



Belegreife und Feuchte

Sorptionsisothermen und die Interpretation von KRL-Messungen

Erstellt von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im
Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	2
1.1	Erläuterung zum Prüfauftrag – Desorptions- und Trocknungsisotherme	3
2.	Experimentelles und Ergebnisse	3
2.1	Materialien	3
2.2	Estrichmischungen, Probenherstellung und Vorlagerung der Proben.....	4
2.3	Messmethoden und grundlegende Daten.....	4
2.3.1	Rohdichte, Biegezug- und Druckfestigkeiten... ..	4
2.3.2	Porositätskennwerte	5
2.3.3	Darren.....	5
2.3.4	Feuchtegehalt nach jeweiliger Vorlagerung	5
2.4	Sorptionsisothermen.....	5
2.5	Temperatureinfluss auf die Sorptionsisothermen	13
3.	Diskussion	13
3.1	Desorptions- und Trocknungsisotherme.....	13
3.2	Scanning- und Adsorptionsisothermen sowie ihr Einfluss auf das KRL-Messergebnis	13
3.3	Ermittlung von Sorptionsmodellen	14
3.3.1	Zementbasierte Estriche	14
3.3.2	Calciumsulfatbasierte Estriche.....	16
3.4	Berechnung von KRL- und Darrwerten von Estrichen.....	16
3.4.1	Ungenauigkeiten und Limitierungen der Rechnungen.....	16
3.5	Der Einfluss der Temperatur auf das KRL Ergebnis	17
4.	Zusammenfassung	17
5.	Weitere Literatur und Quellen.....	17
5.1	Berechnungen	17
Anhang:	18
A1.	Porositätskennwerte.....	18
A2.	Berechneter Trocknungsverlauf und KRL Messergebnisse an verschiedenen Estrichsorten.....	19
A.2.1	CEM I, 5:1, Aussenklima 50 % relative Luftfeuchte	19
A.2.2	CEM I, 5:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte, nach 3,5 Wochen abgedeckt (entspricht einer dampfdichten Sperre).....	25
A.2.3	CEM I, 5:1, Aussenklima 60 % rel. Luftfeuchte	31
A.2.4	CEM I, 6:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte	37
A.2.5	CEM I, 6:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte, nach 3,5 Wochen abgedeckt (entspricht einer dampfdichten Sperre).....	43
A3.	Messdaten für die Sorptionsisothermen	49

1. Einleitung

Die Feuchte von Unterböden ist, neben weiteren Faktoren, ein wichtiges Kriterium für die sogenannte Belegreife, der Zustand, in dem der Unterboden mit Bodenbelägen oder Parkett belegt werden kann.

In den vergangenen Jahren hat die TKB, teilweise in Zusammenarbeit mit verschiedenen Universitätsinstituten, zu diesem Thema eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es,

1. das Trocknungsverhalten alter und heutiger Estrichrezepturen zu verstehen, ggf. auch mathematisch modellieren zu können,
2. Kriterien für den Feuchtegehalt bezüglich der Belegreife von Estrichen zu entwickeln, die nicht nur empirisch, sondern auch theoretisch begründbar sind,
3. existierende und neue Messmethoden auf ihre Aussagekraft in Bezug auf den Feuchtezustand von Estrichen zu untersuchen und zu beschreiben sowie
4. Messgeräte auf ihre Eignung zu prüfen.

Die TKB hat inzwischen 3 Berichte zum Thema „Belegreife und Feuchte“ publiziert:

1. TKB Bericht 1 „Versuche zur Trocknung von Estrichen“¹
2. TKB Bericht 2 „Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen“² und
3. TKB Bericht 3 „Geeignete Messgeräte zur Feuchtebestimmung nach der KRL-Methode“³

Will man empirische Daten zur Belegreife, so wie sie bei der CM- und Darr-Methode reichlich existieren, auf andere Messverfahren übertragen, benötigt man insbesondere auch Kenntnisse der entsprechenden Sorptionsmodelle. Weiter sind solche Kenntnisse auch notwendig um zu verstehen, wie KRL Messungen an Probematerial mit Feuchteunterschieden, wie sie in der Regel bei einem trocknenden Estrich vorliegen, zu beurteilen sind.

Die TKB hat daher einen Auftrag an die Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie, Prof. Dr.-Ing. Frank Schmidt-

¹ TKB-Bericht 1: Belegreife und Feuchte – Versuche zur Trocknung von Estrichen, Technische Kommission Bauklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf, 2012.

² TKB-Bericht 2: Belegreife und Feuchte – Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen; Technische Kommission Bauklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf, 2013.

³ TKB-Bericht 2: Belegreife und Feuchte – Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen; Technische Kommission Bauklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf, 2013.

Döhl erteilt, diese Fragen zu untersuchen. Weiter sollte untersucht werden, wie groß die Differenz zwischen einer „Trocknungsisotherme“ und einer „normalen“ Desorptionisotherme ist.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Berichts der TUHH⁴ zusammen und erläutert sie.

Wesentliche Teile des Berichts und Konsequenzen aus den gemessenen Daten wurden vom Sachbearbeiter des Berichts, Herr Dr.-Ing. Gernod Deckelmann, unter dem Titel „Das Feuchteaufnahme- und -abgabeverhalten zementgebundener Estriche und Konsequenzen für die Bestimmung der KRL“ bei der 34. TKB Fachtagung 2018⁵, am 14. März 2018 in Köln vorgetragen.

Die dort vorgetragenen Erläuterungen finden sich teilweise auch in diesem Bericht wieder.

1.1 Erläuterung zum Prüfauftrag – Desorptions- und Trocknungsisotherme

Während Parkett- und Bodenleger gerne wissen möchten, wie ein Estrich trocknet, sind Bauphysiker bei der Bestimmung von Sorptionsisothermen daran interessiert, alle Feuchtezustände eines Baustoffs zu beschreiben. Der Bauphysiker wird daher einen Zementmörtel in eine Form geben, diese sich verfestigen lassen, dann aber diese Form bis zur Prüfung bei einer Luftfeuchte nahe 100 % rLF lagern und maximal „nass“ halten. Eine chemische Wasserbindung findet statt, hat aber keine Auswirkung auf den Feuchtezustand, da Wasser bis zur Sättigung jeweils nachgeliefert wird. Aus diesem „Nasszustand“ wird dann Wasser durch Trocknung desorbiert und eine **Desorptionisotherme** bestimmt. Der Wert der Isotherme bei 0 KRL-% muss dabei nicht unbedingt 0 Masse-% sein, sondern ist methodenspezifisch. Nachdem hinreichend Massegleichgewicht bei 0 KRL-% erreicht ist, wird das Material durch Erhöhung der Luftfeuchte aufgefuechtet, bis wieder eine Feuchte von 100 % rLF erreicht ist. Dies liefert dann die Werte der **Adsorptionisothermen**⁶. Diese besonderen Bedingungen bei der Durchhärtung haben im Übrigen auch Folgen für die Struktur des Zementleimes und der gesamten Porenstruktur.

Estriche im Baubereich werden dagegen nach dem Einbau nicht konstant feucht gehalten, sie sind gegenüber der Umgebung „einseitig“ offen (unten liegt normalerweise eine Dampfsperre). Sie trocknen also gleichzeitig durch chemische Wassereinbindung (Zementreaktion, Gipsreaktion) und physikalisch durch Verdunstung des Wassers. Da das durch die chemische Reaktion verbrauchte Wasser in der Regel nicht von der Umgebung nachgeliefert wird – die Umgebungsluftfeuchte liegt normalerweise deutlich unter 100 % - kann die Trocknung nicht über die Desorptionisotherme verlaufen. Sie läuft über eine **Trocknungsisotherme**, die im Sorptionsdiagramm eine sogenannte **Scanning-Isotherme** (nass nach trocken) darstellt.

In der Vergangenheit sind diese Unterschiede weitgehend nicht beachtet worden und haben zu einiger Verwirrung geführt. Versuche, Trocknungskurven (der Gewichtsverlust eines Stück Estrichs bei konstanter Luftfeuchte und Temperatur) mit Hilfe von Desorptionisothermen zu berechnen, schlagen daher in der Regel fehl.⁷

Ein wesentlicher Teil des Prüfauftrages war daher, für eine historische Estrichmischung den Unterschied heraus zu arbeiten.

Weiter ist die Kenntnis der Trocknungskurve sowie der Adsorptions- und Scanning-Isothermen notwendig, um zu verstehen, wie der Wert der KRL-Messung bei Prüfgut mit einer Feuchteverteilung zu erklären ist. Dazu gehört insbesondere auch, welcher Feuchtezustand sich nach einer Belegung einstellt.

2. Experimentelles und Ergebnisse

2.1 Materialien

Folgende Baustoffe wurden für die hergestellten Estrichproben verwendet:

- Zement CEM I 32,5R der Fa. Phönix
- Sand der Fa. Otto Dörner, Kies und Deponien GmbH & Co. KG, Bäcker-Busch-Weg, 21218 Seevetal-Hittfeld, Sieblinie A/B8 DIN 1045-2. Vor der Verwendung wurde der Sand nochmals bei 40 °C getrocknet.

⁴ TuTech Innovation GmbH, Zentrum für Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie, Prof. Dr. Ing. Frank Schmidt-Döhl
Untersuchungsbericht

Thema des Auftrags: Untersuchungen zum Feuchteaufnahme- und Feuchteabgabeverhalten ausgewählter Estrichbaustoffe
Auftraggeber: Technische Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Klebstoffe (IVK)

Datum des Dokuments: 9. Juni 2017

Dokumentnummer: 2016-196

⁵ Gernod Deckelmann, „Das Feuchteaufnahme- und -abgabeverhalten zementgebundener Estriche und Konsequenzen für die Be-

stimmung der KRL“, in Tagungsband der 34. TKB Fachtagung 2018, Technische Kommission Bauklebstoffe im Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf

⁶ Im Folgenden wird durchgehend der Begriff Adsorption verwendet, obwohl die Sorption auch teilweise im Material stattfindet und damit als Adsorption zu bezeichnen wäre.

⁷ siehe hierzu z. B. Thomas Brokamp, „Belegreife und Feuchte – Vorschläge der TKB zur Messung der korrespondierenden Luftfeuchte“, 26. TKB Fachtagung

- Fertigmischung eines Calciumsulfatestrichs der Firma Knauf, FE 50 Largo. Gemäß den Herstellerangaben handelt es sich dabei um einen CA-C25-F5.

2.2 Estrichmischungen, Probenherstellung und Vorlagerung der Proben

Es wurden folgende Estriche angemischt:

- Bindemittel CEM I, Wasserbindemittelwert 0,55 und Zuschlag-Bindemittelverhältnis 6:1 (siehe Tabelle 1). Dieser Estrich wird nachfolgend als CEM I bezeichnet. Die Estrichproben CEM I wurden 28 Tage bzw. 56 Tage in Folie gelagert.

	Soll [g]	Ist [g]
CEM I 32,5 R Fa. Phönix	1000,0	1000,1
Estrichsand AB 8	6000,0	5999,9
Wasser	550,0	550,0
Gesamtmasse	7550,0	7550,0
w/z	0,55	
G/Z	6:1	
Ausbreitmaß	Konsistenz sehr steif Ausbreitmaß kaum zu messen	

Tabelle 1: Rezeptur Zementestrich „CEM I“

- Bindemittel CEM I, Wasserbindemittelwert 0,55 und Zuschlag-Bindemittelverhältnis 5:1 (siehe Tabelle 2). Dieser Estrich wird nachfolgend als CEM I-2010 bezeichnet. Die Estrichproben CEM I-2010 wurden 28 Tage in Folie und 28 Tage unter Wasser gelagert.

	Soll [g]	Ist [g]
CEM I 32,5 R Fa. Phönix	1166,7	1166,7
Estrichsand AB 8	5833,5	5833,4
Wasser	641,7	641,8
Gesamtmasse	7641,9	7641,9
w/z	0,55	
G/Z	5:1	
Ausbreitmaß nach ca. 10 min*	108/109 Ø 109 mm	

Tabelle 2: Rezeptur Zementestrich „CEM I-2010“

- Bindemittel Calciumsulfat, Wasser-Feststoffwert 0,1625 (siehe Tabelle 3). Dieser Estrich wird nachfolgend als CSF bezeichnet. Die Estrichproben CSF wurden 28 Tage in Folie gelagert.

	[g]
Knauf FE 50 Largo (Charge # 24.10.16 A)	3000,0
Wasser	487,5
Gesamtmasse	3487,5
Wasserfeststoffwert	0,1625

Tabelle 3: Rezeptur CA-Estrich („CSF“)

Mit den Mörteln wurden prismenförmige Proben (Prismenformen aus Styropor) mit den Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm für die Bestimmung der Rohdichte,

der Biegezugfestigkeiten, der Druckfestigkeiten, der Porositätskennwerte, des Feuchteabgabe- und -aufnahmeverhaltens bei 20 °C und der Konstanz der korrespondierenden Luftfeuchte (KRL) bei wechselnden Temperaturen hergestellt.

Nach der Herstellung wurden die Proben in den Formen abgedeckt und für ca. 24 Stunden in der „Feuchtkiste“ (20,0 °C ± 1,0 K und einer relativen Feuchte von größer 95 %) gelagert. Nach 24 Stunden wurden die Prismen ausgeschalt.

Zwei Arten der Lagerung wurden durchgeführt:

- „**Folienlagerung**“: Die Prismen wurden nach dem Ausschalen einzeln dampfdicht mit Aluminiumfolie ummantelt und zusätzlich in einer verschlossenen Plastiktüte verpackt und lagerten so bis zur Prüfung in einem klimatisierten Raum bei 20 °C.
Anmerkung: Diese entspricht der Situation, bei dem eine chemische Trocknung ohne anschließende Auffeuchtung stattfindet. Zur Geschwindigkeit der chemischen Einbindung von Wasser findet man Daten im TKB Bericht 1.
- „**Unterwasserlagerung**“: Die Prismen wurden nach dem Ausschalen bis zur vorgesehenen Prüfung in einem Wasserbad (20 °C) gelagert.
Anmerkung: Dies entspricht der klassischen Vorgehensweise für die Bestimmung von Sorptionsisothermen, nach chemischer Trocknung kann das System wieder maximal auffeuchten.

In beiden Fällen wurden die für die Sorptionsmessungen vorgesehenen Prismen unmittelbar nach dem Ausschalen zusätzlich gehälftet, um die spätere Zerkleinerung mit dem Hammer zu erleichtern und damit den späteren Zerkleinerungsvorgang zu beschleunigen.

Im Falle des **Calciumsulfatestrichmörtels** wurden vom Datenblatt (zwischen 38 cm bis 43 cm) abweichende Fließmaße von 36 bzw. 45 cm gefunden. Die beiden Chargen werden in Folge mit den **Bezeichnungen „hohes“ bzw. „niedriges“ Fließmaß** unterschieden. Die weiteren an diesen Proben gemessenen Daten sind jedoch nicht statistisch signifikant unterschiedlich und wurden teilweise zusammengefasst.

2.3 Messmethoden und grundlegende Daten

2.3.1 Rohdichte, Biegezug- und Druckfestigkeiten

Nach Entnahme der Prismen aus dem Lagerklima wurden diese gewogen und die Abmessungen jeder Dimension dreimal bestimmt und daraus ein Mittelwert gebildet.

Biegezug- und Druckfestigkeiten wurden in Anlehnung an DIN EN 1015-11 bestimmt. Die nachfolgende Tabelle führt die ermittelten Daten auf.

Bezeichnung	Alter Tage	Lagerung	ρ g/cm ³	β_{BZ} N/mm ²	σ_D N/mm ²
CEM I	28	Folie	2,28	5,7	49,5
	56	Folie	2,30	6,6	60,1
CEM I-2010	28	Folie	2,30	6,5	51,1
	28	unter Wasser	2,30	5,9	42,7
CSF-niedrig	28	Folie	2,23	4,7	25,3
CSF-hoch	28	Folie	2,27	4,7	23,9

Tabelle 4: Rohdichten, Biegezug- und Druckfestigkeiten

Die Werte beim CSF liegen leicht unter denen, die der Hersteller angegeben hat. Bei diesen Proben weisen die Zusätze „niedrig“ und „hoch“ auf die bereits oben angemerkt unterschiedliche Fließmaße hin.

2.3.2 Porositätskennwerte

Zur Ermittlung der Porositätskennwerte im Quecksilberdruckporosimeter (Autopore III, Fa. Micromeritics) wurden im Alter von 28 bzw. 56 Tagen aus einem halben Prisma mehrere Proben herausgebrochen und mit Hilfe einer Zange auf ein ausreichend „kleines“ Probenstück (ca. 1 cm-x 1 cm-x 2 cm) herabgebrochen. Das Probengewicht lag in der Regel zwischen 4 g bis 5 g. Die zementgebundenen Proben wurden bei 105 °C bzw. 65 °C, die calciumsulfatgebundenen Proben bei 40 °C getrocknet und anschließend im Quecksilberdruckporosimeter geprüft.

Die Messergebnisse findet man im Anhang A1.

2.3.3 Darren

Zum Darren wurden die Proben in Öfen mit folgenden Temperaturen bzw. Bedingungen gelegt:

- 105 °C (Zementestrich-Proben) bzw.
- 40 °C (CSF-Proben). Die zur Kontrolle zusätzlich gemessene Luftfeuchte im Ofen betrug circa 10 % (~ 5,1 g/m³). Der Ofen stand in einem nicht klimatisierten Laborraum.

Die Proben wurden jeweils bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, die Darrfeuchte in Bezug auf das Darrgewicht (Trockengewicht) angegeben.

2.3.4 Feuchtegehalt nach jeweiliger Vorlagerung

Ein Teil der hergestellten Prismen wurde verwendet, um nach Ablauf der jeweiligen Vorlagerung den Feuchtegehalt in Gewichts-% und die zugehörige korrespondierende relative Luftfeuchte (KRL) zu bestimmen. Die ermittelten Kennwerte für die verschiedenen Vorlagerungs- und Estrichvarianten sind in Tabelle 5 angegeben. Diese Kennwerte werden nachfolgend als „Nassfeuchten“ bezeichnet.

Zusätzlich angegeben sind in der Tabelle die Feuchtegehalte von Estrichproben in Gew.-% nach Einlagerung bis zur Gewichtskonstanz in Sorptionsbädern entspre-

chend einer relativen Luftfeuchte von 94,6 %. Es ist erkennbar, dass der Feuchtegehalt in Gew.-% der zementgebundenen und folienengelagerten Estrichproben in guter Näherung durch die Gleichgewichtsfeuchten bei 94,6 % relativer Feuchte abgeschätzt werden kann. Erheblich davon abweichende Feuchtegehalte weisen die unter Wasser gelagerten Proben und die calciumsulfatgebundenen Proben auf.

Estrichvariante	Feuchtegehalt	zugehörige KRL*	Feuchtegehalt bei 94,6 % r.F. Gew.-%
	nach Vorlagerung		
	Gew.-%	% rel. F.	
CEM I Folienlagerung 28 Tage	4,3	99,4	4,4
CEM I Folienlagerung 56 Tage	4,1	92,6	4,1
CEM I-2010 Folie, 28 Tage	5,3	96,7	4,7
CEM I-2010 unter Wasser 28 Tage	6,7	99,9	5,5
CSF niedrig Folie	5,5	99,9	1,4
CSF hoch Folie	6,2	99,9	1,3

*KRL = korrespondierende Luftfeuchte

Tabelle 5: "Nassfeuchten"

2.4 Sorptionsisothermen

Zur Ermittlung des Trocknungs-, Scanning- und Adsorptionsverhaltens wurde wie folgt vorgegangen: Zunächst wurden die Sorptionsbehälter mit den gesättigten und für die verschiedenen relativen Feuchten zutreffenden Salzlösungen befüllt. Dies erfolgte mindestens 3 Wochen vor dem eigentlichen Versuchsbeginn. Die sich in den Sorptionsbehältern einstellenden Feuchten wurden regelmäßig mit Feuchtefühlern der Firma Testo kontrolliert. In einem Sorptionsbehälter konnten gleichzeitig jeweils zwei Proben eingelagert werden.

Nach Ablauf der jeweils gewählten Vorlagerungsdauer wurde jeweils ein gehälftetes Estrichprisma in eine Polyethylen-tüte verpackt und mit einem Hammer schnellst möglich zerkleinert.

Die Bruchstücke wurden über ein Sieb mit einer Maschenweite von 8 mm in einen Behälter eingefüllt, gut durchmischt und circa 50 g in eine bereitgestellte Aluminiumschale eingewogen. Anschließend wurde die Probe sofort in den jeweiligen Sorptionsbehälter eingelagert. Die dampfdicht abgeschlossenen Sorptionsbehälter wurden in einem klimatisierten Raum bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte gelagert. In regelmäßigen Abständen wurden die Gewichtsänderungen der Proben ermittelt. Eine Umlagerung der Proben in ein verändertes Klima (veränderte relative Feuchte) erfolgte erst, wenn eine Gewichtskonstanz festzustellen war. Eine Gewichtskonstanz wurde erreicht, wenn in drei auf-

einanderfolgen Messungen mit zeitlichen Abständen von mindestens 24 Stunden eine Gewichtsänderung von weniger als 0,1 Gewichts-% festgestellt wurde. Zum Erreichen der so definierten Gewichtskonstanz waren Einlagerungsdauern im jeweiligen Klima von bis zu 2 Wochen erforderlich.

Für die Ermittlung der Sorptionskennwerte wurden Sorptionsbehälter mit folgenden relativen Feuchten vorgehalten:

- 94,6 % relative Feuchte
- 85,1 % relative Feuchte
- 75,5 % relative Feuchte
- 54,4 % relative Feuchte
- 23,1 % relative Feuchte
- ≤ 3 % relative Feuchte (Molekularsieb 0,3 nm)

Anmerkung: Im Versuch erwies sich die letzte Trocknungsbedingung als „schärfer“, als das Darren bei 40 °C. Entsprechend wurden dort negative Darrfeuchten ermittelt.

Zur Ermittlung des Desorptionsverhaltens erfolgte nach der jeweiligen Vorlagerung eine Einlagerung von Proben bei den genannten relativen Feuchten. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wurde zur Bestimmung des Scanning-Verhaltens und der Adsorptionskennlinie

eine Auffeuchtung jeweils einer Probe in allen über dieser Ausgangs-Desorptionsfeuchte liegenden relativen Feuchten vorgenommen. So wurde zum Beispiel jeweils eine Probe von den bei 23,1 % getrockneten Proben nach Erreichen der Gewichtskonstanz bei 54,4 %, bei 75,5 %, bei 85,1 % und bei 94,6 % relativer Feuchte eingelagert.

Die daraus ermittelten Kennlinien zum Feuchteabgabe- und Feuchteaufnahmeverhalten der verschiedenen Estrichbaustoffe sind nachfolgend wiedergegeben. Zusätzlich zu den Sorptionskennlinien sind die ermittelten „Nassfeuchten“ in den Diagrammen eingetragen. Die ermittelten Werte sind im Anhang A3 tabellarisch wiedergegeben.

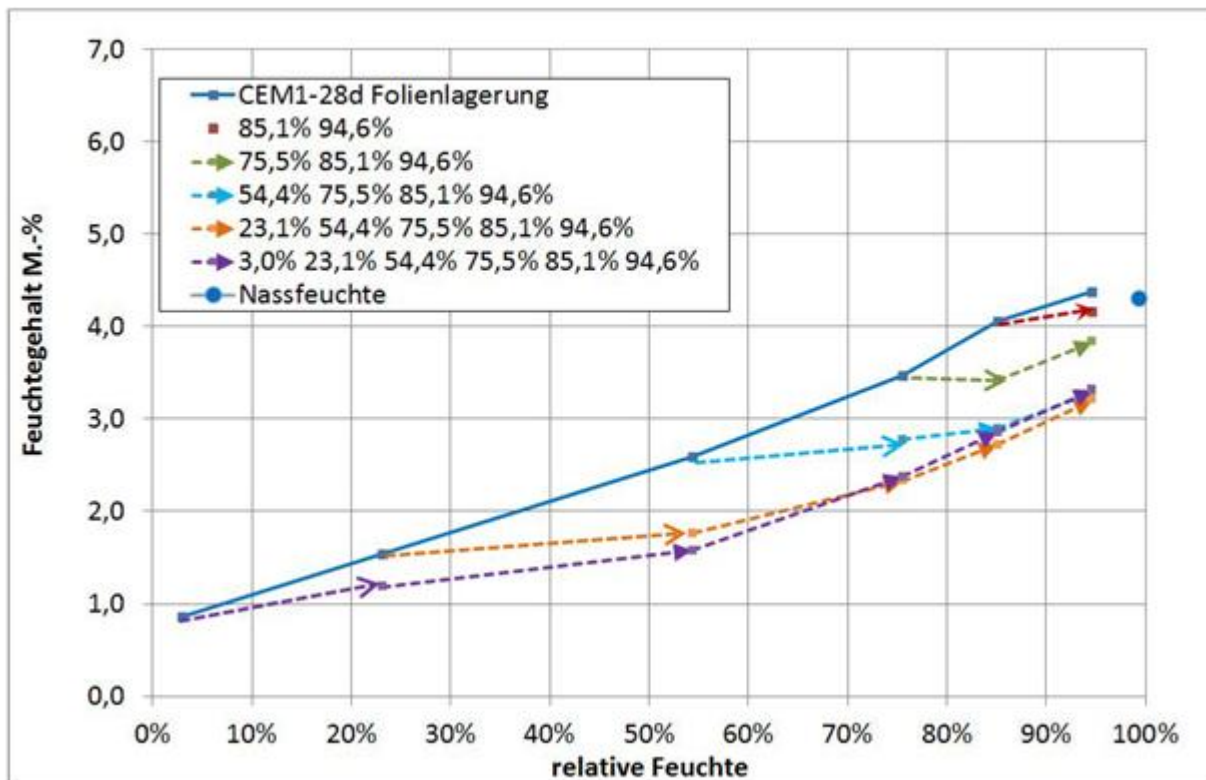


Abbildung 1: Trocknungs-, Scanning und Adsorptionsisotherme(n) der Probe CEM1, W/Z=0,55, G/Z=6/1, 28 d Folienlagerung.
Quelle: 4

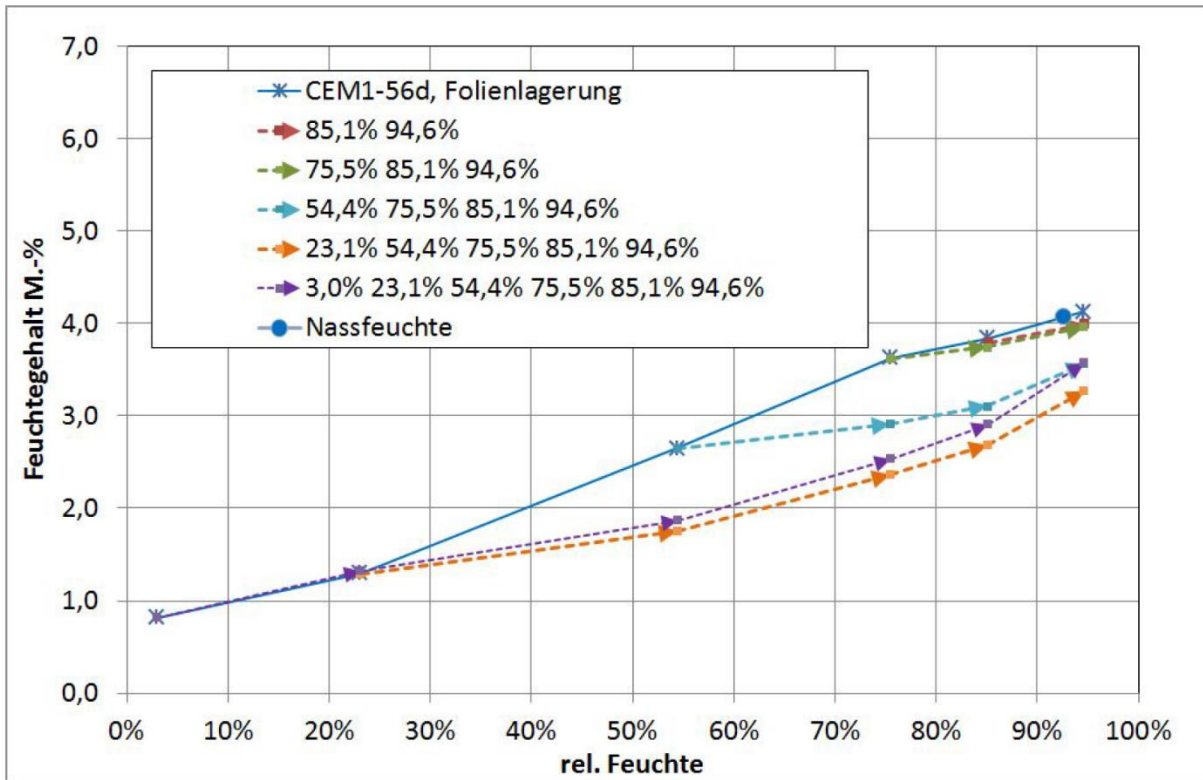


Abbildung 2: Trocknungs-, Scanning und Adsorptionsisotherme(n) der Probe CEM1, W/Z=0,55, G/Z=6/1, 56 d Folienlagerung.
Quelle: 4

