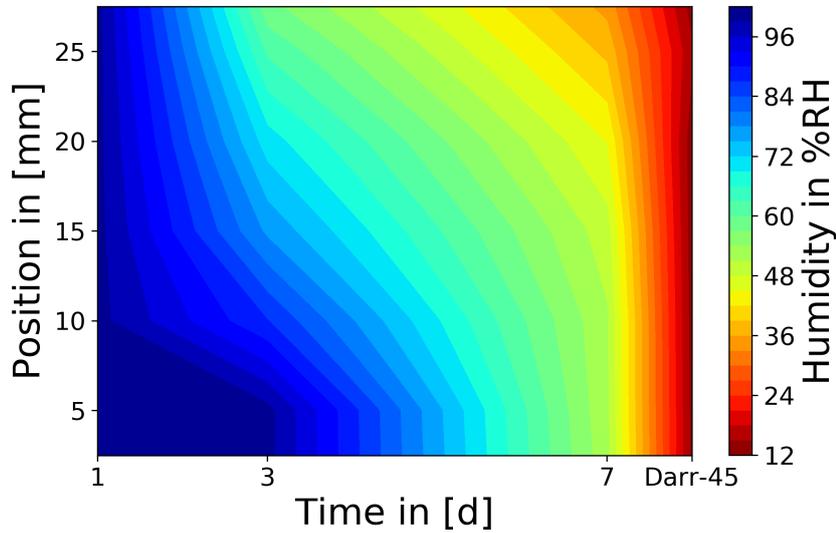


Abbildung 32: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=6/1)-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren

In Abbildung 32 ist die stetige Desorption des Wassers gut ersichtlich.

FE50 Position in [mm]	1.Messtag Feuchte in [% RH]	3.Messtag Feuchte in [% RH]	7.Messtag Feuchte in [% RH]	Darr-45 Feuchte in [% RH]
25	100,0	92,76	65,48	16,87
20	89,37	99,92	95,31	14,84
15	98,84	94,39	98,60	13,82
10	100,0	94,46	100,0	14,09
5	48,54	60,04	66,93	14,94

Tabelle 9: Gemessene Daten der FE50-Probe durch das elektronischen Verfahren

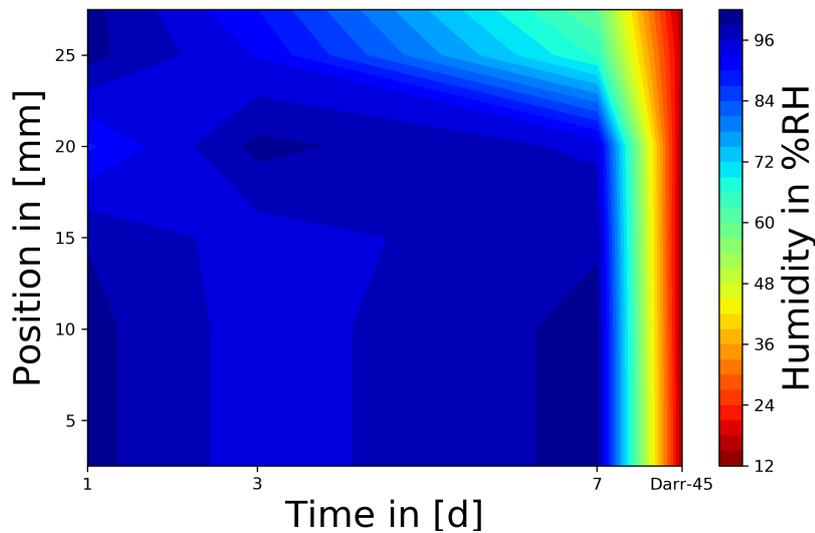


Abbildung 33: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren

Da zur Präparation des FE50-Fließestrich mehr Wasser im Verhältnis zum Gewicht verwendet wird, bleibt der Estrich länger feucht. Tabelle 9 zeigt, dass der unterste Sensor der FE50-Probe defekt war und daher zu kleine relative Luftfeuchtwerte lieferte. Daher wurden die Werte für diesen Sensor für Abbildung 33 extrapoliert. Im Kapitel 7.4 wird Darstellung mit den originalen Messwerten angeführt.

Die Feuchtigkeit fällt in der oben angeführten Abbildung unter 45 % relative Luftfeuchtigkeit, obwohl die Proben bei 45 % Luftfeuchtigkeit gelagert wurden. Dies liegt daran, dass der Bereich von Tag 7, an dem die Messung vom 17.12.18 durchgeführt wurde, bis zum x-Wert 'Darr-45' interpoliert wurde. Tag bzw. x-Wert 'Darr-45' entspricht der Feuchtigkeit der Probe nach der Trocknung bei 45° C im Ofen.

Im Anhang 8.2 sind die Feuchtigkeitsverteilungen der Proben, die im Januar 2018 gemessen wurden, als Vergleichsmaterial zu finden.

4.5 Gegenüberstellung der Messmethoden

In diesem Kapitel wird die Neutronenradiographie mit den bisher etablierten Methoden verglichen.

Für die Gegenüberstellung wurde die FE50-Probe entfernt, da diese im Vergleich zu den Messungen im Januar 2018 widersprüchliche Ergebnisse zeigte.

Die FE50-Probe zeigte bei der CM-Methode und Neutronenradiographie zu niedrige Werte. Außerdem maßen die eingebauten Feuchtigkeitssensoren, dass die FE50-Probe am längsten feucht blieb, die radiographische Messung zeigte jedoch das Gegenteil.

Ein möglicher Erklärungsansatz für dieses Problem könnte sein, dass prozentual mehr Wasser nach der Trocknung in der FE50-Probe fest band und daher das Trockenbild der FE50-Probe im Verhältnis zu den anderen Proben deutlich mehr Wasserstoff enthielt.

Eine weitere Grund für die Diskrepanz könnte durch die Verwendung der Adhäsionsfolie entstanden sein, da sowohl bei der Messung mit der CM-Methode als auch bei radiographische Methode die Adhäsionsfolie entfernt werden musste: Falls überschüssiges Wasser sich zwischen Adhäsionsfolie und Probe gesammelt hat, wurde dieses bei der gravimetrischen Methode mitgemessen, jedoch bei den Methoden, wo die Folie entfernt werden musste, nicht.

4.5.1 Darr-Methode im Vergleich zur CM-Methode

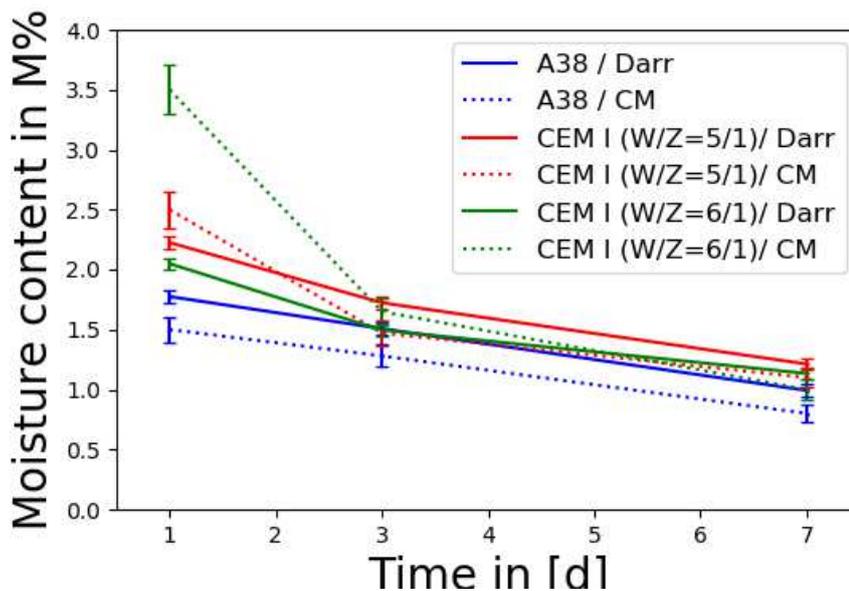


Abbildung 34: Vergleich der Ergebnisse der Messungen durch die CM-Methode mit den Ergebnissen durch die Darr-Methode

In Abbildung 34 werden die Ergebnisse der gravimetrischen Methode mit den Ergebnissen der CM-Methode verglichen.

Die Werte stimmen vor allem beim Lafarge CEM I (G/Z=5/1)- Zement und der Ardex A38-Probe gut überein.

[2] Die Lafarge CEM I (G/Z=5/1) zeigt eine deutliche Diskrepanz bei hohen Feuchtigkeitsgehalt; dieser Fehler bei der CM-Methode wurde bereits in der Literatur erwähnt.

4.5.2 Darr-Methode im Vergleich zur radiographischen Messung

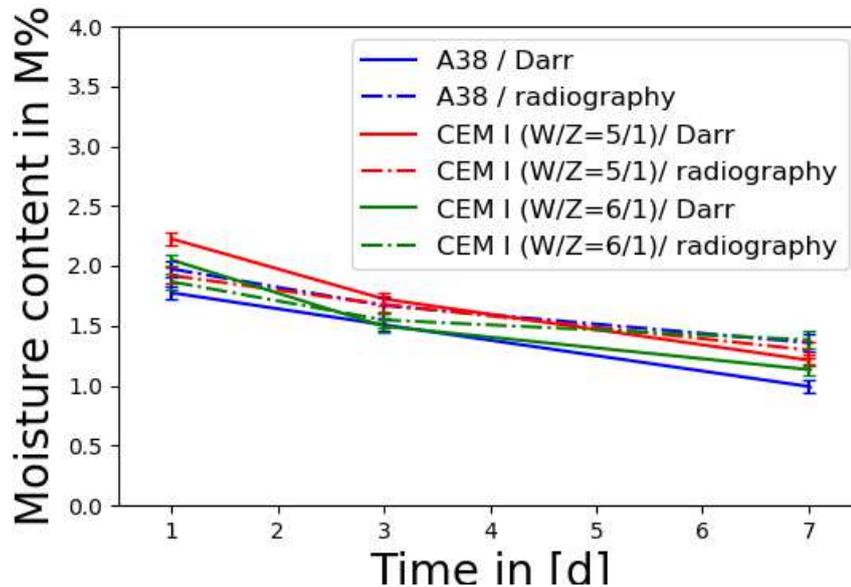


Abbildung 35: Darr-Methode im Vergleich zur radiographischen Messung

Dieser Vergleich stärkt die Zuverlässigkeit des radiographischen Messvorgangs, da die Darr-Methode die bis jetzt genaueste Methode zur Bestimmung des Feuchteanteils einer Probe ist.

4.5.3 Radiographische Messung im Vergleich zur Messung mit den elektronischen Feuchtigkeitssensoren

Da durch eine radiographische Aufnahme der Feuchteanteil örtlich in der ganze Probe ermittelt werden kann, wurde die Feuchtigkeit in Abhängigkeit von der Position und der Zeit dargestellt. Dies soll einen Vergleich zu den Messungen der elektronischen Sensoren ermöglichen. In folgenden Abbildungen wurde die Probe im Trockenzustand auf die Position 'Darr-45' gesetzt, um ähnliche Darstellungen wie in Kapitel 4.4 zu erhalten.

Diese Messung ist örtlich genauer als die Messungen mit den fünf Feuchtigkeitssensoren, da mehr als fünf Punkte pro Messung ausgewertet werden können.

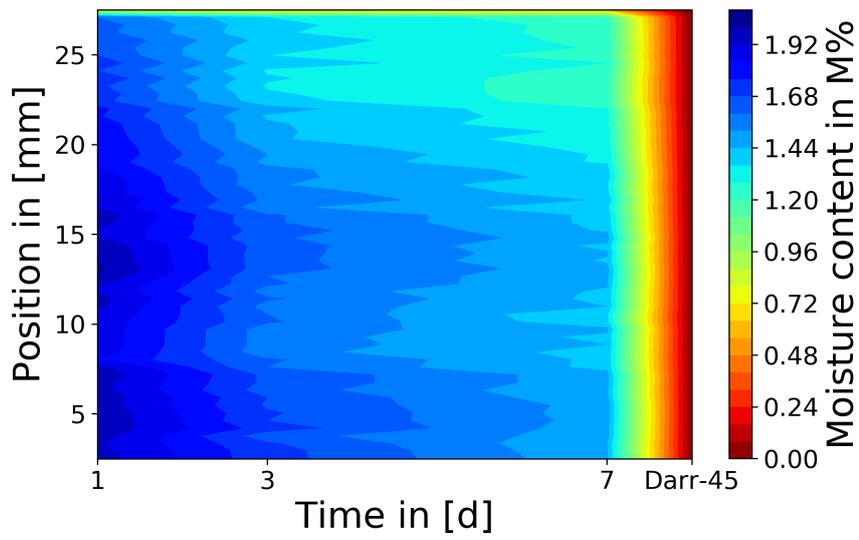


Abbildung 36: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe gemessen durch Neutronenradiographie

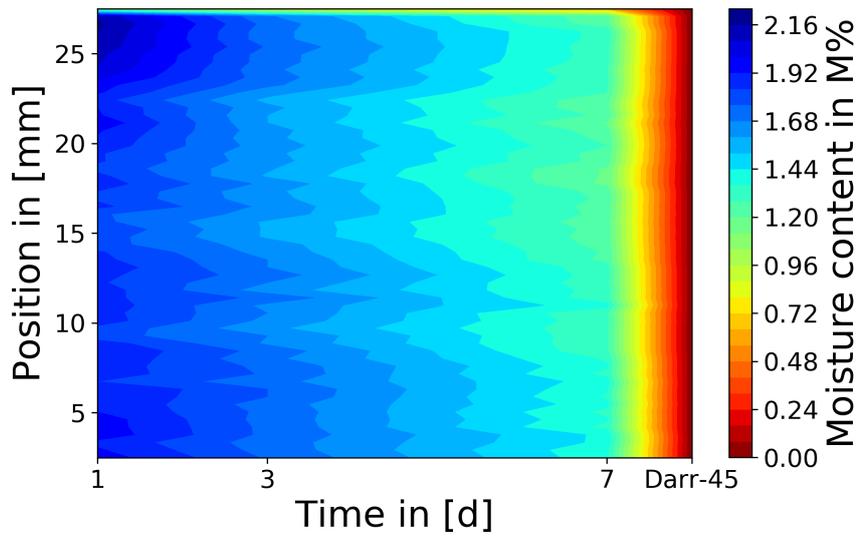


Abbildung 37: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=5/1)-Probe gemessen durch Neutronenradiographie

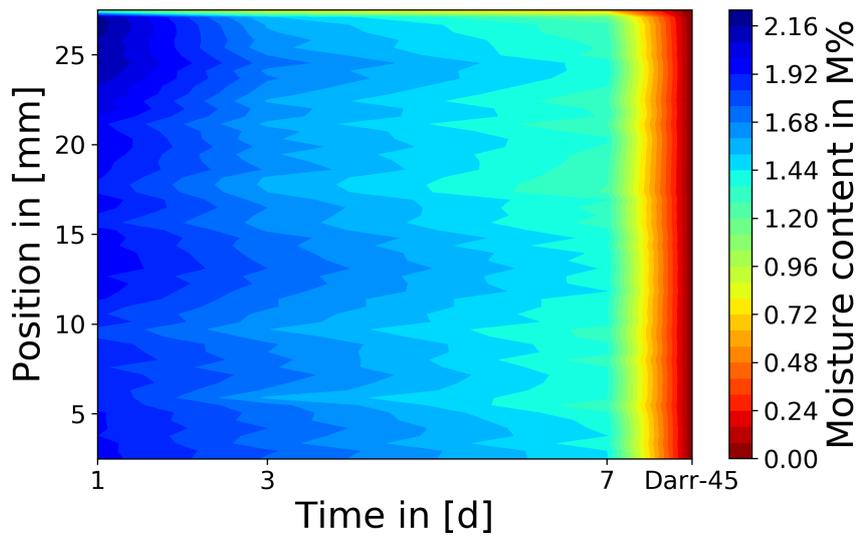


Abbildung 38: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I-Probe (G/Z=6/1)-Probe gemessen durch Neutronenradiographie

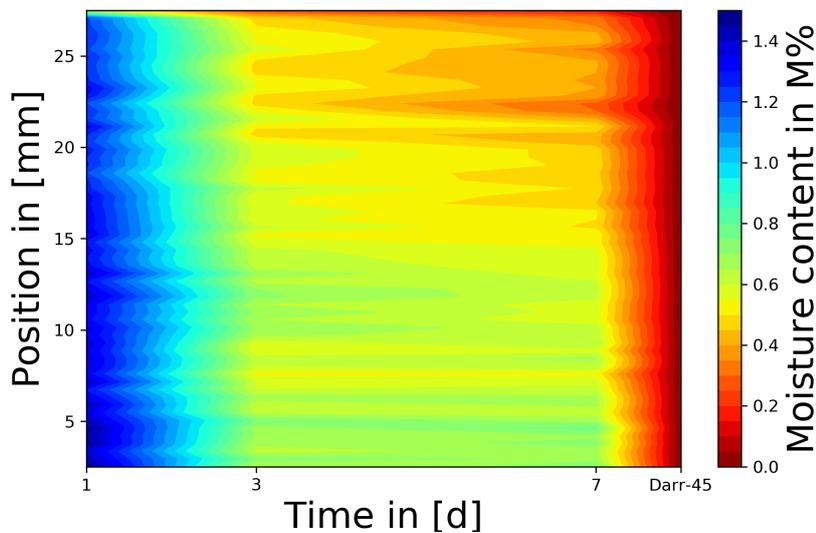


Abbildung 39: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Neutronenradiographie

Ein ähnlicher Verlauf der Feuchtigkeit ist bei beiden Messmethoden ersichtlich. Es wurde ebenfalls gemessen, dass die A38-Probe an der Deckfläche schneller als die anderen Proben getrocknet ist. Jedoch ist die Messung der FE50-Probe gegenteiliger Natur. In Abbildung 33 trocknet diese am langsamsten; die radiographische Messung dieser Probe, welche in Abbildung 39 zu sehen ist, zeigt, dass der FE50-Fließestrich am schnellsten

getrocknet ist.

5 Alternative Messmethoden

5.1 3D-Tomographie

Bei der Tomographie werden mehrere Einzelbilder, unter den gleichen Bedingungen wie die neutronen-radiographischen Aufnahmen und an der selben Anlage, die in Abbildung 2 dargestellt ist, aufgenommen. Zwischen den Aufnahmen wird im Unterschied zur Radiographie die Probe leicht mit einem Goniometer verdreht, um eine 3D-Darstellung erhalten zu können. Es wurden 251 Aufnahmen mit einer Verdrehung um jeweils $0,72^\circ$ um die Drehachse, die normal zur horizontalen Ebene steht, erstellt. Dabei entspricht die erste Aufnahme dem Bild der Probe bei einer 0° -Verdrehung und die 251te Aufnahme dem Spiegelbild bei 180° -Verdrehung. Nach dem Erstellen dieser Bilder folgt die Rekonstruktion der tomographischen Schnitte mit dem Programm „Octopus“. Dieses Programm überlagert die 2D-Aufnahmen zu einem Bild und erstellt daraus horizontale Schnittbilder. Dabei müssen die „Region of Interest“, der „Spot-Filter“ und der Bereich außerhalb der Probe zur Intensitätskorrektur gewählt werden. Da eine minimale Verkippung der Drehachse nicht ausgeschlossen werden kann, wird dieses Programm bei verschiedenen Kippwinkeln ausgeführt und die optisch schärfste Aufnahme weiterverwendet. Anschließend werden die erstellten Schnitte mit dem Programm „VGStudio“ eingelesen und daraus das finale 3D-Bild konstruiert. Nun können die unterschiedlichen Dichten, bzw. Neutronenabsorptionskoeffizienten der Probe farblich differenziert werden. Dabei kann die Transparenz für jeden Dichtebereich beliebig variiert werden, außerdem kann das 3D-Modell räumlich geschnitten werden.

