

# BETONFEUCHTEMODELL FÜR TUNNELINNENSCHALEN

Tunnelbrände können zu raschen Abplatzungen an der Innenschale und damit zu Querschnittsverlusten führen. Dieses Abplatzen wird stark durch die im Beton enthaltene Feuchte beeinflusst. In vier österreichischen Tunnels wurden kapazitive Feuchtesensoren montiert und die Feuchteverläufe über den Jahreszyklus ermittelt. Die Ergebnisse wurden durch Modellrechnungen verifiziert.

## Allgemeine, verständliche Zusammenfassung der Projektergebnisse: (max. 200 Wörter)

Tunnelbrände sind oft durch einen sehr raschen Temperaturanstieg und Brandtemperaturen über 1200°C gekennzeichnet. Die Feuchtigkeit in oberflächennahen Schichten ist neben der raschen Temperaturentwicklung und Dehnungsbehinderung maßgebend für das Abplatzverhalten der Schale im Brandfall. Die Feuchte im Beton ist nach längerem Bauwerksbestand hauptsächlich von der Betonzusammensetzung, den Umgebungsbedingungen, Relativer Luftfeuchte, Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Spritz- bzw. Schadwasserzutritt abhängig. Äußere Schichten folgen den jahreszeitlichen Schwankungen der Feuchte, Kernbereiche bleiben relativ konstant. Um das gefordertes Modell zu entwickeln war es notwendig anhand zuverlässiger Messdaten einen Überblick über die Feuchteverteilung in Abhängigkeit des Tunnelklimas zu bekommen.

Beton hat ein inhomogenes Gefüge aus Zementstein und groben Gesteinskörnungen. Eine direkte Feuchtemessung ist nicht möglich. Das gewählte System dient zur Erfassung der Luftfeuchte und der Temperatur in einem definierten Messraum innerhalb der Betoninnenschale, der Erfassung auf der Oberfläche der Betoninnenschale und im Tunnel. Ein kapazitiv arbeitender Sensortyp, der ausreichende Resistivität gegenüber den im Beton bzw. im Hohlraum der Messung herrschenden Umweltbedingungen aufweist, wurde gewählt. Die Sensoren wurden durch Kunststoffpacker in verschiedener Bohrlochtiefe eingebracht. Die Messung der Betonfeuchte geschieht indirekt über die sich einstellende Luftfeuchte innerhalb des Hohlraums der Bohrung. Ein Datenerfassungssystem überträgt die Daten über das Handynet. Umfangreiche Kalibrierungen im Labor und eine Modellrechnung ergänzten die Untersuchungen. Die Installation erfolgte in je zwei österreichischen Straßen- und Eisenbahntunnels.

### Facts:

- Laufzeit: 09/2015-03/2018
- Forschungskonsortium:  
**OTH Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg**
- Fakultät Elektro- und Informationstechnik,  
Labor für Sensorik  
Mechatronic Research Unit
- Fakultät Bauingenieurwesen,  
Labor für Betontechnologie
- Fakultät Allgemeinwissenschaften & Mikrosystemtechnik,  
Labor für Bauphysik

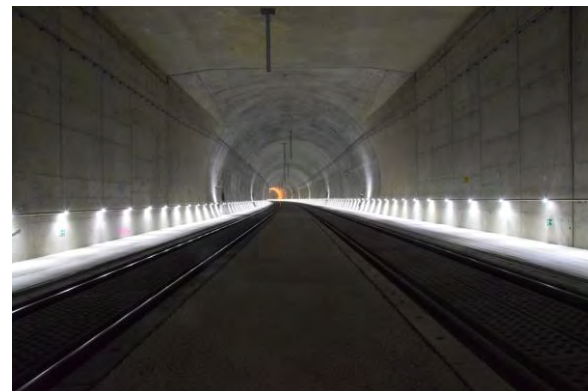


ABB 1. Eisenbahntunnel mit Beton-Innenschale (Sindersberger)



ABB 2. Beispielhafte Abplatzungen an Brandversuchsplatte

## Kurzzusammenfassung

### Problem

Ohne Kenntnisse über den Feuchtegehalt kann nicht abgeschätzt werden, ob im Zuge von Ertüchtigungen Brandschutzschichten aufgebracht werden müssen. Die Feuchtebestimmung im Beton ist jedoch sehr komplex und kann nur indirekt erfolgen.