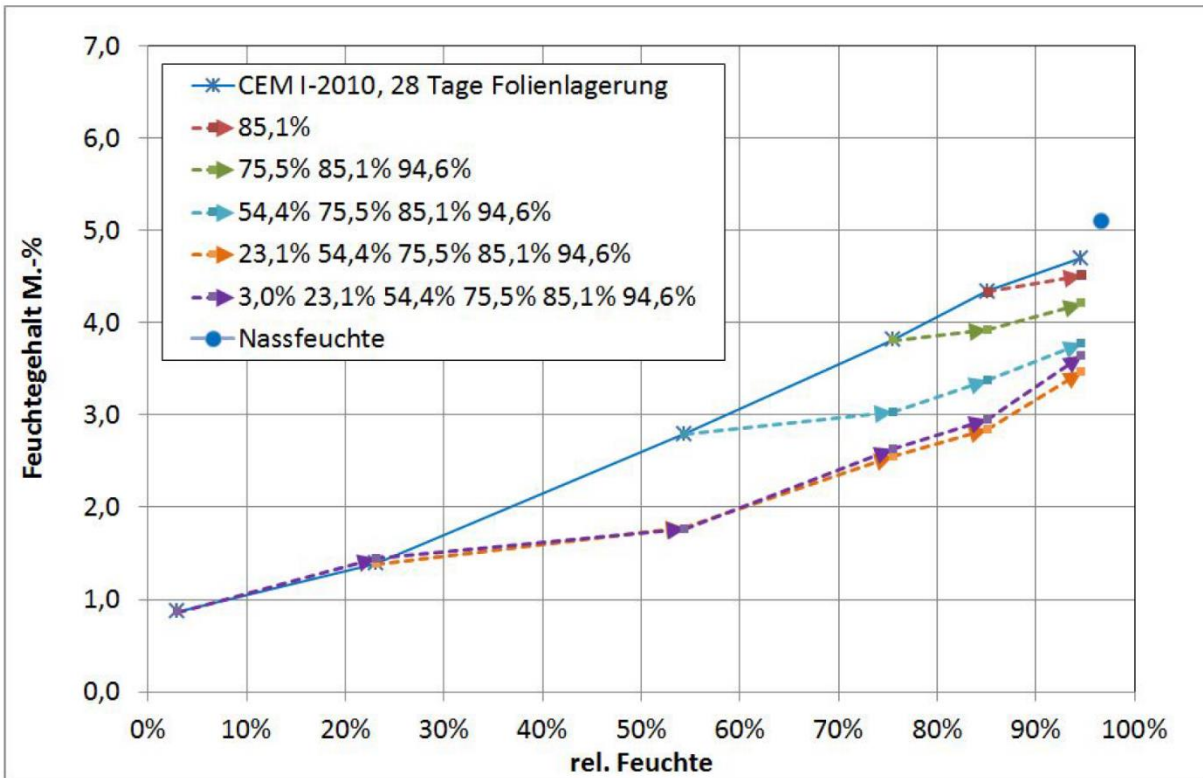


Abbildung 3: Trocknungs-, Scanning und Adsorptionsisotherme(n) der Probe CEM1-2010, W/Z=0,55, G/Z=5/1, 28 d Folienlagerung.
Quelle: 4

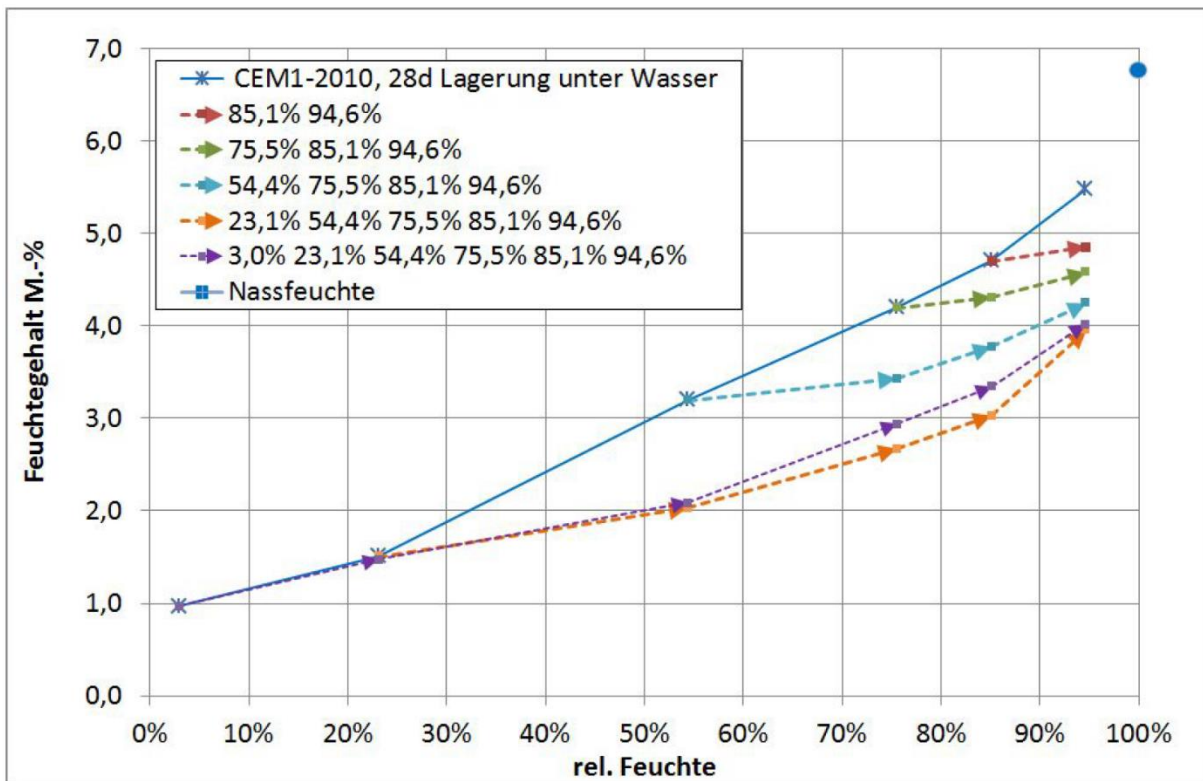


Abbildung 4: Desorptions-, Scanning und Absorptionsisotherme(n) der Probe CEM1-2010, W/Z=0,55, G/Z=5/1, 28 d Lagerung unter Wasser. Quelle: 4

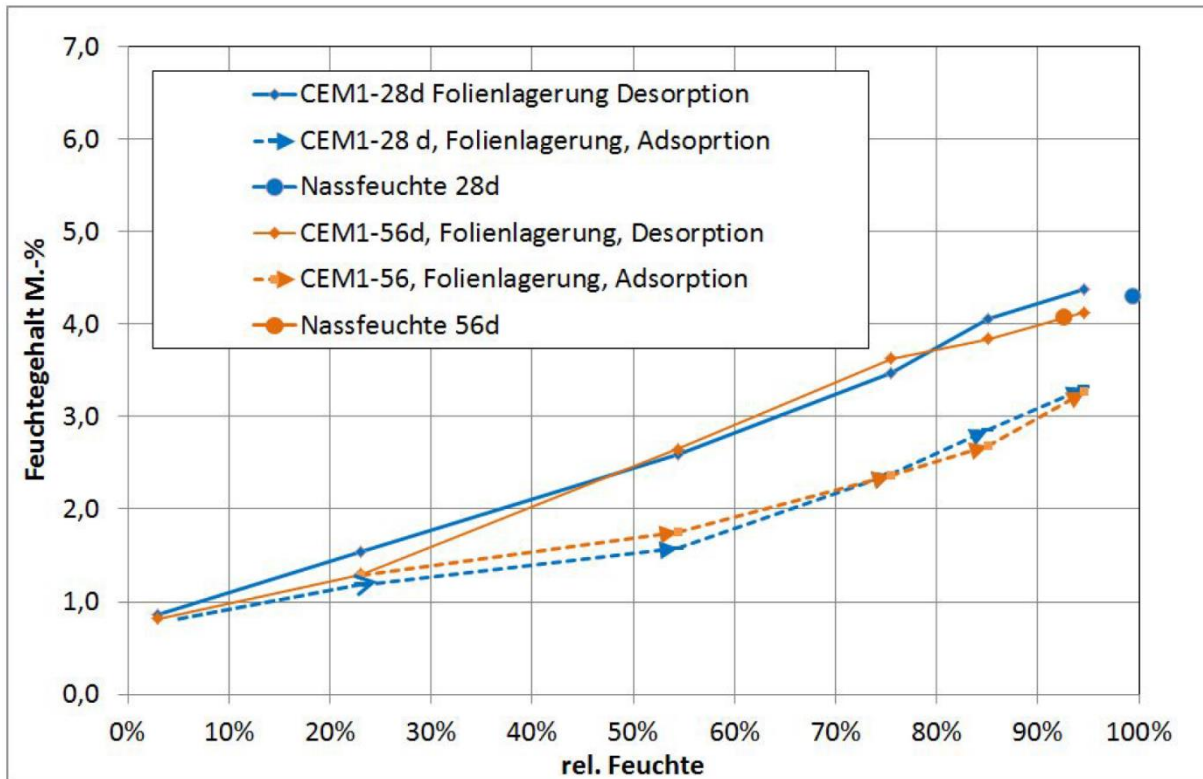


Abbildung 5: Vergleich der Isothermen CEM 1 nach 28 d und 56 d Folienlagerung. Die Unterschiede sind in Bezug auf die Messgenauigkeit nicht signifikant. Quelle: 4

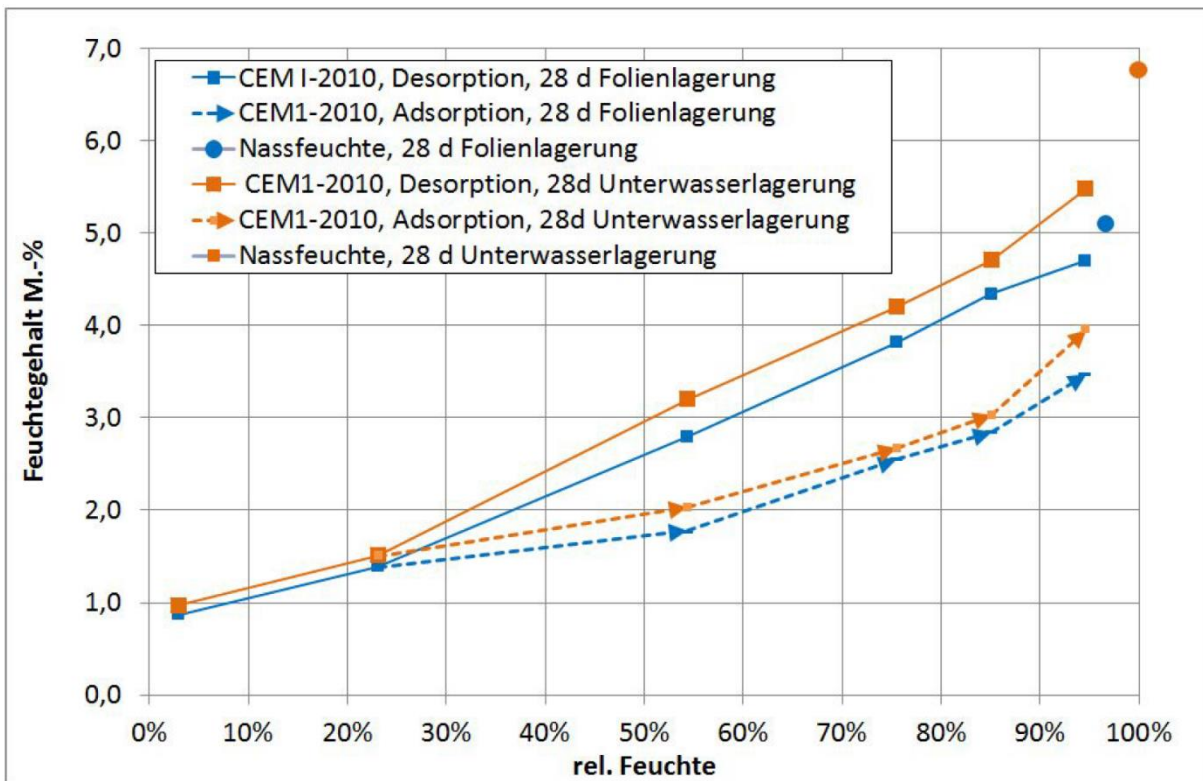


Abbildung 6: Vergleich der Desorptions- und Trocknungsisotherme des Materials CEM1-2010 nach Wasser bzw. Folienlagerung.
Quelle: 4

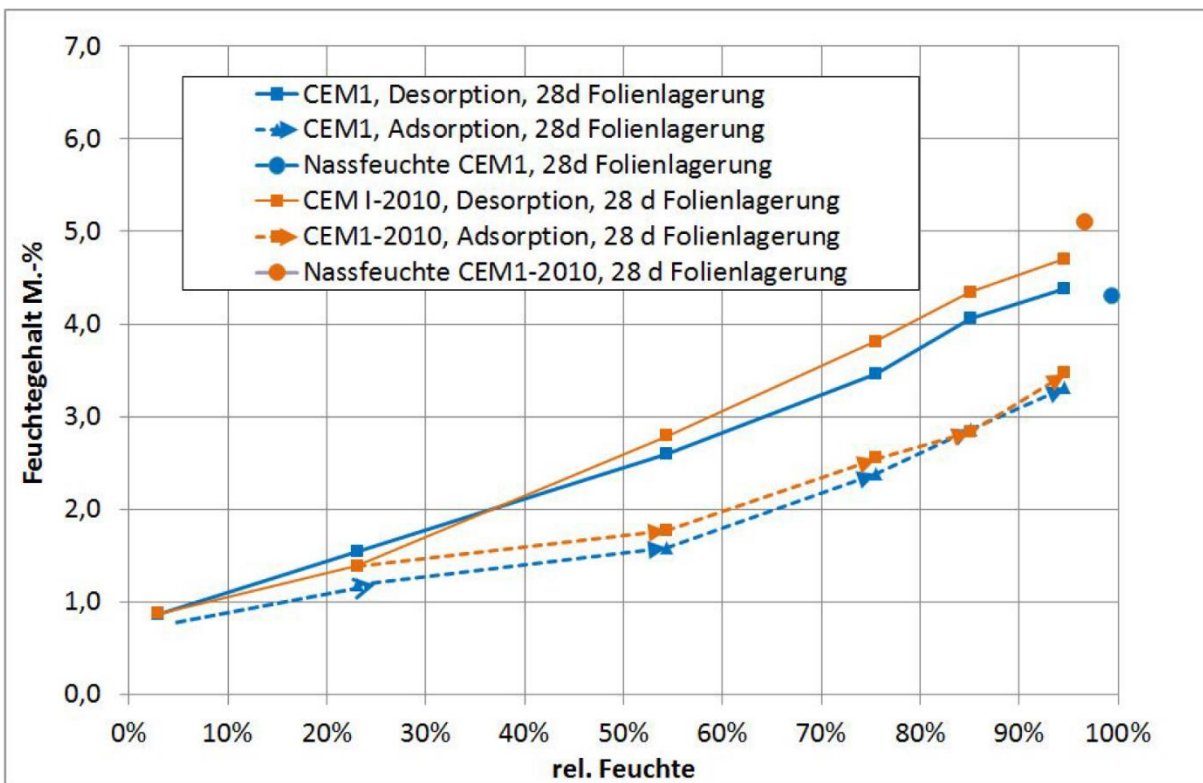


Abbildung 7: Vergleich der Isothermen bei Zementestrichen mit verschiedenen G/Z-Verhältnis, CEM I, W/Z=0,55, G/Z=6:1 und des CEM I-2010, W/Z=0,55, G/Z=5/1, jeweils 28 d Folienlagerung.
Quelle: 4.

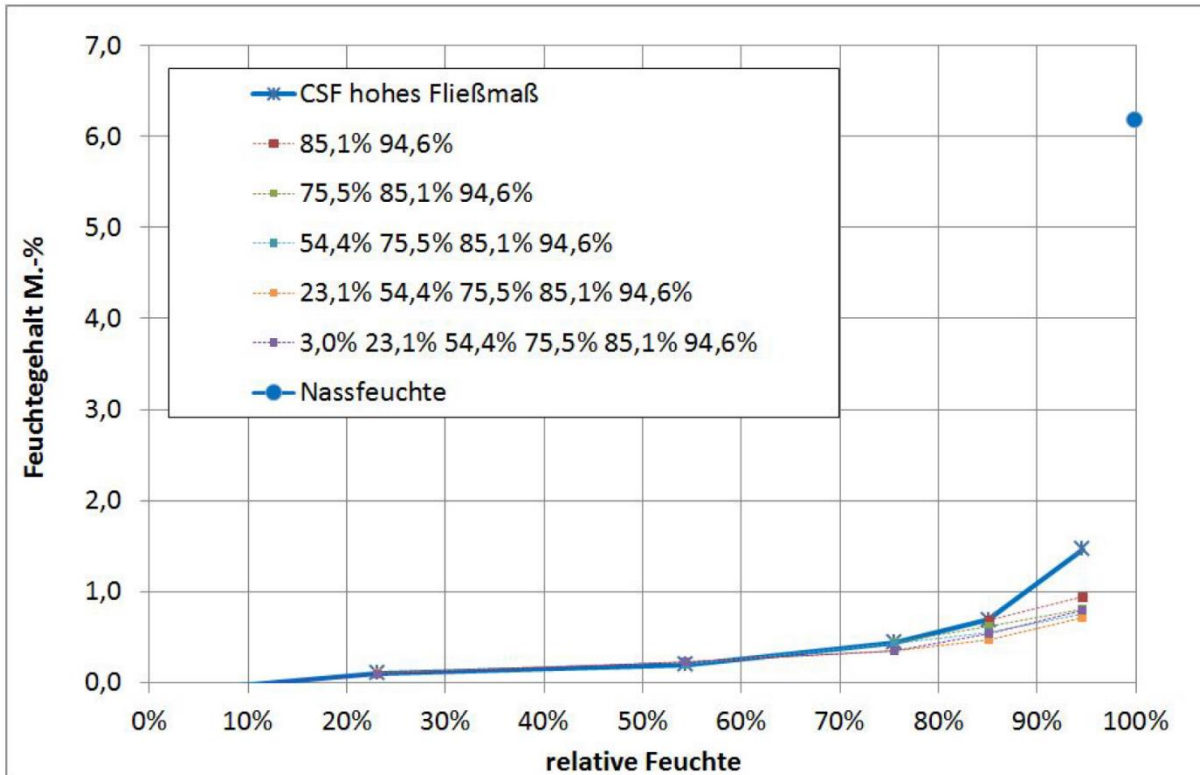


Abbildung 8: Trocknungs-, Scanning und Absorptionsisotherme(n) der Probe CSF, hohes Fließmaß, 28 d Folienlagerung.
Quelle: 4

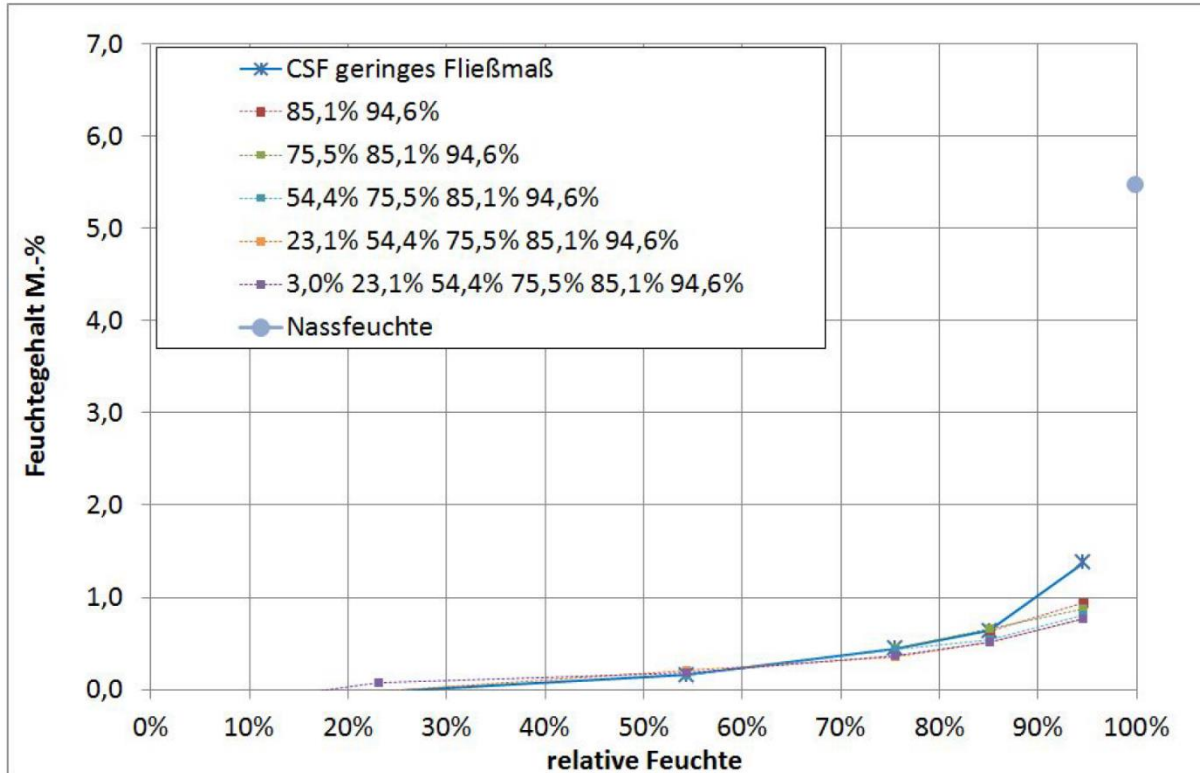


Abbildung 9: Trocknungs-, Scanning und Absorptionsisotherme(n) der Probe CSF, geringes Fließmaß, 28 d Folienlagerung.
Quelle: 4

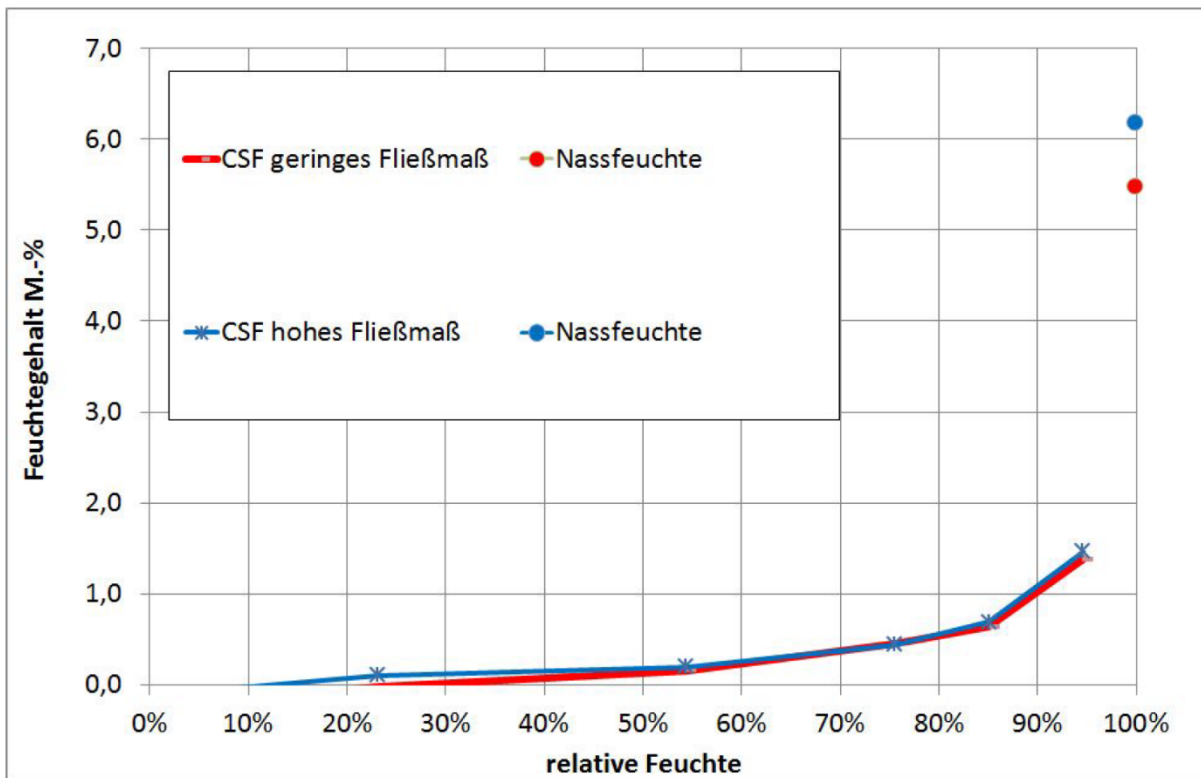


Abbildung 10: Vergleich der Isothermen bei den beiden CSF-Proben. Die Daten sind innerhalb der Messgenauigkeit nicht signifikant unterschiedlich.

Quelle: 4.

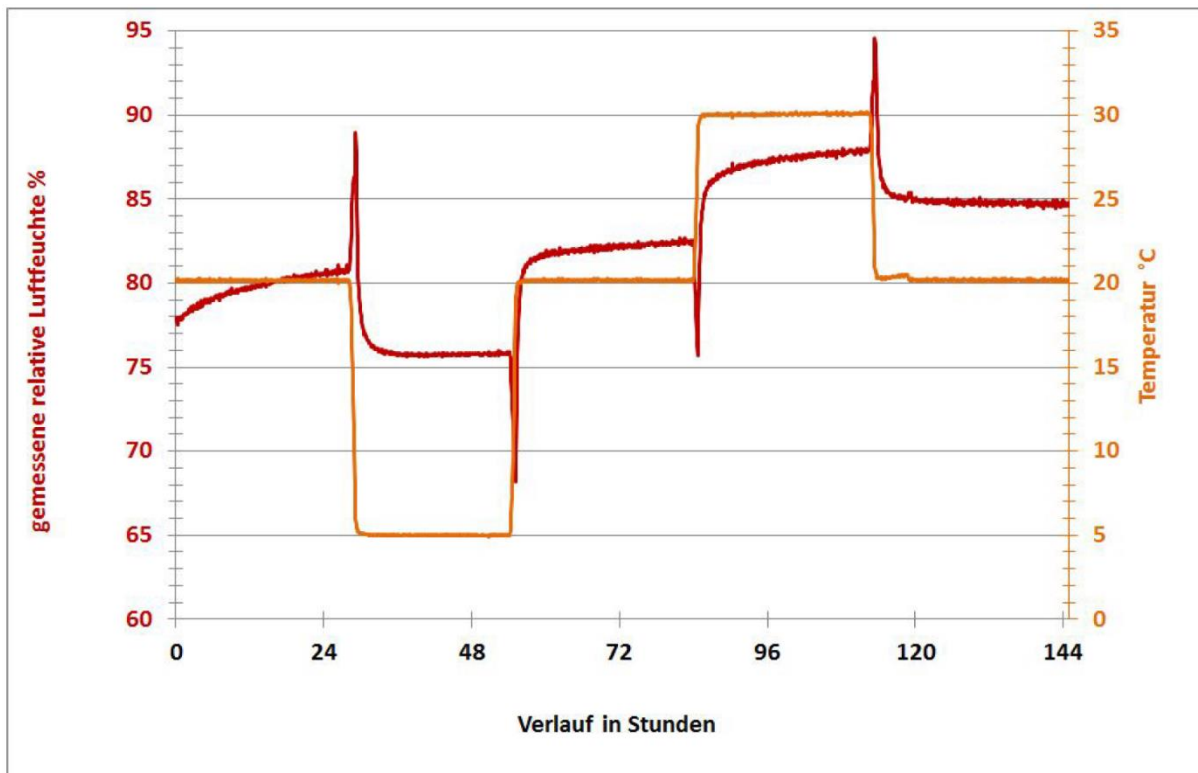


Abbildung 11: Änderung der KRL bei Temperaturveränderungen (CEM I, 28 Tage, Probe 3, Vorlagerung bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte 3 Tage).

Quelle: 4.