5.1.1 Tomographische Messung

Für die tomographische Aufnahme wurde die eine trockene CEM1-Probe ($G/Z=6/1$) verwendet, da eine feuchte Probe sich während der Messzeit zu sehr ändern würde. In den folgenden Bildern wurden die verschieden hohen Neutronen-Absorption-Koeffizienten der Bestandteile der Probe in unterschiedlichen Farben dargestellt. Für die Färbung wurden Graustufen, Rot und Gelb verwendet:

- Graustufen: Niedrige Absorption (umso heller desto höher die Absorption)
- Rot: Hohe Absorption (umso kräftiger desto höher die Absorption)
- Gelb: Höchste Absorption (umso kräftiger desto höher die Absorption)

Da bei dieser Art von Abbildung das Gesamtspektrum in verschiedenen Farben differenziert wird, kann zwischen verschiedenen Stoffen mit gleichen Absorptionskoeffizienten nicht unterschieden werden. Außerdem kann kein eindeutiger Grenzwert für die farbliche

Unterscheidung bestimmt werden, also kann ein Materialtyp unter Umständen bei starker Verdichtung in unterschiedlichen Farben dargestellt sein. Außerdem ist zu beachten, dass Wasserstoff einen deutlich höheren Neutronen- Absorptionskoeffizienten als anorganische Baustoffe aufweist, daher sollte es sich bei den rötlich bzw. gelblich gefärbten Regionen um wasserstoffhaltige Bereiche handeln.

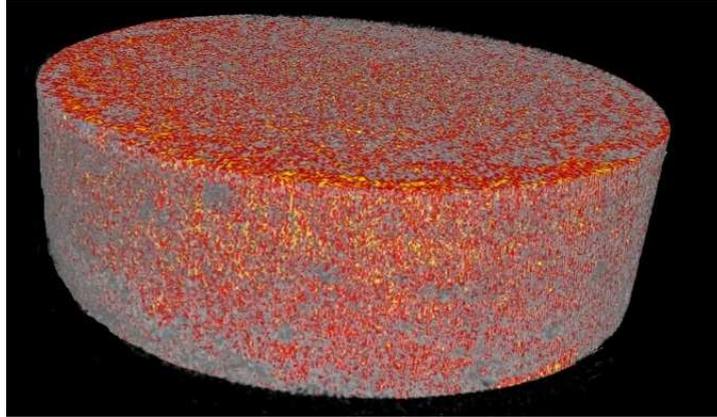


Abbildung 40: 3D-Darstellung der ganzen CEM I-Probe

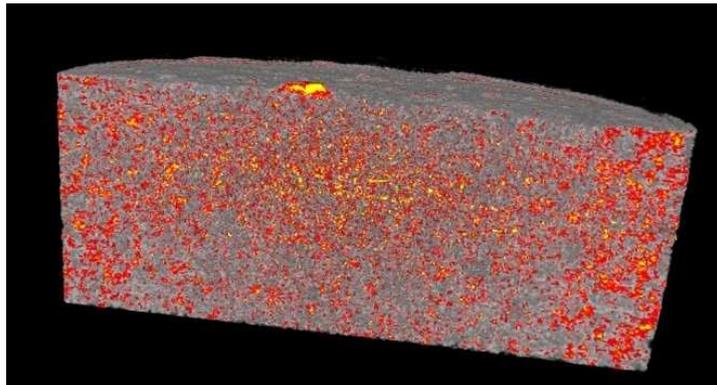


Abbildung 41: Vertikaler Schnitt durch die CEM1-Probe (G/Z=6/1) (durch eine kleine Unebenheit auf der Deckfläche)

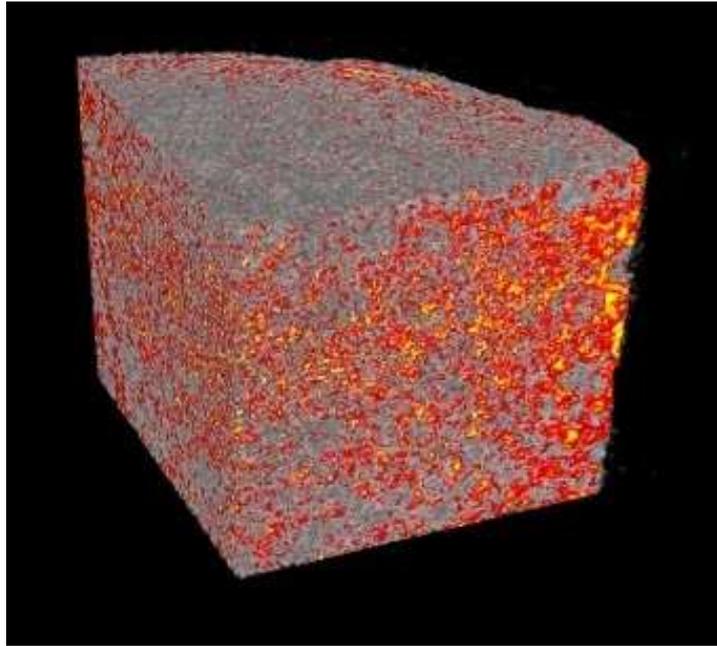


Abbildung 42: Doppelter vertikaler Schnitt durch die CEM1-Probe ($G/Z=6/1$)

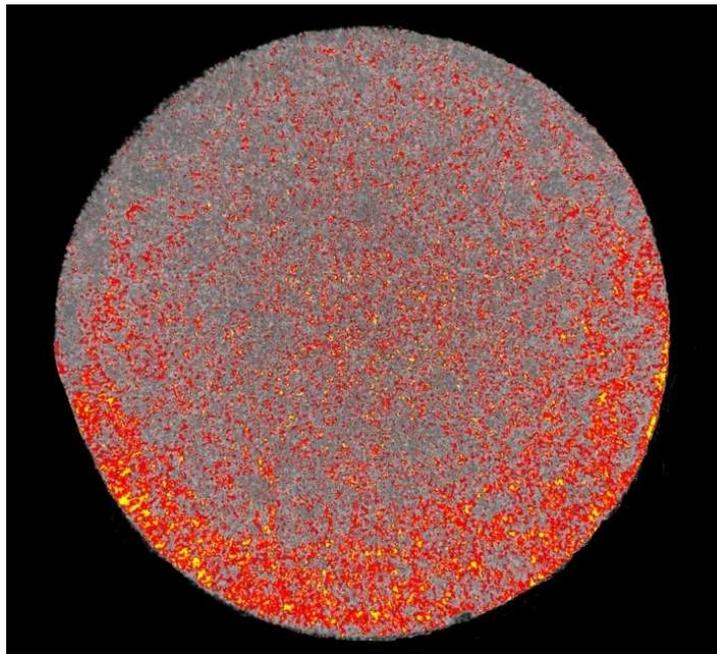


Abbildung 43: Horizontaler Schnitt durch die Probe, jedoch ist ein Messfehler bei dieser Aufnahme zu erkennen

Im Anhang 8.1.1 befinden sich weitere Aufnahmen dieser Messung.

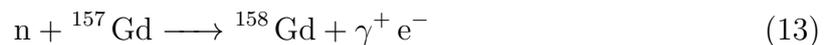
5.1.2 Interpretation der tomographischen Aufnahmen

Bei allen Darstellungen der Probe ist deutlich zu erkennen, dass die Probe in der Nähe der Oberfläche Material mit höherer Absorption von Neutronen aufweist. Dies bedeutet, dass sich mehr Wasser in der Nähe der Oberfläche der Probe gesammelt hat. Die kleinen roten Punktierungen in der Probe sind die Poren, in denen sich Wasser, bzw. der Klebstoff konzentriert. Die gräulichen Bereiche sind anorganische Substanzen.

Abbildung 43 ist leider aufgrund eines Messfehlers nur teilweise richtig. Im Kapitel 7.5 wird auf diesen Fehler eingegangen.

5.2 Imaging Plate

Für die hochdetaillierten Aufnahme mit dem 'Imaging Plates' wurde die gleiche Probe wie für die Tomographie verwendet. Bei einer Belichtungszeit von 80 Minuten kann eine effektive Auflösung von $50\ \mu\text{m}$ (16 Bit dynamisch) erreicht werden. Dies entspricht der vierfachen Auflösung des Szintillationsdetektors. Die auf die 'Imaging Plate' auftreffenden Neutronen werden in Elektronen umgewandelt; dieser Vorgang wird durch Gleichung 13 beschrieben:



n ... Neutron

${}^{157}\text{Gd}$... Gadolinium-157

${}^{158}\text{Gd}$... Gadolinium-158

e^{-} ... Elektron

Die bei diesem Prozess entstehende Energie wird in einer photostimulierbaren Phosphorschicht zweidimensional gespeichert. Zum Auslesen verwendet der Scanner einen He-Ne-Laser, mit dem die Anregungszentren bestimmt werden können. Das Löschen der Imaging Plate funktioniert mithilfe einer Bestrahlung durch Weißlicht. Eine 'Imaging Plate' kann dadurch mehrmals verwendet werden. Sie eignet sich perfekt für hochauflösende Radiographie.

Jedoch dauert die Aufnahme länger und die Positionierung der Platte kann leider nicht millimetergenau durchgeführt werden.

Abbildung 44 zeigt die durch die 'Imaging Plate' erzeugte Aufnahme:

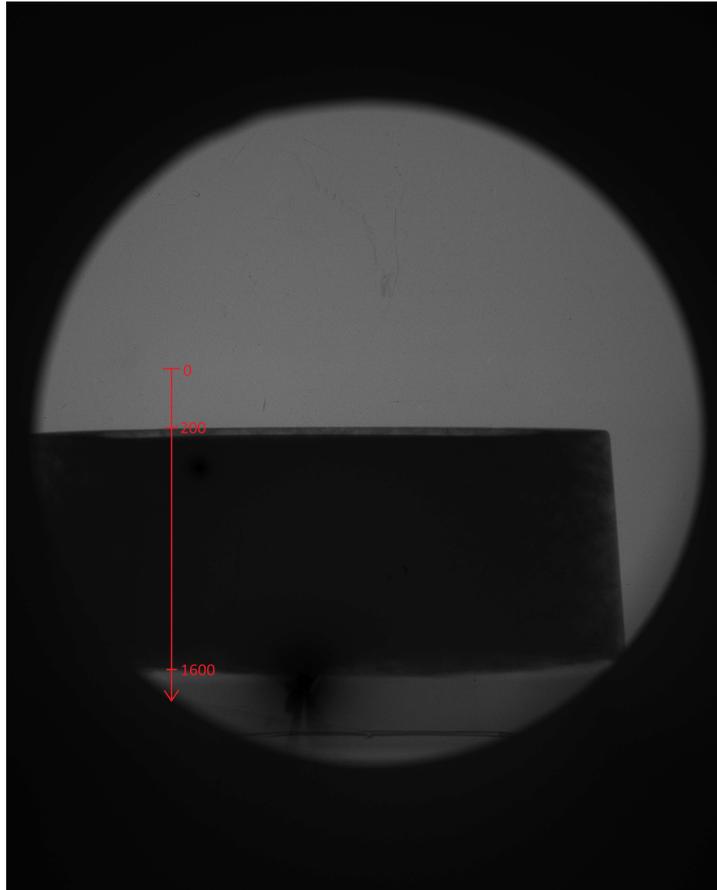


Abbildung 44: Messung durch Imaging Plate der CEM I (G/Z=6=1)-Probe

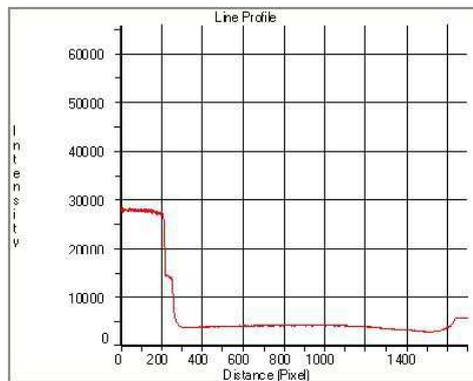


Abbildung 45: Linienprofil der Messung durch Imaging Plate der CEM I (G/Z=6/1)-Probe

Der Vorteil dieser Aufnahme mit einer 'Imaging Plate' ist in Abbildung 45 zu erkennen. Aufgrund der höheren Anzahl von Bildpunkten ist der Mittelwert über die Fläche der Probe genauer, da statistische Fehler minimiert werden. Deshalb ist der Graph in Abbildung 45 deutlich glatter als Aufnahmen in Kapitel 4.1.3.

In Abbildung 45 sinkt die Anzahl der gemessenen Neutronen Richtung Unterseite der Probe leicht ab. Dies liegt jedoch nicht am Feuchtegehalt der Probe, sondern an der leicht konischen Form der Probe, die für diese Messung verwendet wurde. Die Form der Probe ist in Abbildung 13 gut ersichtlich.

Diese Aufnahmemethode ist aufgrund der mangelnden Reproduzierbarkeit für eine Tomographie nicht anwendbar.

6 Conclusio

Die Neutronenradiographie ist ausgezeichnete Methode die Feuchtigkeitsverteilung in Estrichen und Zementen darzustellen. Es konnten aussagekräftige Ergebnisse erstellt werden, die den Trocknungsprozess visualisieren. Im Trocknungsprozess konnte eine übermäßig trockene Schicht an der Oberfläche der Proben gemessen werden.

Messungen durch elektronische Sensoren, durch die Darr-Methode und durch die CM-Methode lieferten konsistente Ergebnisse zur Neutronenradiographie. Die CM-Methode zeigt bei hohem Feuchtegehalt ungenaue Messergebnisse, was mit dieser Messreihe bestätigt werden konnte.

Es wurden alternative Methoden vorgestellt, wie zum Beispiel die Messung mit einer 'Imaging Plate', die bei anderen Messaufbau genauere Ergebnisse erzielen kann. Diese kann für zukünftige Messungen verwendet werden, um den inneren Aufbau der Proben deutlicher zeigen zu können

Anschauliche Bilder bieten die Ausschnitte der 3D-Tomographie, die einen Einblick über den Aufbau einer trockenen Probe ermöglicht.

Für die Bauindustrie könnten Neutronenquellen zur verlässlichen Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalt verwendet werden.

7 Limitationen

7.1 Positionierung der Probe

Abbildung 46 zeigt die berechnete Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I ($G/Z=5/1$) vor Anwendung des Positionierungsalgorithmus. Da die Bilder, die zur Berechnung des Bildes verwendet wurden, nicht deckungsgleich sind, kommt es zu signifikanten Peaks an den Rändern der Probe.

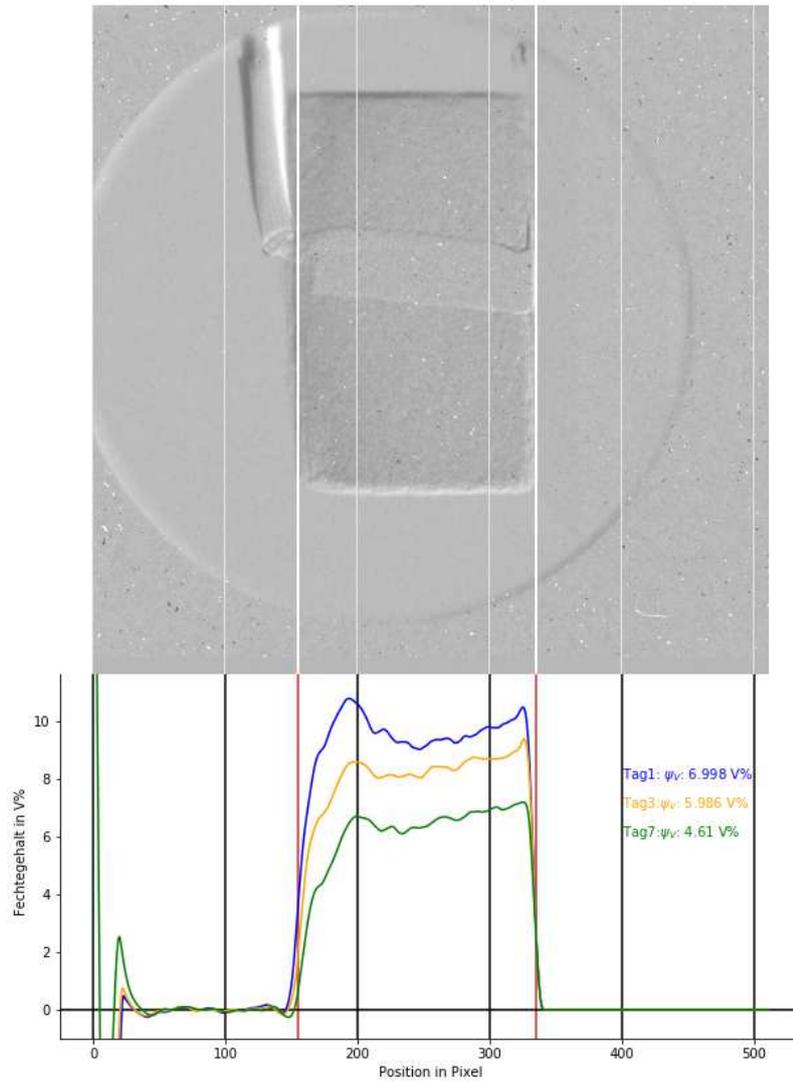


Abbildung 46: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe

Für Berechnung des Mittelwerts werden die Werte einer Pixelreihe entlang der horizontalen Linie, die in Abbildung 10 als grüne Linie gekennzeichnet ist, verwendet. Aus diesem Grund haben Verdrehungen der Probe oder des aufgenommenen Bildes einen starken Einfluss auf diesen Mittelwert. Insbesondere am Rand der Proben bzw. des Bildes sind dadurch Peaks entstanden. Dieser Effekt wird mit folgender Abbildung 47 verdeutlicht:

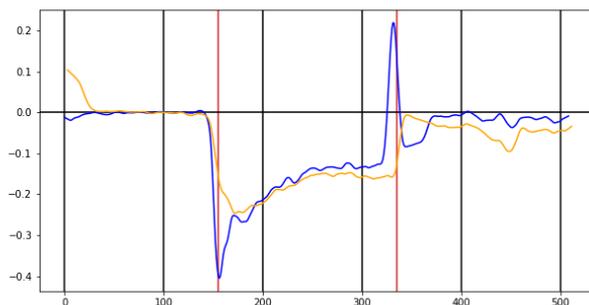


Abbildung 47: Auswirkung einer Verdrehung des Bildes auf das Histogramm

Die Aufnahme des ersten Tages der Messreihe, die in Abbildung 46 blau dargestellt ist, wurde im und gegen den Uhrzeigersinn um $1,5^\circ$ verdreht und danach erneut durch die Aufnahme des siebten Tages dividiert. Abbildung 47 verdeutlicht, dass Verdrehungen die Randpeaks entweder stark verstärken, bzw. abschwächen.

Im Vergleich zu Abbildung 16 ändert sich die Skalierung der y-Achse.