### Gewählte Methodik

Die Bestimmung erfolgte mit kapazitiven Sensoren in kleinen Bohrlöchern. Die Kalibrierung wurde über Sorptionsisothermen und über gravimetrische Methoden durchgeführt.

### Ergebnisse

Die Messinstallationen erfüllten die Anforderungen. Die Kalibrierung erwies sich als anspruchsvoll, da sie von vielen Parametern beeinflusst wird. Insgesamt ergaben sich mit der gewählten Kalibrierung doch relativ hohe Feuchtegehalte.

### Schlussfolgerungen

Um die Feuchtesituation in Tunnels beurteilen zu können sind die Sorptionsisothermen der jeweiligen Betone zu bestimmen und die Umweltdaten festzustellen. Damit lässt sich die Feuchte in M-% abschätzen. Für die Festlegung von Grenzwerten ist das Verfahren noch zu verfeinern, bzw. sind auch in Brandversuchen gezielter Feuchteprofile zu ermitteln.

### English Abstract

Tunnel fires are often characterized by very rapid temperature increases. In addition to mechanical strain induced by temperature, humidity in the tunnel lining is a major factor contributing to explosive spalling in case of fire. The moisture content of the concrete changes with variations in environmental conditions. For the development of a suitable model, it was necessary to obtain reliable data to ascertain the humidity distribution. Capacitive sensors were situated over a period at different depths of four Austrian traffic tunnels. Calibration process proved to be complex and ambitious, as many influencing factors and the inhomogeneity of concrete had to be considered. The data will enable prognosis of future conditions of tunnel walls sealed against water ingress from the surrounding ground.

## Impressum:

### Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatis  
Abt. IV/ST 2 Technik und  
Verkehrssicherheit  
[johann.horvatis@bmvit.gv.at](mailto:johann.horvatis@bmvit.gv.at)

DI (FH) Andreas Blust  
Abt. III/14 Mobilitäts- und  
Verkehrstechnologien  
[andreas.blust@bmvit.gv.at](mailto:andreas.blust@bmvit.gv.at)  
[www.bmvit.gv.at](http://www.bmvit.gv.at)

### ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, SAE  
Streckenmanagement und  
Anlagenentwicklung  
Stab LCM und Innovationen  
[wolfgang.zottl@oebb.at](mailto:wolfgang.zottl@oebb.at)  
[www.oebb.at](http://www.oebb.at)

### ASFINAG

DI Eva Hackl  
Manager International Relations  
und Innovation  
[eva.hackl@asfinag.at](mailto:eva.hackl@asfinag.at)

DI (FH) René Moser  
Leiter Strategie, Internationales  
und Innovation  
[rene.moser@asfinag.at](mailto:rene.moser@asfinag.at)  
[www.asfinag.at](http://www.asfinag.at)

### Österreichische Forschungs- förderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda  
Programmleitung Mobilität  
Sensengasse 1, 1090 Wien  
[christian.pecharda@ffg.at](mailto:christian.pecharda@ffg.at)  
[www.ffg.at](http://www.ffg.at)

5, 2018

# Betonfeuchtemodell für Tunnelinnenschalen in Österreich

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014  
(VIF2014)

Projektnummer 850560

Juli 2018

Vorabzug, wird bis Ende 2018 ergänzt





## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien

Radetzkystraße 2

A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG

Nordbahnstraße 50

A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs

Aktiengesellschaft

Rotenturmstraße 5-9

A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Prüfeninger Straße 58

D – 93049 Regensburg



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Bereich Thematische Programme

Sensengasse 1

A – 1090 Wien



# Betonfeuchtemodell für Tunnelinnenschalen in Österreich

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014  
**(Mobilität der Zukunft - VIF2014)**

Projektnummer 850560

eCall Nummer: 5591985

**Autoren:**

**Wolfgang KUSTERLE**

**Gareth MONKMAN**

**Mikhail CHAMONINE**

**Oliver STEFFENS**

**Dirk SINDERSBERGER**

Mit Beiträgen von

Malz, S., Gruber, R., Oberhofer, M., Schmidmeier, C., Inal, A.,  
Speckner, S., Hölz, D., Hoffmann, B., Winter, F., Gensler, M.  
unter Mitarbeit von Thumann, M., Paric, I. und Preischl, T.