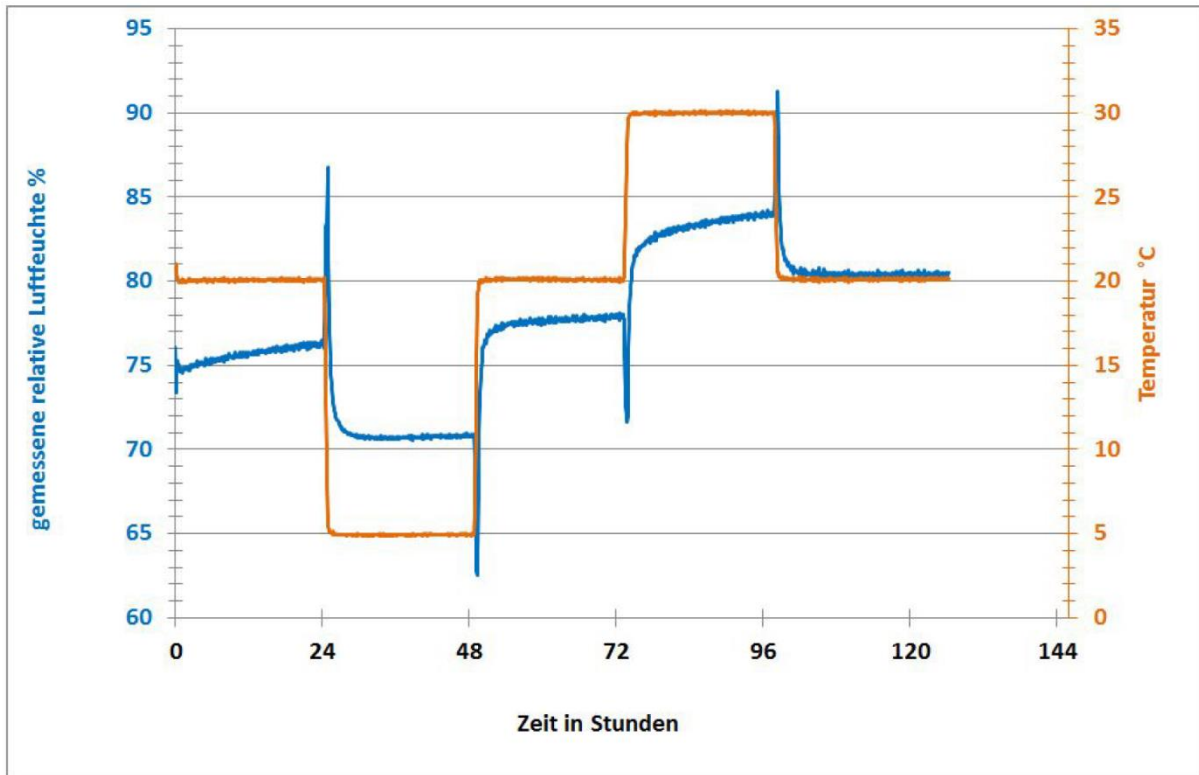


Abbildung 12: Änderung der KRL bei Temperaturveränderungen (CEM I, 49 Tage, Probe 1, Vorlagerung bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte 8 Tage).
Quelle: 4

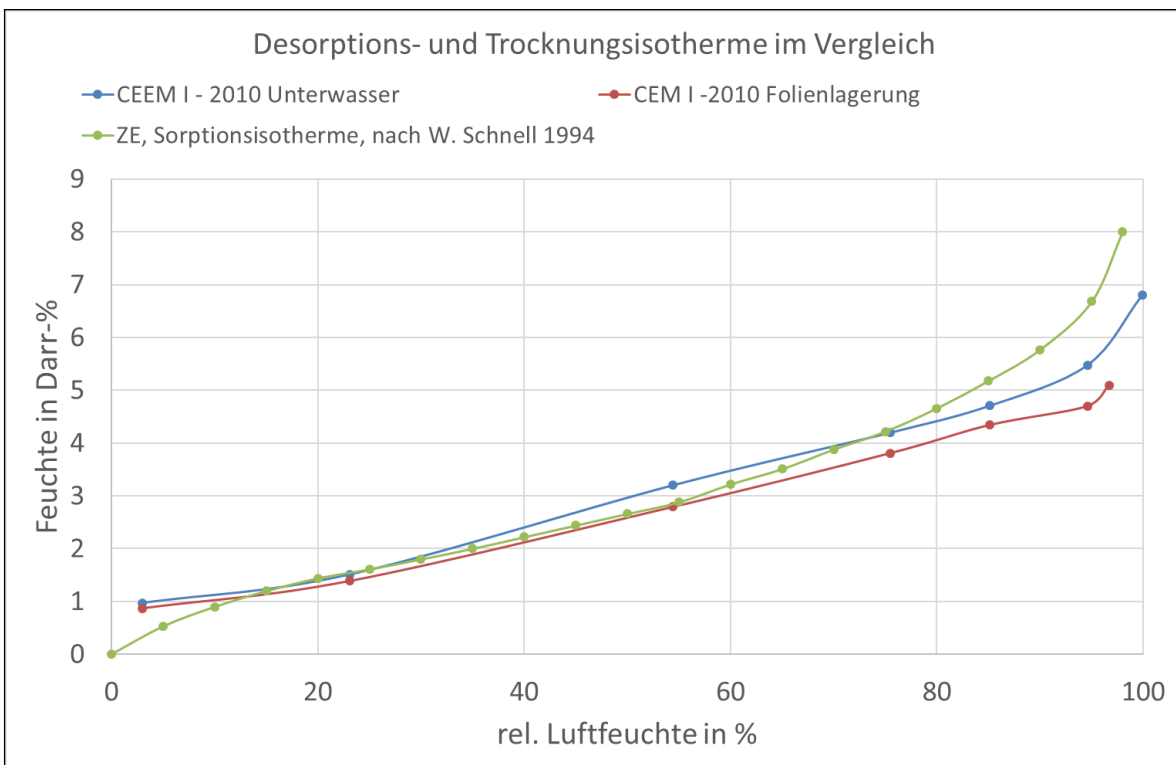


Abbildung 13: Vergleich der von Schnell berichteten Isothermen für Zementstriche und der hier gemessenen.

Das Verhältnis der Steigung der Trocknungs- zu den Scanning-Isothermen kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden:

Estrich	Steigung		m_{Desorp}/m_{scan}
	m_{Desorp}	m_{scan}	
CEM I, 28 Tage	0,0386	0,0090	0,23
CEM I, 56 Tage	0,0382	0,0123	0,32
CEM I-2010, Folie	0,0434	0,0114	0,26
CEM I-2010-UW	0,0491	0,0114	0,23

Tabelle 6: Steigungen der Trocknungs- bzw. Desorptions- und Scanningisothermen. Quelle: 4

2.5 Temperatureinfluss auf die Sorptionsisothermen

Der Temperatureinfluss auf die Gleichgewichtsfeuchten wurde an einigen Proben durch schlagartiges Ändern der Probentemperatur untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich die KRL um ca. 0,3 bis 0,5 %/°C ändert. Im Verhältnis zur Referenztemperatur von 20 °C ist also mit Abweichungen von 2 % bei +/- 5 °C (15 bis 25 °C) und einer Feuchte im Bereich von ca. 75 % r.LF zu rechnen.

3. Diskussion

3.1 Desorptions- und Trocknisotherme

Wie bereits oben erläutert, war eine Motivation für diese Untersuchung der Verdacht, dass die bisher berichteten Desorptionsisothermen zur Beschreibung von trocknenden Estrichen nur wenig geeignet sind.

Vergleicht man nun die hier erhalten „Desorptionsisothermen“ für den Estrich CEM I – 2010 mit der bekannten Desorptionsisotherme von W. Schnell⁸ erkennt man die vermuteten Unterschiede:

Insbesondere im Hochfeuchtebereich, der für die Beurteilung des „Trockenzustandes“ der wichtigste ist, zeigen sich erhebliche Abweichungen. Nahe der Sättigungsfeuchte von 98 % beträgt der Unterschied 2 bis 3 Darr-%, liegt also bei ca. 50 % bezogen auf die maximale Darrfeuchte bei einer „Trocknungs-Desorptionsisotherme“. Dies erklärt auch, wieso eine zufriedenstellende Modellierung von Trocknungskurven auf Basis der Schnell'schen Isotherme nicht möglich war (siehe TKB Bericht 1, Fußnote 1).

Ein weiterer Unterschied liegt im niedrigen Feuchtebereich vor. Anders als bei der Isotherme von Schnell eingezeichnet, muss die Isotherme nicht im Koordina-

tenursprung beginnen (rel. Luftfeuchte = 0 %, Darrfeuchte = 0 %). Wie man sehr schön an den hier vorgestellten Daten für calciumsulfatbasierte Estriche erkennen kann, sind Darrfeuchten keine absoluten, sondern relative Größen. Je nach Darrbedingung bleiben im Prüfkörper noch verschiedene Mengen an Wasser zurück.

3.2 Scanning- und Adsorptionsisothermen sowie ihr Einfluss auf das KRL-Messergebnis

Grundsätzlich können bei Baustoffen die Desorptions- und Adsorptionsisothermen in guter Näherung gleich sein.

Dies ist aber bei den hier betrachteten Estrichen **nicht der Fall**. Dies wurde bereits 1985 von W. Schnell⁹ angesprochen, nach Kenntnis der Autoren dieses Berichts aber in der Folge weder von ihm noch von Anderen dokumentiert untersucht oder aufgenommen¹⁰.

Für ein Verständnis der Ergebnisse von KRL-Messungen ist eine Kenntnis der Scanning- und Adsorptionsisothermen notwendig.

Der Grund wurde von G. Deckelmann bei der 34. TKB Fachtagung⁵ wie folgt erläutert:

„Nimmt man bei einem Baustoff an, dass die Desorptionsisotherme gleich der Adsorptionsisotherme ist, stellt sich bei 2 Proben gleicher Masse, aber unterschiedlicher Feuchte, einfach das arithmetische Mittel der Feuchten ein:

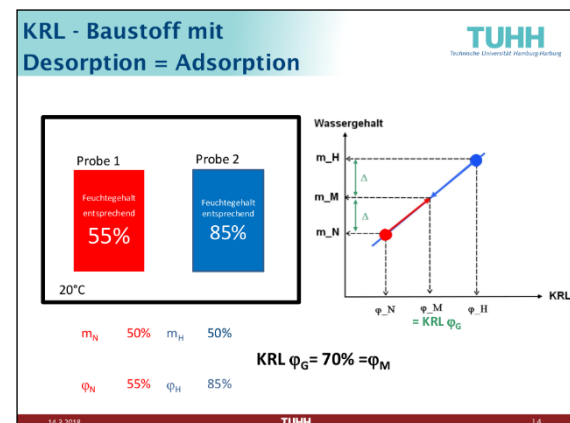


Abbildung 14: Mittlere Feuchte zweier Proben mit Feuchteaufnahme- und -abnahmeverhalten ohne Hysterese.

Quelle: 5

⁸ W. Schnell, Das Trocknungsverhalten von Estrichen – Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis, in: Rainer Oswald (Hrsg.), „Aachener Bausachverständigentage 1994“, Neubauprobleme – Feuchtigkeit und Wärmeschutz, AlBau, Bauverlag GmbH, Wiesbaden 1994

⁹ W. Schnell, Zur Ermittlung von Belegreife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen, BWD 1/1985

¹⁰ Anmerkung: Das dort enthaltene „Bild 1 Sorptionsisotherme eines Zementestrichs“ ist nach mündlichen Angaben des Autors eine Skizze, die nicht auf Messdaten basiert.

Dies ist jedoch bei den hier betrachteten Estrichen anders: hier ist Desorption ungleich Adsorption! Rechnet man in erster Näherung mit einem linearen Ansatz für die Desorptions- und Scanning-Isothermen, wird vom desorbierenden Material sehr viel mehr „Feuchte“ (in KRL) abgegeben, als von der gleichen Menge adsorbierenden Materials aufgenommen wird. Bei Proben gleicher Masse, aber verschiedenen Feuchten ergibt sich dann die KRL-Feuchte durch die Gleichgewichtsbedingung, dass die abgegebene Menge Wasser gleich der aufgenommenen Menge Wasser sein muss. Im konkreten Beispiel ergibt dann für eine Probe mit KRL-Feuchten von 55 bzw. 85 % ein Mischwert von 79 %.

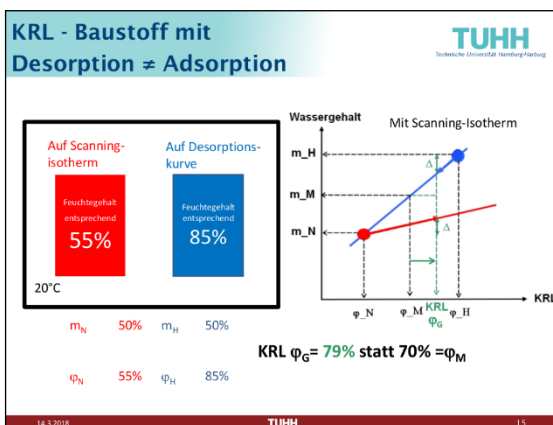


Abbildung 15: Mittlere Feuchte zweier Proben mit Feuchteaufnahme- und -abnahmeverhalten mit Hysterese.
Quelle: 5.

Man beachte hierbei, dass aber die Darrfeuchten in der gemischten Probe hinterher unterschiedliche sind!

Die hier vorgestellten Daten geben nun zum ersten Mal die Möglichkeit, das Verhalten von Zement- und eingeschränkt auch bei calciumsulfatbasierten Estrichen bei der Trocknung korrekt zu modellieren und sind auch eine Grundlage zur Beurteilung von KRL-Messungen.

Zuletzt muss noch darauf hingewiesen werden, dass hiermit das Scanning Modell nicht vollständig ermittelt worden ist. Die von uns nicht benötigten Daten, die von der Adsorptionsisotherme auf die Desorptionsisotherme führen, wurden nicht ermittelt.

3.3 Ermittlung von Sorptionsmodellen

Reale Proben von Baumaterialien zeigen in den meisten Fällen nicht eine diskrete (wie im Beispiel oben mit 2 Proben unterschiedlicher Feuchte) sondern eine kontinuierliche Verteilung der Feuchte. Für die KRL müssen daher Integrale im Feuchte- wie im Trockenbereich gebildet werden. Dafür ist es wünschenswert, auf Basis der gemessenen Daten kontinuierliche Funktionen zur Verfügung zu stellen. Dies ist durch Polynome

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

$$= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n, \quad n \geq 0$$

mit:

- a_i: Faktor (Koeffizient) für den Term x_i
 - i: Potenz
 - x: Variable, hier Feuchte in KRL-%
 - P(x): Funktionswert, hier: Feuchte in Darr-%
- möglich.

3.3.1 Zementbasierte Estriche

Für die **zementbasierten Estriche** ist dies in guter Näherung durch Polynome 2ten bzw. 3ten Grades möglich. Die Scanning-Isothermen können sinnvoll an eine Gerade angepasst werden; hier muss man jedoch beachten, dass nicht die KRL als unabhängige Variable, sondern die Differenz der KRL zum Ausgangspunkt der Scanning-Isotherme eingesetzt werden muss.

In Tabelle 6 findet man eine Übersicht der ermittelten Faktoren für die jeweiligen Polynom-Elemente.

Die zu diesem Bericht gehörende Excel Datei „TKB Bericht 4, Daten“ enthält zusätzlich die experimentellen und mit den Formeln und Werten berechneten Daten.

	Potenz	CEM1-2010-Unterpwasser		CEM1-2010-28Tage		CEM1-28Tage		CEM1-56Tage	
		Faktor	Stabw des Faktors	Faktor	Stabw des Faktors	Faktor	Stabw des Faktors	Faktor	Stabw des Faktors
Desorption	0	0,818397	0,139753	0,704737	0,121053	0,787284	0,082424	0,596284	0,178198
	1	0,031949	0,007171	0,032645	0,006211	0,028913	0,004229	0,038399	0,009143
	2	0,000177	0,000071	0,000107	0,000062	0,000098	0,000042	-0,000005	0,000091
Absorption	0	0,843872	0,116909	0,775287	0,156805	0,833980	0,104926	0,696210	0,060016
	1	0,041403	0,012186	0,040081	0,016345	0,014804	0,010937	0,039853	0,006256
	2	-0,000699	0,000295	-0,000719	0,000395	-0,000134	0,000264	-0,000637	0,000151
	3	0,000006	0,000002	0,000006	0,000003	0,000003	0,000002	0,000005	0,000001
Scanning	0	0,009699	0,001987	0,011157	0,002568	0,005554	0,001761	0,009817	0,001995
	1	0,000291	0,000049	0,000225	0,000063	0,000216	0,000044	0,000226	0,000049

Tabelle 7: Polynomkoeffizienten der Sorptionsmodelle für zementbasierte Estriche (Stabw = Standardabweichung)

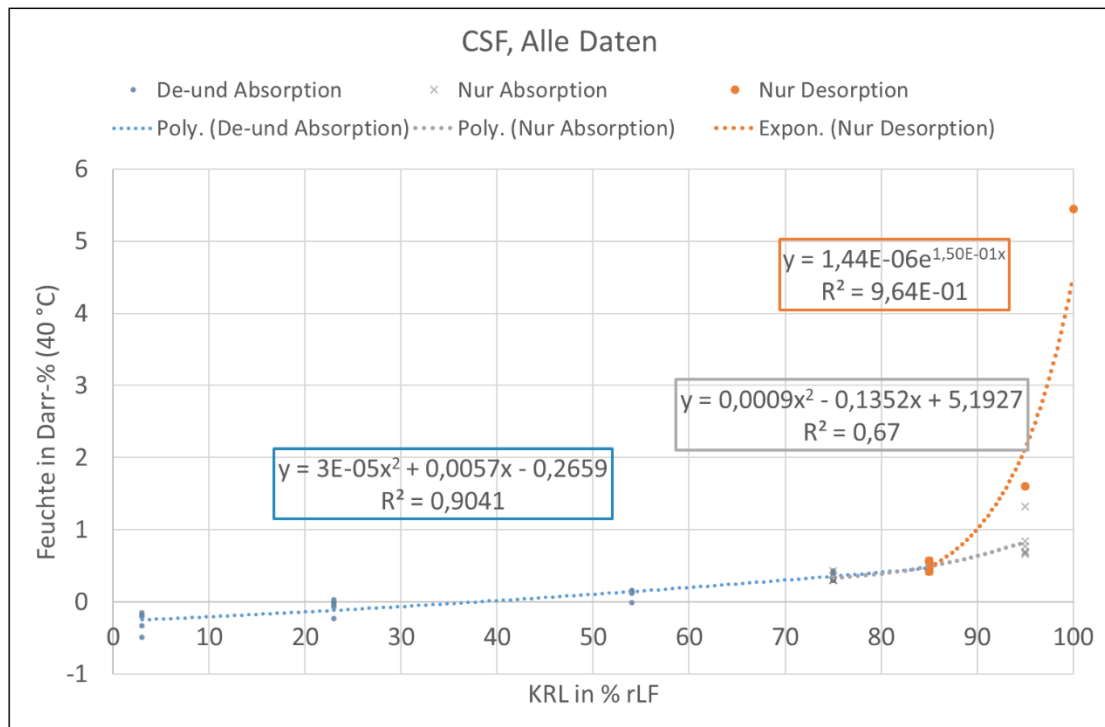


Abbildung 16: Zusammenfassung der Daten CSF „hohes und niedriges Fließmaß“ Sorptionsverlauf bei einem CSF

CSF (Mittelwerte)							
Desorption	Bereich: 0 bis 85 KRL-%			Bereich: 85 bis 100 KRL-%			
	Potenz	Faktor	Stabw				
	0	-0,26587	0,045358				
	1	0,005716	0,00268				
	2	3,44E-05	2,95E-05				
Absorption	Bereich: 0 bis 85 KRL-%			Bereich: 85 bis 98 KRL-%			
	Potenz	Faktor	Stabw		Potenz	Faktor	Stabw
	0	-0,26587	0,045358		0	5,192705	6,349059
	1	0,005716	0,00268		1	-0,13518	0,150307
	2	3,44E-05	2,95E-05		2	0,00094	0,000882

Tabelle 8: Anpassungskoeffizienten (Polynome bzw. Exponentiell) des Sorptionsmodells für einen calciumsulfatbasierten Estrich

3.3.2 Calciumsulfatbasierte Estriche

Für diese Estriche liegen 2 Datensätze vor (vergleiche Kapitel 2.2):

- a) CSF niedrig
- b) CSF hoch

Beide Datensätze scheinen nicht signifikant unterschiedlich zu sein, daher werden die Daten zusammengefasst.

Man erkennt, dass für die calciumsulfatbasierten Estriche die Situation grundsätzlich anders ist, als bei den zementbasierten:

- die bei den Zementestrichen gesehene, ausgesprochen starke Hysterese zwischen Desorption und Adsorption über fast den kompletten Feuchtebereich wird hier nicht beobachtet. Eine signifikante Hysterese findet man hier erst bei KRL-Feuchte > 85 %.
- Die Auflösung der gemessenen Daten reicht hier nicht aus, um Daten für Scanning-Isothermen anzugeben.
- Eine Anpassung eines gesamten Sorptionszweiges mit Polynomen ist ebenfalls nicht sinnvoll möglich. Es ist lediglich für den Feuchtebereich 3 bis 85 KRL-% eine gemeinsame (also De- und Adsorption) Anpassung und dann für die Bereiche größer 85 KRL-% eine getrennte Anpassung sinnvoll.
- Allerdings ist die Anzahl der Daten > 85 KRL-% für die Erstellung von Berechnungen in diesem Bereich nicht ausreichend. Hier wären deutlich mehr Punkte notwendig, insbesondere auch, wie die Scanning-Isothermen im Bereich 85 bis 98 KRL-% aussehen.

Die entsprechenden Faktoren findet man in Tabelle 8, Abbildung 16 zeigt die Daten in graphischer Form.

3.4 Berechnung von KRL- und Darrwerten von Estrichen

Mit den im TKB Bericht 1 publizierten Messergebnissen, insbesondere den Diffusionskonstanten, kann die Trocknung eines Estrichs berechnet werden. Dies geschieht am einfachsten numerisch, dazu muss die Diffusionsgleichung (2. Fick'sches Gesetz) diskretisiert werden. Die Vorgehensweise wird z. B. in Biran¹¹ erläutert.

Mit den nun vorhandenen kompletten Trocknungsisothermen können für Zementestriche auch Erwartungs-

werte für das Ergebnis einer KRL-Messung in Abhängigkeit vom Probenahmeort (Querschnitt, untere bzw. obere Hälfte) berechnet werden. Hierzu werden für verschiedene KRL-Werte mit einer Schrittweite von 0,2 KRL-% die absorbierte und desorbierte Menge Wasser in der Probe berechnet. Angezeigt wird dann jeweils der Fall, der einer ausgeglichen Bilanz am nächsten ist (d. h. der rechnerische Fehler zum tatsächlichen Punkt liegt bei 0,2 KRL-%).

Im Anhang A2 findet man die Ergebnisse graphisch dargestellt.

Man sieht, dass der KRL-Wert einer Estrichprobe, die „normal“ durchtrocknet, ungefähr den örtlichen Mittelwert, leicht verschoben zu höherer Feuchte angibt.

Anmerkung: Dies ist kein Widerspruch zu den Aussagen des Kapitels 3.2. Der dort beschriebene Unterschied zwischen Desorptions- und Scanning-Isotherme wird teilweise durch den Verlauf der Feuchtwerte konterkariert.

Während die Probenahme aus der unteren Hälfte und aus dem Querschnitt robust gegenüber feuchten Trocknungsbedingungen ist, ist dies bei der Probenahme aus der oberen Hälfte nicht der Fall. Hohe Außenfeuchten beeinflussen naturgemäß die obere Hälfte des Estrichs stärker, bei einem festen Grenzwert wird dieser später angezeigt.

Besonders interessant ist dabei das Ergebnis für einen Zementestrich mit dem G/Z-Wert von 5:1, da es Ergebnisse für einen Modellestrich enthält, so wie ihn Schnell 1994 benutzt hatte (siehe Graphik auf Seite 24 unten).

Hier findet man neben dem „klassischen Grenzwert“ für die Darrfeuchte des Querschnitts von 3,5 Darr-% als KRL-Wert für den Querschnitt 74 KRL-% und für die Probenahme aus der unteren Hälfte 79 KRL-%. Auch der in Österreich seit kurzem empfohlene KRL-Wert bei Probenahme aus der oberen Hälfte findet sich hier mit 65 KRL-% wieder.

3.4.1 Ungenauigkeiten und Limitierungen der Rechnungen

Basis der Berechnung sind die Diffusionskonstanten (genauer: „Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten) des Estrichmörtels CEM1 wie sie für den TKB Bericht 1 ermittelt worden sind. Diese wurden aus Desorptionsversuchen ermittelt und sind daher in einem strengen Sinne auch nur dafür korrekt. In dieser Arbeit wurden Sie auch für die Absorptionsvorgänge eingesetzt, dadurch können diese fehlerbehaftet sein.

¹¹ A. Biran, M. Breiner, Matlab5 für Ingenieure, 3. Aufl, Addison-Wesley, Bonn, 1999 (Anmerkung: die Diskretisierung der PDGL wird im Kapitel 17.2 für die Wärmeleitung gezeigt.)

Mit den in der hier zitierten Arbeit ermittelten Daten lässt sich allerdings prüfen, ob der Unterschied groß ist. Da die Proben hier keine definierte Gestalt hatten, kann lediglich eine Relation ermittelt werden. Für CEM1-56d wurde eine solche Auswertung gemacht. Im Ergebnis sieht man innerhalb der Messgenauigkeit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Desorptions- und Adsorptionsdaten. Der Fehler wird also klein sein.

Ein weiteres Problem entsteht bei der Berücksichtigung des Effekts der Scanning-Isothermen auf die Geschwindigkeit der Diffusion. In der üblichen Fassung des 2. Fick'schen Gesetzes, welches durch Einsetzen des 1. Fick'schen Gesetzes in die Kontinuitätsgleichung der Diffusion erhalten wird, kürzt sich die Speicherkapazität, wenn sie konstant ist, aus der Gleichung heraus. Wenn jedoch die Speicherkapazität eine Funktion des treibenden Potentials ist (hier: rel. Luftfeuchte), gilt dies nicht mehr. In der diskretisierten Diffusionsgleichung taucht die Speicherkapazität benachbarter finiter Elemente dann als Relation auf und gibt damit fast immer einen Faktor, der sehr nahe bei 1 ist; der Einfluss auf die Rechnung ist daher sehr klein. Eine Ausnahme ist allerdings die direkte Umgebung des Übergangs vom Desorptions- zu Adsorptionsbereich. Insgesamt hat das aber nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis, und macht sich auch nur bei der Diffusionsgeschwindigkeit leicht bemerkbar.

3.5 Der Einfluss der Temperatur auf das KRL Ergebnis

In Kapitel 2.5 wurde bereits mitgeteilt, dass sich die KRL um ca. 0,3 bis 0,5 % rLF / °C ändert. Im Verhältnis zur Referenztemperatur von 20 °C ist also mit Abweichungen von 2 % bei +/- 5 °C (15 bis 25 °C) und einer Feuchte im Bereich von ca. 75 % r.LF zu rechnen.

In den meisten praktischen Fällen kann diese Abweichung ignoriert werden, lediglich bei Temperaturen außerhalb des Bereichs 15 .. 25 °C muss dies sinnvollerweise berücksichtigt werden.

4. Zusammenfassung

Es wurde von Zementestrichmaterialien jeweils

- a) die Desorptionsisotherme
- b) die Trocknungsisotherme und
- c) die Scanning- und Adsorptionsisothermen gemessen.

Der Unterschied zwischen Desorptions- und Trocknungsisothermen ist insbesondere im Hochfeuchtebereich erheblich. Durch die Verwendung von Trocknungsisothermen können die Vorgänge in Zementestrichen nun in Übereinstimmung mit bekannten Messdaten berechnet werden.

Auch für einen calciumsulfatbasierten Estrichmörtel wurden die Trocknungs- und Scanning-Isothermen gemessen. Allerdings zeigen die Messdaten, dass das benutzte Messraster im Hochfeuchtebereich zu grob für eine weitere rechnerische Betrachtung war. Allerdings konnte auch hier gezeigt werden, dass im Feuchtebereich > 85 KRL-% für eine sinnvolle Modellierung Scanning-Isotherme notwendig sind.

5. Weitere Literatur und Quellen

5.1 Berechnungen

Diese wurden mit Python 3.6 (www.python.org), in einer Anaconda Distribution (anaconda.org, Version 5.1, Release Date: February 15, 2018) durchgeführt. Insbesondere wurden dabei die folgenden Bibliotheken in der entsprechenden aktuellen Anaconda Fassung benutzt:

- Numpy
- Scipy
- Matplotlib
- Pandas
- Spyder
- Ipython

Die entsprechenden Scripte liegen auf dem IVK-Server neben diesem Bericht vor.