In Abbildung 48 wurden die verkippten Bilder durch das Ausgangsbild dividiert, wodurch die Peaks an den Rändern stark zu erkennen sind.

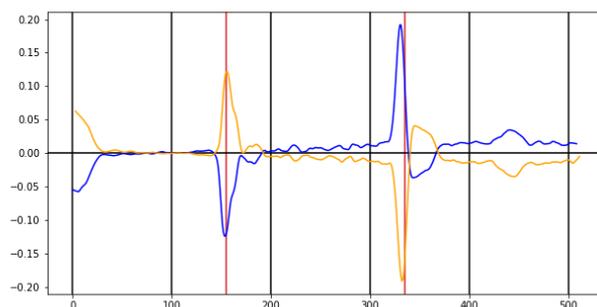


Abbildung 48: Auswirkung einer Verdrehung des Bildes auf das Histogramm durch Vergleich mit dem Ausgangsbild

Innerhalb der Probe ist der durch Verdrehung des Bildes entstandene Fehler jedoch schwächer.

Der Bereich unter der Probe, der sich in Abbildung 48 rechts vom rechten Peak befindet, ist durch die Verdrehung stärker als der Bereich über der Probe beeinflusst. Dies ist auf die Struktur des Probestisches rückzuführen, da dieser Bohrlöcher beinhaltet und daher ähnliche Fehler erzeugt wie der Rand der Probe. Daher sind Abweichungen von 0 unter anderem auch diesem Effekt zuzuweisen.

Dieses Problem konnte jedoch mit Hilfe eines Programms, das die aufgenommenen Bilder pixelgenau übereinstimmt reduziert werden. Der Programmcode ist im Anhang 8.4.1 zu finden.

7.2 Niedriger Wassercementwert der CEM I-Proben des Januar 2018

Die CEM I-Proben, die im Januar 2018 angerührt wurden, hatten einen w/z-Wert von 0,44. Dies ist ein zu niedriger Wert für CEM I Portlandzement. Daher wurden diese Proben im Dezember 2018 erneut gemessen.

Folglich sind die Messungen der CEM I-Proben im Anhang 8.2 zu trocken.

7.3 Veränderung der Stahlrohr-Position in der Aufnahme

Während der Auswertung der Tomographiedaten ist ein systematischer Fehler des Versuchsaufbaus entdeckt worden. Das kreisrunde Strahlrohr ist nicht bei allen Aufnahmen an der selben Stelle. Die runde Öffnung scheint in den Aufnahmen über die Zeit leicht die Position zu wechseln, obwohl Strahlrohr, Spiegel und Kamera fest verankert waren. Abbildung 49 zeigt die Differenz zweier Bilder, die für die Tomographie aufgenommen wurden. Zwischen den Aufnahmen dieser Bilder sind nur wenige Minuten vergangen:

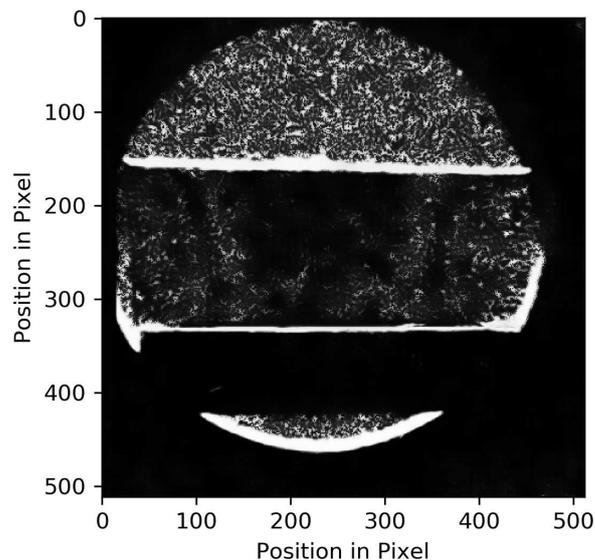


Abbildung 49: Differenz zwischen zwei tomographischen Aufnahmen

Die hellen Linien am unterem Ende des Strahlrohrs verdeutlichen, dass der Bildausschnitt bewegt worden ist. Während der Messung blieb die Anlage jedoch unberührt. Außerdem trat dieser Effekt während der Tomographie wiederholt auf.

Diese Unstetigkeit hat ebenfalls Auswirkungen auf die Messgenauigkeit dieses Experimentes. Jedoch kann mit Hilfe des Programms, das in Kapitel 8.4.1 zu finden ist, dieser Effekt reduziert werden.

Der Grund für das Auftreten dieses Fehlers ist unbekannt.

7.4 Defekter Feuchtigkeitssensor in der FE50-Probe

Der unterste Sensor der FE50-Fließestrich-Probe war defekt und lieferte zu geringe relative Feuchtigkeitswerte. Dies ist deutlich in Tabelle 9 zu erkennen.

Vor Verwendung im Januar 2018 wurden die Sensoren getestet, jedoch war dieser bereits damals defekt. Da jeweils fünf Sensoren miteinander gekoppelt sind, konnte dieser nicht ersetzt werden.

Während der Messungen im Januar lieferte der Sensor jedoch plausible Werte. Hierbei handelt es sich wahrscheinlich um ein Kondensat am Detektor, das die gemessenen Werte verfälschte.

Um diesen Fehler auszugleichen wurden realistischere relative Feuchtigkeitswerte für den Sensor auf 5 mm Höhe extrapoliert.

Abbildung 50 zeigt den Verlauf der relativen Feuchtigkeit in FE50-Fließestrich-Probe mit den ursprünglichen Werten des Sensors.

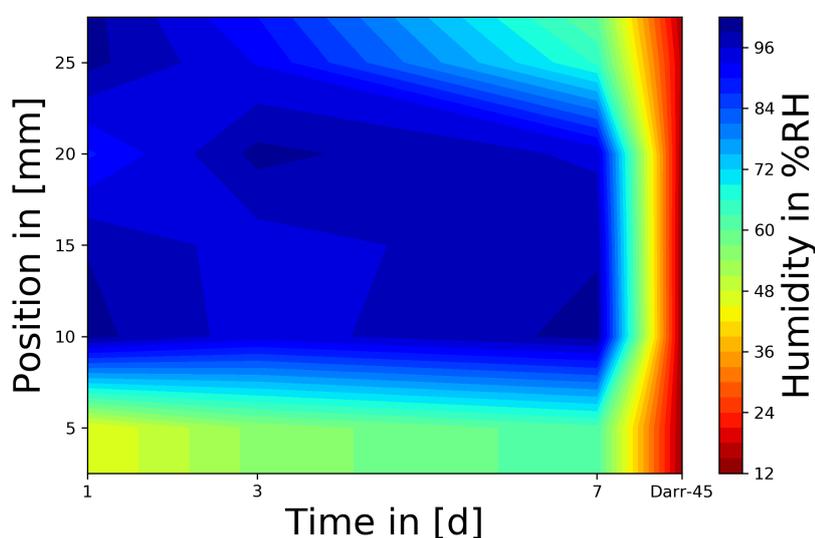


Abbildung 50: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe gemessen durch Feuchtigkeitssensoren, wobei die Werte des untersten Feuchtigkeitssensors aus den anderen Werten extrapoliert wurden

Teilweise sind ebenfalls Werte des Sensor bei sehr hohen relativen Feuchtigkeitswert verfälscht, da der Detektor nur zwischen einem relative Feuchtigkeitssgehalt zwischen 11 %RH und 89 %RH verlässlich funktioniert.

7.5 Probengröße bei tomographische Aufnahme

Die eingesetzte Probe war wenige Millimeter zu groß für eine tomographische Aufnahme mit der verwendeten Anlage, daher bewegte sich die Probe während der Aufnahme leicht aus dem Neutronenstrahl, dies ist in Abbildung 51 zu erkennen. Dadurch sind

7 Limitationen

die Messwerte am Rand des oberen Halbkreises in Abbildung 43 nicht korrekt, weil ein Teil der Information fehlte. Aus diesem Grund wurde ein bearbeitetes Bild, welches in Abbildung 52 dargestellt ist, erstellt.

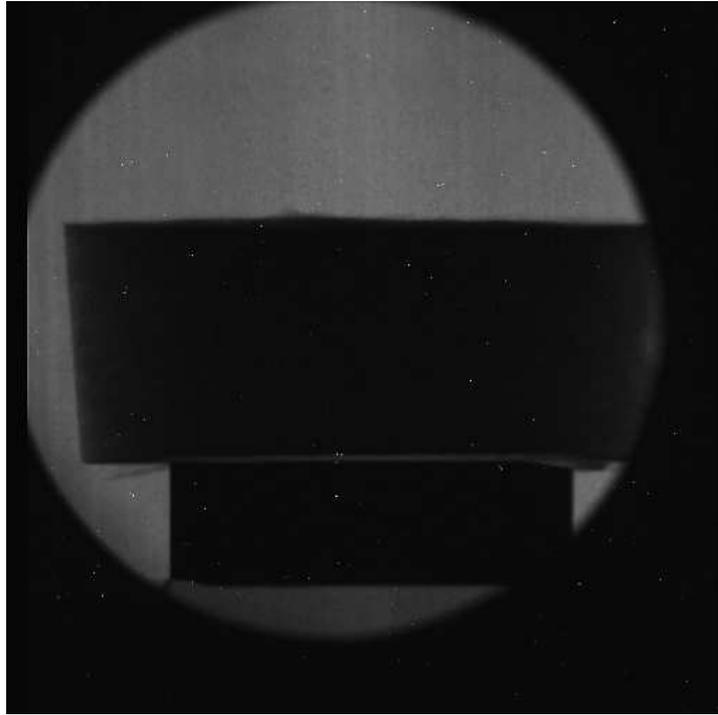


Abbildung 51: Nach einer 160°-Drehung befindet sich die Probe nicht mehr vollkommen im Neutronenstrahl

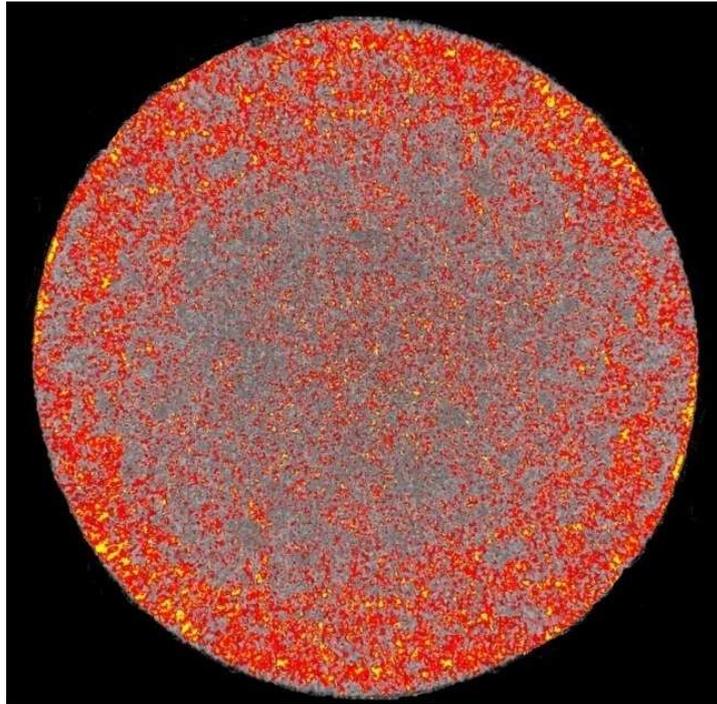


Abbildung 52: Bearbeiteter horizontaler Schnitt durch die Probe

8 Anhang

8.1 Zusätzliches Bildmaterial

8.1.1 Tomographie

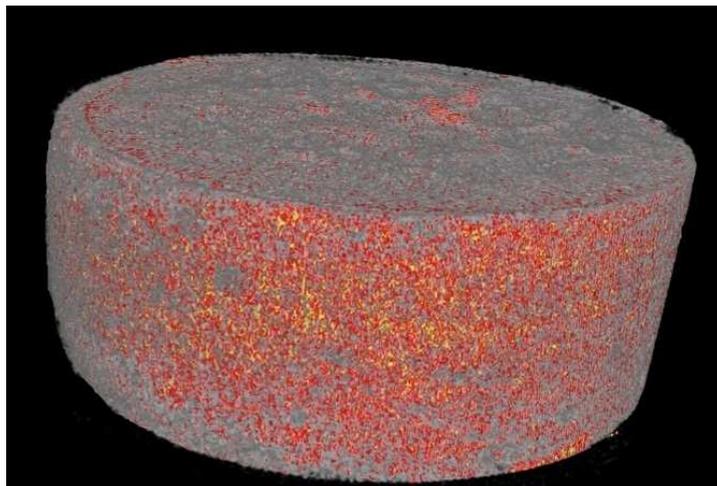


Abbildung 53: 3D-Darstellung der CEM I-Probe

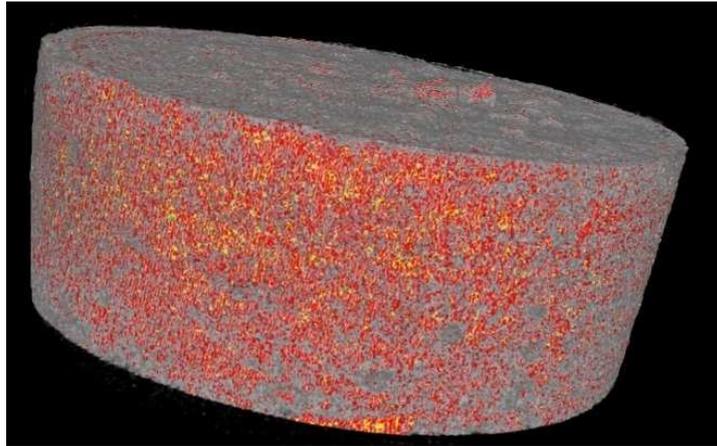


Abbildung 54: 3D-Darstellung der CEM I-Probe

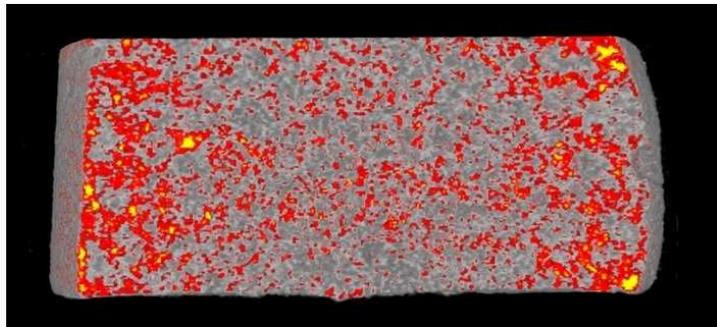


Abbildung 55: Vertikaler Schnitt durch die Probe unter Anwendung eines Gauß-Filters

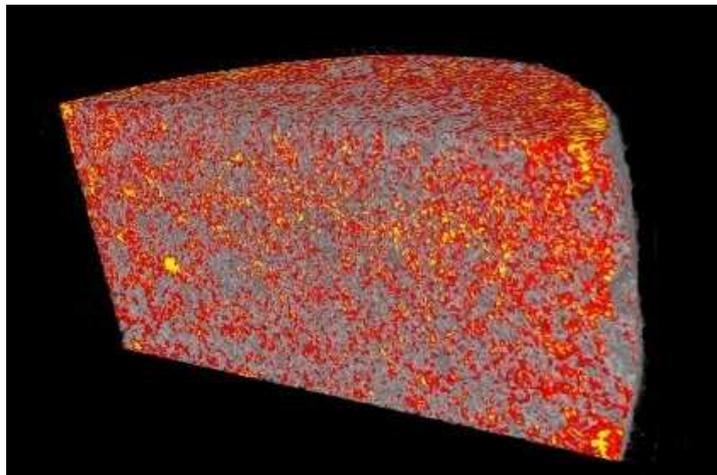


Abbildung 56: Vertikaler und Horizontaler Schnitt durch die 3D-Darstellung

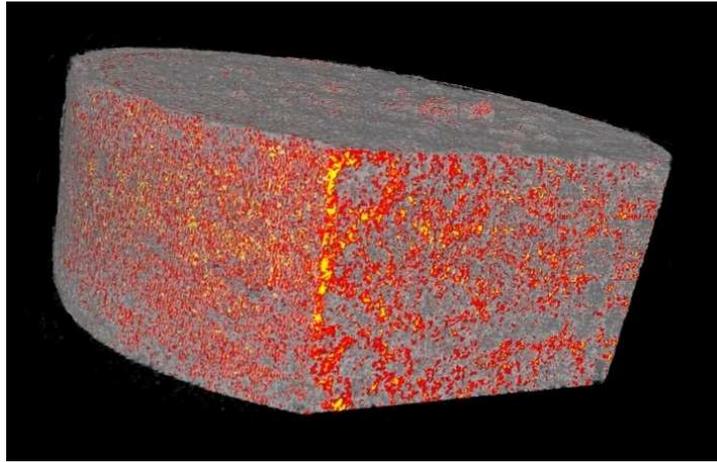


Abbildung 57: vertikaler Schnitt durch die 3D-Darstellung

8.2 Messergebnisse vom Januar 2018

Im Januar 2018 wurden ebenfalls Messungen durchgeführt. Zur Erstellung dieser Bilder wurden dieselben Programme und Messmethoden verwendet wie für die Proben, die im Dezember 2018 gemessen wurden.