## **VORABZUG**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG</b> .....	9
<b>2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS</b> .....	9
<b>3 STAND DER TECHNIK</b> .....	10
3.1 Tunnelbrände und Abplatzen [2].....	10
3.2 Einflüsse der Feuchte auf das Abplatzen .....	12
3.3 Feuchtemessung [2] .....	15
Direkte Messverfahren .....	15
Darmmethode .....	16
Calciumcarbid-Methode .....	16
Indirekte Messverfahren.....	17
Kalibrierung .....	17
Hygrometrische Verfahren .....	18
Elektrische Widerstandsmessverfahren.....	19
Multi-Ring-Elektroden.....	20
Kapazitive Messverfahren.....	20
Mikrowellenmessverfahren .....	21
Neutronenmessverfahren.....	23
Infrarotmessverfahren .....	24
Optisches Messverfahren .....	25
Thermische Messverfahren.....	26
3.4 Feuchte im Beton.....	28
Ausgleichsfeuchte mit Umgebungsluft .....	28
Restfeuchte aus der Herstellung.....	28
Tauwasser.....	29
Oberflächenwasser, Schadwasser und Undichtigkeiten .....	29
3.5 Hygrische Eigenschaften des Betons .....	29
Feuchtespeicherung [18].....	29
Sorptionsfeuchtebereich .....	30
Kapillarwasserbereich .....	30
Übersättigungsbereich .....	31
Sorptionsisotherme und Feuchtespeicherfunktion .....	31
Feuchtetransporte [2, 18].....	32
3.6 Einflüsse auf die Betonfeuchte [2, 18] .....	33
Zeitlicher Verlauf .....	33
Wasserzement- und Wasser-Bindemittelwert.....	34

Einfluss des Bindemittels [55] .....	35
Menge grober Gesteinskörnungen.....	36
Versalzung .....	37
Karbonatisierung .....	39
Temperatur.....	41
Selbstabdichtung von Beton .....	42
Inhomogenitäten [2] .....	43
3.7 Feuchtesituation in Tunnelinnenschalen [2, 92] .....	43
Gäubahntunnel.....	44
Tunnel Farchant.....	46
Kalibrierung der Multi-Ring-Elektroden für die beiden Beispiele .....	49
Betone für Brandversuche .....	50
Feuchte und Tunnelbeschichtungen .....	50
3.8 Berechnungsverfahren WUFI [18] .....	52
<b>4 LÖSUNGSVORSCHLÄGE UND VORGEHENSWEISE .....</b>	<b>53</b>
<b>5 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>53</b>
5.1 Problematik inhomogenes Betongefüge [92].....	53
5.2 Tunnelklima [98] .....	54
5.3 Überblick über das gewählte Messsystem [Text Sindlersberger].....	55
Datenübertragung aus den Tunnels.....	55
Auswahl des Temperatur- und Feuchtsensors und des Anemometers .....	57
Platinendesign.....	58
Messung der relativen Luftfeuchte .....	59
Anemometer.....	62
5.4 Einsatz der Sensoren .....	63
5.5 Befestigung der Sensoren [92].....	63
Beeinflussung der Temperatur und der Feuchte im Bohrloch [92].....	63
Konstantes Hohlraumvolumen .....	64
Denkbare Befestigungssysteme .....	64
Injektionspacker Vor- und Nachteile .....	65
Arbeitsvorgänge .....	65
Auswahl, Entwicklung von Befestigungen für Sensoren im Bohrloch.....	66
Prüfung gegen Herausfallen .....	67
Prüfung der Dichtigkeit [92].....	70
Test des Prüfaufbaus im Klimaschrank [92].....	74
Test beim Einfrieren und Auftauen.....	76
Test auf Ausbaubarkeit .....	76