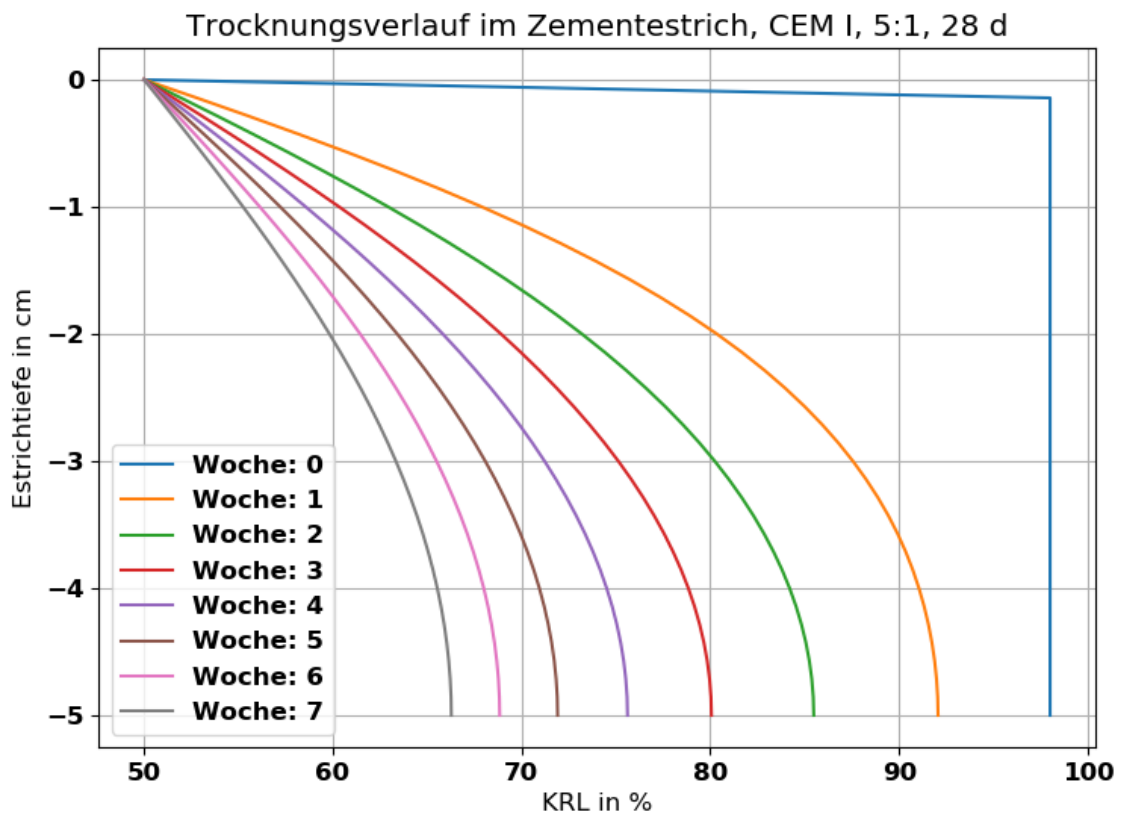
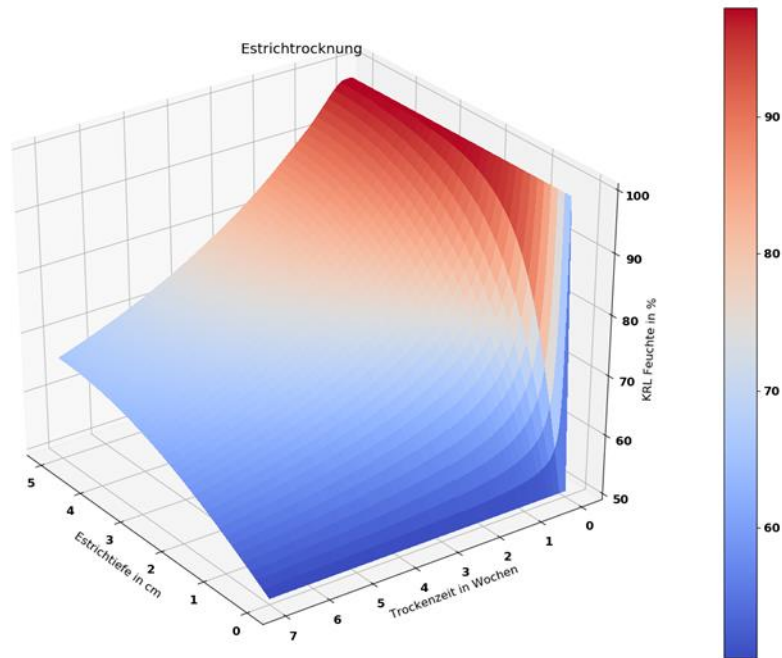
Anhang:

A1. Porositätskennwerte

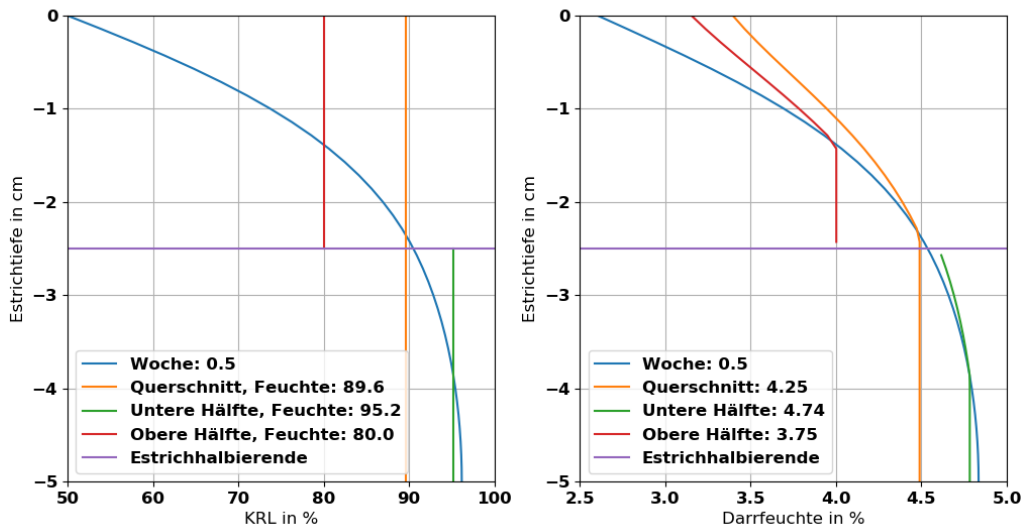
Estrich	Average Pore Radius (2V/A) μm	Porosity %
CEM I, Folie, 28 Tage	0,0198	12,5
CEM I, Folie, 56 Tage	0,0229	11,2
CEM I-2010, Folie, 28 Tage	0,0216	12,6
CEM I-2010, unter Wasser, 28 Tage	0,0208	14,5
CSF, niedrig, Folie, 28 Tage	0,0991	15,5
CSF, hoch, Folie, 28 Tage	0,1200	16,0

A2. Berechneter Trocknungsverlauf und KRL Messergebnisse an verschiedenen Estrichsorten

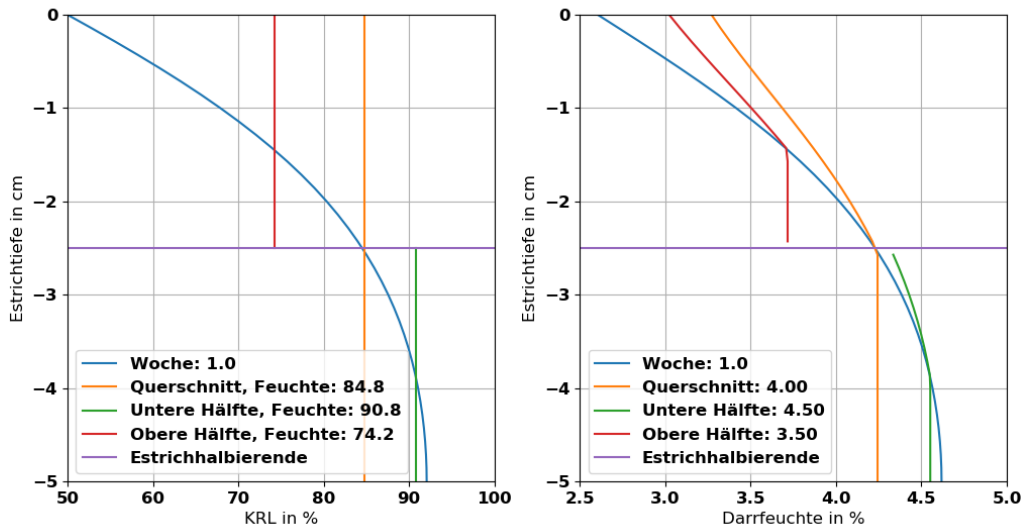
A.2.1 CEM I, 5:1, Aussenklima 50 % relative Luftfeuchte



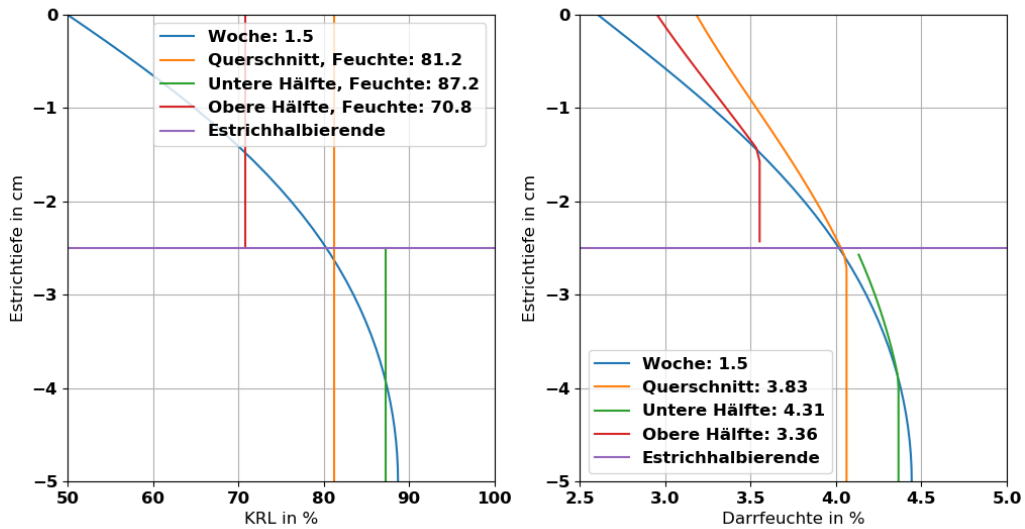
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



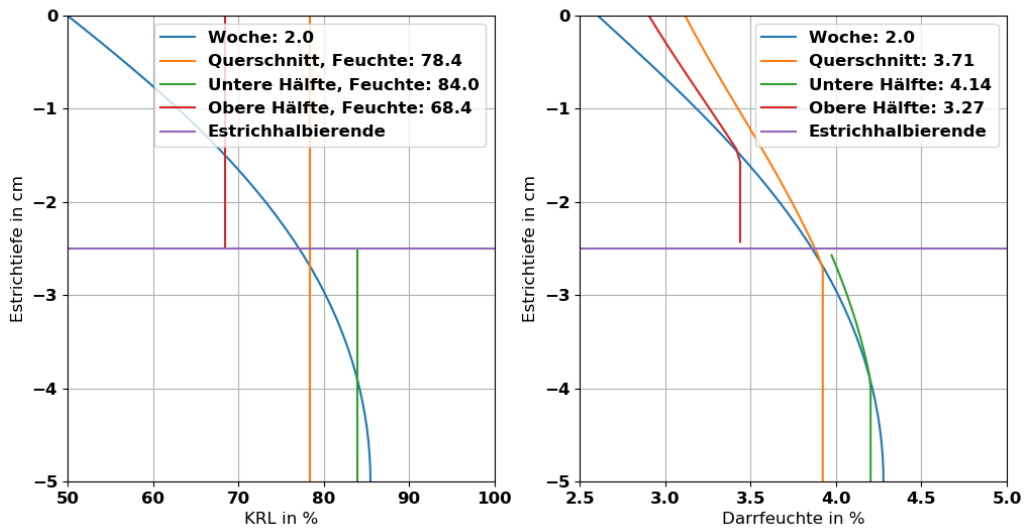
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



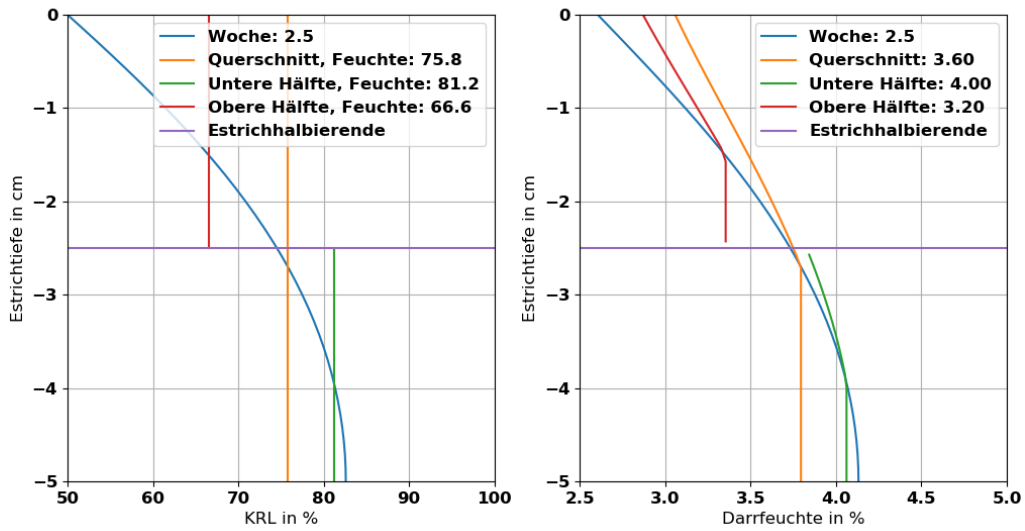
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



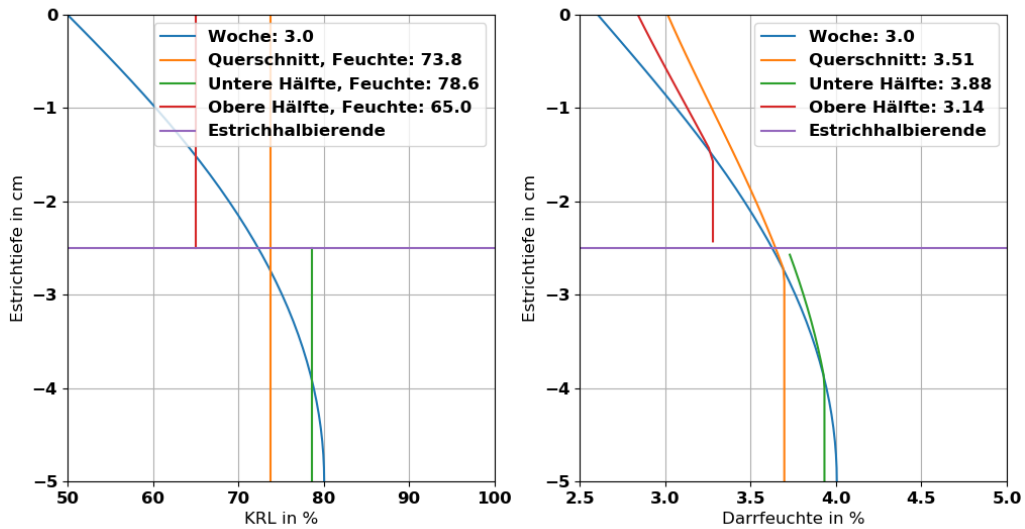
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



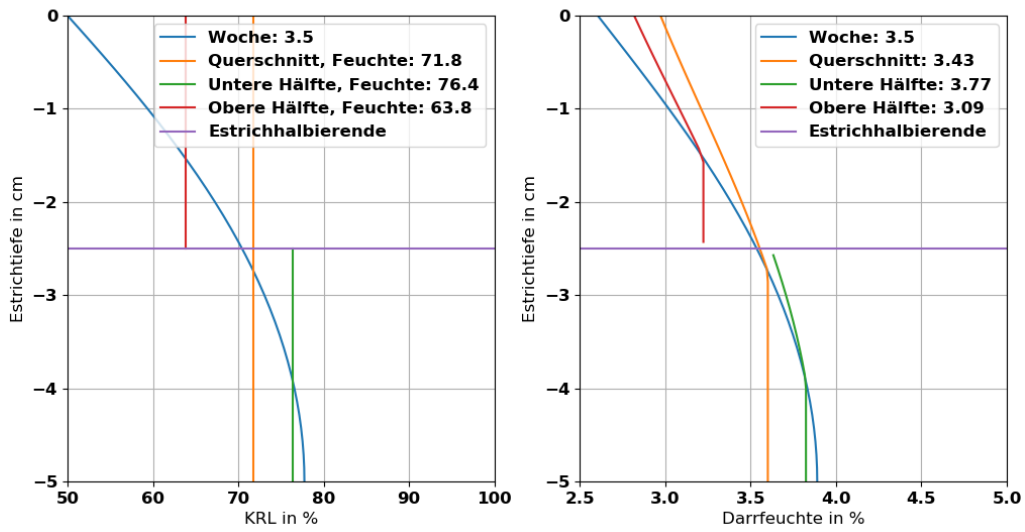
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



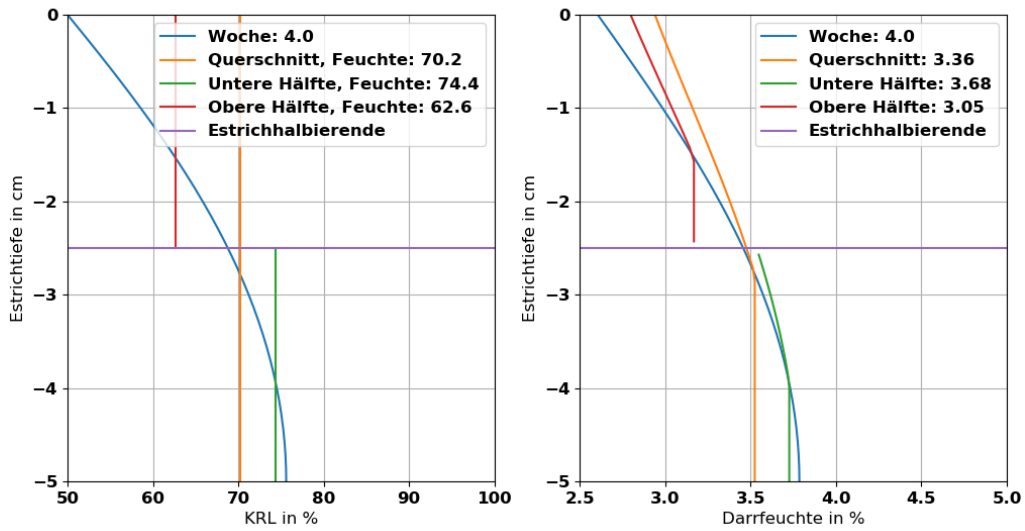
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



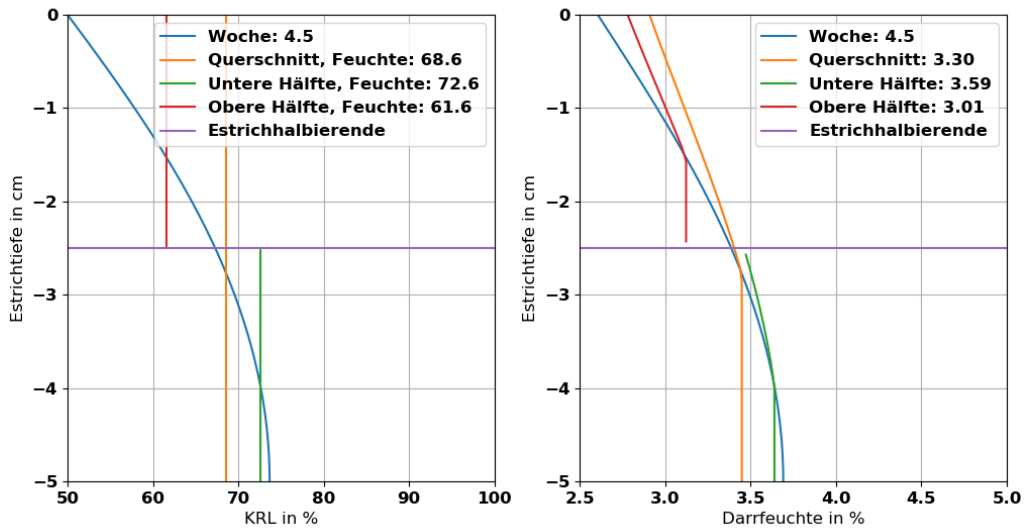
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



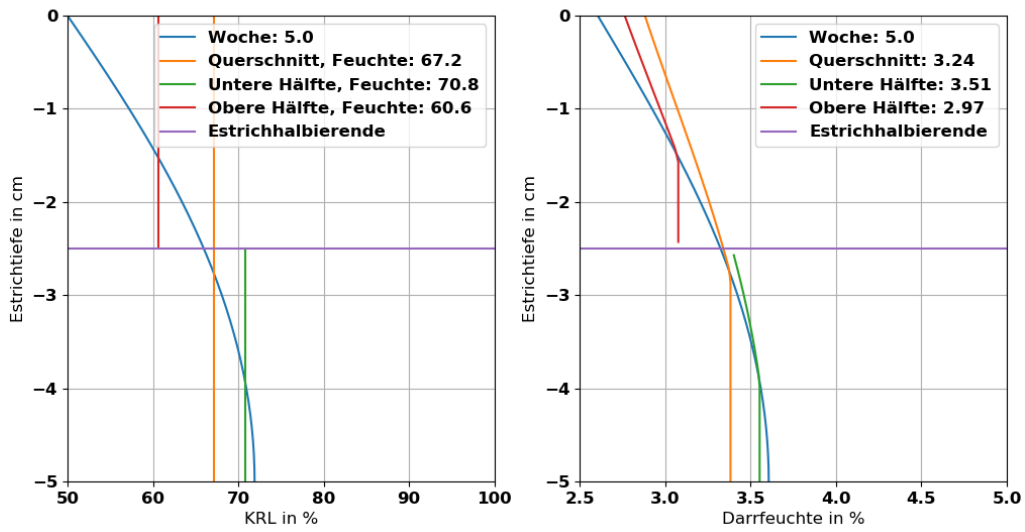
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



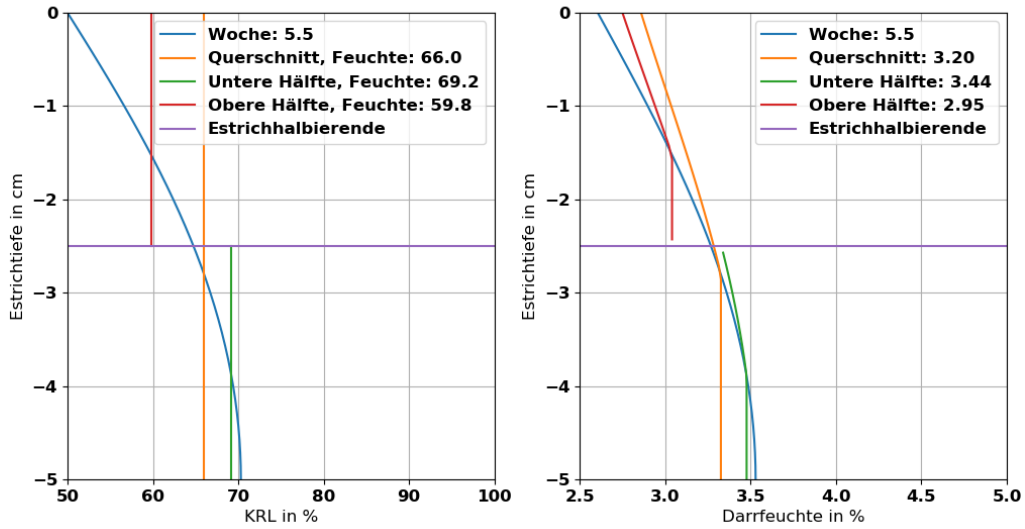
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



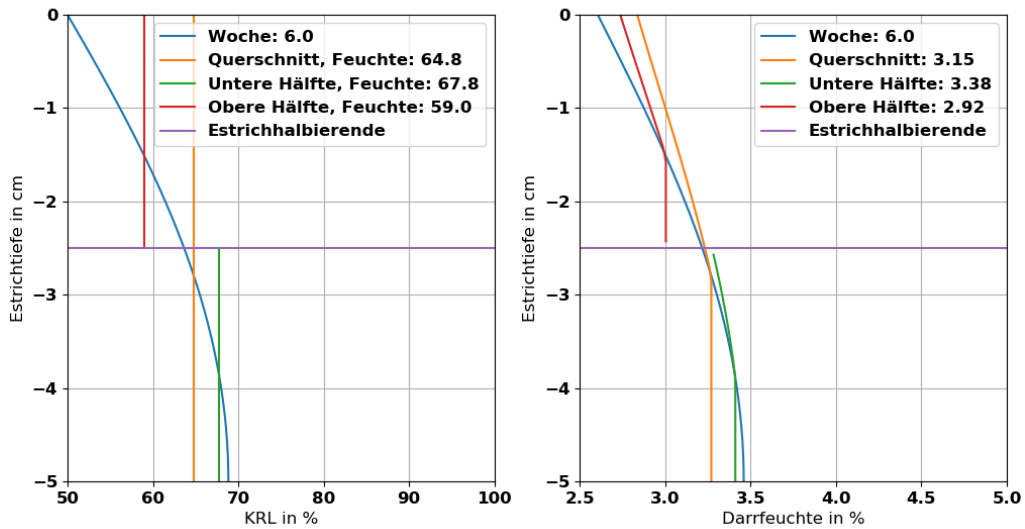
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



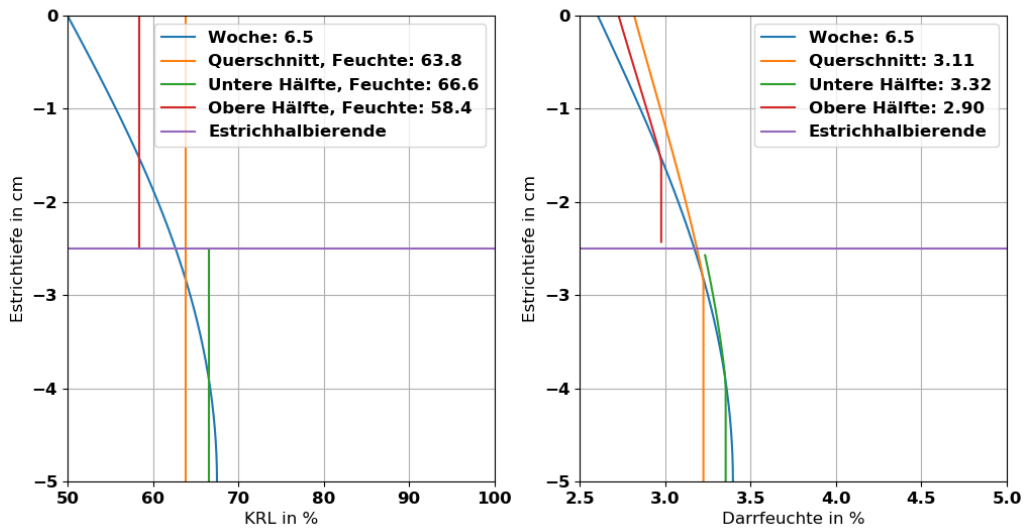
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



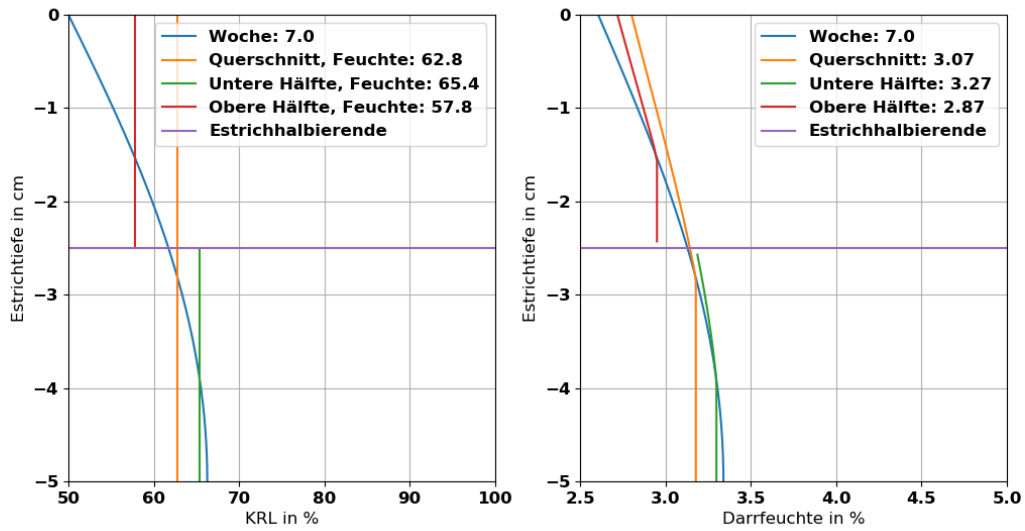
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



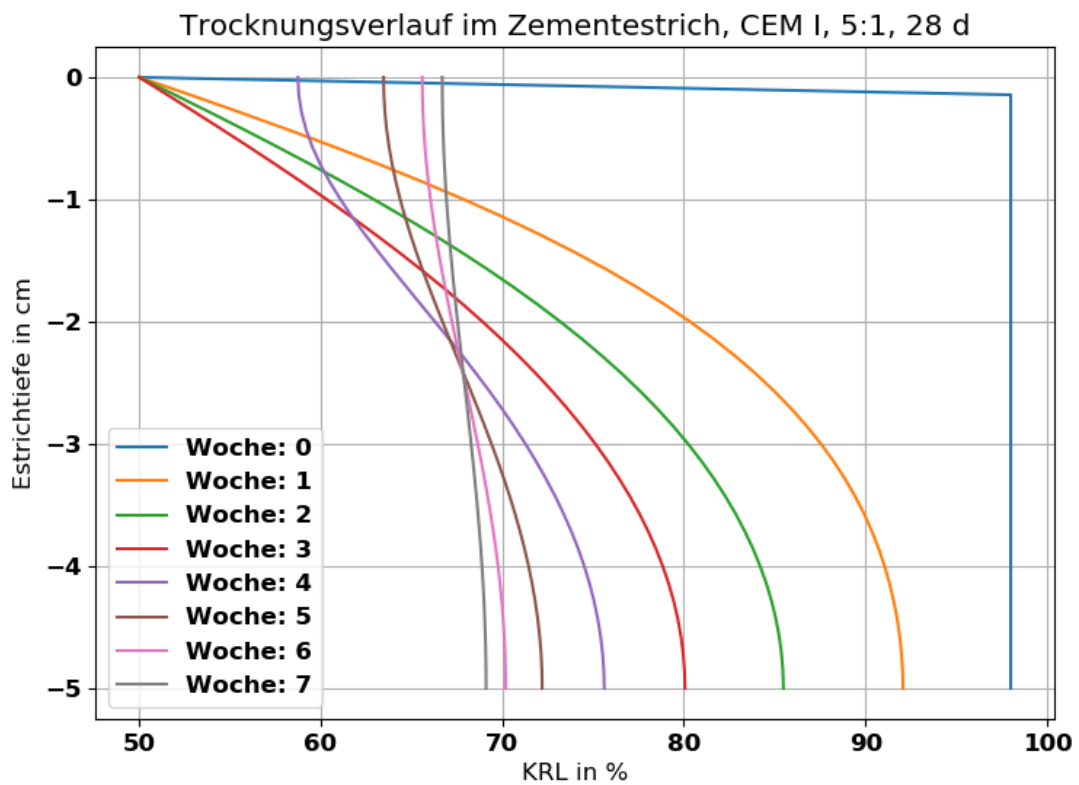
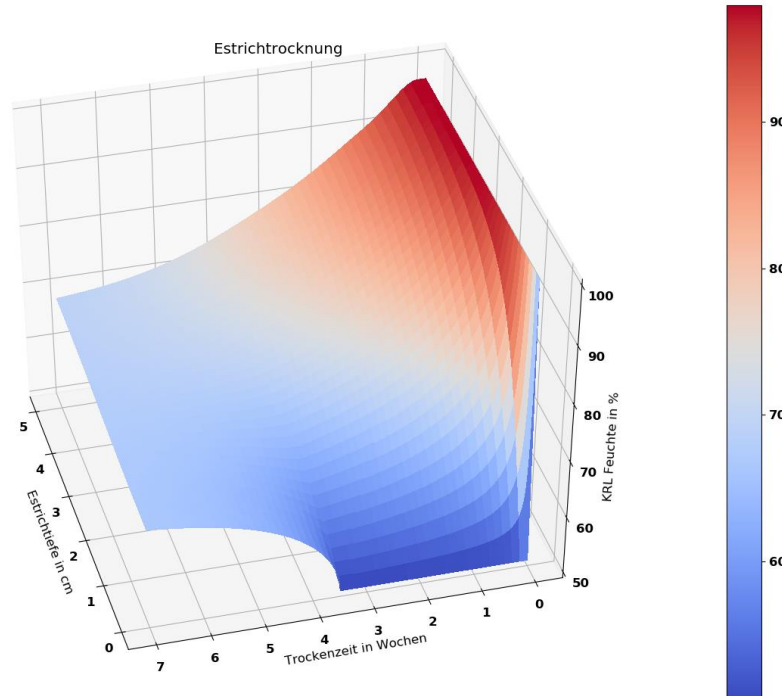
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