8.2.1 Neutronenradiographische Aufnahmen vom Januar 2018

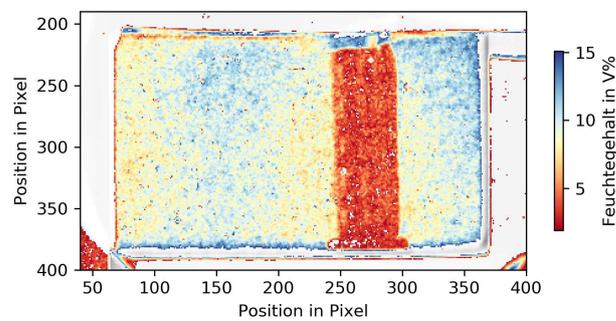


Abbildung 58: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 11.01.2018

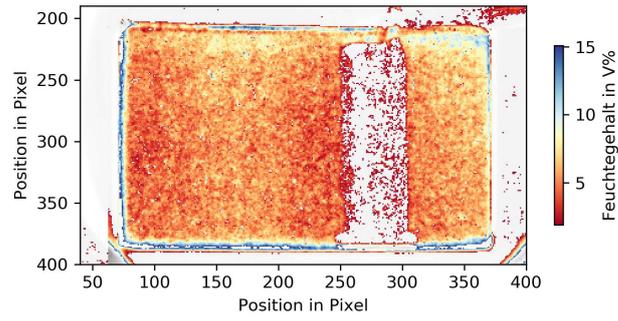


Abbildung 59: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 12.01.2018

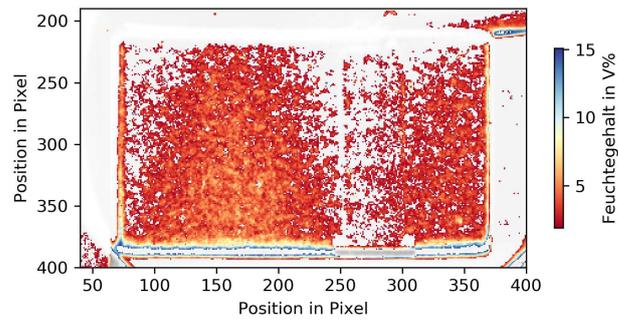


Abbildung 60: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 18.01.2018

8 Anhang

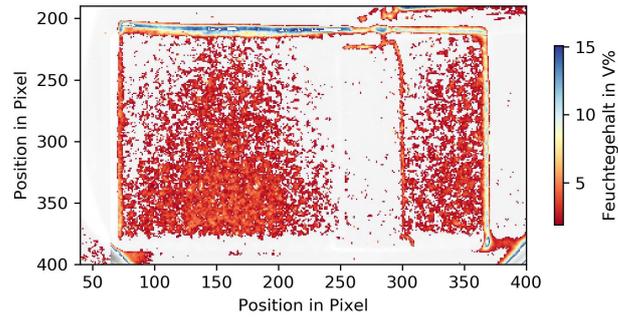


Abbildung 61: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom 19.01.2018

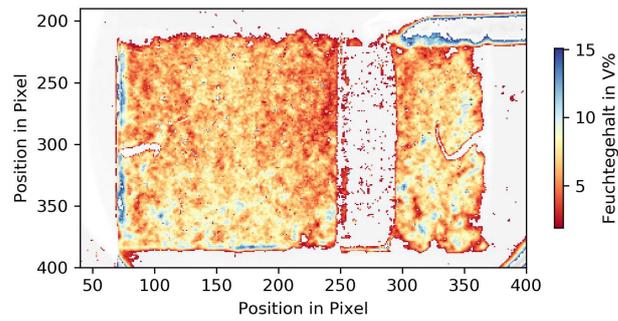


Abbildung 62: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 11.01.2018

8 Anhang

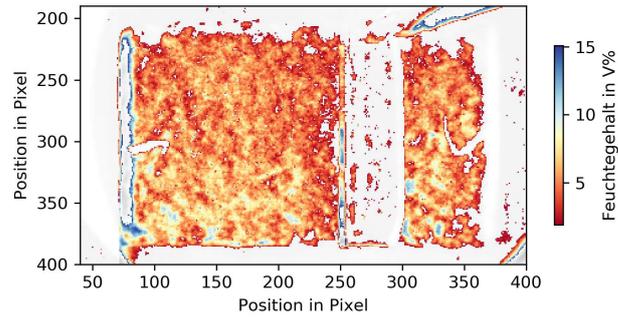


Abbildung 63: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 12.01.2018

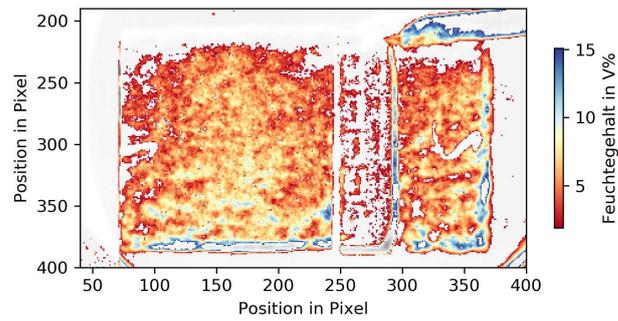


Abbildung 64: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 18.01.2018

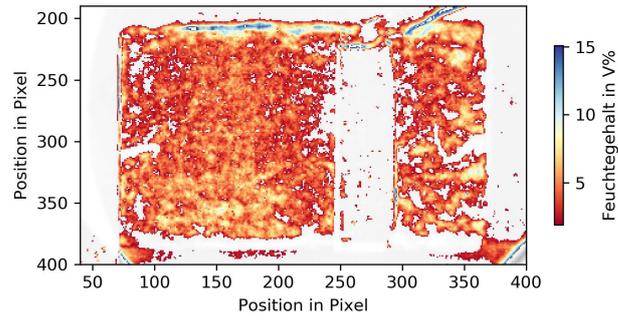


Abbildung 65: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 19.01.2018

8.2.2 Messergebnisse der elektronischen Messung vom Januar 2018

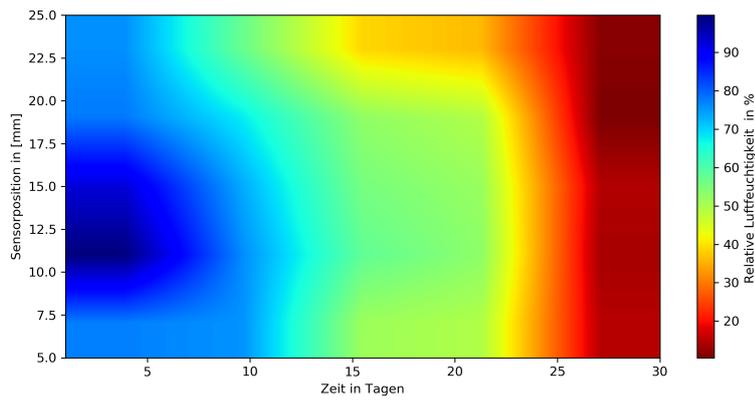


Abbildung 66: Feuchtigkeitsverteilung in der A38-Probe vom 19.01.2018

8 Anhang

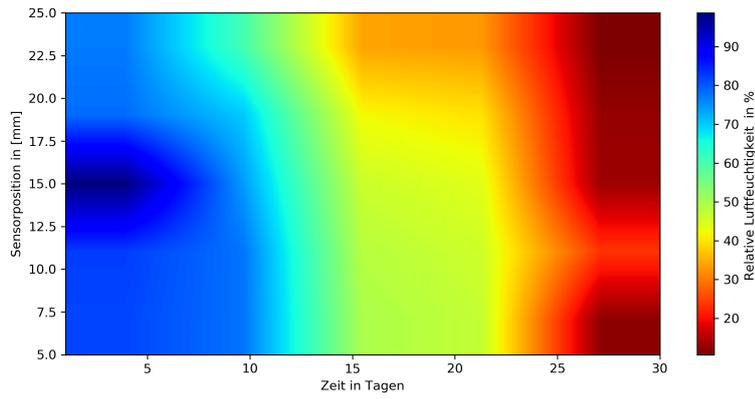


Abbildung 67: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=5/1)-Probe vom Januar 2018

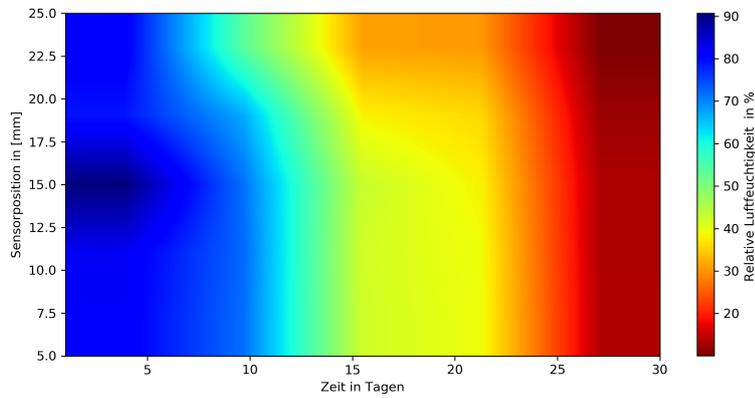


Abbildung 68: Feuchtigkeitsverteilung in der CEM I (G/Z=6/1)-Probe vom Januar 2018

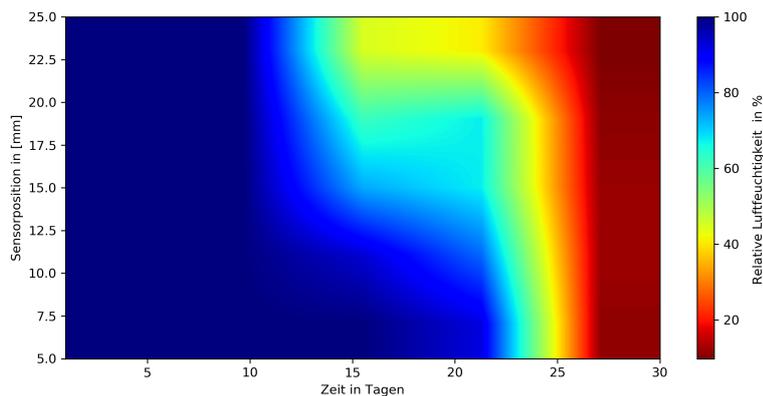


Abbildung 69: Feuchtigkeitsverteilung in der FE50-Probe vom Januar 2018

8.2.3 Gravimetrische Messung vom Januar 2018

Durch Messung der Gewichtsveränderung kann auf den Feuchtegehalt der Probe vor der Trocknung geschlossen werden.

Probe	11.1.18 Masse in [g]	12.1.18 Masse in [g]	18.1.18 Masse in [g]	19.1.18 Masse in [g]	Darr-45 Masse in [g]
A38	276.06	275.52	274.38	274.24	271.15
CEM I (G/Z=5/1)	264.47	262.98	261.79	261.5	258,53
CEM I (G/Z=6/1)	260.23	258.83	257.47	257.33	254.88
FE50	283.96	279.20	272.23	271.95	268.98

Tabelle 10: Masse der Proben im Januar 2018

Die Daten von Tabelle 10 wurden durch Abbildung 70 visualisiert:

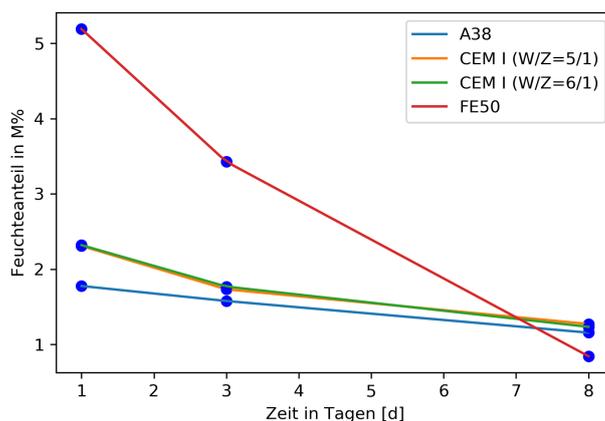


Abbildung 70: Visualisierung des Masseverlust der Proben vom Januar 2018

8.2.4 CM-Messung vom Januar 2018

Tabelle 11 zeigt die Messwerte die im Januar 2018 durch die CM-Methode ermittelt wurden:

Probe	11.1.18 Feuchtigkeit in [M%]	12.1.18 Feuchtigkeit in [M%]	18.1.18 Feuchtigkeit in [M%]	19.1.18 Feuchtigkeit in [M%]
A38	1.5	1.37	0.9	0.88
CEM I (G/Z=/5/1)	1.3	1.2	0.2	0.1
CEM I (G/Z=/6/1)	1.3	1.1	0.2	0.1
FE50	9.0	4.6	0.2	0.1

Tabelle 11: Durch die CM-Methode ermittelte Feuchtigkeit in [M%] der Proben vom Januar 2018

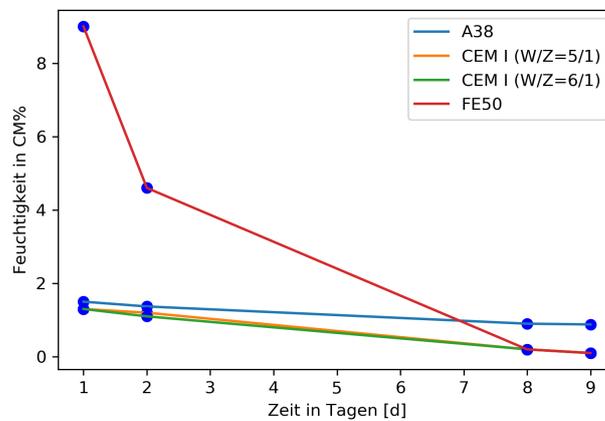


Abbildung 71: Visualisierung der Messergebnisse der CM-Methode vom Januar 2018

8.3 Datenblätter

8.3.1 Arbeitsanweisung des CM-Messgeräts



Arbeitsanweisung CM-Messung

Feuchtigkeitsbestimmung
Schnell. Einfach. Zuverlässig.

Die CM-Messung dient der Bestimmung der Estrichfeuchte zur Feststellung der Belegereife. Die Probenentnahme für die CM-Messung darf bei Heizstrichen nur an den ausgewiesenen Messstellen erfolgen oder wenn der Verlauf der Heizschlaufen vorgängig mit entsprechenden Hilfsmitteln festgestellt werden kann (Infrarotkamera, CPM-Monitor oder Oberflächenthermometer)

1) Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass bei der Probenvorbereitung so wenig Feuchtigkeit wie möglich verloren geht.

Daraus folgt:

- Die Probenentnahme und Probenvorbereitung muss so schnell wie möglich durchgeführt werden.
- Bei der Probenentnahme am besten **Arbeitshandschuhe tragen**.
- Die Probenvorbereitung darf nicht bei Sonneneinstrahlung bzw. Luftzug vorgenommen werden.
- Die Probe ist nur soweit zu zerkleinern, dass sie in dem CM-Gerät mit Hilfe des Kugelsatzes (4 Kugeln) völlig zerkleinert werden kann. **Die Probe am besten in einem Plastikbeutel zerkleinern.**

2) Vor der Probenentnahme sind jeweils folgende Massnahmen zu ergreifen:

- Vorprüfung mit einem kapazitiven Feuchtigkeitsprüfgerät zur Ortung der geeigneten Prüfstelle.
- Überprüfen, ob CM-Gerät dicht ist (ggf. mit Prüfmittel), ggf. Gummidichtung reinigen oder erneuern,
- Kugelsatz in das CM-Gerät einfüllen,
- sofern erforderlich Waage am Koffer des Gerätes befestigen und Probenbecher vorbereiten
- Schale, Vorschlaghammer resp. Hämmer und Löffel bereitlegen,
- Protokoll vorbereiten (Angabe von Baustelle, Stockwerk, Raum, Prüfdatum, Prüfer und Luft- und Bodentemperatur sowie Luftfeuchtigkeit sowie Estrichtyp und gegebenenfalls Zusatzmittel).

3) Bei der Prüfungsdurchführung ist wie folgt vorzugehen:

1. Durchschnittsprobe grundsätzlich über den ganzen Querschnitt des Estrichs entnehmen. Bei Parkett sind die Grenzwerte traditionsgemäß auf das Messen des unteren bis mittleren Bereiches abgestimmt. Unter Parkett ist deshalb die Durchschnittsprobe des Estrichs aus dem unteren bis mittleren Bereich zu entnehmen (evtl. Handschuhe und Schutzbrille tragen).



2. Durchschnittsprobe **im Beutel** in der Schale soweit zerkleinern, dass ein völliges Zerkleinern in dem CM-Gerät mit den Kugeln möglich ist.



3. Prüfgut mit Löffel abwiegen:

Calciumsulfatestrich:	100 g
Magnesiaestrich: jung	20 g
bei Belegereife	50 g
Zementestrich: jung	20 g
bei Belegereife	50 g



4. Prüfgut vorsichtig in CM-Gerät einfüllen.



5. CM-Gerät schräg halten und Glasampulle mit Calciumcarbid einfüllen.

6. Die Flaschentemperatur am Oberflächenthermometer ablesen und notieren.



7. Nach dem Verschliessen des CM-Gerätes kräftig schütteln, bis Anzeige am Manometer des Gerätes ansteigt.



8. Durch kräftiges Hin- und Herbewegen sowie durch kreisende Bewegungen des Prüfgutes im CM-Gerät mit Hilfe der Kugeln völlig zerkleinern. Dauer: 2 Minuten

Anmerkung: Die Manometer unserer modernen CCM-Geräte sind durch eine patentierte Deckeldämpfung gegen die Kugelschläge geschützt.

9. 5 Minuten nach dem Verschliessen des CM-Gerätes wie unter Punkt 7. eine weitere Minute schütteln.
10. **10 Minuten** nach dem Verschliessen des CM-Gerätes nochmals kurz (~ 10 s) aufschütteln und Wert ablesen. Der Feuchtegehalt kann direkt vom Manometer abgelesen oder der Eichtafel (Gebrauchsanleitung Seite 7) entnommen werden. Wert in das Protokoll eintragen. **Anmerkung:** Bei calciumsulfatgebundenen Estrichen ist ein weiterer Druckanstieg möglich; nicht beachten, da chemisch (d.h. fest-)gebundenes Wasser.
11. Endtemperatur ablesen und notieren. CM-Gerät entleeren und reinigen.
Wichtig: Beim Entleeren Prüfgut überprüfen, Falls dieses nicht völlig zerkleinert, Prüfung einschliesslich Probeentnahme wiederholen und dabei Prüfgut mit Schlosserhammer und Vorschlaghammer feiner zerkleinern (oder intensiver Schütteln).
12. Prüfgut entsprechend den Vorgaben des Herstellers entsorgen.

Belegereife	beheizt	unbeheizt	¹ Unter Stein- und keramische Belägen: 2,0 CM-%. Quelle: BEB-Merkblatt „CM-Messung“ Ausgabe: 01/2007
Calciumsulfatestrich	0,3 CM-%	0,5 CM-%	
Zementestrich	1,8 CM-% ¹⁾	2,0 CM-%	

8.3.2 Datenblatt des Feuchtigkeitssensors

Honeywell



HIH-5030/5031 Series

Low Voltage Humidity Sensors

DESCRIPTION

The HIH-5030/5031 Series Low Voltage Humidity Sensors operate down to 2.7 Vdc, often ideal in battery-powered systems where the supply is a nominal 3 Vdc.

The HIH 5030/5031 complements our existing line of 5 Vdc SMD (Surface Mount Device) humidity sensors. SMD packaging on tape and reel allows for use in high volume, automated pick and place manufacturing, eliminating lead misalignment to printed circuit board through-holes.

The HIH-5030/5031 Series Humidity Sensors are designed specifically for high volume OEM (Original Equipment Manufacturer) users.

Direct input to a controller or other device is made possible by this sensor's near linear voltage output. With a typical current draw of only 200 μ A, the HIH-5030/5031 Series is ideally suited for many low drain, battery operated systems.

Tight sensor interchangeability reduces or eliminates OEM production calibration costs.

FEATURES

- Operates down to 2.7 Vdc, often ideal in battery-powered systems where the supply is a nominal 3 Vdc.
- Tape and reel packaging allows for use in high volume pick and place manufacturing (1,000 units per tape and reel)
- Molded thermoset plastic housing
- Near linear voltage output vs %RH
- Laser trimmed interchangeability
- Low power design
- Enhanced accuracy
- Fast response time
- Stable, low drift performance
- Chemically resistant

The HIH-5030/5031 Series delivers instrumentation-quality RH (Relative Humidity) sensing performance in a competitively priced, solderable SMD.

The HIH-5030 is a covered integrated circuit humidity sensor. The HIH-5031 is a covered, condensation-resistant, integrated circuit humidity sensor that is factory-fitted with a hydrophobic filter allowing it to be used in many condensing environments including industrial, medical and commercial applications.

The RH sensor uses a laser trimmed, thermoset polymer capacitive sensing element with on-chip integrated signal conditioning.

The sensing element's multilayer construction provides excellent resistance to most application hazards such as condensation, dust, dirt, oils and common environmental chemicals.

Sample packs are available. See order guide.