5.6 Montage in den Tunnels [98] .....	77
Arbeitsschritte .....	78
Reinigung und Vorbereitung der Messstellen [98] .....	78
Einbringen der Bohrlöcher .....	78
Montage des Verteilers .....	79
Einbau der Sensorik .....	79
5.7 Auswahl der Tunnels und Position der Fühler [98, 18] .....	82
Inntaltunnel Nordseite .....	82
Tunnel Selzthal Oströhre .....	83
Hengsbergtunnel .....	84
S16 Arlbergschnellstraße – Tunnel Strengen .....	85
Übersicht beprobte Tunnel .....	86
5.8 Innenschalenbetone [2] .....	87
Beton für Tunnelinnenschalen .....	88
Wasserundurchlässiger Beton .....	88
Betone der geprüften Tunnels [95] .....	90
5.9 Laboruntersuchungen .....	92
Rezepte und Betonagen .....	92
Inntaltunnel Betonrezept .....	100
Tunnel Strengen Betonrezept .....	100
Hengsbergtunnel Betonrezepte .....	101
Tunnel Selzthal Betonrezept .....	103
Zusätzliche Untersuchungen .....	103
5.10 Vorgehen zur Kalibrierung .....	105
5.11 Bestimmung der Sorptionsisothermen für Versuchsbetone [98] .....	105
Exsikkator Prüfungen [98] .....	105
V-Sorp .....	106
5.12 Spalten und Gravimetrische Feuchte-Bestimmung [92] .....	106
Feuchtebestimmung über Darrmethode .....	107
5.13 Bauphysikalische Modellrechnungen .....	108
<b>6 MESSERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>108</b>
6.1 Laborbetone .....	108
Feuchtemessungen im Labor an Probekörpern .....	108
Trocknung der Versuchsbalken [98] .....	111
Gravimetrische Referenzprüfungen V1 und V5 .....	113
Ergebnisse gravimetrische Referenzprüfungen nach [95] .....	114
Ergebnisse Ringelektrode .....	115



Zusammenfassung Kalibrierungen Laborversuche mit Stand 5/2018 .....	115
6.2 Kalibrierungen mit Sorptionsisothermen und Lollipop-Versuchen [18] .....	116
Bestimmung der Sorptionsisothermen [18] .....	119
Aufbau und Durchführung [18] .....	120
<b>Auswertung der Adsorptionsisothermen [18]</b> .....	121
Auswertung der Desorptionsisothermen [19] .....	123
Ergebnisse Exsikkator nach [95] .....	126
Ergebnisse Vsorp [95] .....	128
Porositäten der Proben .....	130
6.3 Messdaten aus den Tunnels .....	132
Inntaltunnel Nordseite .....	133
Hengsbergtunnel .....	134
Tunnel Selzthal Ost .....	139
Tunnel Strengen Süd .....	142
Gegenüberstellungen .....	146
Analyse der Messdaten in den Tunneln [18, Kap. 8] .....	146
Überprüfung der Datenqualität [18, Kap.8.1] .....	147
Ermittlung des Wassergehalts in der Tunnelinnenschale [18, Kap.8.2] .....	148
Vorläufiger Wassergehalt Inntaltunnel [18, Kap.8.3ff] .....	150
Vorläufiger Wassergehalt im Hengsbergtunnel .....	152
Vorläufiger Wassergehalt im Tunnel Strengen .....	153
Vorläufiger Wassergehalt im Tunnel Selzthal .....	154
6.4 Modellrechnungen .....	155
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	159
7.1 Zusammenfassung .....	159
Diskussion der Ergebnisse [z.B. 98, Kap. 5.1 ff] .....	159
7.2 Schlussfolgerungen, Bewertung, Vorschläge und Ausblick .....	160
Schlussfolgerungen aus versuchstechnischer Sicht .....	160
Schlussfolgerungen aus brandschutztechnischer Sicht .....	160
Schlussfolgerungen aus baupraktischer Sicht .....	160
<b>8 LITERATUR</b> .....	162
Studentische Arbeiten an der OTH Regensburg .....	162
Zitierte Literatur: .....	163
Weitere Literatur zum Thema .....	170
<b>9 ANHANG</b> .....	175
9.1 Vorsimulationsstudie Einflüsse auf WUFI [18] .....	175
9.2 Beispiele Sorptionsisothermen .....	180