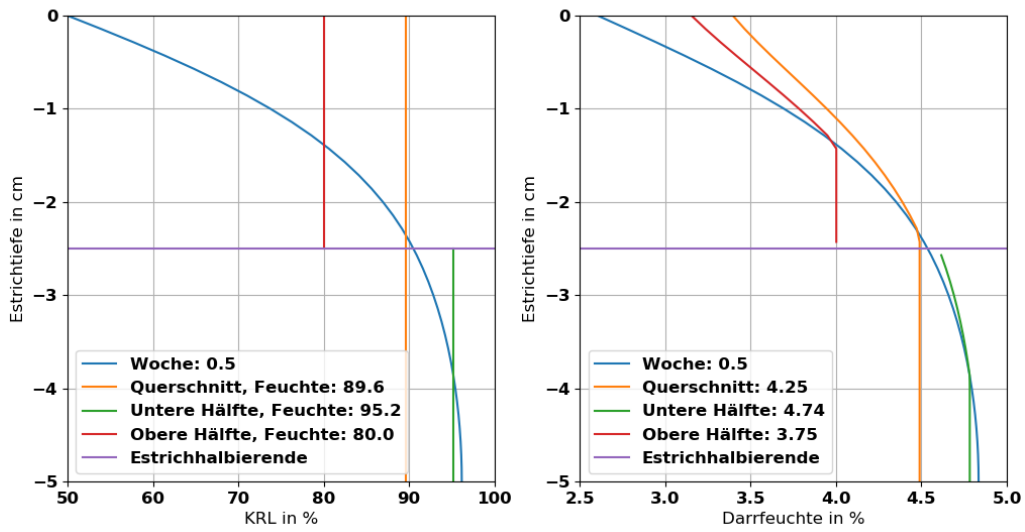
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



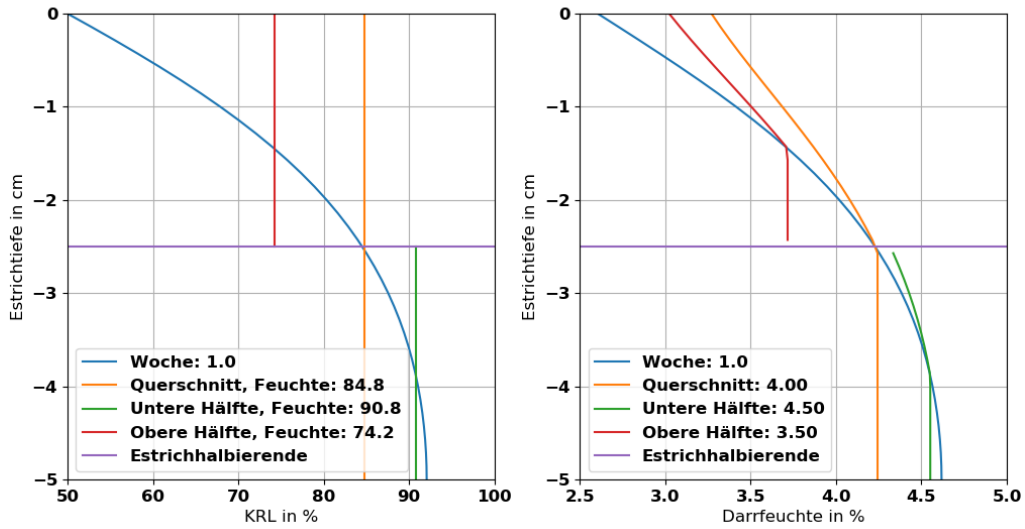
A.2.2 CEM I, 5:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte, nach 3,5 Wochen abgedeckt (entspricht einer dampfdichten Sperre)



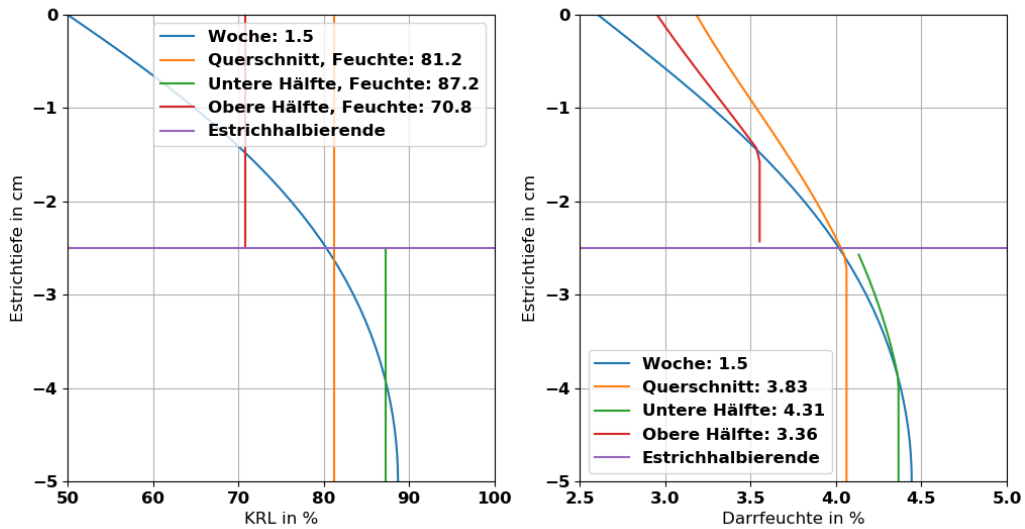
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



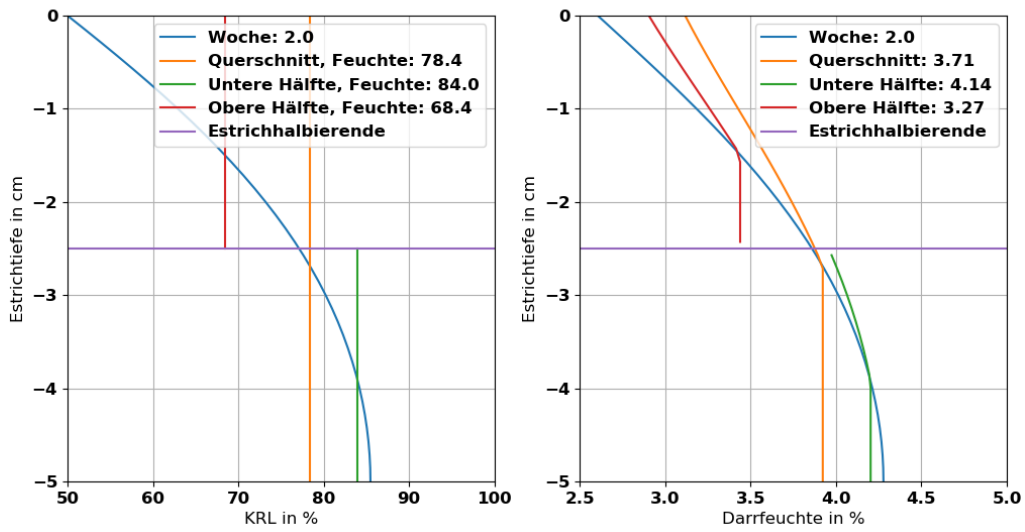
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



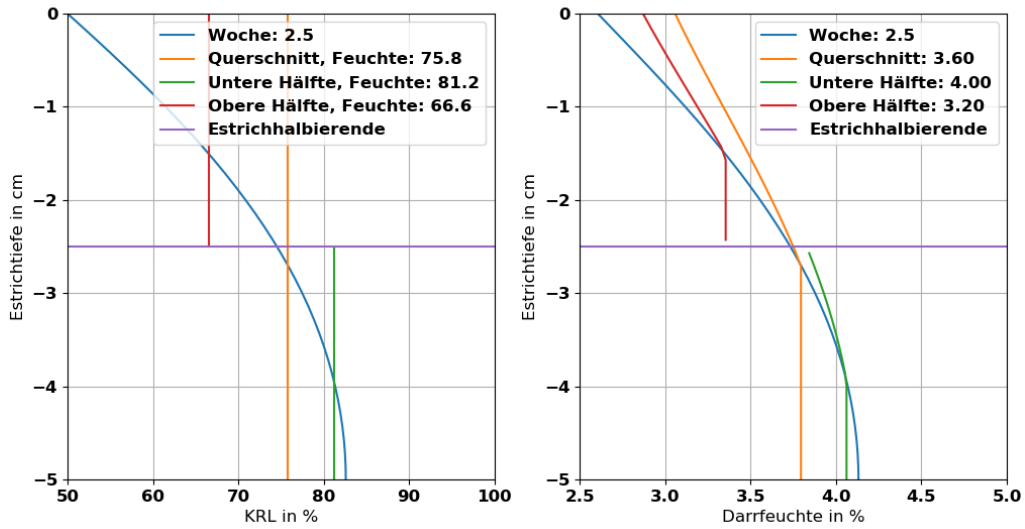
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



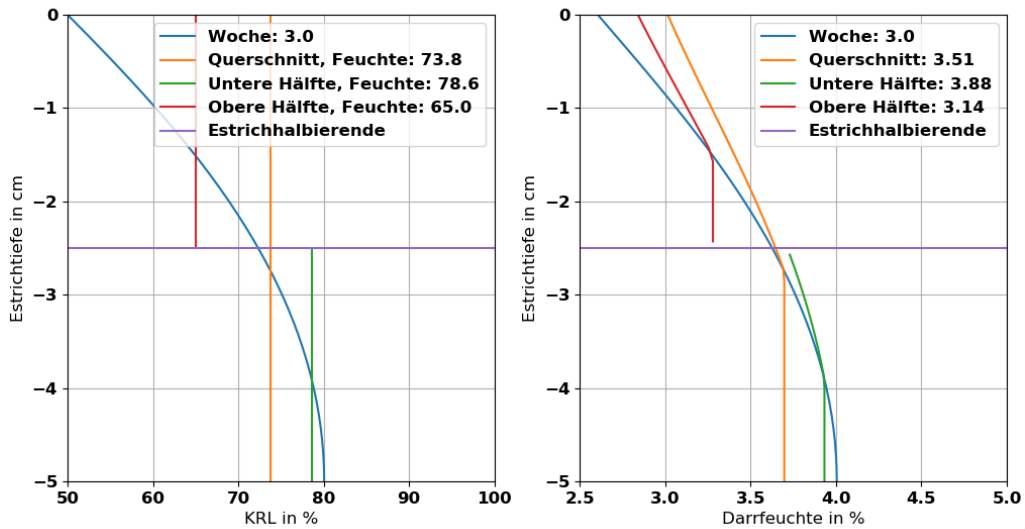
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



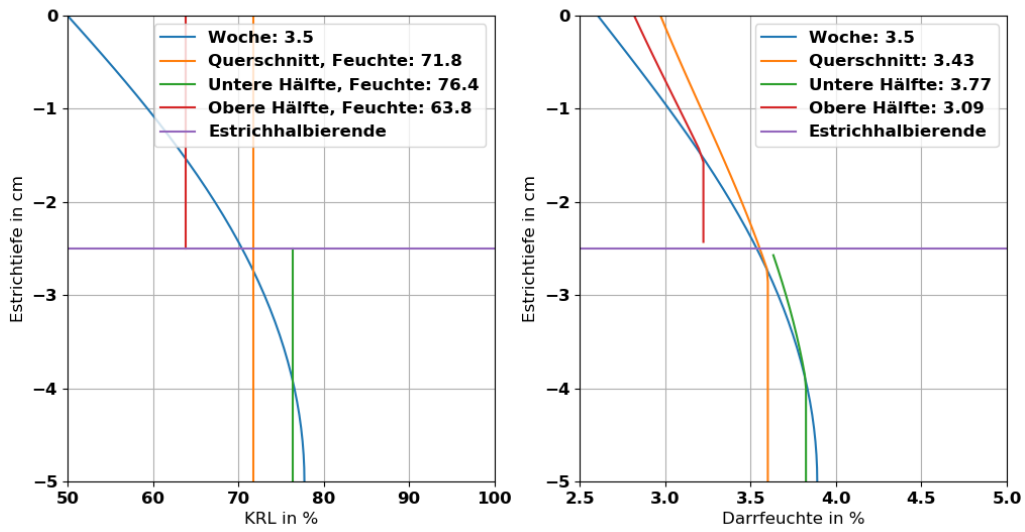
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



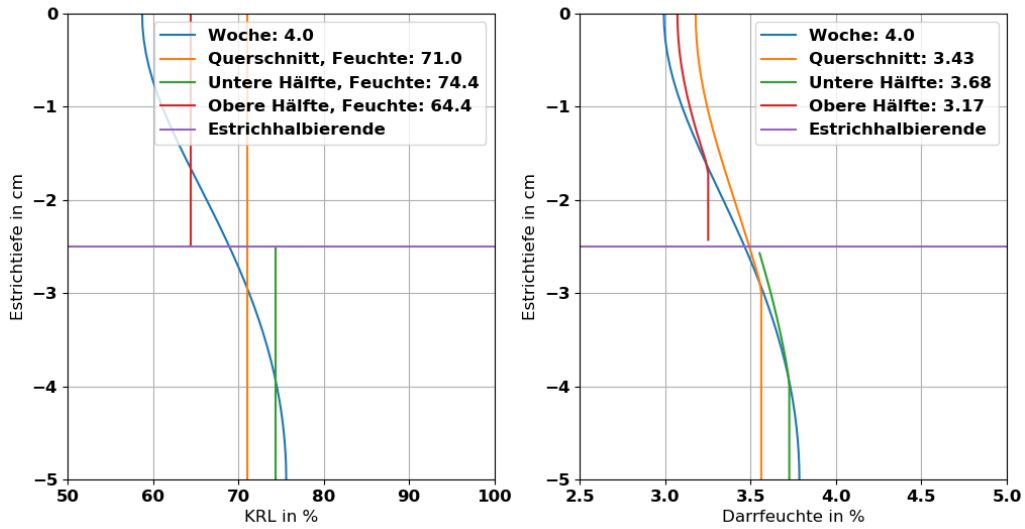
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



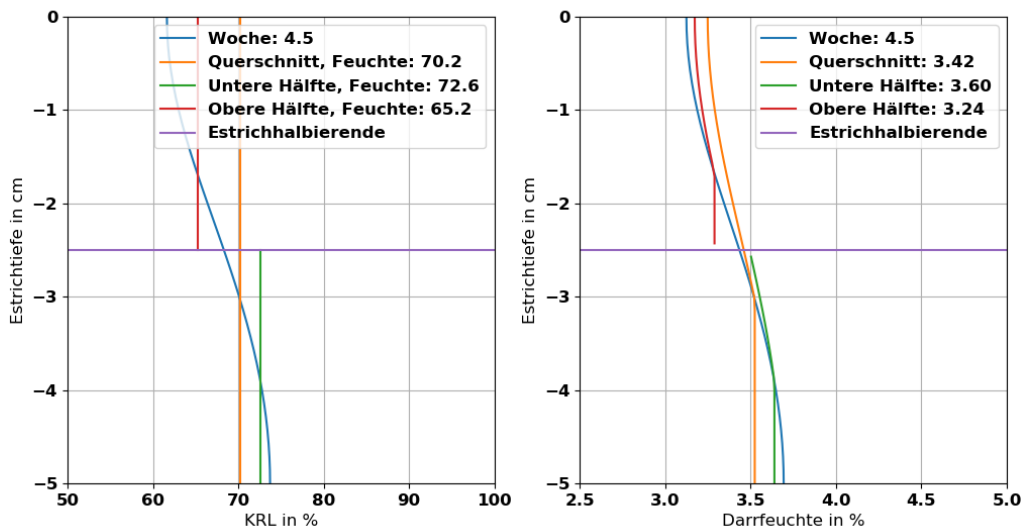
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



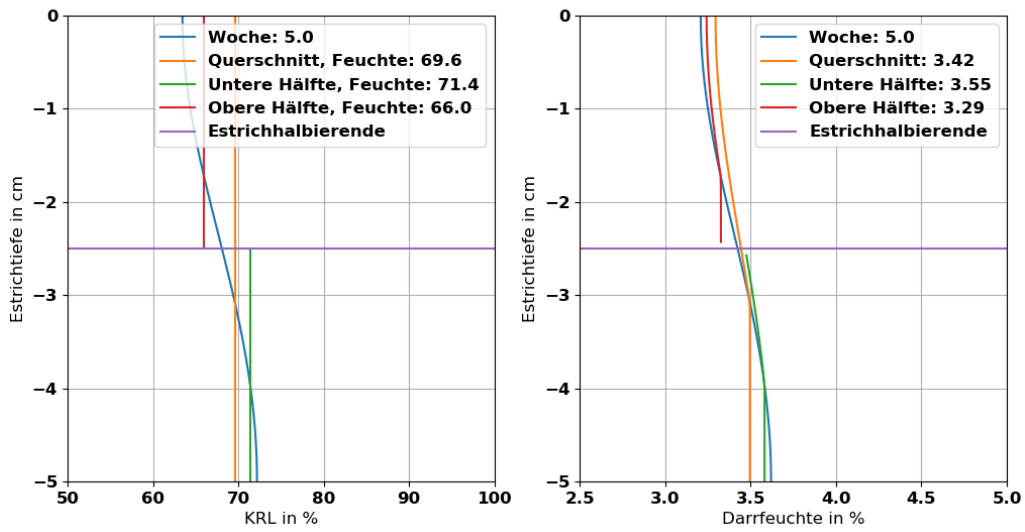
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



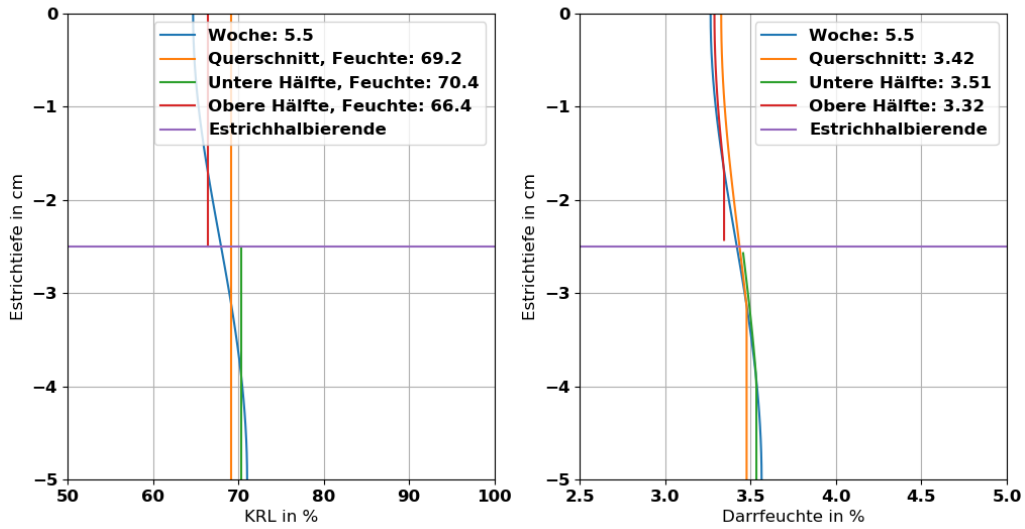
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



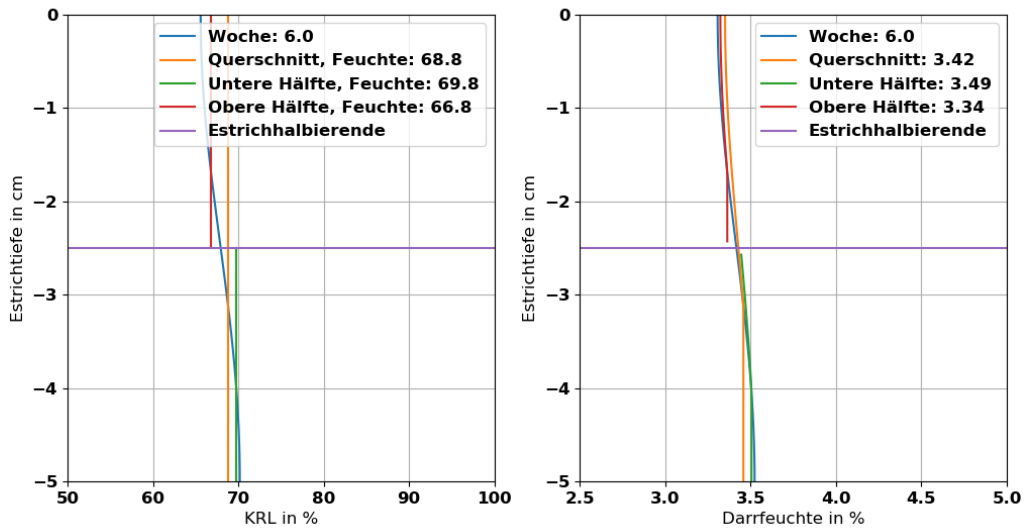
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



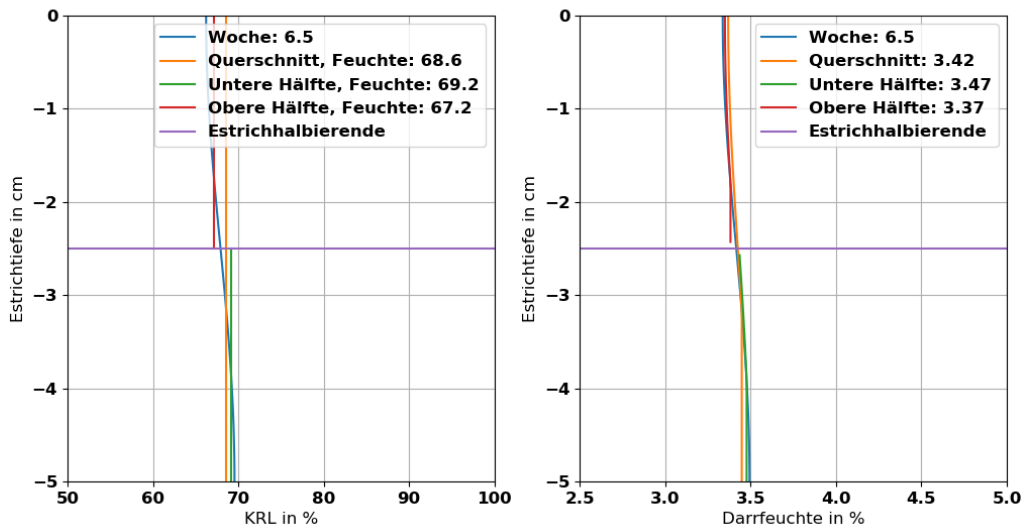
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



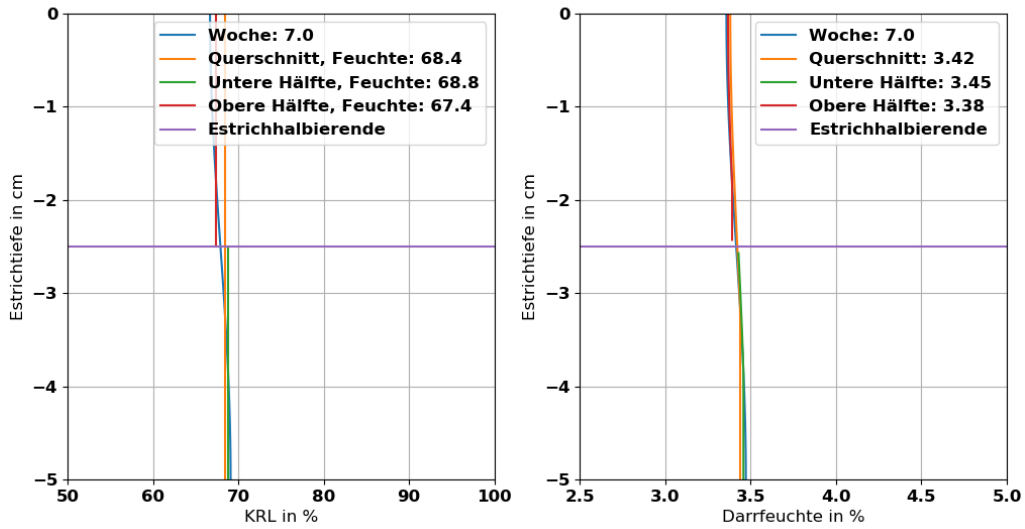
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



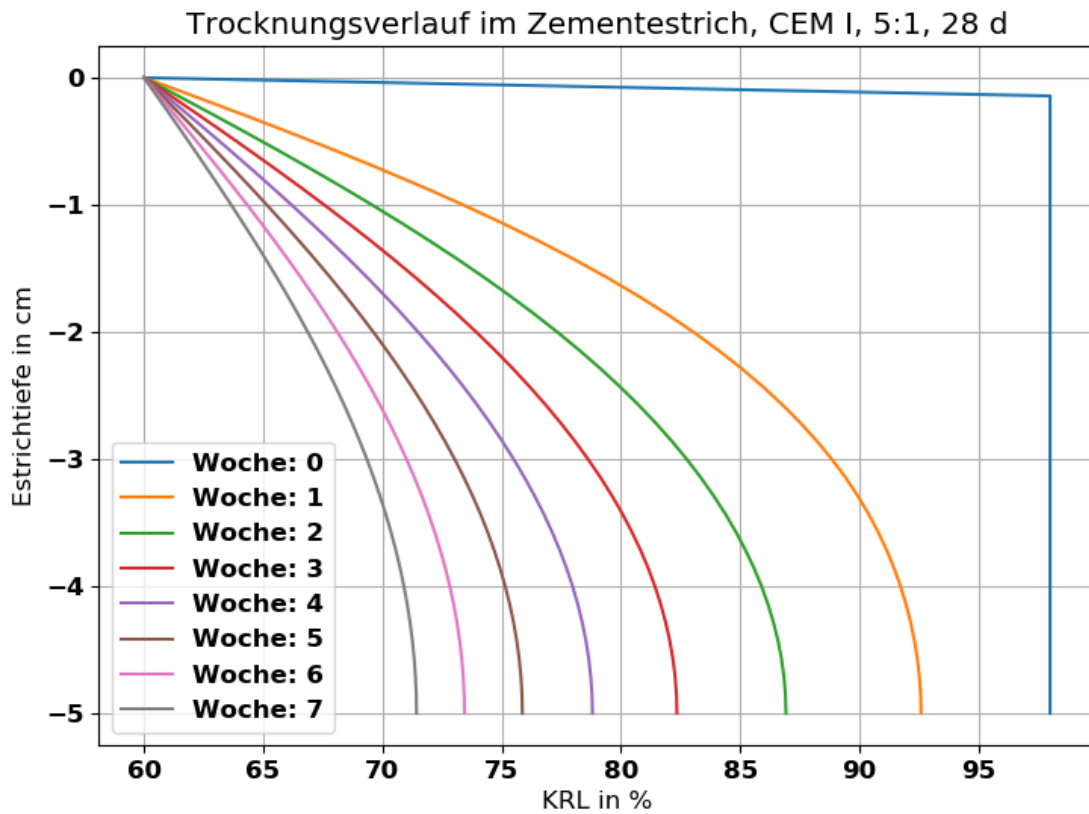
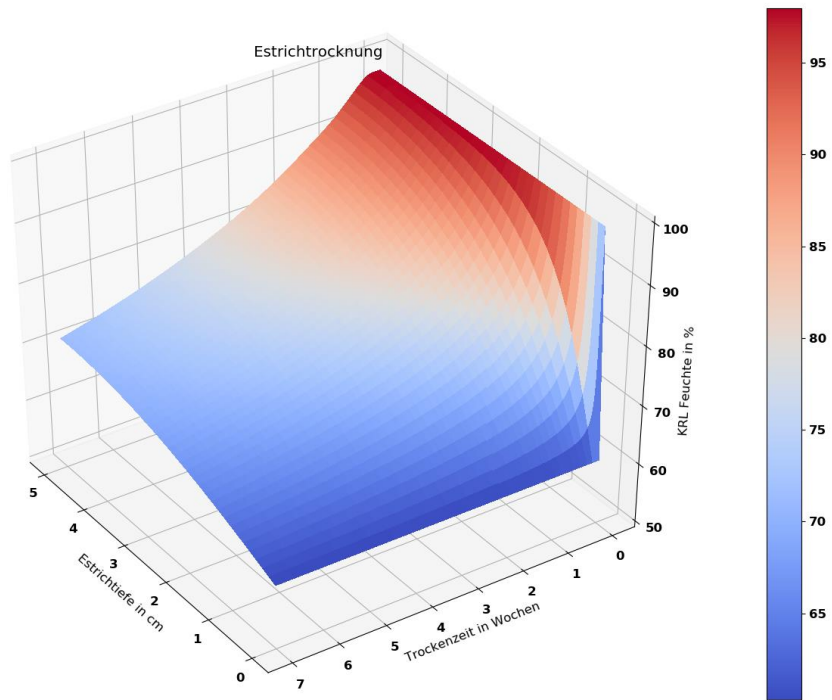
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