POTENTIAL APPLICATIONS

Industrial

- Air compressors
- Battery-powered systems
- Drying equipment
- HVAC (includes air conditioning, air movement, thermostats, humidifiers, de-humidifiers, humidistats, enthalpy sensing)
- OEM assemblies
- Office automation equipment
- Process equipment
- Refrigeration (includes bulk and transport systems)
- Telecommunications cabinets
- Weather stations and meteorology equipment

Medical

- Hospital air compressors
- Infant incubators
- Microenvironments
- Sleep apnea equipment
- Treadmill stress monitoring equipment

HIH-5030/5031 Series

Table 1. Performance Specifications (At 3.3 Vdc supply and 25 °C [77 °F] unless otherwise noted.)

Parameter	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Specific Note
Interchangeability (first order curve) 0% RH to 10% RH, 90% RH to 100% RH 11% RH to 89% RH	-7 -3	– –	7 3	% RH % RH	–
Accuracy (best fit straight line) 11% RH to 89% RH	-3	–	+3	% RH	4
Hysteresis	–	2	–	% RH	–
Repeatability	–	±0.5	–	% RH	–
Settling time	–	–	70	ms	–
Response time (1/e in slow moving air)	–	5	–	s	–
Stability (at 50% RH in 5 years)	–	±1.2	–	% RH	1
Voltage supply	2.7	–	5.5	Vdc	2
Current supply	–	200	500	µA	–
Voltage output (1st order curve fit)	$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.00636(\text{sensor RH}) + 0.1515)$, typical at 25 °C				
Temperature compensation	True RH = (Sensor RH)/(1.0546 – 0.00216T), T in °C				
Output voltage temp. coefficient at 50% RH, 3.3 V	–	-2	–	mV/°C	–
Operating temperature	-40[-40]	See Figure 2.	85[185]	°C[°F]	–
Operating humidity (HIH-5030)	0	See Figure 2.	100	% RH	3
Operating humidity (HIH-5031)	0	See Figure 2.	100	% RH	–
Storage temperature	-50[-58]	–	125[257]	°C [°F]	–
Storage humidity	See Figure 3.			% RH	3

Specific Notes:

1. Includes stress outside of recommended operating zone.
2. Device is tested at 3.3 Vdc and 25 °C.
3. Non-condensing environment. When liquid water falls on the humidity sensor die, output goes to a low rail condition indicating no humidity.
4. Total accuracy including interchangeability is ±3 %RH.

General Notes:

- Sensor is ratiometric to supply voltage.
- Extended exposure to ≥90 % RH causes a reversible shift of 3 % RH.
- Sensor is light sensitive. For best performance, shield sensor from bright light.



Low Voltage Humidity Sensors

Figure 1. Operating Environment (Non-condensing environment for HIH-5030 catalog listings only.)

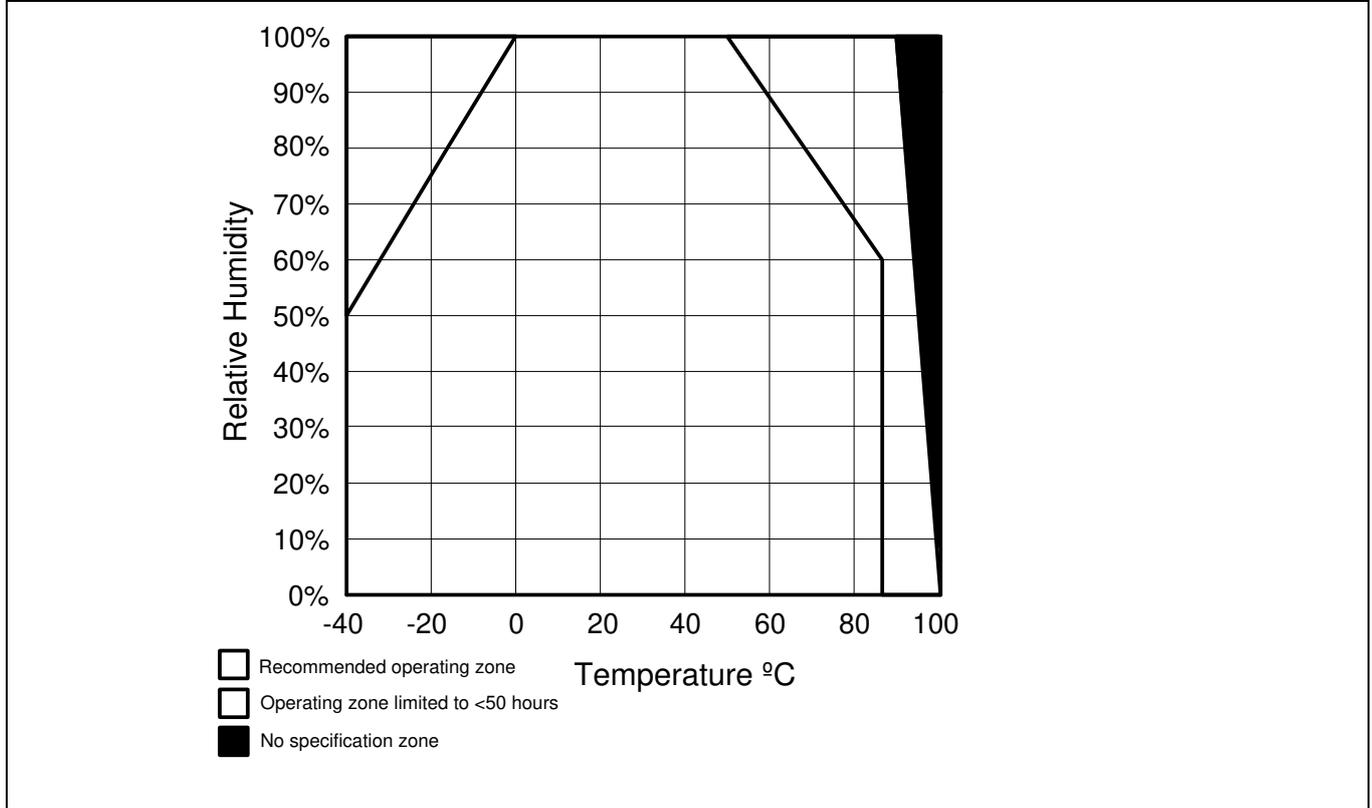
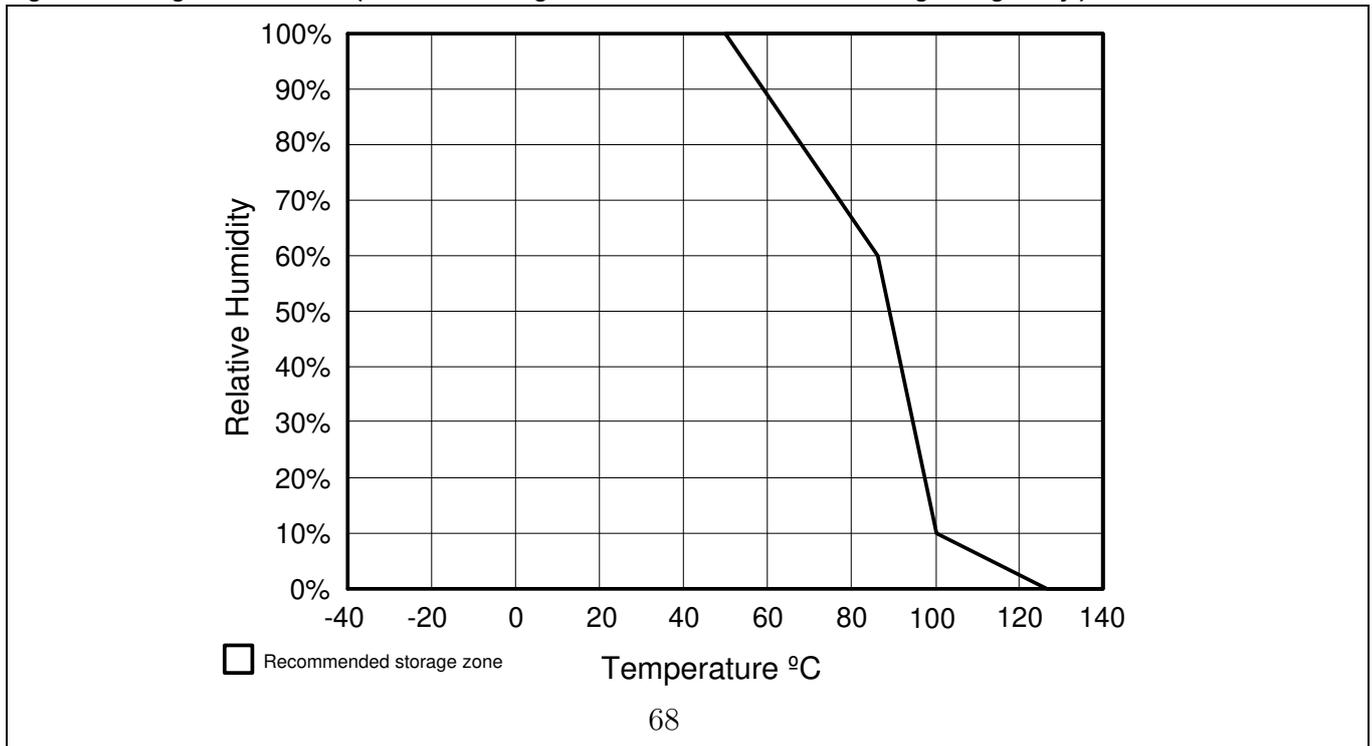


Figure 2. Storage Environment (Non-condensing environment for HIH-5030 catalog listings only.)



HIH-5030/5031 Series

Figure 3. Typical Output Voltage vs Relative Humidity (At 25 °C and 3.3 Vdc.)

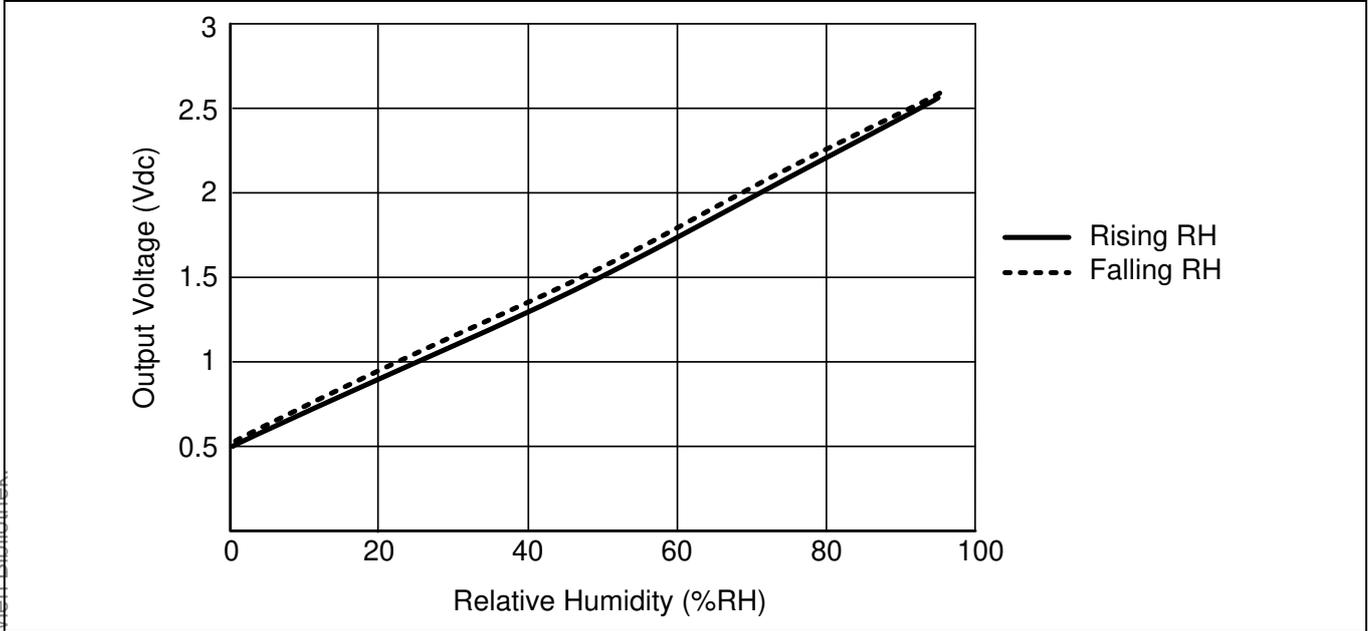
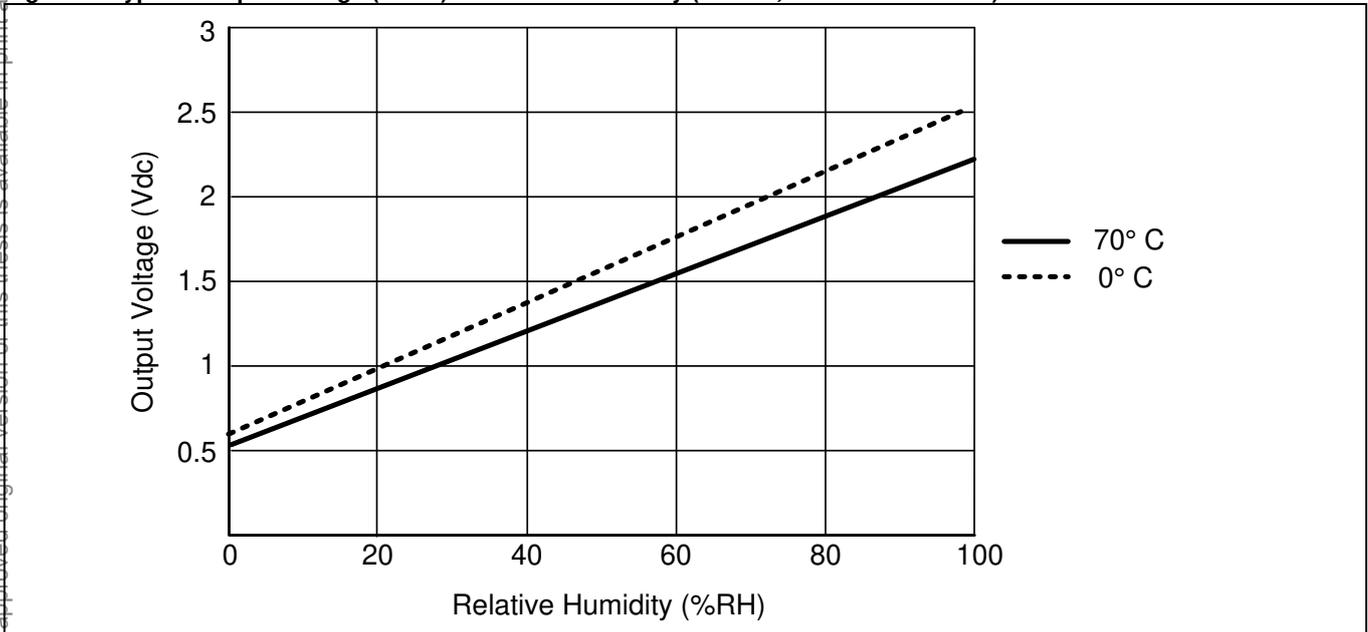


Figure 4. Typical Output Voltage (BFSL) vs Relative Humidity (At 0 °C, 70 °C and 3.3 Vdc.)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

HIH-5030/5031 Series

Figure 7. HIH-5031 Mounting Dimensions (For reference only. mm/[in])

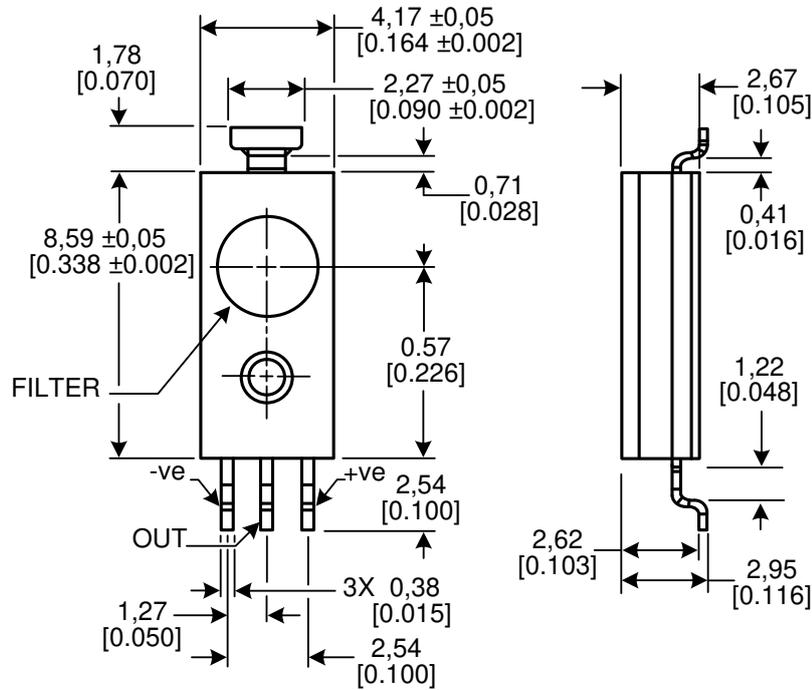
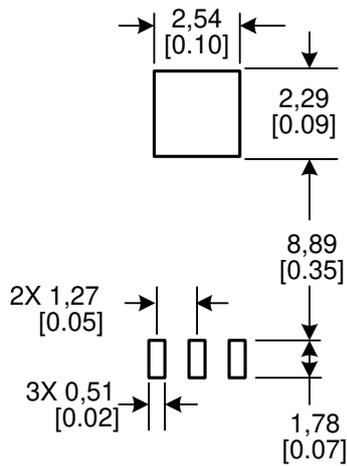


Figure 8. HIH-5031 PCB Landing Pattern (For reference only. mm/[in])



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Low Voltage Humidity Sensors

Figure 9. Tape and Reel Dimensions (For reference only. mm/[in])