9.3 Tunnelquerschnitte und Lage der Sensoren [18].....	181
Inntaltunnel Nordseite .....	181
Tunnel Selzthal Oströhre .....	186
Hengsbergtunnel (offene Bauweise).....	193
Hengsbergtunnel (offene Bauweise, Kastenquerschnitt ) .....	194
Hengsbergtunnel (bergmännische Bauweise) .....	195
Tunnel Strengen.....	199
9.4 Bohrkerne .....	203
Inntal .....	203
Selzthal .....	205
9.5 Hygrische und thermische Daten aller Tunnel.....	207
Inntal .....	207
Hengsberg.....	207
Selzthal .....	207
Strengen.....	207
9.6 Wetterdaten der nächsten Wetterstation zu den jeweiligen Tunnels.....	207
9.7 Unkalibrierte Feuchteverläufe der Probekörper B1 bis B3 [98] .....	209

## 1 EINLEITUNG

Tunnelbrände sind oft durch einen sehr raschen Temperaturanstieg und Brandtemperaturen über 1200°C gekennzeichnet. Die Innenschale ist dabei weitgehend dehnungsbehindert. Freie und chemisch gebundene Feuchte im Beton kann nicht schnell genug entweichen. Tunnelbrände können neben der Gefährdung des Personenschutzes auch zu Problemen in der Standsicherheit der Tunnelröhre während und nach einem Brand führen. Die Auswertung der Schäden zahlreicher Tunnelbrände und einer großen Zahl an Versuchen zeigt:

- Der nicht brennbare Beton kann durch Tunnelbrände zerstört werden.
- Die je nach Ausführung doch ziemlich brandbeständige Stahlbetonkonstruktion kann durch Tunnelbrände, infolge Aufbau eines Dampfdrucks im Porensystem und durch folgendes explosives Abplatzen oberflächlicher Betonschichten, progressive Schädigungen erleiden.
- Abplatzungen können somit zu einem raschen Freilegen der Bewehrung und zu starken Querschnittsverlusten der Innenschale führen.

Die Feuchtigkeit in oberflächennahen Schichten der Tunnelinnenschalen ist neben der Temperaturentwicklung und Dehnungsbehinderung maßgebend für das Abplatzverhalten der Schale im Brandfall. Die Feuchte ändert sich mit den Umgebungsbedingungen. Im vorliegenden Programm wurde versucht ein Modell dazu zu entwickeln und anhand zuverlässiger Messdaten einen Überblick über die Feuchteverteilung in Abhängigkeit des Tunnelklimas zu bekommen. Das Programm ist auf Tunnels mit intakter Abdichtung beschränkt. Feuchte von der Bergseite wird nicht berücksichtigt. Die Messung in verschiedenen Tiefenstufen im Tunnel und in der Klimakammer erfolgte mit spezifischen Sensoren und Datenerfassungseinheiten. Die Sensoren wurden für den Einsatz im Beton und in unterschiedlicher Positionen der Innenschale ausgewählt. Aufbauend auf den realen Messdaten aus vier Tunnels wurde ein bauphysikalisches Modell entwickelt.

Zur Beurteilung der gefährlichen Querschnittsschwächung ist der Feuchtegehalt im Beton ein wichtiges Entscheidungskriterium für oder gegen den Einsatz von kostenintensiven Schutzmaßnahmen. Diese Forschungsergebnisse tragen einen Teil zur Klärung bei, müssen aber mit genaueren Messungen im Zuge von Brandprüfungen verglichen werden. Zur Feuchteverteilung in Brandversuchskörpern stehen derzeit meist, außer einem einzigen Wert, keine weiteren Daten über die Verteilung im Querschnitt zur Verfügung.