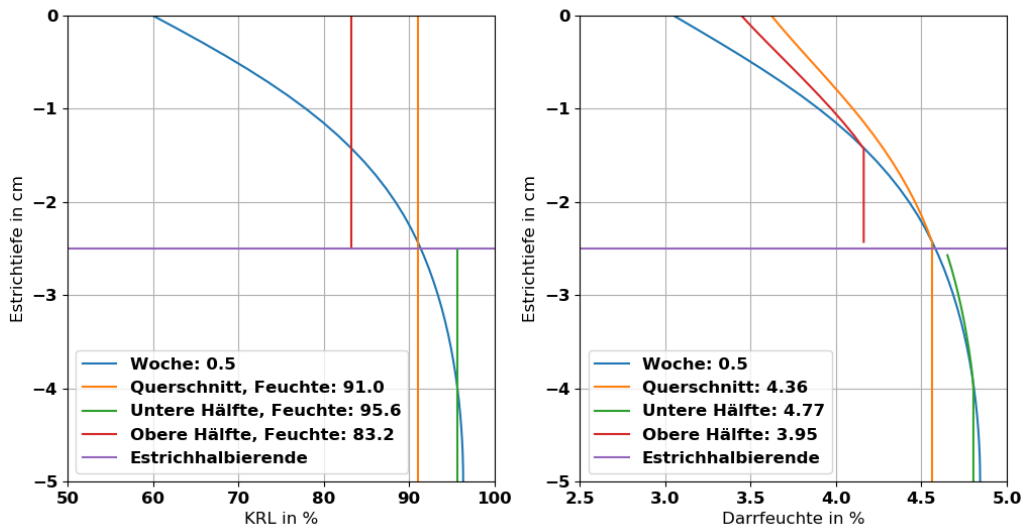
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



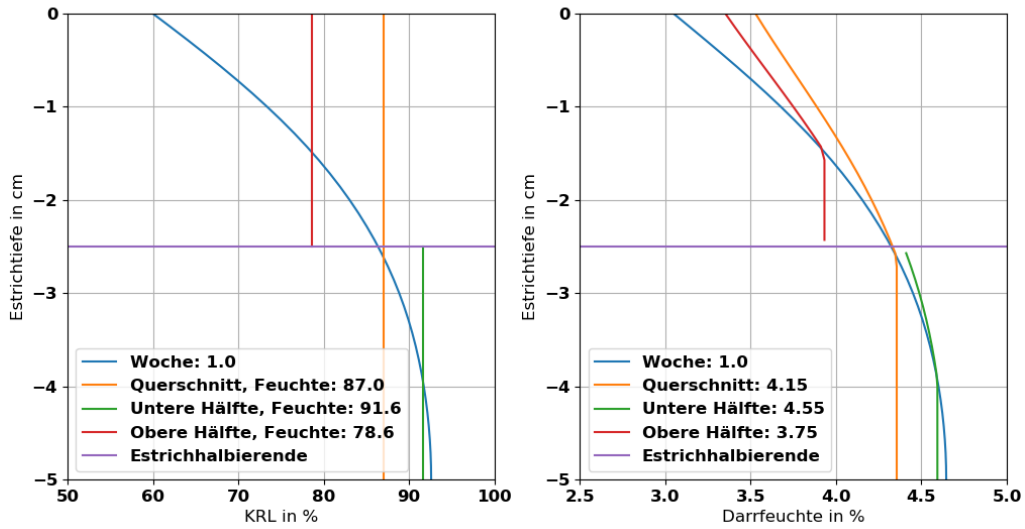
A.2.3 CEM I, 5:1, Aussenklima 60 % rel. Luftfeuchte



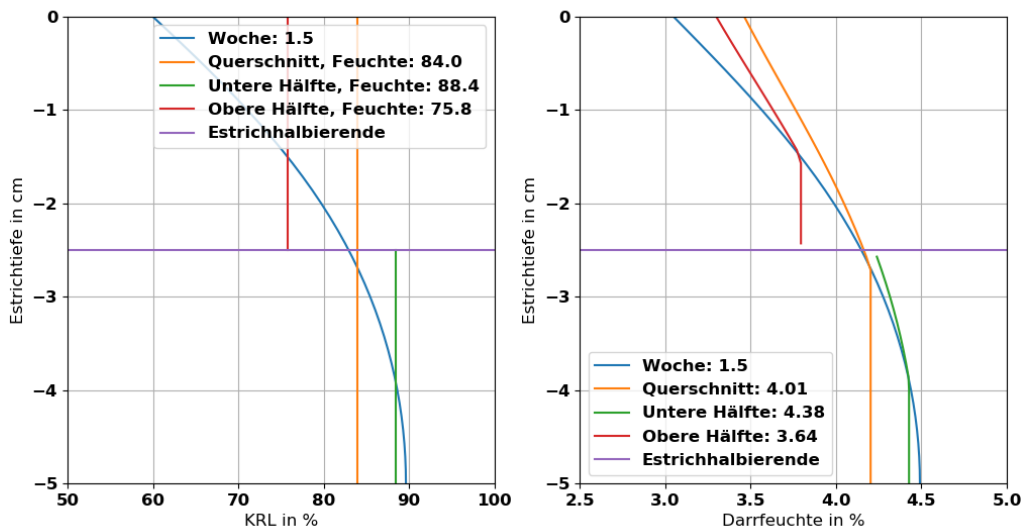
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



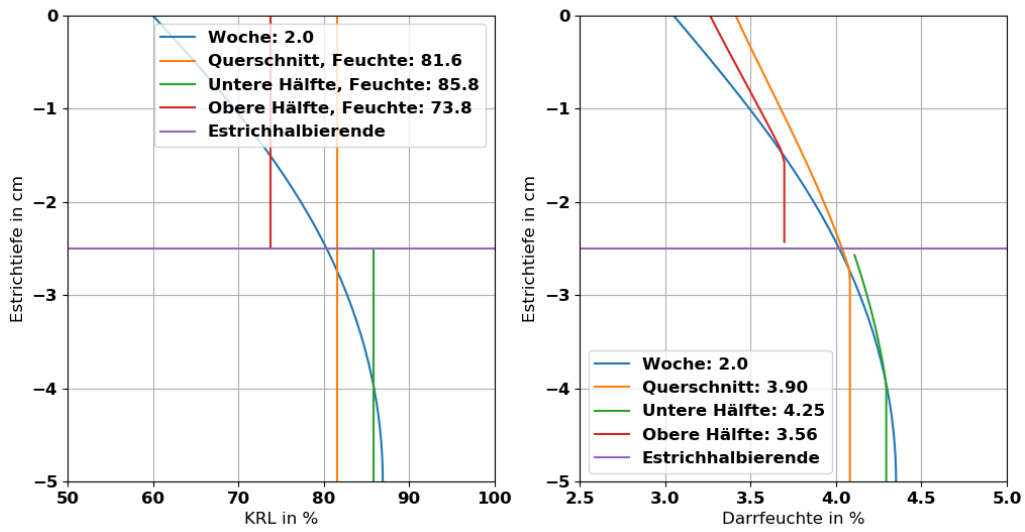
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



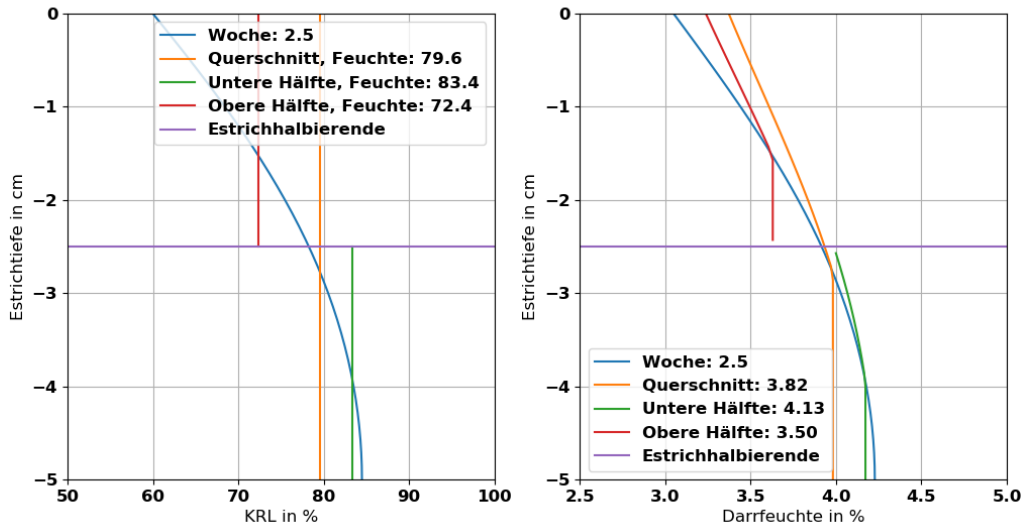
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



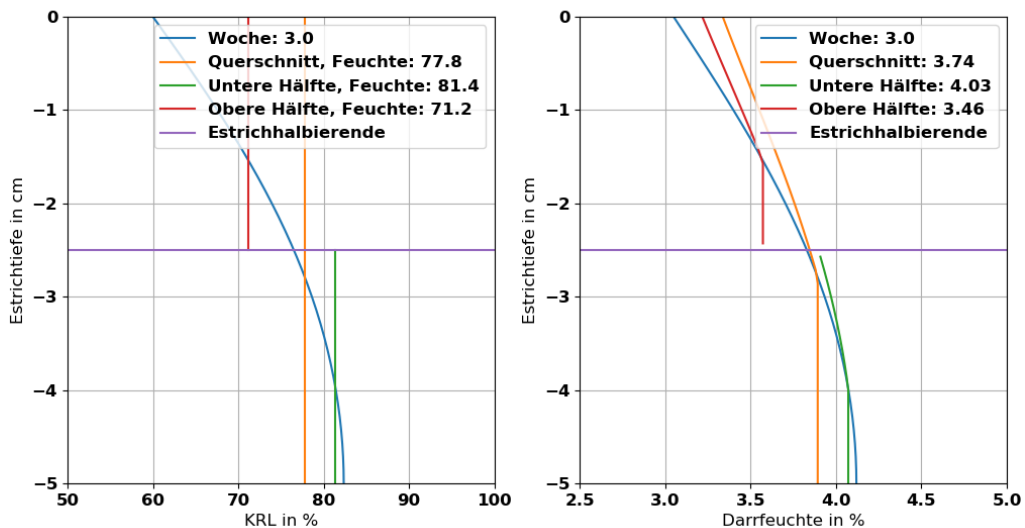
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



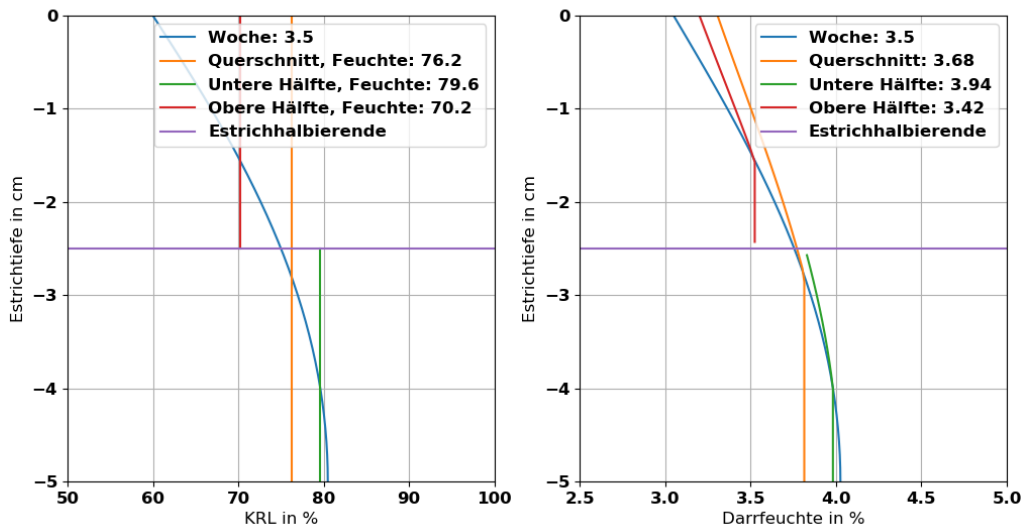
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



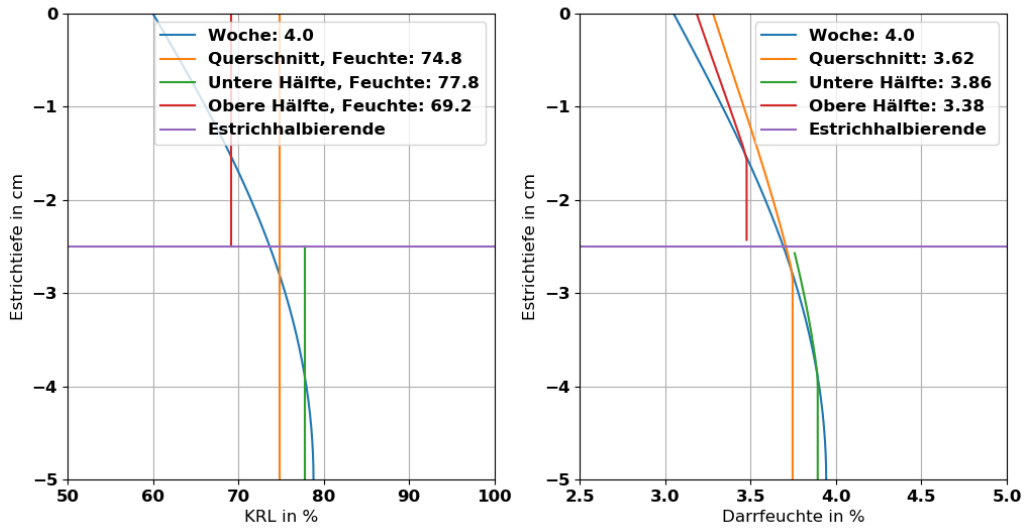
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



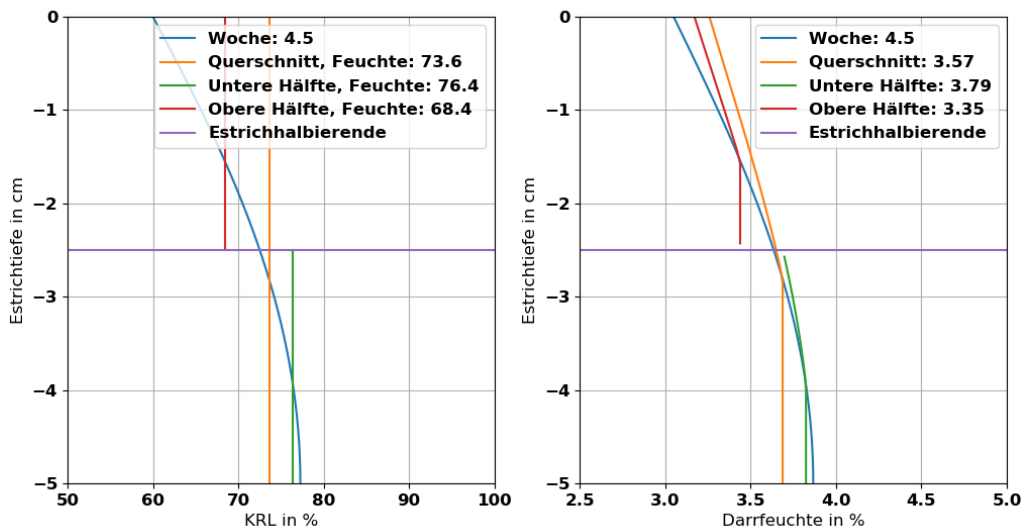
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



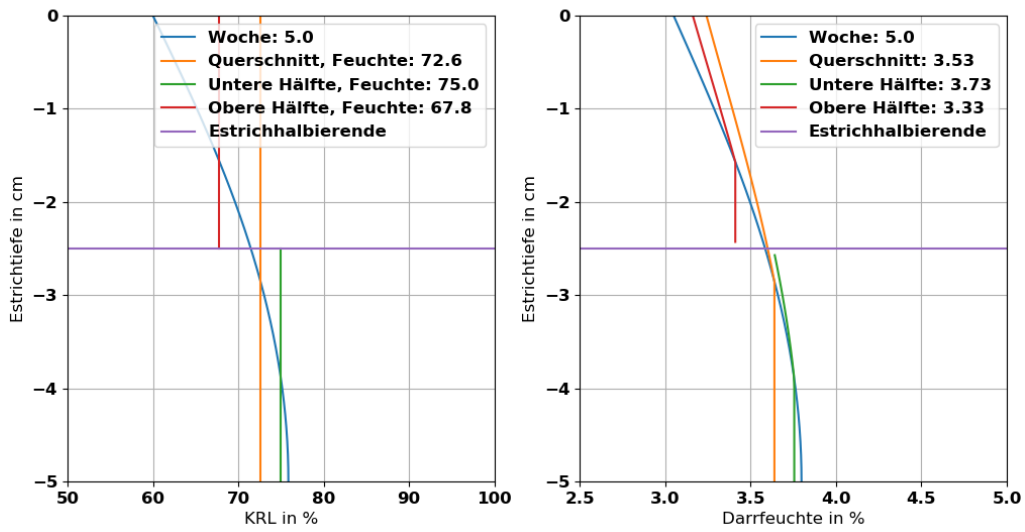
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



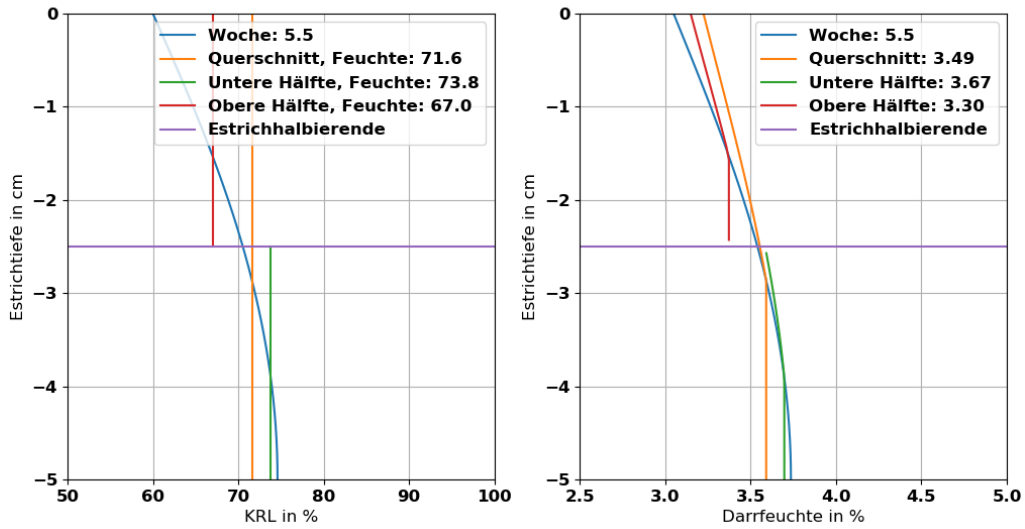
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



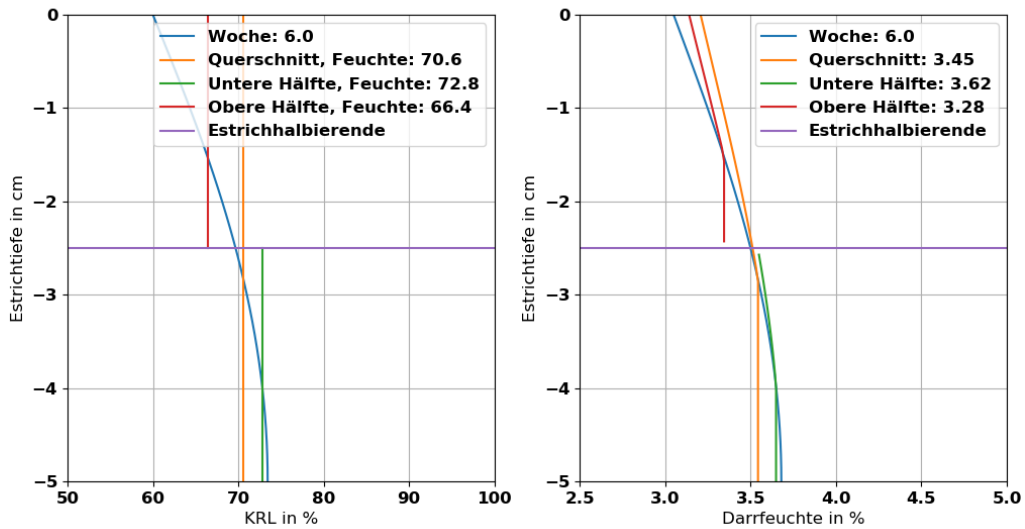
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



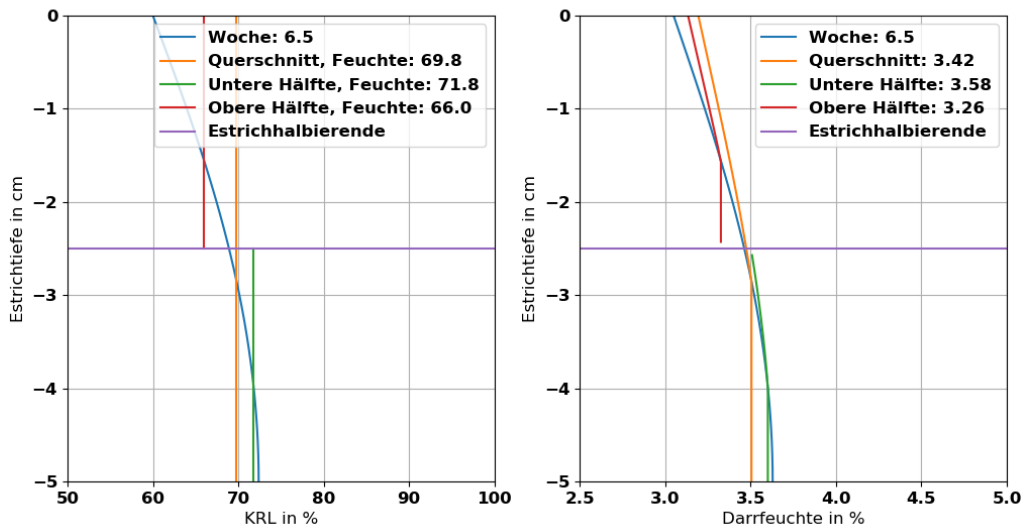
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



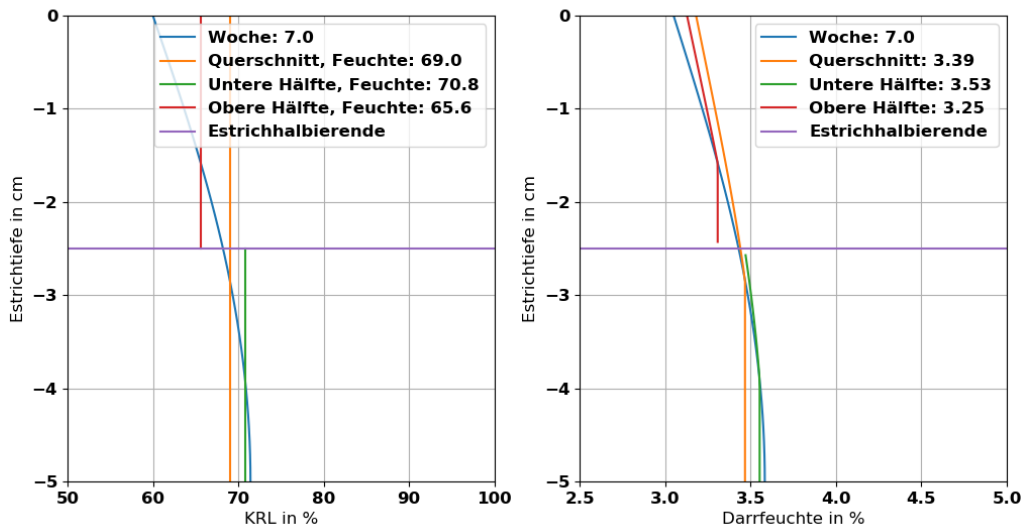
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



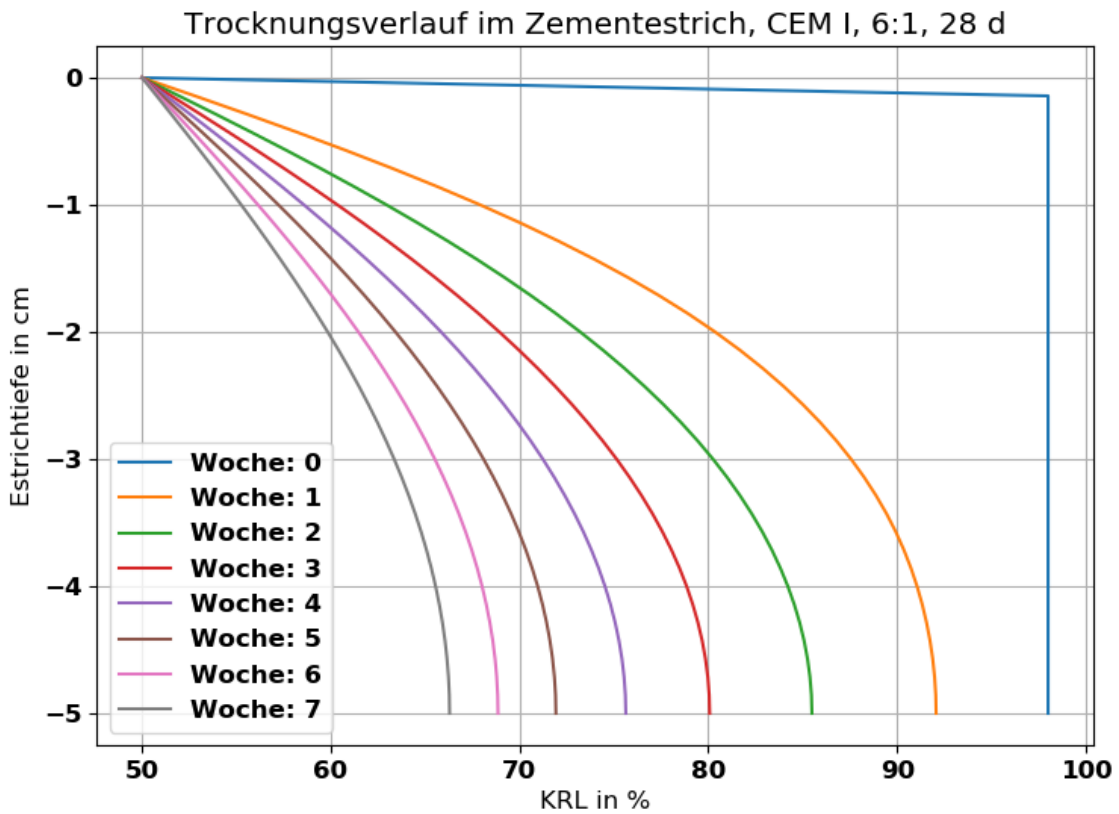
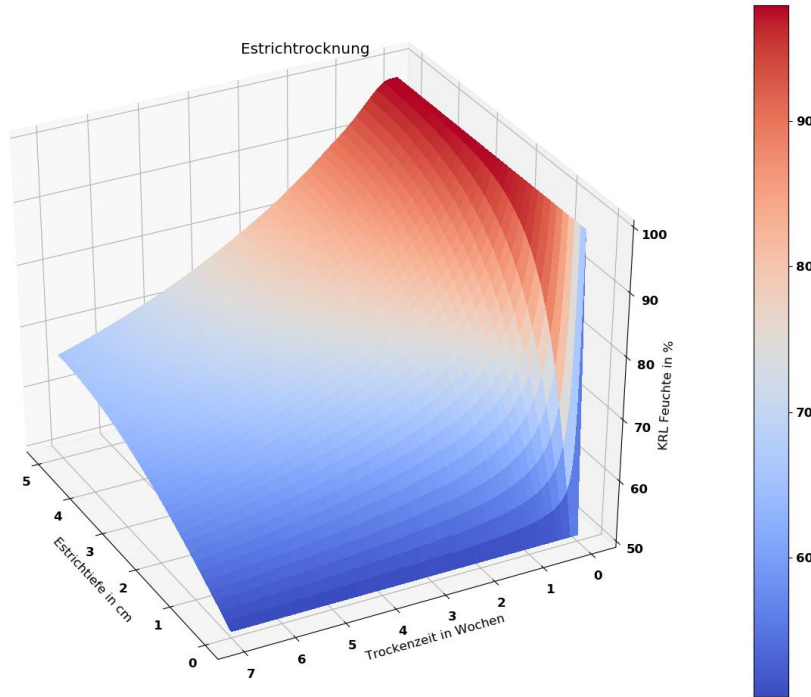
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



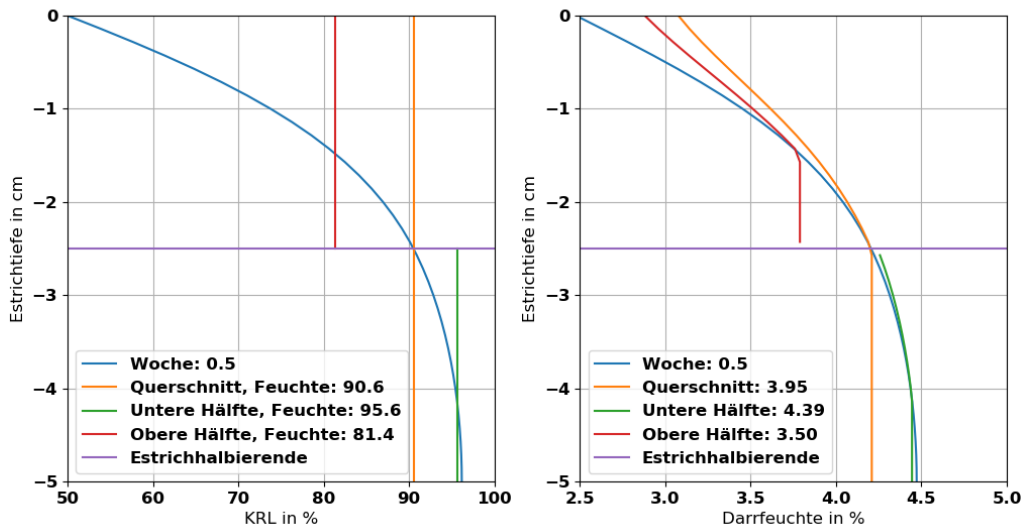
Zementestrich (CEM I, G/Z=5:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