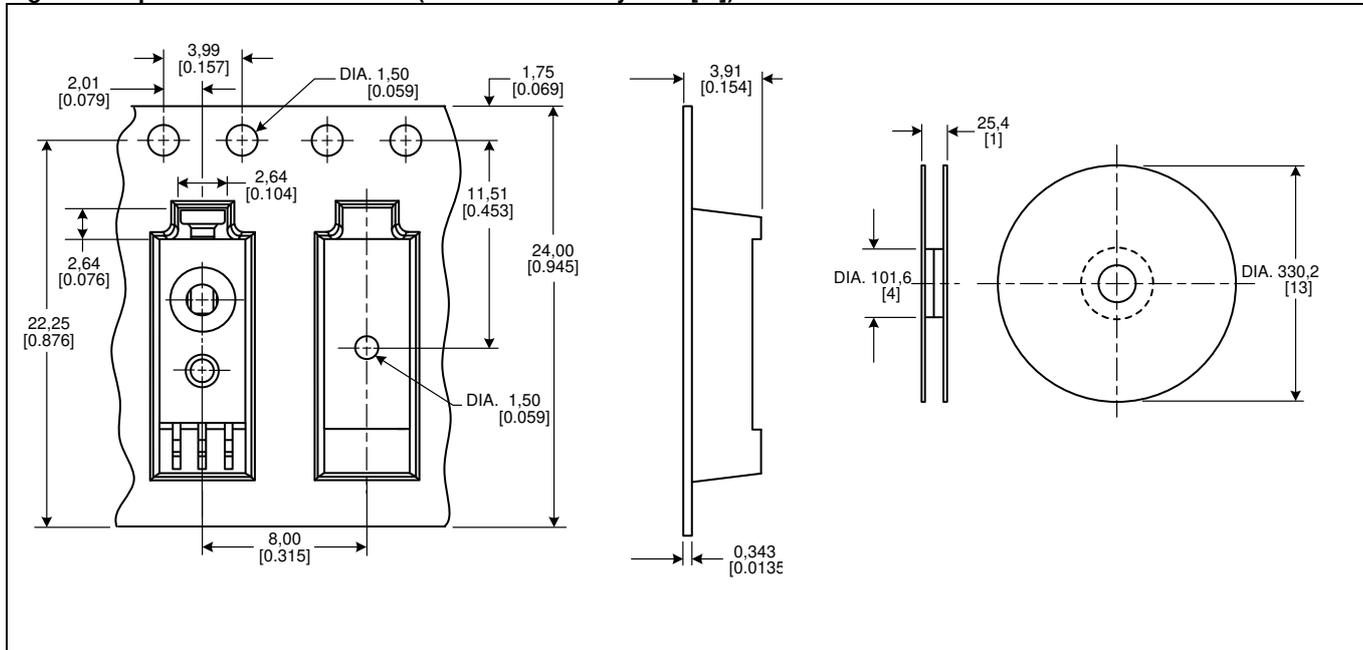
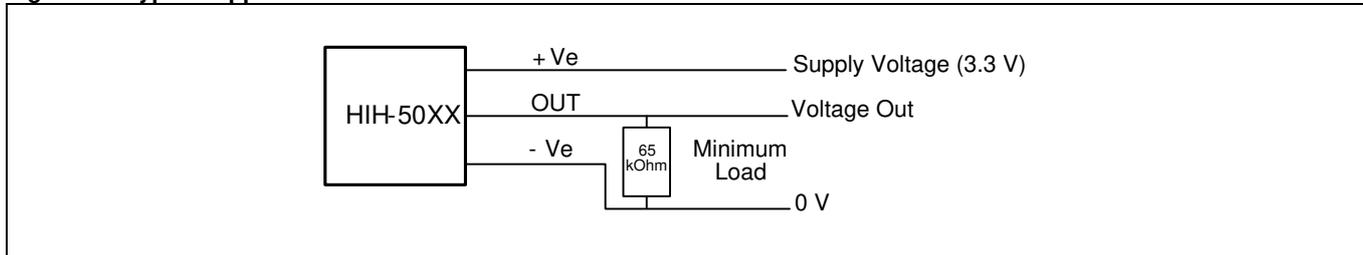


Figure 10. Typical Application Circuit



ORDER GUIDE

Catalog Listing	Description
HIH-5030-001	Covered integrated circuit humidity sensor, SMD, 1000 units on tape and reel
HIH-5031-001	Covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, 1000 units on tape and reel
HIH-5030-001S	Sample pack: covered integrated circuit humidity sensor, SMD, five units on tape
HIH-5031-001S	Sample pack: covered, filtered integrated circuit humidity sensor, SMD, sample pack, five units on tape

ADDITIONAL HUMIDITY SENSOR INFORMATION

See the following associated literature is available on the [Web](#):

- Product installation instructions
- Application sheets:
 - Humidity Sensor Performance Characteristics
 - Humidity Sensor Theory and Behavior
 - Humidity Sensor Moisture and Psychrometrics
 - Thermoset Polymer-based Capacitive Sensors

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

HIH-5030/5031 Series

Low Voltage Humidity Sensors

WARNING

MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this product sheet is for reference only. Do not use this document as a product installation guide.
- Complete installation, operation, and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

WARNING

PERSONAL INJURY

DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

WARRANTY/REMEDY

Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship. Honeywell's standard product warranty applies unless agreed to otherwise by Honeywell in writing; please refer to your order acknowledgement or consult your local sales office for specific warranty details. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace, at its option, without charge those items it finds defective. **The foregoing is buyer's sole remedy and is in lieu of all other warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. In no event shall Honeywell be liable for consequential, special, or indirect damages.**

While we provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is up to the customer to determine the suitability of the product in the application.

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this printing. However, we assume no responsibility for its use.

SALES AND SERVICE

Honeywell serves its customers through a worldwide network of sales offices, representatives and distributors. For application assistance, current specifications, pricing or name of the nearest Authorized Distributor, contact your local sales office or:

E-mail: info.sc@honeywell.com

Internet: www.honeywell.com/sensing

Phone and Fax:

Asia Pacific	+65 6355-2828
	+65 6445-3033 Fax
Europe	+44 (0) 1698 481481
	+44 (0) 1698 481676 Fax
Latin America	+1-305-805-8188
	+1-305-883-8257 Fax
USA/Canada	+1-800-537-6945
	+1-815-235-6847
	+1-815-235-6545 Fax

8.3.3 Datenblatt des CEM I - Portlandzements

**EN 197-1 CEM I 52,5 R**

Chromatarm gem. Verordnung (EG) Nr. 1907/2006
 Portlandzement gem. ON EN 197-1, Werk Retznei
 CE-Kennzahl 2523-CPR-0043
 entspricht den Anforderungen in Tabelle 4/1 der ÖVBB-Richtlinie Spritzbeton Dez. 2009
 Fremdüberwacht durch das FI der VÖZ

Anwendungsbereich:

Diese Zementsorte eignet sich in Folge seiner Zusammensetzung besonders für Nassspritzbeton gem. ÖVBB Richtlinie "Spritzbeton". Die Zementart zeichnet sich weiters durch eine hohe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit und einen hervorragenden Erhärtungsverlauf aus. Besonders empfohlen wird der Einsatz in den Spritzbetonfestigkeitsklassen J2 und J3. Selbstverständlich kann dieser Zement auch für Bauwerke und Betonbauteile gem. Österreichischer Betonnorm ÖNORM B 4710-1 eingesetzt werden.-

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte	Normanforderungen	
		ON EN 197-1	ON B 3327-1
Dichte in kg/dm ³	3,13	-	-
Druckfestigkeit (bei 20° C) in MPa (=N/mm ²)			
1 Tag	27	-	-
2 Tage	42	≥ 30	-
7 Tage	-	-	-
28 Tage	64	≥ 52,5	-
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage in MPa	-	-	-
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm ² /g	5000	-	-
Erstarrungsbeginn (bei 20° C) in min	110	≥ 45	-
Bluten in cm ³ nach 120 min	2	-	-
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	-	-	-
Sulfatbeständigkeit bzw. C ₃ A-frei	nein	-	-

Lieferform:	Lose im (Silo)-LKW oder Bahnwaggon	gültig ab 01.03.2018
Lagerung:	Trocken, geschlossen im Silo, vor Feuchtigkeitszutritt schützen	Sicherheitsdatenblatt anfordern bzw. beachten
Haltbarkeit (chromatarm):	Trocken im Silo 1 Monat	
Farbe als Pulver:	Hellgrau, Farbunterschiede zu anderen Zementarten bzw. -sorten möglich	

LAFARGE ZEMENTWERKE GMBH - Vertrieb Österreich
 Roter Weg 2, 2452 Mannersdorf / L., Tel.: 02168/62311-2901, Fax: 02168/62311-2505
 Retznei 34, 8461 Ehrenhausen, Tel.: 03453/2101-3502, Fax: 03453/2101-3580
 www.lafarge.at

8.3.4 Datenblatt des Knauf FE50 - Fließestrichs



Boden-Systeme

F322.de

Technisches Blatt

10/2017



FE 50 Largo

Calciumsulfat-Fließestrich CAF-C25-F5

Produktbeschreibung

Der Fließestrich FE 50 Largo ist ein Werk trockenmörtel auf Calciumsulfat-Basis, der mit reinem Wasser angemacht wird. Er besteht aus Anhydrit, Spezialgipsen, Fließmittel und Zuschlagstoffen (0 bis 4 mm), wie körniger Naturanhydrit oder Quarzsand.

Qualitätseinstufung nach DIN EN 13813

CA-C25-F5

Lagerung

Trockenmörtel bis 6 Monate

Qualität

In Übereinstimmung mit der EN 13813 unterliegt das Produkt einer Erstprüfung sowie der ständigen werkseigenen Produktionskontrolle und trägt eine CE-Kennzeichnung.

Eigenschaften und Mehrwert

- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Maschinell verarbeitbar
- Hohe Verlegeleistung
- Selbstnivellierend
- Sehr schwind- und spannungsarm
- Frühe Belastbarkeit
- Keine Sinterschicht
- Ebene Oberfläche
- Fugenarme Flächen
- Kontrollierte, gleichmäßig gute Qualität

Anwendungsbereich

FE 50 Largo ist der ideale Estrich für Einfamilienhäuser, Reihenhäuser, mehrgeschossige Wohn- und Bürobauten im Innenbereich.

Er wird eingesetzt als:

- Schwimmender Estrich, Nenndicke ≥ 35 mm
- Heizestrich, Nenndicke ≥ 35 mm über Heizelement
- Estrich auf Trennschicht, Nenndicke ≥ 30 mm
- Verbundestrich, Nenndicke ≥ 25 mm
- Estrich als Hohlboden, Nenndicke ≥ 30 mm

Ausführung

Vorarbeiten

Für 40 kg Trockenmaterial (1 Sack) werden ca. 6,5 l sauberes Wasser benötigt.

Anmischen mit der Maschine

Fließestrich FE 50 Largo wird mit sauberem Wasser in Mischpumpen (z. B. PFT FERRO 100, PFT G 4 o. Ä.) angemischt und auf die vorbereitete Fläche gepumpt.

Verarbeitung

Empfohlenes Fließmaß $\varnothing 38$ bis 43 cm, bestimmt mit der Konsistenzprüfdose $\varnothing 31$ auf ebenem, nicht saugendem Untergrund.

Beim Vergießen darf sich kein Wasser vom Mörtel trennen.

Mit Spezialbesen oder Schwabbelstange durchgeschlagen, nivelliert sich FE 50 Largo zu einer waagerechten und ebenen Fläche.

Reinigung

Bei Maschinenverarbeitung spätestens 30 min nach Maschinenstillstand Maschine und Schläuche reinigen.

Bewegungsfugen

Fließestrich FE 50 Largo erhärtet raumstabil. Bewegungsfugen im Feld sind, außer bei Heizestrich, nicht erforderlich, außer Bauwerksfugen. Diese sind an gleicher Stelle in voller Breite im Estrich zu übernehmen. Pressfugen (Arbeitsfugen) können je nach Arbeitsfortschritt, Maschinenleistung und Objektgröße eingebaut werden.

Bewegungsfugen bei Heizestrich

Je nach Flächengröße und Grundrissform können Fugen erforderlich sein. Es hat sich bewährt, Fugen in Türdurchgängen, bei Flächen über 10 m Seitenlänge, bei Flächenvorsprüngen und Flächeneinschnürungen vorzusehen. Detailliertere Angaben können dem Merkblatt von IGE „Fugen in Calciumsulfat-Fließestrichen“ entnommen werden.

Trocknung – Oberbelagsverlegung

Hinweis Als Heizestrich ist FE 50 Largo vor Belagsverlegung trockenzuheizen.

Belegreif ist FE 50 Largo ohne Fußbodenheizung nach Erreichen einer Restfeuchte von:

- $\leq 1,0$ CM-% für dampfoffene Beläge bzw.
- $\leq 1,0$ CM-% für dampfbremsende Beläge, z. B. Fliesen,
- $\leq 0,5$ CM-% für dampfdichte Beläge und Parkett.

Die Trocknungszeit beträgt bei 35 mm Estrichdicke ca. 3 bis 6 Wochen in Abhängigkeit von den Trocknungsbedingungen.

Aufheizvorschrift für FE 50 Largo:

Beginn: 7 Tage nach dem Einbringen

Vorlauftemperatur auf 25 °C einstellen und drei Tage halten.

Anschließend Höchsttemperatur (max. 55 °C) einstellen und halten (ohne

Nachtabsenkung), bis der Estrich trocken ist. Das Hochheizen kann alternativ auch in Schritten von 5 K pro Tag erfolgen.

Richtwerte für die Trocknung bei maximaler Vorlauftemperatur:

55 °C ca. 10 Tage,

45 °C ca. 12 Tage bei ~50 mm Dicke, ansonsten länger.

Vorprüfung auf Restfeuchte mit aufgelegter Folie oder CM-Messung.

3. Nach Trocknung Vorlauftemperatur so reduzieren, dass die Oberflächentemperatur des Estrichs von 15 bis 18 °C erreicht wird.

4. Vor Belagsverlegung Restfeuchte mit CM-Gerät überprüfen.

Belegreif ist FE 50 Largo als Heizestrich nach Erreichen einer Restfeuchte von $\leq 0,5$ CM-% für alle Beläge.

Bitte fordern Sie die detaillierte Aufheizvorschrift mit Aufheizprotokoll an, siehe Technische Information Bo17.de Knauf Fließestriche auf Elektrofußbodenheizung und Technische Information Bo18.de Knauf Fließestriche auf Warmwasserfußbodenheizung.

Hinweis	Die Trocknungszeit ist neben der Estrichdicke hauptsächlich abhängig von Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit. Ständiges Lüften bereits ab 2 Tage nach Estricheinbau beschleunigt den Trocknungsprozess.
Hinweis	Nach der Schnittstellenkoordination bei Flächenheizungs- und Flächenkühlungssystemen des BVF sind Messstellen für die CM-Messung anzuordnen.
Hinweis	Weitere Informationen zu Planung und Ausführung von Knauf Boden-Systemen mit Knauf Fließestrichen siehe Technische Broschüre F20.de.

Aufheizprotokoll zum Belegreifheizen

Bauherr:

Baustelle:

Heizungsbauer:

Bauleiter:

Jede Änderung der Vorlauftemperatur (Warmwasserheizung) bzw. Bodenthermostat-Einstellung (Elektroheizung) beim Aufheizen und beim Absenken ist auf 5 °C genau einzutragen. Jede Prüfung auf Trockung ist zu protokollieren.

Heizsystem:

Estricheinbau am:

Mittlere Estrichdicke: mm

Heizelementüberdeckung:

Min: mm **Max:** mm

Aufheizen (Belegreifheizen)

Datum	Vorlauftemperatur / Bodenthermostat-Einstellung in °C	Unterschrift

- Ventilation
- Fensterlüftung

Datum von	Datum bis	ø h je Tag

Vorprüfung der Trocknung
(z. B. Folienprüfung¹⁾)

Datum	Trocken ja / nein	Unterschrift

Prüfung der Trocknung
(CM-Messung)

Datum	Restfeuchte in %	Unterschrift

Absenken der Vorlauftemperatur

Datum	Vorlauftemperatur / Bodenthermostat-Einstellung in °C	Unterschrift

Belegreifheizen abgeschlossen

Datum	Außentemperatur in °C	Unterschrift

Ort / Datum

Unterschrift (Bauleiter)

Bitte aufbewahren!

1) Ersetzt nicht die CM-Messung vor Belagsverlegung

Technische Daten

Bezeichnung	Einheit	Wert
Druckfestigkeit trocken	N/mm ²	> 25
Biegezugfestigkeit trocken	N/mm ²	> 5
Elastizitätsmodul	N/mm ²	Ca. 17000
Baustoffklasse	–	A1 nichtbrennbar
Rohdichte, trocken	kg/l	Ca. 2,0 – 2,1
Rohdichte, nass	kg/l	Ca. 2,2 – 2,3
Schüttgewicht des trockenen Materials, lose	kg/l	1,6
Verarbeitungszeit	min	Ca. 60
Begehbar	h	Nach ca. 24
Belastbar	d	Nach ca. 3
Freie Dehnung beim Abbinden	mm/m	Ca. 0,1
Wärmeausdehnungskoeffizient	mm/(m·K)	Ca. 0,016
Wärmeleitfähigkeit λ _z	W/(m·K)	Ca. 1,4 – 1,6
Ergiebigkeit aus 100 kg Trockenmörtel	l	Ca. 53
Mörtelreaktion	–	Alkalisch

Die technischen Daten wurden nach den jeweils gültigen Prüfnormen ermittelt. Abweichungen davon sind unter Baustellenbedingungen möglich.

Materialbedarf und Verbrauch

Materialbedarf	Verbrauch ca. in kg/m ²
Je 1 cm Estrichdicke	19

Lieferprogramm

Bezeichnung	Verpackungseinheit	Artikelnummer	EAN
FE 50 Largo	Lose	00005528	4003982155887
	40 kg	00005182	4003982000156



Sicherheitsdatenblatt beachten!

Sicherheitsdatenblätter und CE-Kennzeichnung siehe pd.knauf.de



Lassen Sie sich zu den passenden Ausschreibungstexten für Ihr Projekt führen.

www.knauf.de/planbar



Ausschreibungstexte für alle Knauf Systeme und Produkte mit Exportfunktionen für Word, PDF und GAEB

www.ausschreibungscenter.de



Mit der Tablet App Knauf Infothek stehen jetzt alle Informationen und Dokumente der Knauf Gips KG jederzeit und an jedem Ort immer aktuell, übersichtlich und bequem zur Verfügung.

[Knauf Infothek](#)

Knauf Direkt

Technischer Auskunft-Service:

► **Tel.: 09001 31-1000 ***

► knauf-direkt@knauf.de

► www.knauf.de

Knauf Gips KG Am Bahnhof 7, 97346 Iphofen

* Ein Anruf bei Knauf Direkt wird mit 0,39 €/Min. berechnet. Anrufer, die nicht mit Telefonnummer in der Knauf Gips KG Adressdatenbank hinterlegt sind, z. B. private Bauherren oder Nicht-Kunden, zahlen 1,69 €/Min. aus dem deutschen Festnetz. Mobilfunk-Anrufe können abweichen, sie sind abhängig vom Netzbetreiber und Tarif.

78
Technische Änderungen vorbehalten. Es gilt die jeweils aktuelle Auflage. Die enthaltenen Angaben entsprechen unserem derzeitigen Stand der Technik. Die allgemein anerkannten Regeln der Bautechnik, einschlägige Normen, Richtlinien und handwerklichen Regeln müssen vom Ausführenden neben den Verarbeitungsvorschriften beachtet werden. Unsere Gewährleistung bezieht sich nur auf die einwandfreie Beschaffenheit unseres Materials. Verbrauchs-, Mengen- und Ausführungsangaben sind Erfahrungswerte, die im Falle abweichender Gegebenheiten nicht ohne weiteres übertragen werden können. Alle Rechte vorbehalten. Änderungen, Nachdruck und fotomechanische sowie elektronische Wiedergabe, auch auszugsweise, bedürfen unserer ausdrücklichen Genehmigung.

Konstruktive, statische und bauphysikalische Eigenschaften von Knauf Systemen können nur gewährleistet werden, wenn ausschließlich Knauf Systemkomponenten oder von Knauf empfohlene Produkte verwendet werden.

8.3.5 Datenblatt des Ardex A38 - Estrichbindemittels



AUS GUTEM GRUND

ARDEX A38

4 Stunden-Estrichbindemittel

Im Innen- und
Außenbereich
einsetzbar

Herstellen schnell nutzbarer und verlegereifer
Zementestriche auf Dämmschicht,
auf Trennschicht und im Verbund



Im Innen- und Außenbereich

Nach 4 Stunden verlegereif für Fliesen,
Naturwerkstein- und Betonwerksteinplatten



Nach 2 Tagen verlegereif für elastische und textile
Beläge sowie Parkett

Dimensionskontrolliertes Bindemittelsystem =
nahezu schwind- und spannungsfreie Erhärtung
und Trocknung

Erfüllt die Anforderungen der DIN 18560 und
EN 13813 (Festigkeitsklassen CT-C35-F4 bis CT-C45-F5)

Verarbeitungszeit 60 Minuten

Hersteller mit zertifiziertem
QM/UM-System nach
DIN EN ISO 9001/14001

ARDEX GmbH
58430 Witten · Postfach 6120
DEUTSCHLAND
Tel.: +49 (0) 23 02/664-0
Fax: +49 (0) 23 02/664-240
kundendienst@ardex.de
www.ardex.de

4 Stunden- Estrichbindemittel



mit ARDURAPID-Effekt, der eine schnelle hydraulische Erhärtung und vollständige kristalline Wasserbindung bewirkt.

Anwendungsbereich:

Innen und Außen.

Herstellen schnell nutzbarer und schnell verlegereifer Zementestriche

- im Verbund
- auf Trennschicht
- auf Dämmschicht
- als Heizestrich

Zur Aufnahme von

- Fliesen
- Naturwerkstein- und Betonwerksteinplatten
- elastischen und textilen Bodenbelägen
- Parkett

Nach 4 Stunden verlegereif für Fliesen, Naturwerkstein- und Betonwerksteinplatten.

Nach 2 Tagen verlegereif für elastische und textile Beläge sowie Parkett.

Verarbeitung:

Zum Anmischen des Mörtels werden gebräuchliche Zwangsmischer oder Misch- und Förderpumpen verwendet.

Das Mischungsverhältnis für einen 100l-Mischer beträgt:

25 kg ARDEX A 38	=	1 Originalsack
100–150 kg Sand 0–8 mm	=	12–18 Schaufeln
6–11 l Wasser		je nach Feuchtigkeit des Sandes

für einen 200l-Mischer:

50 kg ARDEX A 38	=	2 Originalsäcke
200–300 kg Sand 0–8 mm	=	24–36 Schaufeln
12–22 l Wasser		je nach Feuchtigkeit des Sandes

Wichtig!

Um das Mischungsverhältnis nicht zu überschreiten, sollte der Mischkessel nicht über den empfohlenen Nutzinhalt hinaus befüllt werden. Als Faustformel gilt, dass der Mischkessel nur zu ca. $\frac{3}{4}$ gefüllt werden soll. Wenn der Mischkessel vollständig mit Sand aufgefüllt wird, ist das vorgegebene Mischungsverhältnis deutlich überschritten.

Als Zuschlag ist Sand der Korngruppe 0–8 mm nach DIN 4226 mit stetiger Kornzusammensetzung im günstigen bis brauchbaren Bereich A8–C8 nach DIN 1045 zu verwenden. Die gesamte Wassermenge, also Feuchtigkeit des Sandes und Anmachwasser, sollte – je nach Mischerfüllung 11–22 l nicht überschreiten.

Kein Estrichzusatzmittel, wie Mischöle usw., verwenden. Nicht mit anderen Zementen mischen.

Die Verarbeitungszeit des ARDEX A 38-Mörtels beträgt ca. 1 Stunde. Mischen, Einbringen, Abziehen und Glätten müssen zügig aufeinander folgen.

Die Flächen dürfen nur so groß bemessen sein, dass sie innerhalb dieser Verarbeitungszeit fertig gestellt werden können.

Höhere Temperaturen verkürzen, tiefere verlängern die Verarbeitungszeit.

Estrichanschlüsse oder Teilflächen werden mit Rundstahl gegen Höhenversatz verankert. Schein- und Dehnungsfugen sind wie bei herkömmlichen Zementestrichen vorzusehen und anzubringen.

Bei Verbundestrichen ist der Untergrund vorzuschlämmen. Hierzu sind ARDEX A 18 Haftschrämläme zu verwenden. Angaben im Technischen Datenblatt beachten. Der Estrichmörtel ist frisch in frisch einzubringen.

Für die Ausführung der Estriche gelten die allgemeinen Richtlinien, insbesondere DIN 18353 »Estricharbeiten« und DIN 18560 »Estriche im Bauwesen«. Für die Anwendung im Außenbereich auf Balkonen und Terrassen sind die Hinweise des Merkblattes »Belagskonstruktionen mit Fliesen und Platten außerhalb von Gebäuden«, ZDB, zu beachten.

Die schnelle Erhärtung des Estrichmörtels ist dabei zu berücksichtigen.

Nicht bei Temperaturen unter +5 °C verarbeiten.

In Zweifelsfällen Probearbeiten durchführen.

Anwendung auf Fußbodenheizung:

Bei Verwendung von ARDEX A 38 auf Warmwasser-Fußbodenheizung lässt sich die Wartezeit bis zur Verlegung deutlich verkürzen. 3 Tage nach Einbringen des Estrichs beginnt das Aufheizen mit einer Vorlauf-temperatur von +25 °C. Diese wird 3 Tage gehalten.

Danach wird die maximale Vorlauf-temperatur eingestellt und weitere vier Tage gehalten. Dabei sind Zuglufferscheinungen zu vermeiden.

Weiteres Vorgehen ggf. entsprechend der Fachinformation »Schnittstellenkoordination bei beheizten Fußbodenkonstruktionen«, Zentralverband SHK.

Die Oberflächentemperatur des Heizestrichs darf bei der Verlegung von Bodenbelägen nicht +15 °C unterschreiten.

Belagsverlegungen:

Der ARDEX A38-Estrich ist, eingebaut im Mischungsverhältnis 1 : 4 bis 1 : 5 nach ca. 4 Std., eingebaut im Mischungsverhältnis 1 : 6, nach ca. 8 Std., verlegereif für Fliesen- und Plattenbeläge. Da die Festigkeit des Estrichs zu diesem Zeitpunkt noch nicht voll ausgebildet ist, sollten auf der Estrichfläche keine schweren Lasten, wie z. B. Maschinen oder Paletten mit Fliesen, gelagert werden.

Die Verlegereife für elastische und textile Bodenbeläge sowie Parkett ist beim Mischungsverhältnis 1 : 4 bis 1 : 5 nach ca. 2 Tagen gegeben, beim Mischungsverhältnis 1 : 6 nach ca. 4 Tagen. Zur Überprüfung der

Verlegereife sind Feuchtigkeitsmessungen mit einem CM-Gerät durchzuführen.

Diese Zeiten werden erreicht, wenn das vorgegebene Mischungsverhältnis und der W/Z-Wert von ca. 0,44 eingehalten werden sowie während Verarbeitung und Wartezeit die Temperatur $\geq +10\text{ °C}$ und die relative Luftfeuchtigkeit $\leq 70\%$ betragen.

Das Ablesen des Manometerdruckes am CM-Gerät erfolgt ca. nach 10–15 Minuten.

Die Verlegereife ist bei folgenden Feuchtigkeitsgehalten / Wartezeiten erreicht:

ARDEX A 38-Estrich

unbeheizt	beheizt	Bodenbelag
4 Std./8 Std.	$\leq 1,8\%$	Stein- und keramische Beläge im Dünnbett
4 Std./8 Std.	$\leq 2,0\%$	Stein- und keramische Beläge im Mörtelbett auf Trennschicht
4 Std./8 Std.	$\leq 3,0\%$	Stein- und keramische Beläge im Dickbett
$\leq 3,0\%$	$\leq 3,0\%$	dampfdurchlässige textile Bodenbeläge
$\leq 2,0\%$	$\leq 1,8\%$	elastische Bodenbeläge, z. B. PVC, Gummi, Linoleum
$\leq 2,0\%$	$\leq 1,8\%$	Parkett

Gebundene Leichtschüttung:

Mit ARDEX A 38 können auch gebundene Leichtschüttungen hergestellt werden:

- zum Ausgleichen von Unebenheiten, Höhendifferenzen und Rohrleitungen
- zum Füllen von Hohlräumen, Vertiefungen und Löchern vor dem Einbau von Estrichen auf Dämm- und Trennschichten im System mit ARDEX EP 25 Epoxiestrich.

Für Schichtdicken von 10 bis 300 mm.

Mischungsverhältnis: ca. 37,5 kg ARDEX A 38 : 200 l Polystyrolgranulat, Körnung 5 mm : 16 l Wasser

Verarbeitungszeit: ca. 60 Min. bei $+20\text{ °C}$

Begehbarkeit: nach ca. 5 Std.

Trocknung: ca. 1 Tag

Materialbedarf: ca. 1,6 kg ARDEX A 38 und 8,7 l Polystyrolgranulat pro m^2/cm Schichtdicke

Die Verarbeitung erfolgt mit Misch- und Fördermaschinen (Pumpen), wie sie für Zementestriche verwendet werden. Kein Überschusswasser verwenden!

Zu beachten ist:

Entsprechend DIN 18560 muss die Mindestdicke für Zementestriche auf Dämmschichten mind. 40 mm betragen. Die Estrich-Nennstärke für Zementestriche auf Trennschicht beträgt mindestens 35 mm, bei Zement-Verbundestrichen mindestens 10 mm. Die Estrichdicken sind, je nach vorgesehener Dämmschicht, einzubauenden Belag und den auftretenden Beanspruchungen, zu erhöhen.

Hinweis:

Enthält Zement. Verursacht Hautreizungen. Verursacht schwere Augenschäden. Darf nicht in die Hände von Kindern gelangen. Schutzhandschuhe tragen. Augenschutz tragen. Nicht in die Augen, auf die Haut oder auf die Kleidung gelangen lassen.

BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

Bei anhaltender Augenreizung: Ärztlichen Rat einholen/ärztliche Hilfe hinzuziehen.

An einem trockenen Ort aufbewahren.

Inhalt/Behälter gemäß lokalen Vorschriften entsorgen.

Inhalt/Behälter gemäß regionalen Vorschriften entsorgen.

Inhalt/Behälter gemäß nationalen Vorschriften entsorgen.

Inhalt/Behälter gemäß internationalen Vorschriften entsorgen.

Bei Verschlucken sofort ärztlichen Rat einholen und Verpackung oder Etikett vorzeigen.

GISCODE ZP1 = zementhaltiges Produkt, chromatarm



ARDEX GmbH
Friedrich-Ebert-Str. 45
58453 Witten
Germany

ARDEX A 38

Zementestrichbindemittel

Zur Herstellung von Zementestrichen nach
DIN EN 13813 und DIN 18560
(Festigkeitsklassen CT-C35-F4 bis CT-C45-F5)
Brandverhalten: A1_{f1}

Alle angegebenen technischen Kennwerte sind Laborwerte nach 28 Tagen und beziehen sich auf einen W/Z-Wert von 0,42 sowie Sand der Körnung 0–8 mm und einer Sieblinie A8–C8 nach DIN 1045 in einem Mischungsverhältnis von 1:4 bis 1:6.



4 Stunden- Estrichbindemittel

mit ARDURAPID-Effekt, der eine schnelle hydraulische Erhärtung und vollständige kristalline Wasserbindung bewirkt.

Technische Daten nach ARDEX-Qualitätsnorm:

Anmisch- verhältnis:

Mischungsverhältnis: 1 : 4 in
Gewichtsteilen
25 kg ARDEX A38
100 kg Sand der Körnung 0-8 mm
6-11 l Wasser
(je nach Feuchtigkeit des Sandes)
Mischungsverhältnis 1 : 5
in Gewichtsteilen
25 kg ARDEX A38
125 kg Sand der Körnung 0-8 mm
6-11 l Wasser
(je nach Feuchtigkeit des Sandes)
Mischungsverhältnis 1 : 6
in Gewichtsteilen
25 kg ARDEX A38
150 kg Sand der Körnung 0-8 mm
6-11 l Wasser
(je nach Feuchtigkeit des Sandes)

Schüttgewicht: 1,0 kg/l

Frischgewicht des

Mörtels: ca. 2,0 kg/l

Materialbedarf: je m² und cm

3,7 kg Pulver bei MV 1 : 4

3,1 kg Pulver bei MV 1 : 5

2,6 kg Pulver bei MV 1 : 6

Verarbeitungszeit

(+20 °C): ca. 60 Min.

Begehbarkeit

(+20 °C): nach ca. 2–3 Std.

Druckfestigkeit:

MV 1 : 4
(CT-C45-F5) nach 1 Tag ca. 35 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 45 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 50 N/mm²

MV 1 : 5
(CT-C40-F5) nach 1 Tag ca. 25 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 40 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 45 N/mm²

MV 1 : 6
(CT-C35-F4) nach 1 Tag ca. 20 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 30 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 40 N/mm²

Biegezugfestigkeit:

MV 1 : 4

(CT-C45-F5) nach 1 Tag ca. 4,5 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 5,0 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 5,5 N/mm²

MV 1 : 5

(CT-C40-F5) nach 1 Tag ca. 4,0 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 4,5 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 5,5 N/mm²

MV 1 : 6

(CT-C35-F4) nach 1 Tag ca. 3,5 N/mm²
nach 7 Tagen ca. 4,0 N/mm²
nach 28 Tagen ca. 4,5 N/mm²

Korrosions- verhalten:

enthält keine auf Stahl korrosions-
fördernd wirkenden Bestandteile

Brandverhalten: A1_{fl}

Fußboden- heizungs- eignung:

ja

Kennzeichnung

nach GHS/CLP: GHS05 "ätzend",
Signalwort: Gefahr

Kennzeichnung

nach GGVSEB/ADR: keine

Abpackung: Säcke mit 25 kg netto

Lagerung: in trockenen Räumen ca. 12 Monate
im originalverschlossenen Gebinde
lagerfähig

8.4 Verwendete Programmcodes zur Auswertung der gemessenen Daten

Jeglicher angeführter Programmcode wurde für Python 3.7 geschrieben. Es wurde die Distribution 'Anaconda' verwendet. Mit Hilfe des Programms 'Spyder' wurde der Code erstellt.

```
import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import sys
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from scipy import ndimage, misc

def rotateImage(img, angle, pivot):
    padX = [img.shape[1] - pivot[0], pivot[0]]
    padY = [img.shape[0] - pivot[1], pivot[1]]
    imgP = np.pad(img, [padY, padX], 'constant')
    imgR = ndimage.rotate(imgP, angle, reshape=False)
    return imgR[padY[0] : -padY[1], padX[0] : -padX[1]]
```

```
np.set_printoptions(threshold=sys.maxsize)
values = open("values.txt", "w")
Name="FE50"
Option='a'
manuelx=0
manuely=0
```

```
if(Option=='a'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\11.12.18\%s")
elif(Option=='b'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\13.12.18\%s")
else:
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\17.12.18\%s")
```

```
im2 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\28.06.19\%s_28.")
```

```
im1array = np.array(im1)
im2array = np.array(im2)
```

```
maxdifvalue = []
locatex1 = []
locatey1 = []
locatex2 = []
```

```

locatey2=[]

maxdif=0
x=0
y=0

for iteration in range(0,6):

    for i in range(140,350):
        for j in range(100,200):
            dif=abs(float(im1array[i][j]) - float(im1array[i][j+1]))
            if (dif>maxdif):
                maxdif=dif
                x=int(j)

            maxdifvalue.append(maxdif)
            locatex1.append(x)
            maxdif=0
            x=0

    for i in range(140,350):
        for j in range(100,200):
            dif=abs(float(im2array[i][j]) - float(im2array[i][j+1]))
            if (dif>maxdif):
                maxdif=dif
                x=int(j)

            maxdifvalue.append(maxdif)
            locatex2.append(x)

            maxdif=0
            x=0

x1=np.array(locatex1)
x2=np.array(locatex2)

transx=x1-x2

pairs, counts = np.unique(transx, axis=0, return_counts=True)
deltax=pairs[counts.argmax()]
stdx=transx.std()
index=0
for ele in transx:
    if ele > deltax+stdx:

```

```

    transx[index]=deltax
if ele < deltax-stdx:
    transx[index]=deltax
index=index+1

```

```

pairs , counts = np.unique(locatex1 , axis=0, return_counts=True)
xvalue=pairs[counts.argmax()]
xaxis=np.arange(transx.size)
xaxis=xaxis.reshape(-1,1)

```

```

model = LinearRegression().fit(xaxis , transx)
yvalue= np rint(350.-(-model.intercept_/model.coef_))
if yvalue<0: yvalue=1
else: yvalue=yvalue[0]
if yvalue>512: yvalue=511
else: yvalue=yvalue

```

```

r_sq = model.score(xaxis , transx)
rot=np.arctan(model.coef_)*180/np.pi/(2.5**((iteration -1))
if(abs(rot)>1.): rot=0
pivot= [int(xvalue),int(yvalue)]
print(pivot)
print(rot)
im2array = rotateImage(im2array , rot , pivot)
locatex1=[]
locatex2=[]

```

```

for i in range(140,350):
    for j in range(100,200):
        dif=abs(float(im1array[i][j])-float(im1array[i][j+1]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif
            x=int(j)

```

```

maxdifvalue.append(maxdif)
locatex1.append(x)
maxdif=0
x=0

```

```

for i in range(140,350):
    for j in range(100,200):
        dif=abs(float(im2array[i][j])-float(im2array[i][j+1]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif

```

```

        x=int(j)

        maxdifvalue.append(maxdif)
        locatex2.append(x)

        maxdif=0
        x=0

x1=np.array(locatex1)
x2=np.array(locatex2)

transx=x1-x2

locatex1=[]
locatex2=[]
print(deltax)
if(deltax<0):
    for i in range(0,512):
        for j in range(0+int(abs(deltax)),512-int(abs(deltax))):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-deltax]
else:
    for i in range(0,512):
        for j in range(511-int(abs(deltax)),0+int(abs(deltax)),-1):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-deltax]

#####

for j in range(130,350):
    for i in range(100,200):
        dif=abs(float(im1array[i][j])-float(im1array[i+1][j]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif
            y=int(i)

        maxdifvalue.append(maxdif)
        locatex1.append(y)
        maxdif=0
        y=0

for j in range(130,350):
    for i in range(100,200):
        dif=abs(float(im2array[i][j])-float(im2array[i+1][j]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif

```

```

y=int(i)

maxdifvalue.append(maxdif)
locatey2.append(y)
maxdif=0
y=0

y1=np.array(locatey1)
y2=np.array(locatey2)
transy=y1-y2

pairs, counts = np.unique(transy, axis=0, return_counts=True)
deltay=pairs[counts.argmax()]

locatey1=[]
locatey2=[]

print(deltay)
if(deltay<0):
    for j in range(0,512):
        for i in range(0+int(abs(deltay)),512-int(abs(deltay))):
            im2array[i][j]=im2array[i-deltay][j]
    else:
        for j in range(0,512):
            for i in range(511-int(abs(deltay)),0+int(abs(deltay)),-1):
                im2array[i][j]=im2array[i-deltay][j]

if(manuelx<0):
    for i in range(0,512):
        for j in range(0+int(abs(manuelx)),512-int(abs(manuelx))):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-manuelx]
    else:
        for i in range(0,512):
            for j in range(511-int(abs(manuelx)),0+int(abs(manuelx)),-1):
                im2array[i][j]=im2array[i][j-manuelx]

if(manuely<0):
    for j in range(0,512):
        for i in range(0+int(abs(manuely)),512-int(abs(manuely))):
            im2array[i][j]=im2array[i-manuely][j]
    else:
        for j in range(0,512):
            for i in range(511-int(abs(manuely)),0+int(abs(manuely)),-1):
                im2array[i][j]=im2array[i-manuely][j]