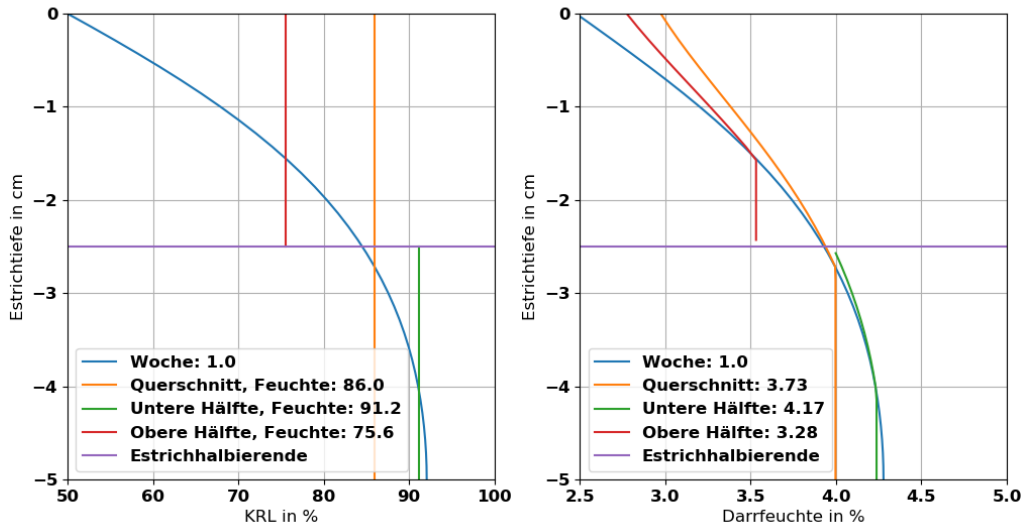
A.2.4 CEM I, 6:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte



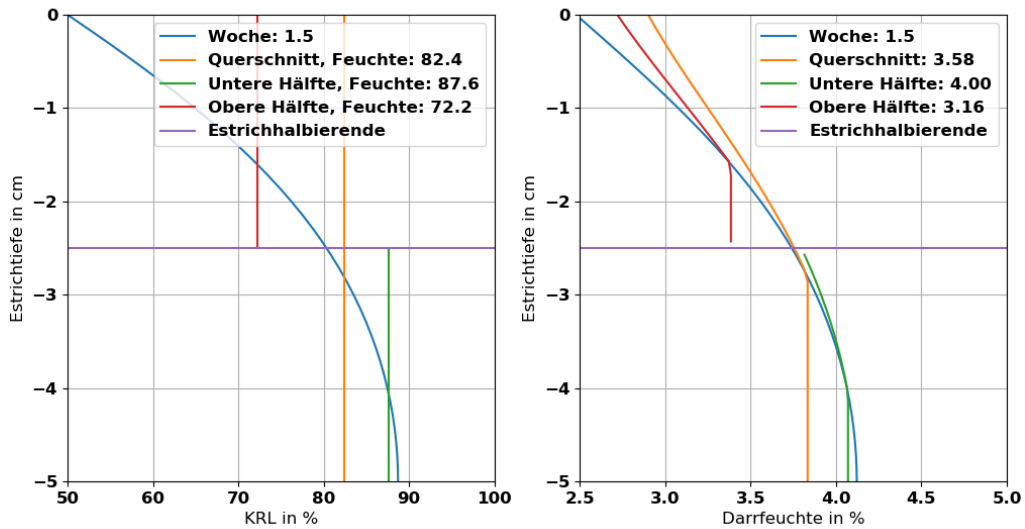
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



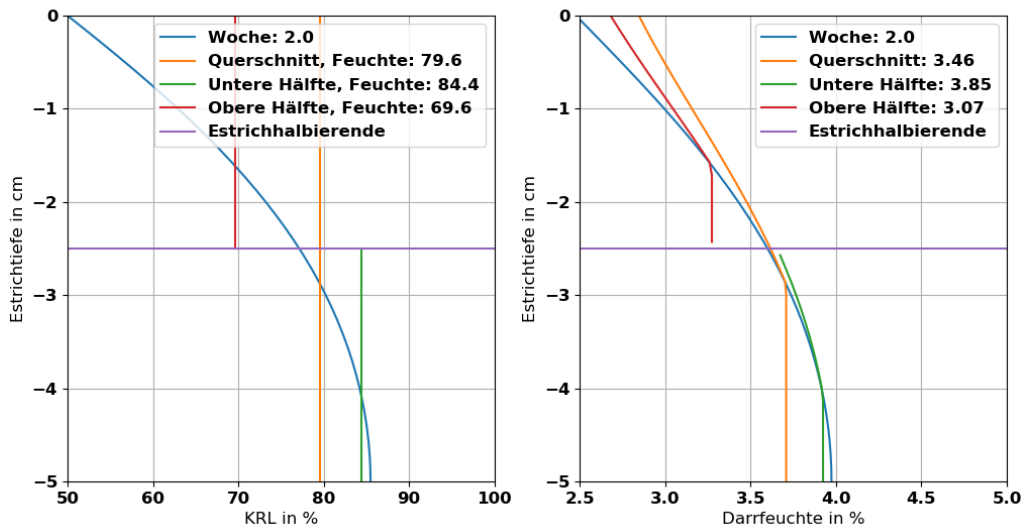
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



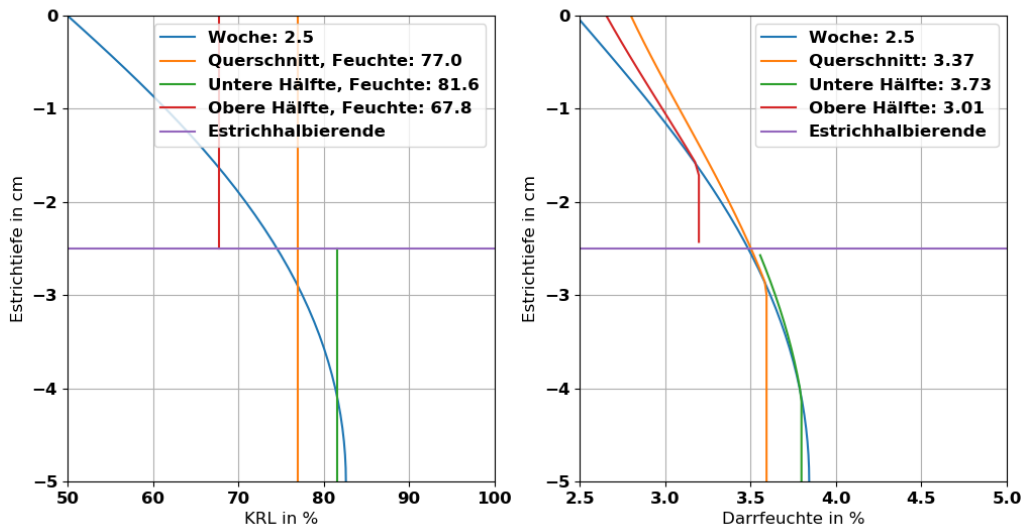
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



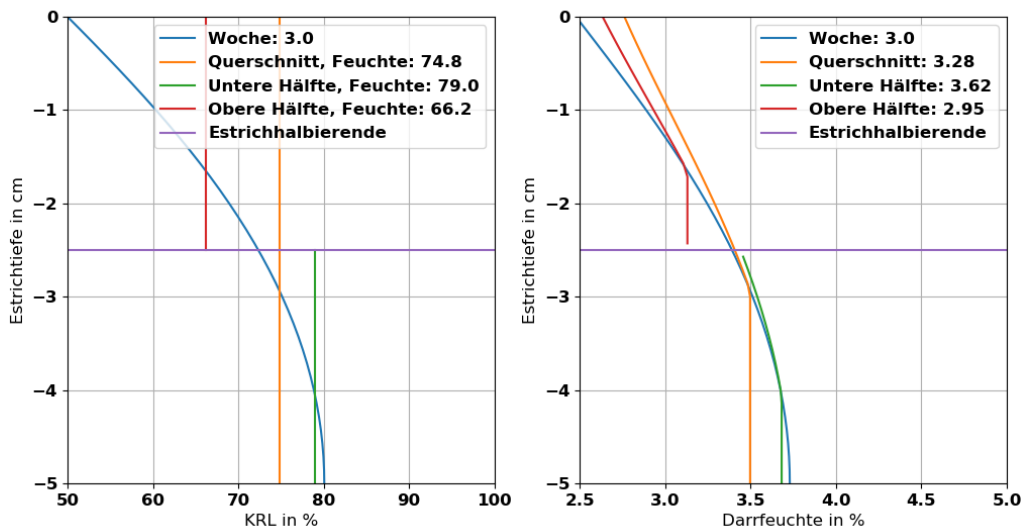
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



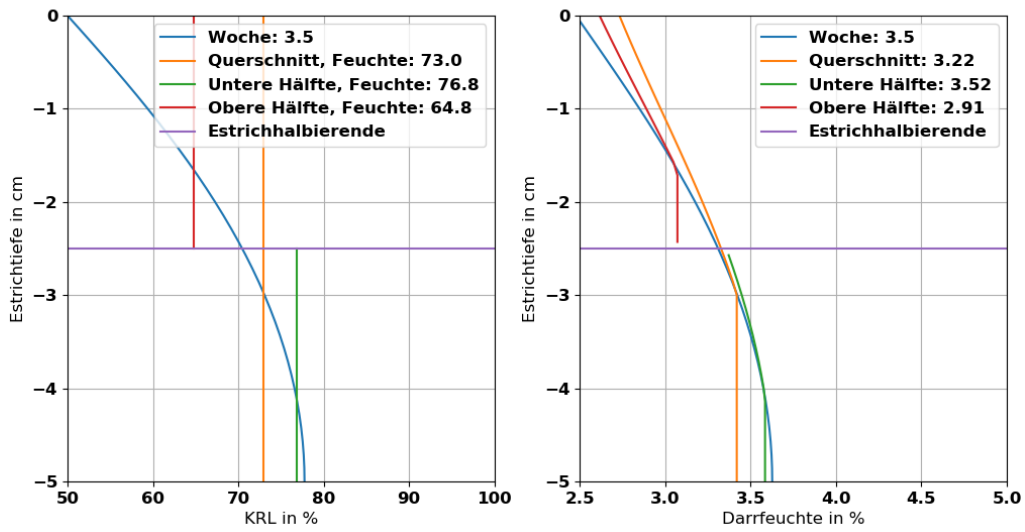
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



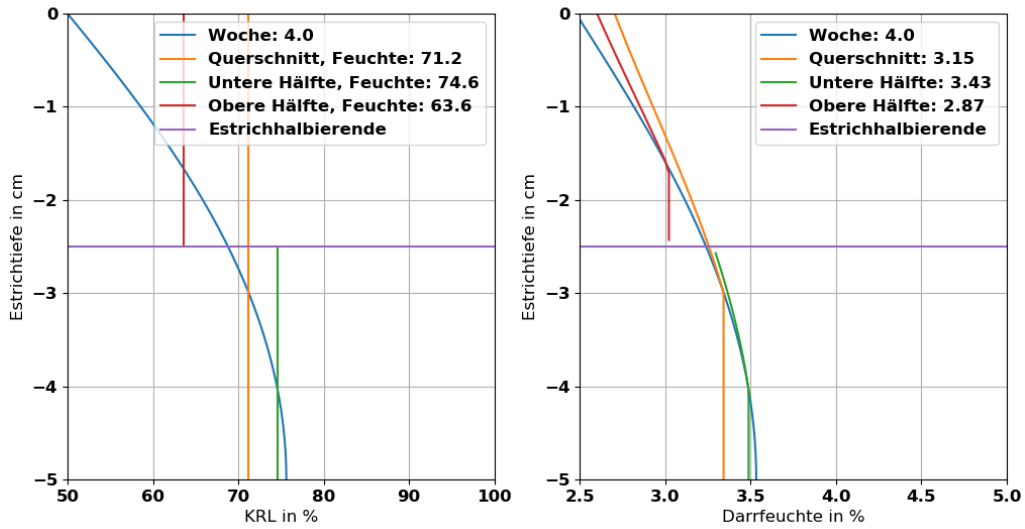
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



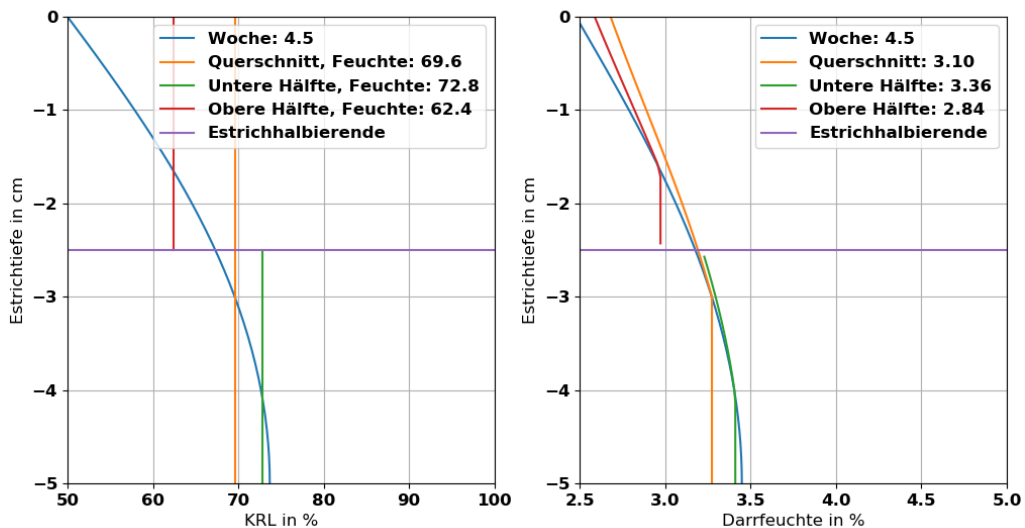
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



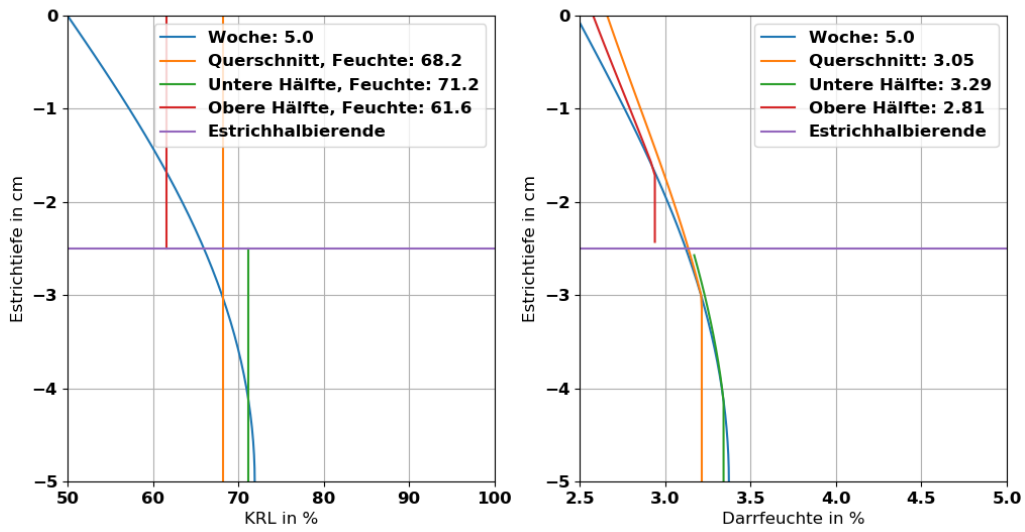
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



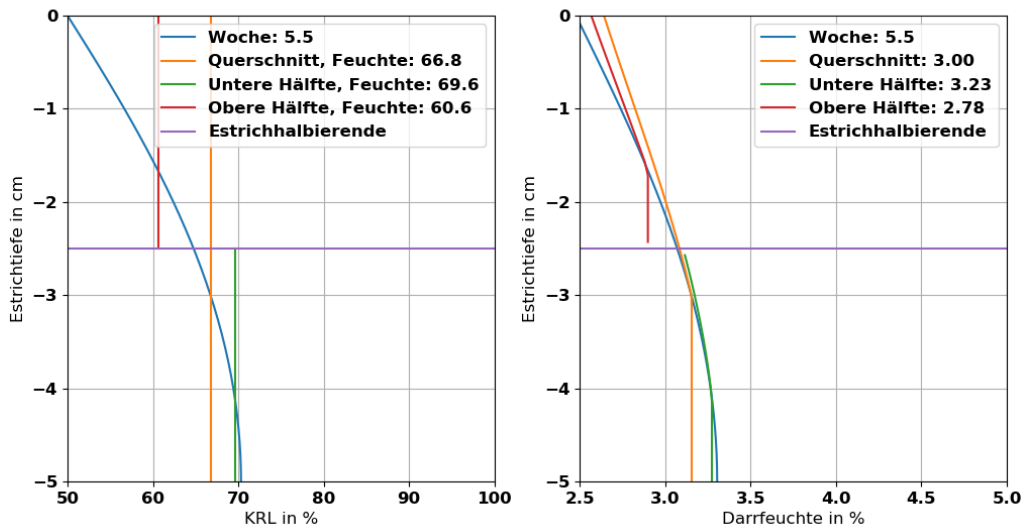
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



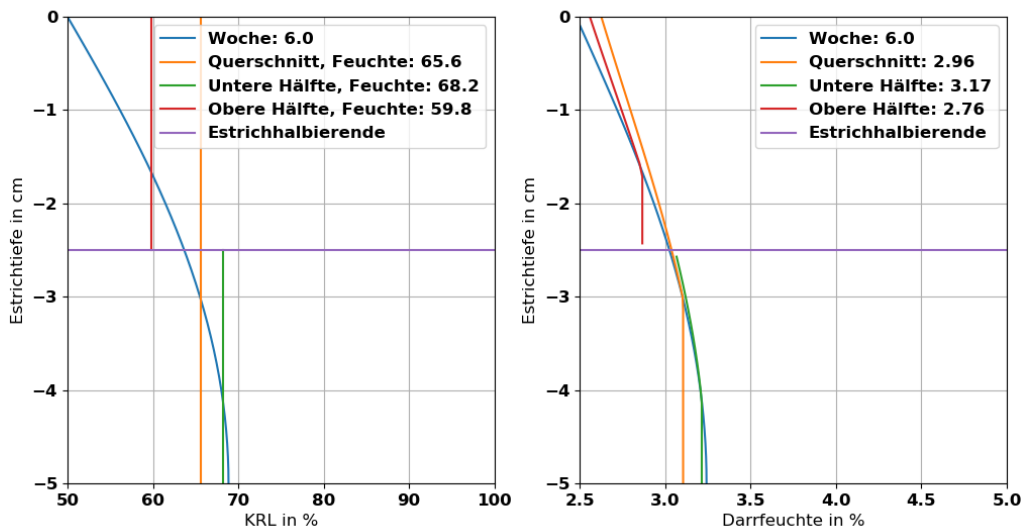
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



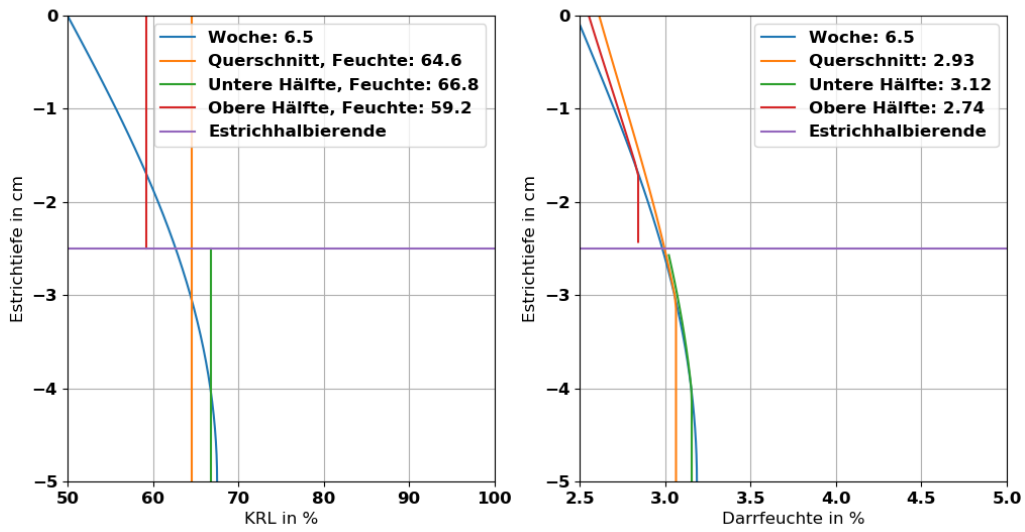
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



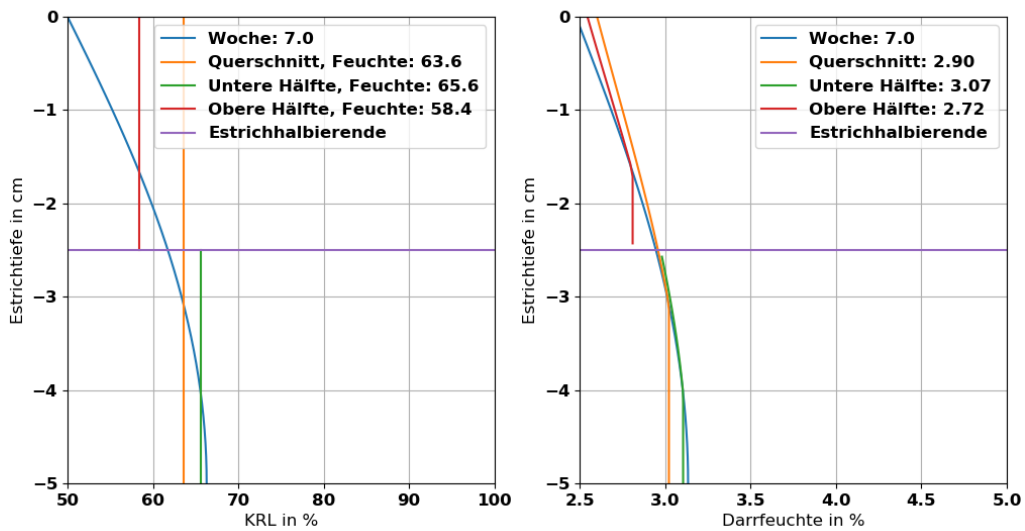
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



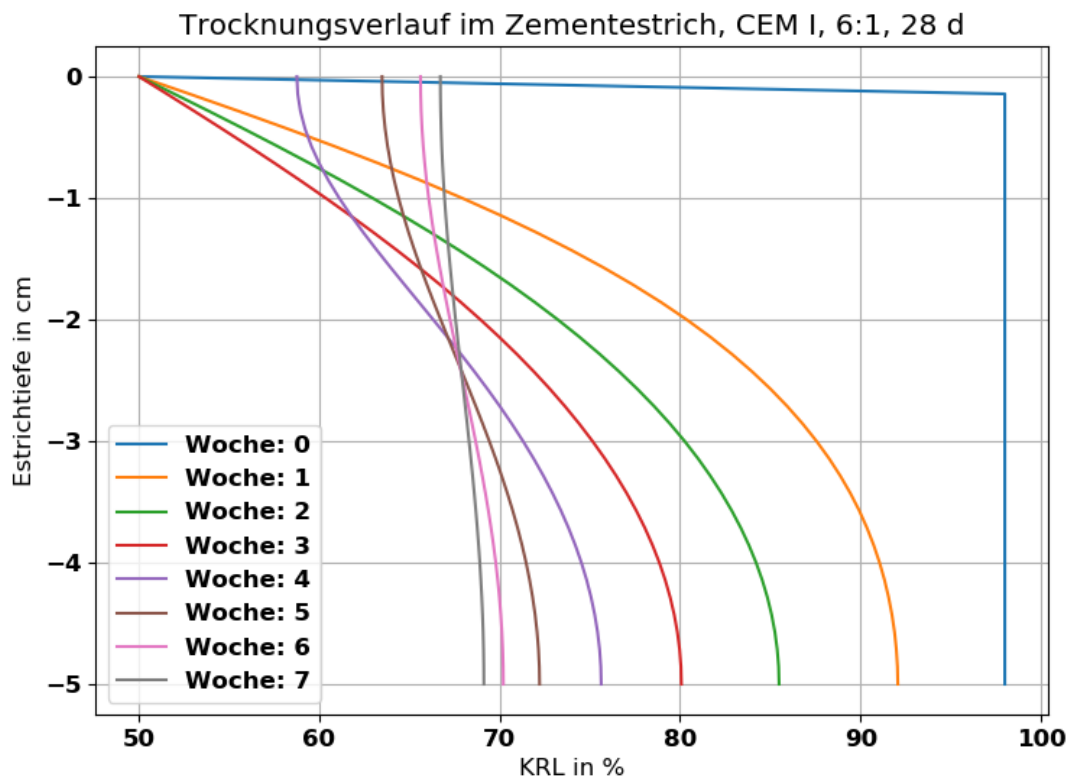
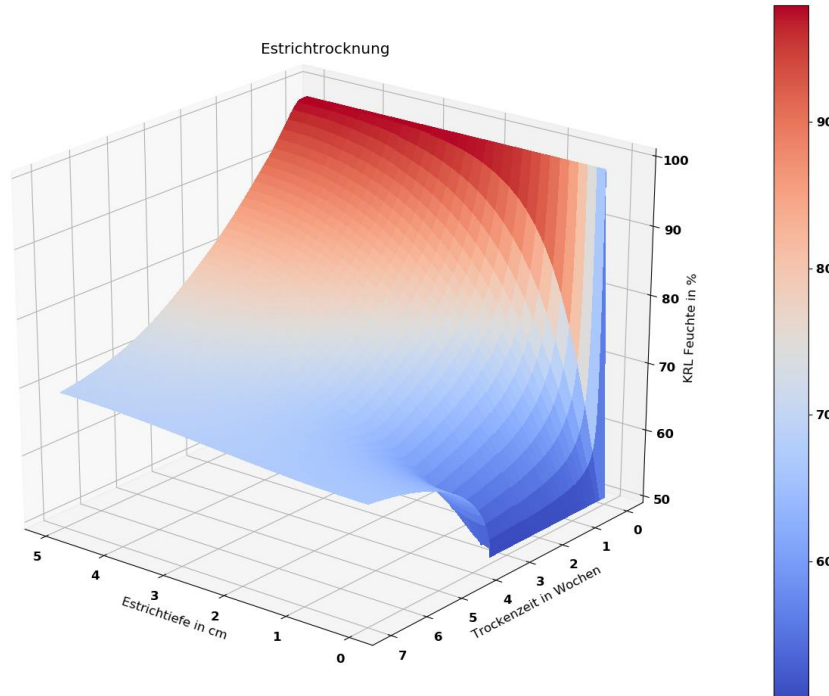
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



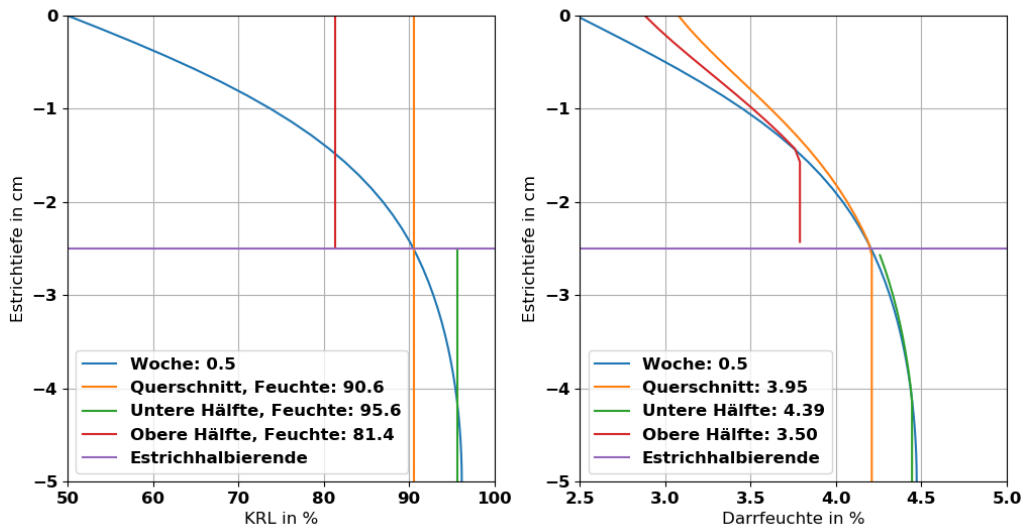
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



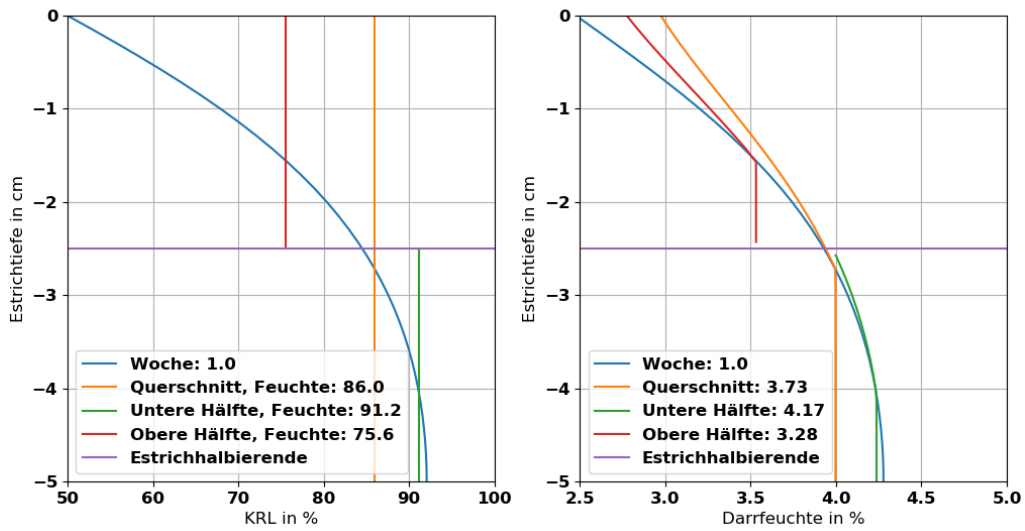
A.2.5 CEM I, 6:1, Aussenklima 50 % rel. Luftfeuchte, nach 3,5 Wochen abgedeckt (entspricht einer dampfdichten Sperre)