```

```

plt.imshow(im2array)

new_im = Image.fromarray(im2array)
if (Option=='a'):
    new_im.save("%s_28_06_191_a.tif" %Name)
elif (Option=='b'):
    new_im.save("%s_28_06_191_b.tif" %Name)
else:
    new_im.save("%s_28_06_191_c.tif" %Name)

im1.close()
im2.close()

```

8.4.1 Ausrichtung der radiographischen Aufnahmen

Dieses Programm verschiebt die Bilder pixelgenau, sodass die Kanten der Proben übereinstimmen. Um dies zu bewerkstelligen, werden die Maximalunterschiede der Intensitäten in den Bildern durch Translation angeglichen. Die größte Unterschied der Intensitäten befindet sich in allen Bildern am Rand der Proben, wenn der Mantel des Strahlrohrs ausgenommen wird. Außerdem werden Geraden entlang der Seitenkanten interpoliert und deren Neigung wird ebenfalls angeglichen.

```

import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import sys
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from scipy import ndimage, misc

def rotateImage(img, angle, pivot):
    padX = [img.shape[1] - pivot[0], pivot[0]]
    padY = [img.shape[0] - pivot[1], pivot[1]]
    imgP = np.pad(img, [padY, padX], 'constant')
    imgR = ndimage.rotate(imgP, angle, reshape=False)
    return imgR[padY[0] : -padY[1], padX[0] : -padX[1]]

np.set_printoptions(threshold=sys.maxsize)
values = open("values.txt", "w")
Name="FE50"
Option='a'
manuelx=0
manuely=0

```

```

if(Option=='a'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\11.12.18\%s
elif(Option=='b'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\13.12.18\%s
else:
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\17.12.18\%s

im2 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\28.06.19\%s_28.0

im1array = np.array(im1)
im2array = np.array(im2)

maxdifvalue=[]
locatex1=[]
locatey1=[]
locatex2=[]
locatey2=[]

maxdif=0
x=0
y=0

for iteration in range(0,6):

    for i in range(140,350):
        for j in range(100,200):
            dif=abs(float(im1array[i][j]) - float(im1array[i][j+1]))
            if (dif>maxdif):
                maxdif=dif
                x=int(j)

            maxdifvalue.append(maxdif)
            locatex1.append(x)
            maxdif=0
            x=0

    for i in range(140,350):
        for j in range(100,200):
            dif=abs(float(im2array[i][j]) - float(im2array[i][j+1]))
            if (dif>maxdif):
                maxdif=dif
                x=int(j)

            maxdifvalue.append(maxdif)

```

```

locatex2.append(x)

maxdif=0
x=0

x1=np.array(locatex1)
x2=np.array(locatex2)

transx=x1-x2

pairs, counts = np.unique(transx, axis=0, return_counts=True)
deltax=pairs[counts.argmax()]
stdx=transx.std()
index=0
for ele in transx:
    if ele > deltax+stdx:
        transx[index]=deltax
    if ele < deltax-stdx:
        transx[index]=deltax
    index=index+1

pairs, counts = np.unique(locatex1, axis=0, return_counts=True)
xvalue=pairs[counts.argmax()]
xaxis=np.arange(transx.size)
xaxis=xaxis.reshape(-1,1)

model = LinearRegression().fit(xaxis, transx)
yvalue= np rint(350.-(-model.intercept_/model.coef_))
if yvalue<0: yvalue=1
else: yvalue=yvalue[0]
if yvalue>512: yvalue=511
else: yvalue=yvalue

r_sq = model.score(xaxis, transx)
rot=np.arctan(model.coef_)*180/np.pi/(2.5**((iteration-1))
if(abs(rot)>1.): rot=0
pivot= [int(xvalue),int(yvalue)]
print(pivot)
print(rot)
im2array = rotateImage(im2array, rot, pivot)
locatex1=[]
locatex2=[]

for i in range(140,350):

```

```

for j in range(100,200):
    dif=abs(float(im1array[i][j])-float(im1array[i][j+1]))
    if (dif>maxdif):
        maxdif=dif
        x=int(j)

    maxdifvalue.append(maxdif)
    locatex1.append(x)
    maxdif=0
    x=0

for i in range(140,350):
    for j in range(100,200):
        dif=abs(float(im2array[i][j])-float(im2array[i][j+1]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif
            x=int(j)

        maxdifvalue.append(maxdif)
        locatex2.append(x)

        maxdif=0
        x=0

x1=np.array(locatex1)
x2=np.array(locatex2)

transx=x1-x2

locatex1=[]
locatex2=[]
print(deltax)
if(deltax<0):
    for i in range(0,512):
        for j in range(0+int(abs(deltax)),512-int(abs(deltax))):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-deltax]
else:
    for i in range(0,512):
        for j in range(511-int(abs(deltax)),0+int(abs(deltax)),-1):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-deltax]

#####

for j in range(130,350):

```

```

for i in range(100,200):
    dif=abs(float(im1array[i][j])-float(im1array[i+1][j]))
    if (dif>maxdif):
        maxdif=dif
        y=int(i)

    maxdifvalue.append(maxdif)
    locatey1.append(y)
    maxdif=0
    y=0

for j in range(130,350):
    for i in range(100,200):
        dif=abs(float(im2array[i][j])-float(im2array[i+1][j]))
        if (dif>maxdif):
            maxdif=dif
            y=int(i)

        maxdifvalue.append(maxdif)
        locatey2.append(y)
        maxdif=0
        y=0

y1=np.array(locatey1)
y2=np.array(locatey2)
transy=y1-y2

pairs , counts = np.unique(transy , axis=0, return_counts=True)
deltay=pairs [counts.argmax()]

locatey1=[]
locatey2=[]

print(deltay)
if(deltay<0):
    for j in range(0,512):
        for i in range(0+int(abs(deltay)),512-int(abs(deltay))):
            im2array [ i ] [ j ]=im2array [ i-deltay ] [ j ]
    else :
        for j in range(0,512):
            for i in range(511-int(abs(deltay)),0+int(abs(deltay)) , -1):
                im2array [ i ] [ j ]=im2array [ i-deltay ] [ j ]

if(manuelx<0):

```

```

    for i in range(0,512):
        for j in range(0+int(abs(manuelx)),512-int(abs(manuelx))):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-manuelx]
else:
    for i in range(0,512):
        for j in range(511-int(abs(manuelx)),0+int(abs(manuelx)),-1):
            im2array[i][j]=im2array[i][j-manuelx]

if(manuely<0):
    for j in range(0,512):
        for i in range(0+int(abs(manuely)),512-int(abs(manuely))):
            im2array[i][j]=im2array[i-manuely][j]
else:
    for j in range(0,512):
        for i in range(511-int(abs(manuely)),0+int(abs(manuely)),-1):
            im2array[i][j]=im2array[i-manuely][j]

plt.imshow(im2array)

new_im = Image.fromarray(im2array)
if(Option=='a'):
    new_im.save("%s_28_06_191_a.tif" %Name)
elif(Option=='b'):
    new_im.save("%s_28_06_191_b.tif" %Name)
else:
    new_im.save("%s_28_06_191_c.tif" %Name)

im1.close()
im2.close()

```

8.4.2 Berechnung der Feuchtigkeitsverteilung

In Kapitel 4.1.1 wird dieses Programm ausführlich besprochen.

Die aufgenommenen Bilder werden zunächst durch das Trockenbild dividiert und anschließend der Logarithmus gebildet. Es werden Mittelwerte berechnet und aus diesen der Graph erstellt.

Außerdem wird eine Norm berechnet um eine mögliche Schwankung der Reaktorleistung zu berücksichtigen.

```

import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.nonparametric.smoothers_lowess import lowess
import sys

```

```
np.set_printoptions(threshold=sys.maxsize)
values = open("values.txt", "w")
```

```
Name="FE50"
```

```
im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\11.12.18\%s_11.tif" % Name)
im2 = Image.open(r"%s_28_06_191_a.tif" % Name, "r")
im3 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\13.12.18\%s_13.tif" % Name)
im4 = Image.open(r"%s_28_06_191_b.tif" % Name, "r")
im5 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\17.12.18\%s_17.tif" % Name)
im6 = Image.open(r"%s_28_06_191_c.tif" % Name, "r")
file = open("%s_Radio.txt" % Name, "w+")
```

```
im1array_0 = np.array(im1)
im2array_0 = np.array(im2)
im3array_0 = np.array(im3)
im4array_0 = np.array(im4)
im5array_0 = np.array(im5)
im6array_0 = np.array(im6)
```

```
im1array_nozeros=np.where(im1array_0==0, 1, im1array_0)
im2array_nozeros=np.where(im2array_0==0, 1, im2array_0)
im3array_nozeros=np.where(im3array_0==0, 1, im3array_0)
im4array_nozeros=np.where(im4array_0==0, 1, im4array_0)
im5array_nozeros=np.where(im5array_0==0, 1, im5array_0)
im6array_nozeros=np.where(im6array_0==0, 1, im6array_0)
```

```
a=im1array_nozeros/im2array_nozeros
b=im3array_nozeros/im4array_nozeros
c=im5array_nozeros/im6array_nozeros
```

```
imarray1=np.log(a)
imarray2=np.log(b)
imarray3=np.log(c)
```

```
norm1=norm2=norm3=0
summe1=summe2=summe3=0
```

```
hist1=[]
hist2=[]
hist3=[]
punkte=np.arange(512)
for i in range(0,512):
```

```

for j in range(155,260):

    summe1=summe1+imarray1 [ i ] [ j ]
    summe2=summe2+imarray2 [ i ] [ j ]
    summe3=summe3+imarray3 [ i ] [ j ]
if (i <120 and i >60):
    norm1=norm1+summe1
    norm2=norm2+summe2
    norm3=norm3+summe3

if (i%100==0):
    imarray1 [ i ]=0.1
    imarray2 [ i ]=0.1
    imarray3 [ i ]=0.1
    plt.axvline(x=i , color='black ')
    hist1.append(summe1/(260-155))
    hist2.append(summe2/(260-155))
    hist3.append(summe3/(260-155))
    summe1=summe2=summe3=0

norm1=norm1/59/105
norm2=norm2/59/105
norm3=norm3/59/105
hist1=hist1-norm1
hist2=hist2-norm2
hist3=hist3-norm3
hist1 [335:512][:]=0
hist2 [335:512][:]=0
hist3 [335:512][:]=0

hist1=-((hist1*18)/ (6.02214 * 168.12 /10) *100
hist2=-((hist2*18)/ (6.02214 * 168.12 /10) *100
hist3=-((hist3*18)/ (6.02214 * 168.12 /10) *100
summe1=summe2=summe3=0
save1=save2=save3=0
for i in range(170,315):
    summe1=summe1+hist1 [ i ]
    summe2=summe2+hist2 [ i ]
    summe3=summe3+hist3 [ i ]
    if ((i)%2==0):
        file.write(str(round((hist1 [i]+save1)/2.,2)) + ' ' + str(round((hi
    save1=hist1 [ i ]
    save2=hist2 [ i ]
    save3=hist3 [ i ]

```

```

av1=round(summe1/200.,3)
av2=round(summe2/200.,3)
av3=round(summe3/200.,3)

plt.axvline(x=155, color='C3'),
imarray1[155]=imarray1[156]=1
imarray2[155]=imarray2[156]=1
imarray3[155]=imarray3[156]=1

plt.axvline(x=335, color='C3')
imarray1[335]=imarray1[336]=1
imarray2[335]=imarray2[336]=1
imarray3[335]=imarray3[336]=1

plt.axhline(y=0, color='black')

filtered1 = lowess(hist1, punkte, is_sorted=True, frac=0.03, it=0)
filtered2 = lowess(hist2, punkte, is_sorted=True, frac=0.03, it=0)
filtered3 = lowess(hist3, punkte, is_sorted=True, frac=0.03, it=0)

s="Tag1: \$\u03C8_V$: %s_V%" %av1
plt.text(400, 8, s, color='b')
s="Tag3: \$\u03C8_V$: %s_V%" %av2
plt.text(400, 7, s, color='orange')
s="Tag7: \$\u03C8_V$: %s_V%" %av3
plt.text(400, 6, s, color='g')

plt.plot(filtered1[:,0], filtered1[:,1], color='b')
plt.plot(filtered2[:,0], filtered2[:,1], 'orange')
plt.plot(filtered3[:,0], filtered3[:,1], 'g')
plt.xlabel('Position in Pixel')
plt.ylabel('Fechtegehalt in V%')
plt.ylim(-1,12)
fig = plt.gcf()

DPI = fig.get_dpi()
fig.set_size_inches(725.0/float(DPI), 378.0/float(DPI))
fig.savefig('histogram_%s.png'%Name)

im1.close()
im2.close()
im3.close()
im4.close()

```

```
im5.close()
im6.close()
file.close()
```

8.4.3 Erstellung der eingefärbten Bilder zur Visualisierung der Feuchtigkeitsverteilung

Um die Graustufen der aufgenommenen 'TIFF'-Dateien (Tagged Image File Format) farblich zu visualisieren, wurde ein Histogramm der Zahlraten des Bildes erstellt. Anschließend wurden Teile des Histogramms eingefärbt, sodass die Feuchtigkeitsverteilung leichter zu erkennen war.

```
import numpy as np
from PIL import Image
import matplotlib.pyplot as plt
import sys
import numpy.ma as ma

np.set_printoptions(threshold=sys.maxsize)
values = open("values.txt", "w")
Name="A38"
Option="c"

if(Option=='a'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\11.12.18\%s
    im2 = Image.open(r"%s_28_06_191_a.tif" %Name, "r")
elif(Option=='b'):
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\13.12.18\%s
    im2 = Image.open(r"%s_28_06_191_b.tif" %Name, "r")
else:
    im1 = Image.open(r"C:\Users\lolka\OneDrive\Desktop\Projekt\17.12.18\%s
    im2 = Image.open(r"%s_28_06_191_c.tif" %Name, "r")

im1array = np.array(im1)
im2array_0=np.array(im2)

norm1=norm2=0.
summe1=0.
summe2=0.
for i in range(60,120):
    for j in range(155,260):
        summe1=summe1+im1array[i][j]
        summe2=summe2+im2array_0[i][j]
    norm1=norm1+summe1
```

```
norm2=norm2+summe2
summe=0

im1array=np.rint(im1array/(norm1/norm2))

im2array_nozeros=np.where(im2array_0==0, 1, im2array_0)

img=np.rint((im1array/im2array_nozeros*30000))
img=np.where(img>65000, 65000, img)
upperrange=25000
lowerrange=12000

img_a = ma.masked_array(img, img < upperrange)
img_b= ma.masked_outside(img, lowerrange, upperrange)
img_c= ma.masked_array(img, img > lowerrange)

fig, ax = plt.subplots()

pa=ax.imshow(img_b, cmap=plt.cm.RdYlBu_r)
pb=ax.imshow(img_a, cmap=plt.cm.Greys, alpha=0.7)
pc=ax.imshow(img_c, cmap=plt.cm.Greys, alpha=0.7)
cb = plt.colorbar(pa, shrink=0.5)
plt.xlabel('Position_in_Pixel')
plt.ylabel('Position_in_Pixel')
cb.set_label('Counts_(~ Neutronenquerschnitt)')
plt.ylim(350,150)
plt.xlim(100,480)
plt.show()

if(Option=='a'):
    fig.savefig('Farbe_%s_a.png' %Name, dpi=300)
elif(Option=='b'):
    fig.savefig('Farbe_%s_b.png' %Name, dpi=300)
else:
    fig.savefig('Farbe_%s_c.png' %Name, dpi=300)

im1.close()
im2.close()
```

Literatur

- [1] Ksenija Varga1 , Fareeha Hameed , Michael Zawisky , and K. Christian Schuster, DISTRIBUTION OF WATER IN FILLING FIBRES VISUALISED BY NEUTRON

- RADIOGRAPHY, Lenzinger Berichte 87 (2009)
- [2] Thomas Brokamp, Bona GmbH, Die Bestimmung der Feuchte mit der Carbid-Methode, 19. TKB Fachtagung 'Klebstoffe in der Fußbodentechnik', 12. März 2003, Frankfurt a.M.
- [3] Boualem Hammouda, National Institute of Standards and Technology (NIST), Chapter 9 - COHERENT AND INCOHERENT NEUTRON SCATTERING
- [4] Zawisky M., Hameed F., Dyrnjaja E., and Springer J.: Digitized Neutron Imaging with High Spatial Resolution at a Low Power Research Reactor: I. Analysis of Detector Performance Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 587 (2008), pp. 342–349.
- [5] WTA Referat 4 Mauerwerk, WTA Arbeitsgruppe 4.11 Leiter: Günter Rieche, Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen
- [6] Earthzine, IEEE Oceanic Engineering Society (OES), '<https://earthzine.org/about/>'
- [7] Klaus Kupfer: Materialfeuchtemessung - Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen. Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1997
- [8] Radtke Messtechnik, 03/2008
- [9] Hans Keune und Manfred Just 1999, Chemische Schulexperimente – Band 2 Organische Chemie, S. 66-67
- [10] TuTech Innovation GmbH, Prof. Dr. Ing Frank Schmidt Doehl, Untersuchungen zum Feuchteaufnahme- und Feuchteabgabeverhalten ausgewählter Estrichbaustoffe, 9. Juni 2017
- [11] Christoph Strangfeld, Sabine Kruschwitz, ANWENDUNG VON ZFP, VERFAHREN ZUR MATERIAL UND FEUCHTEZUSTANDS CHARAKTERISIERUNG IM BAUWESEN, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 01.06.2017
- [12] Josef Felixberger, Wann ist ein Zementestrich belegreif?, PCI Auxsburg GmbH
- [13] Dr. Thomas Brokamp, Bona GmbH, Die Trocknung von Estrichen - Vorstellung von Messergebnissen der Uni Siegen 22. März 2011, Frankfurt a.M
- [14] Dr. Thomas Brokamp, Bona GmbH, Verlegereife und Feuchte - Vorschläge der TKB zur Messung der korrespondierenden Luftfeuchte 18. März 2010, Frankfurt a.M
- [15] Dr. Thomas Brokamp, Bona GmbH, Verlegereife und Feuchte, 25. TKB Fachtagung "Klebstoffe in der Fußbodentechnik", 18. März 2009, Frankfurt a.M
- [16] Alfred Puchegger u. Helmut Jilg, Vergleich unterschiedlicher Messverfahren für die Beurteilung der Belegreife von Estrichen, März 2016

Literatur

- [17] Knauf Gips KG Am Bahnhof 7, 97346 Iphofen, Technisches Datenblatt FE 50 Largo, 10/2017
- [18] LAFARGE ZEMENTWERKE GMBH - Vertrieb Österreich, Der Blaue SP, Roter Weg 2, 2452 Mannersdorf, 1.03.2018
- [19] ARDEX GmbH, 58430 Witten, ARDEX A38 4 Stunden- Estrichbindemittel
- [20] <https://de.wikipedia.org/wiki/Materialfeuchte>
- [21] ARDEX GmbH, ,Friedrich-Ebert-Str. 45 58453 Witten, Germany, Technisches Datenblatt ARDEX A38 4 Stunden- Estrichbindemittel
- [22] Technische Universität Wien, Michael Zawisky, <http://www.ati.ac.at/neutropt/-experiments/Radiography/radiography.html>
- [23] Infopro Digital company, Stephan Westermann, https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/_estriche/restfeuchte-und-belegreife
- [24] Honeywell, HIH-5030/5031 Series, Low Voltage Humidity Sensors, Sensing and Control Honeywell 1985 Douglas Drive North