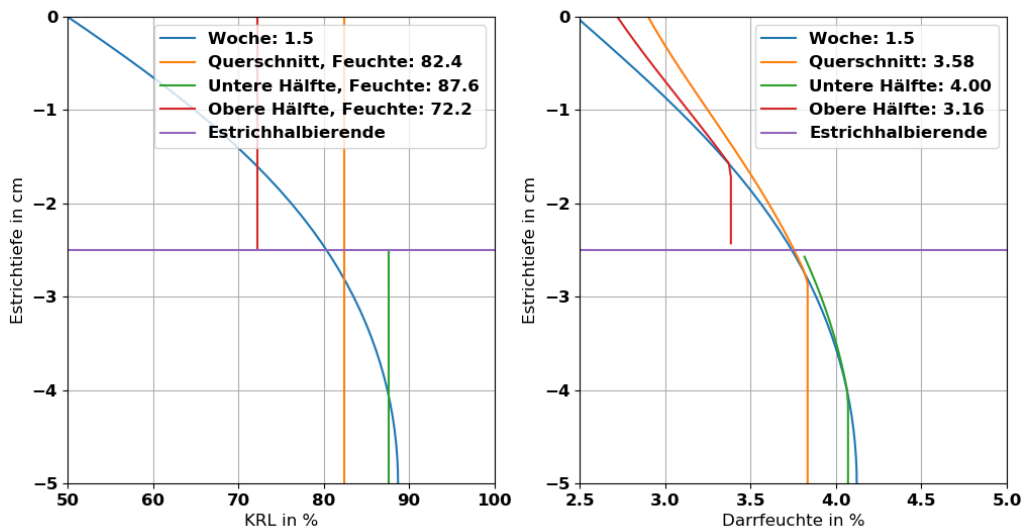
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



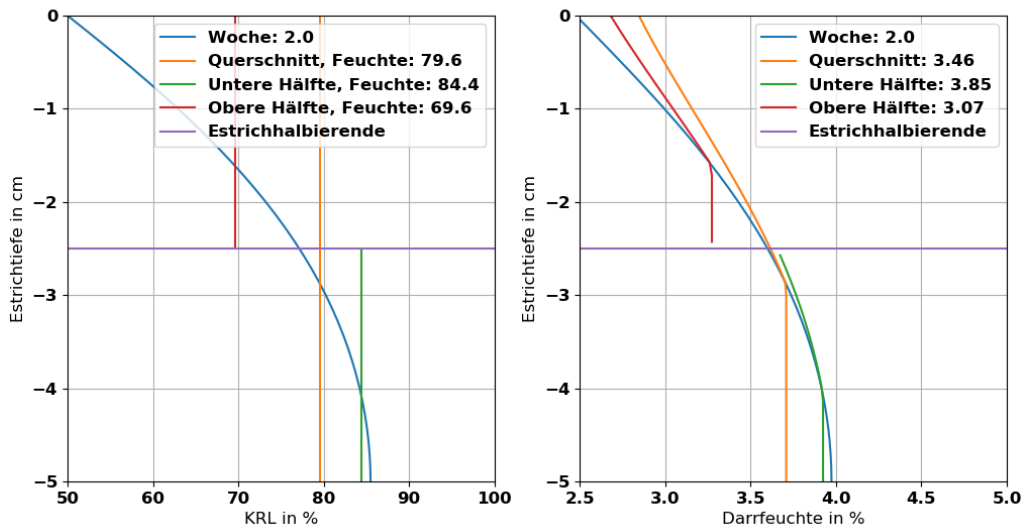
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



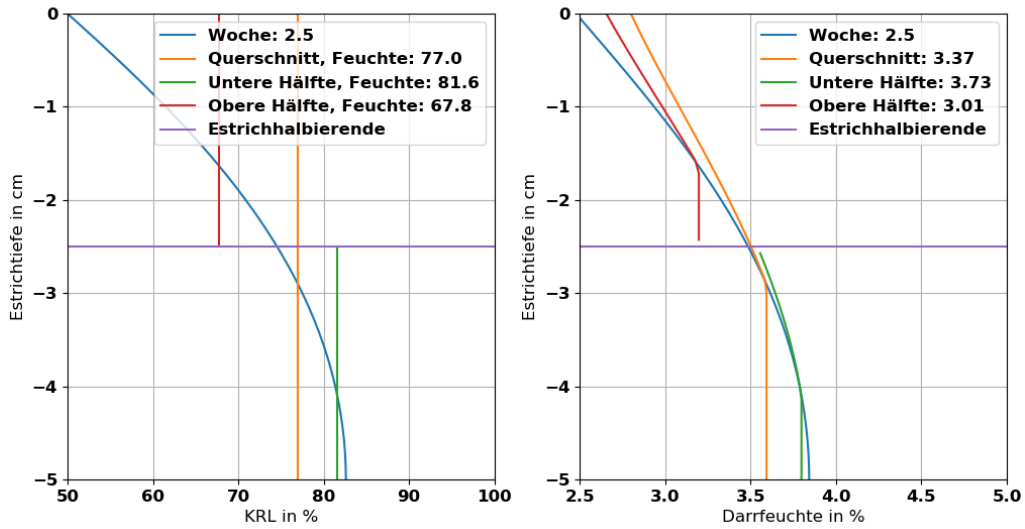
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



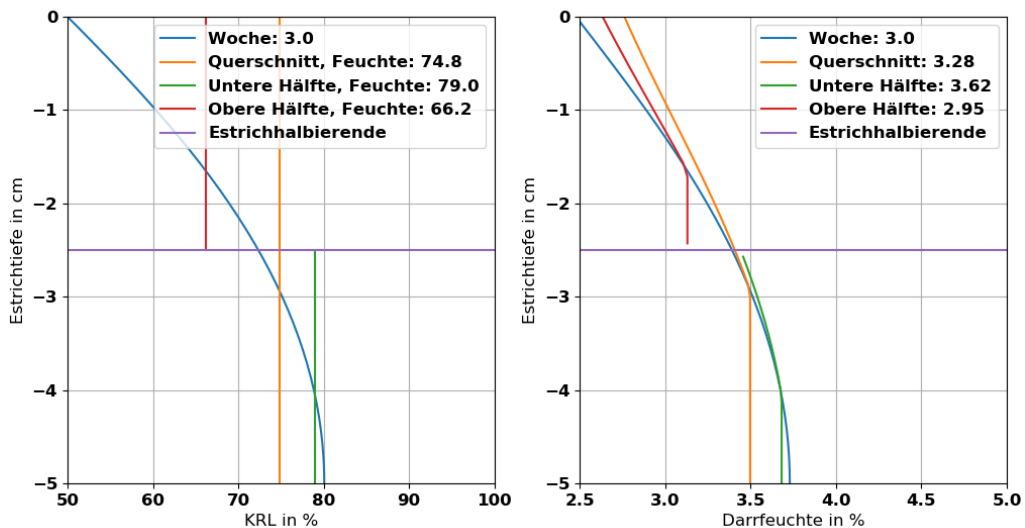
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



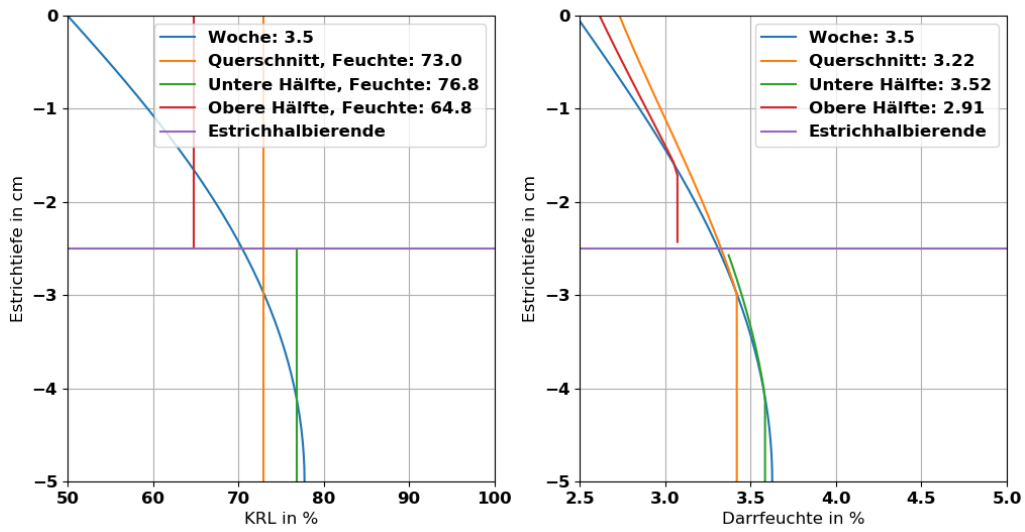
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



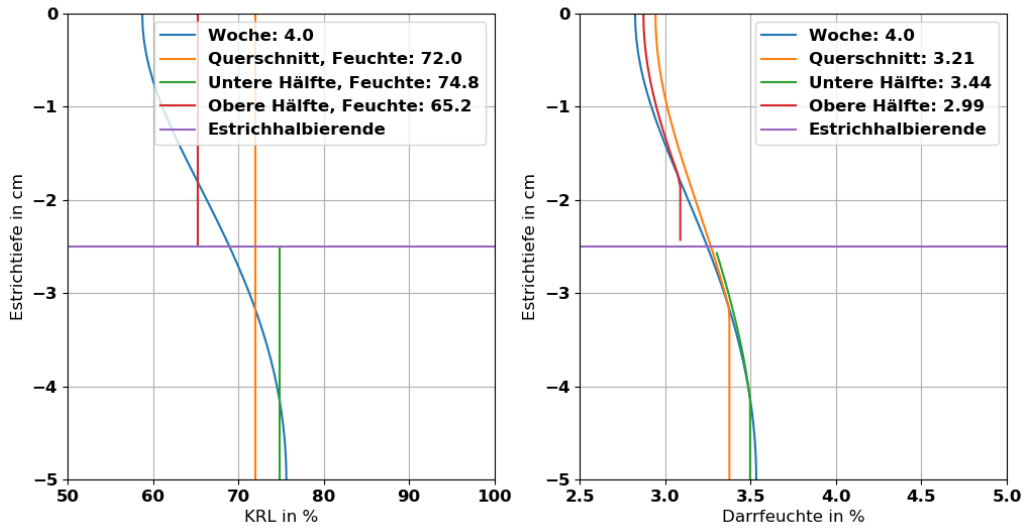
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



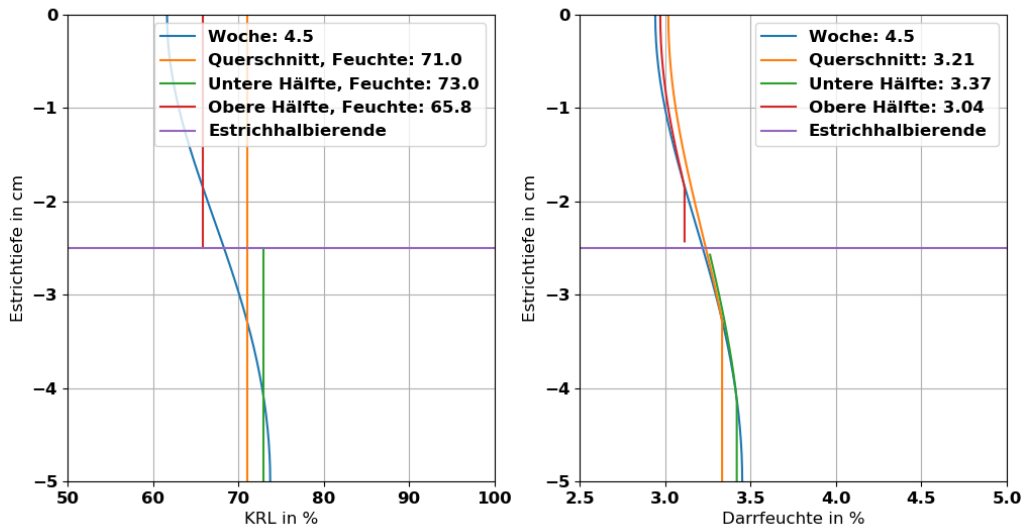
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



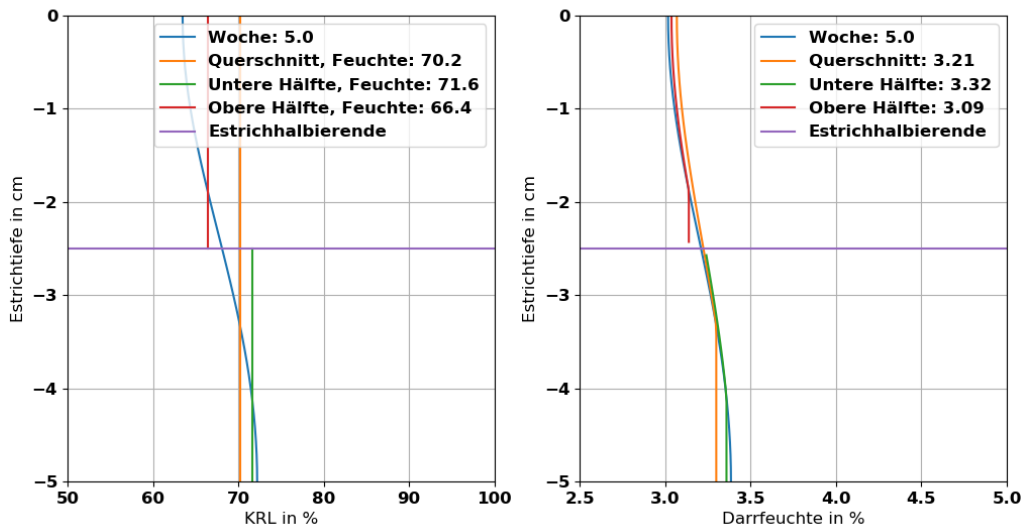
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



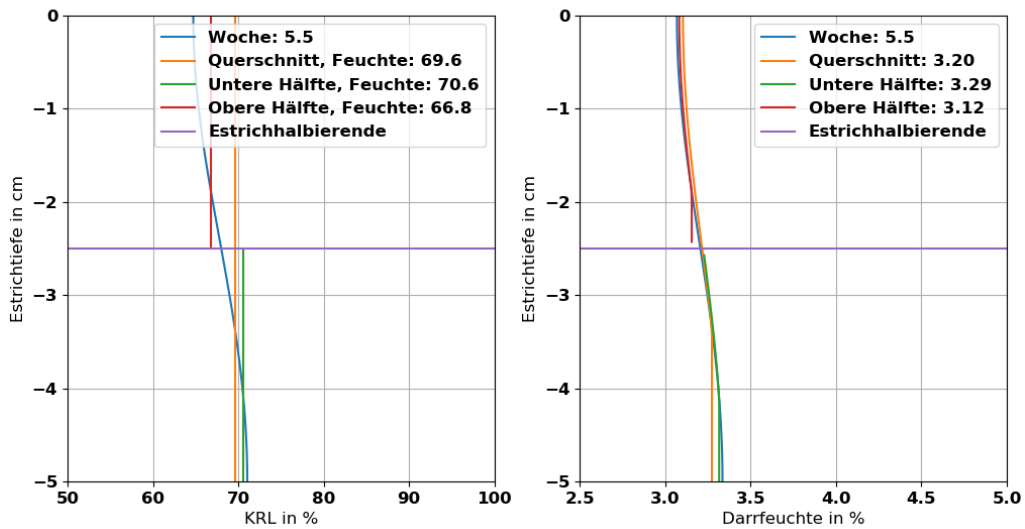
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



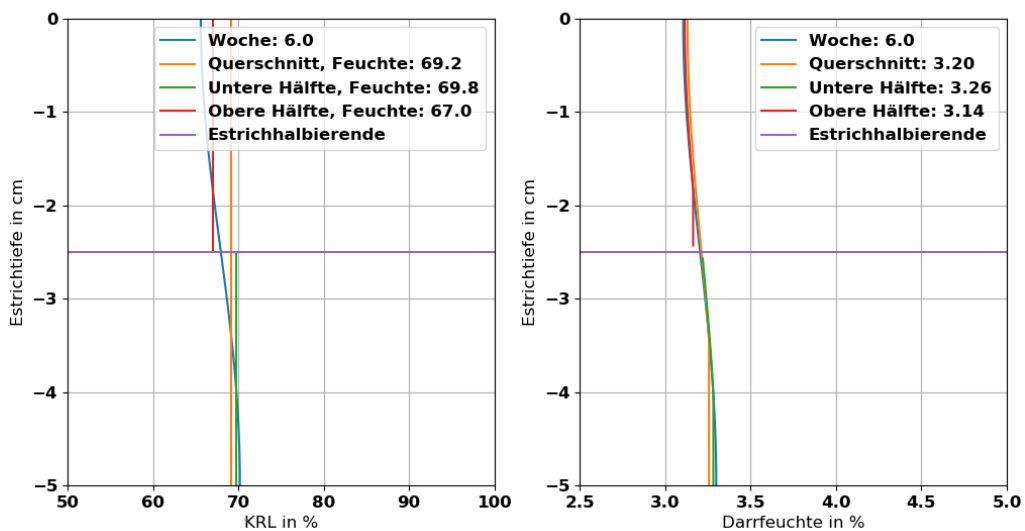
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



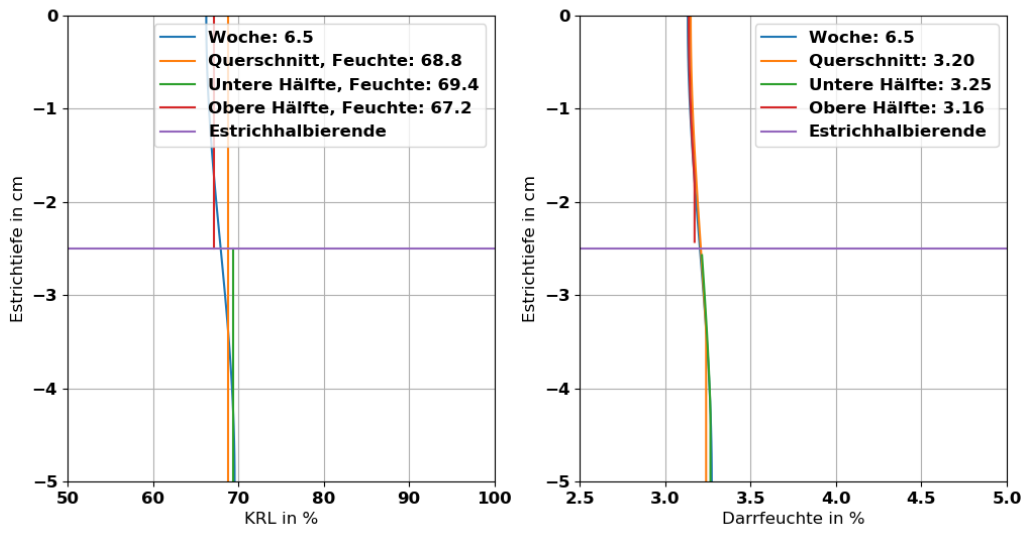
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



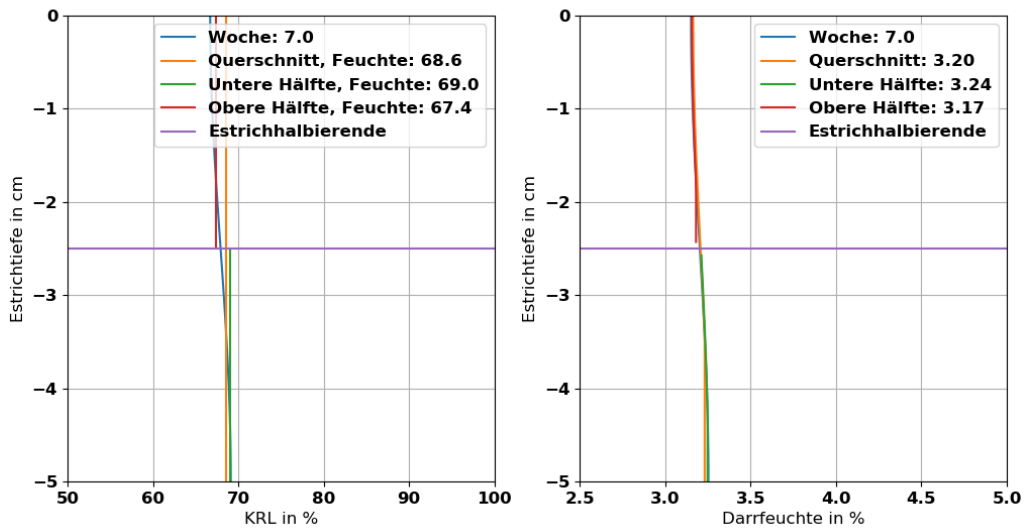
Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



Zementestrich (CEM I, G/Z=6:1, w/z=0,55), Trocknungskurve und Feuchte-Messwerte



A3. Messdaten für die Sorptionsisothermen

Hinweise zu den Tabellen:

Spalte 1: laufende Nr.

Spalte 2: relative Luftfeuchte bei der anfänglichen Desorption (rLF-%)

Spalte 3: Darrfeuchte beim Erreichen der Soll-Desorptionsfeuchte (Darr-%)

Spalte 4: relative Luftfeuchte bei der Adsorption nach der anfänglichen Desorption (rLF2-%)

Spalte 5: Darrfeuchte beim Erreichen der Soll-Adsorptionsfeuchte (Darr2-%)

Spalte 6: Klassifizierung, ob dieser Teil der Adsorption zu einer Scanning oder Adsorptionsisotherme gehört (Scan. O Adsorp.)

Spalte 7: Differenz der Adsorptions- zu Desorptionsluftfeuchte in % (drLF)

Spalte 8: die entsprechende Scanning-Steigung in Darr-%/rLF-% (m_scan)

CEM1-28Tage							
	rLF-%	Darr-%	rLF2-%	Darr2-%	Scan. o Adsorp.	drLF	m_scan
0	95	4,367	95	4,380	s	0	inf
1	85	4,058	95	4,163	s	10	0,0105
2	75	3,344	85	3,427	s	10	0,0083
3	75	3,587	95	3,840	s	20	0,0127
4	54	2,638	75	2,780	s	21	0,0068
5	54	2,560	85	2,891	s	31	0,0107
6	54	2,578	95	3,286	a	41	0,0173
7	23	1,517	54	1,767	s	31	0,0081
8	23	1,557	75	2,332	a	52	0,0149
9	23	1,548	85	2,726	a	62	0,0190
10	23	1,555	95	3,217	a	72	0,0231
11	3	0,876	23	1,188	a	20	0,0156
12	3	0,824	54	1,580	a	51	0,0148
13	3	0,887	75	2,381	a	72	0,0208
14	3	0,833	85	2,861	a	82	0,0247
15	3	0,876	95	3,319	a	92	0,0266

CEM1-56Tage							
	rLF-%	Darr-%	rLF2-%	Darr2-%	Scan. o Adsorp.	drLF	m_scan
0	95	4,082	95	4,127	s		
1	85	3,840	95	3,999	s	10	0,0159
2	75	3,630	85	3,742	s	10	0,0112
3	75	3,618	95	3,966	s	20	0,0174
4	54	2,675	75	2,915	s	21	0,0114
5	54	2,641	85	3,103	s	31	0,0149
6	54	2,632	95	3,568	a	41	0,0228
7	23	1,372	54	1,750	s	31	0,0122
8	23	1,312	75	2,360	a	52	0,0202
9	23	1,251	85	2,681	a	62	0,0231
10	23	1,243	95	3,258	a	72	0,0280
11	3	0,848	23	1,329	a	20	0,0241
12	3	0,887	54	1,867	a	51	0,0192
13	3	0,791	75	2,526	a	72	0,0241
14	3	0,717	85	2,911	a	82	0,0268
15	3	0,834	95	3,561	a	92	0,0296

CEM1-2010-28Tage							
	rLF-%	Darr-%	rLF2-%	Darr2-%	Scan. o Adsorp.	drLF	m_scan
0	95	4,670	95	4,702	s		
1	85	4,343	95	4,519	s	10	0,0176
2	75	3,802	85	3,925	s	10	0,0123
3	75	3,818	95	4,215	s	20	0,0199
4	54	2,791	75	3,035	s	21	0,0116
5	54	2,855	85	3,374	s	31	0,0167
6	54	2,728	95	3,782	a	41	0,0257
7	23	1,391	54	1,771	s	31	0,0123
8	23	1,477	75	2,550	a	52	0,0206
9	23	1,373	85	2,841	a	62	0,0237
10	23	1,320	95	3,475	a	72	0,0299
11	3	0,976	23	1,446	a	20	0,0235
12	3	0,844	54	1,763	a	51	0,0180
13	3	0,922	75	2,628	a	72	0,0237
14	3	0,807	85	2,949	a	82	0,0261
15	3	0,814	95	3,646	a	92	0,0308

CEM1-2010-Unterswasser							
	rLF-%	Darr-%	rLF2-%	Darr2-%	Scan. o Adsorp.	drLF	m_scan
0	95	5,501	95	5,478	s		
1	85	4,706	95	4,862	s	10	0,0156
2	75	4,187	85	4,306	s	10	0,0118
3	75	4,209	95	4,584	s	20	0,0188
4	54	3,159	75	3,437	s	21	0,0132
5	54	3,233	85	3,778	s	31	0,0176
6	54	3,208	95	4,251	a	41	0,0255
7	23	1,577	54	2,032	s	31	0,0147
8	23	1,529	75	2,675	a	52	0,0220
9	23	1,419	85	3,034	a	62	0,0260
10	23	1,524	95	3,960	a	72	0,0338
11	3	0,974	23	1,479	a	20	0,0253
12	3	0,983	54	2,087	a	51	0,0217
13	3	0,933	75	2,936	a	72	0,0278
14	3	0,974	85	3,345	a	82	0,0289
15	3	0,996	95	4,021	a	92	0,0329

CSF-Mittelwerte							
	rLF-%	Darr-%	rLF2-%	Darr2-%	Scan. o Adsorp.	drLF	m_scan
0	100	5,450	100				
1	95	1,604	95	1,324	s	0	
2	85	0,567	95	0,846	s	10	0,0280
3	75	0,430	85	0,559	s	10	0,0129
4	75	0,303	95	0,767	s	20	0,0232
5	54	0,158	75	0,370	s	21	0,0101
6	54	0,153	85	0,470	s	31	0,0102
7	54	-0,007	95	0,691	a	41	0,0170
8	23	-0,010	54	0,130	s	31	0,0045
9	23	-0,040	75	0,297	a	52	0,0065
10	23	-0,073	85	0,416	a	62	0,0079
11	23	-0,230	95	0,664	a	72	0,0124
12	3	-0,147	23	0,028	a	20	0,0087
13	3	-0,190	54	0,120	a	51	0,0061
14	3	-0,200	75	0,298	a	72	0,0069
15	3	-0,334	85	0,443	a	82	0,0095
16	3	-0,492	95	0,692	a	92	0,0129

Hinweise für die nachfolgende Tabelle:

Spalte 2: Dies sind die Mittelwerte der Desorptionswerte (Darr-%, MW)

Spalte 4: dies sind die Differenzen von Darr-% und Darr2-% aus der obigen Tabelle (delta-Darr-%)

Spalte 5: die Summe aus Darr-%, MW und delta-Darr-% (Darr3-%)

Gemittelte Werte (Desorption) für CSF				
rLF-%	Darr-%, MW	rLF2-%	delta Darr-%	Darr3-%
100	5,450			
95	1,604	95	-0,280	1,324
85	0,567	95	0,280	0,846
75	0,367	85	0,129	0,496
75	0,367	95	0,464	0,830
54	0,101	75	0,212	0,313
54	0,101	85	0,317	0,418
54	0,101	95	0,698	0,799
23	-0,088	54	0,140	0,052
23	-0,088	75	0,336	0,248
23	-0,088	85	0,489	0,401
23	-0,088	95	0,895	0,807
3	-0,273	23	0,175	-0,098
3	-0,273	54	0,311	0,038
3	-0,273	75	0,498	0,225
3	-0,273	85	0,778	0,505
3	-0,273	95	1,184	0,911

Die Hinweise und Angaben in diesem Merkblatt entsprechen bestem Wissen nach derzeitigem Stand der Technik. Sie dienen zur Information und als unverbindliche Richtlinie. Gewährleistungsansprüche können daraus nicht abgeleitet werden.

TKB-Berichte

- behandeln wissenschaftliche Grundlagen der Fußbodentechnik,
- erläutern technische Zusammenhänge,
- geben einen Ausblick auf einen möglichen künftigen Stand der Technik,
- sind auf der Website des IVK permanent verfügbar,
- und stellen damit zitierfähige Quellen dar.

Neben TKB-eigenen Untersuchungs- und Forschungsergebnissen werden auch Publikationen und Informationen Dritter genutzt, analysiert, kommentiert und weiterentwickelt.

Alle verfügbaren TKB-Berichte
finden Sie in der jeweils aktuell gültigen Fassung unter

**www.
klebstoffe
.com**

Die Info-Plattform im Internet.

Alles Wissenswerte aus der Welt, in der wir (k)leben.