## 2 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS

Derzeit ist für abgedichtete Verkehrstunnels nicht bekannt, in welcher Größenordnung sich der Feuchtegehalt der Tunnelinnenschalen über den Jahreszyklus und die Tiefe bewegt.

- Hauptziel des Programms war daher die Bestimmung dieser Feuchteverläufe in ausgewählten österreichischen Tunnels. Darüber hinaus war ein Ansatz für eine verlässliche Abschätzung der Feuchtesituation in österreichischen Verkehrstunnels gesucht.

Derzeit gibt es keine allgemein anerkannten Verfahren die Feuchte im Beton punktgenau und permanent zerstörungsfrei zu messen

- Eine direkte Feuchtemessung im Betongefüge ist unter den geforderten Randbedingungen im Tunnel nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zufriedenstellend möglich, da die meisten Sensoren empfindlich auf flüssiges Wasser bzw. stark alkalische Wässer reagieren. In dem Vorhaben sollten die lokalen Klimadaten in kleinen Bohrlöchern bestimmt und daraus der Feuchtegehalt in Massen-% abgeleitet werden. Um diese Messungen durchführen zu können, mussten entsprechende

Sensoren und Messverfahren gefunden und kalibriert werden. Diese Sensoren sollten an Datenlogger angeschlossen und die Daten in Zeitintervallen ausgelesen werden. Die Messgeräte sollten über einen Jahreszyklus in vier Tunnels in ausgewählten Tunnelquerschnitten die Feuchte aufnehmen.

Es ist nicht bekannt, wie unterschiedliche Innenschalenbetone sich bei Feuchteänderungen verhalten.

- Parallel zu den Tunnelmessungen sollten Versuche im Labor zu Sorptionsisothermen und weiteren hygri-schen Kennwerten durchgeführt werden. Durch Variation der Betonzusammensetzung sollte der Einfluss der Betonzusammensetzung auf diese Kenngrößen festgestellt werden.

Welche Tunnel bzw. in welchen Tunnelbereichen ist mit hohen Feuchtegehalten zu rechnen

- Die Feuchte im Beton ist nach längerem Bauwerksbestand hauptsächlich von den Umgebungsbedingungen, das heißt Relativer Luftfeuchte, Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Spritz- bzw. Schadwasserzutritt, aber auch von der Betonrezeptur abhängig. Äußere Schichten folgen den jahreszeitlichen Schwankungen der Feuchte, Kernbereiche bleiben relativ konstant. Es ist wichtig die Feuchteverteilung über den Querschnitt zu ermitteln um später Versuchskörper z.B. nach ÖBV-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Beton für unterirdische Verkehrsbauwerke“ [1] dahingehend im Brandversuch untersuchen zu können.

Je nach Bauweise, Lage, Befahrbarkeit, Verkehrsführung und Nutzung werden unterschiedliche Feuchtebelastungen festgestellt.

- Mit einem bauphysikalischen Modell sollten Umweltdaten und Sorptionsisothermen eingepflegt werden und damit Prognosen ermöglicht werden.

Am Ende des Programms sollten folgende Ergebnisse vorliegen:

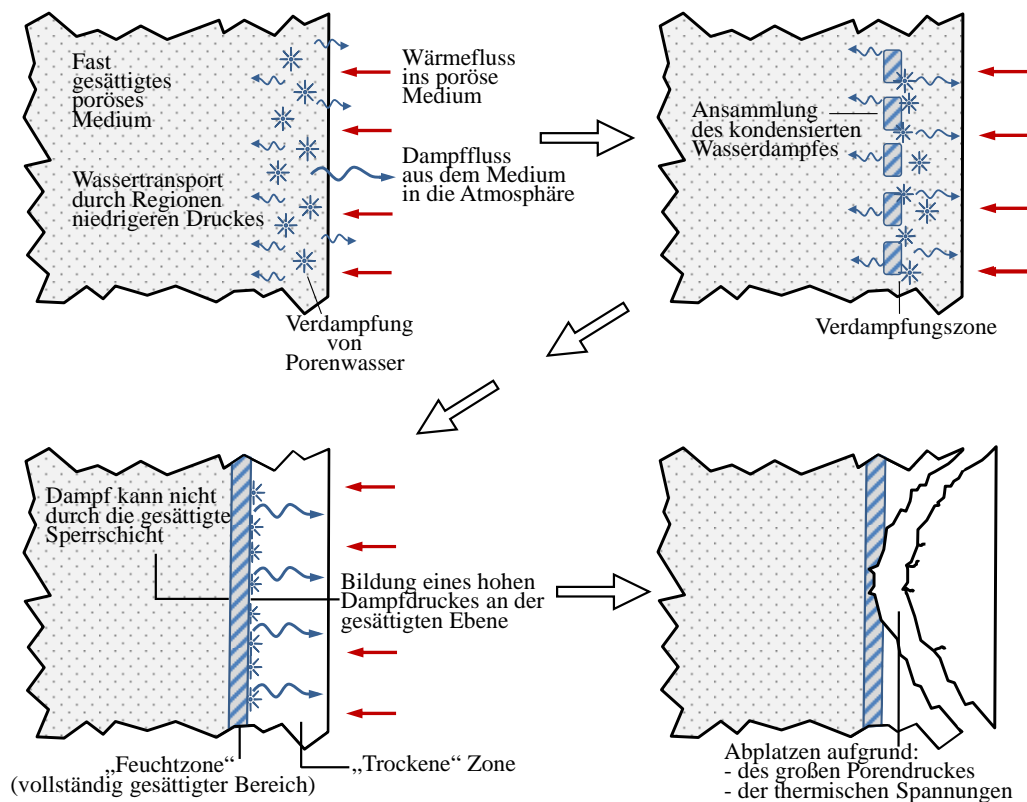
- geeignete Sensoren (für Feuchte und Temperatur) zur Messung in unterschiedlichen Tiefen im Beton und Bezug auf Masse-%
- Kleine Erfassungs- und Speichereinheiten samt Stromversorgung, Datensicherung und Datenübertragung (lokal und Internet)
- Feuchtejahresverläufe in unterschiedlichen Tiefen in vier ausgewählten Österreichischen Tunnelinnenschalen
- Erkenntnisse zum Einfluss der Betonmischung auf das Feuchteniveau im Laborversuch
- Bauphysikalisches Modelle zur Abschätzung der Feuchte in anderen Tunnels mit Regenschirmabdichtung

### 3 STAND DER TECHNIK

#### 3.1 Tunnelbrände und Abplatzen [2]

Bei einem Brandfall in Tunneln treten fast schlagartig hohe Temperaturen auf. Dies bedeutet eine erhebliche Belastungssituation sowohl für die Konstruktion als auch den Konstruktionswerkstoff. Durch eine ungleichmäßige Erwärmung ergeben sich Temperaturspannungen im Material der Tunnelinnenschale. Dabei entstehen am heißen Rand Druckspannungen und am kalten Rand, aufgrund der einseitigen Beflammung, Zugspannungen. Gleichzeitig verdampft das freie und auch chemisch gebundene Wasser im Betongefüge. Die auftretenden thermodynamischen Prozesse führen zu Wasserdampfströmungen. Der Dampf bewegt sich sowohl in die temperaturbeanspruchte Bauteilseite, als auch in Richtung des kalten bergseitigen Randes. In den kälteren Bereichen im Bauteilinneren kondensiert ein Teil

des Wasserdampfes, was gesättigte Poren zur Folge hat. Der Wasserdampf kann danach nur noch aus dem Bauteil hinaus entweichen. Der dort entstehende Druck in Verbindung mit weiteren vorhandenen Spannungen (bspw. thermische Eigenspannungen, äußere Last) führt im Brandfall zu explosionsartigen Abplatzungen des Betons, die bereits in den ersten 10 bis 25 Minuten nach dem Auftreten der Brandbeanspruchung hervorgerufen werden. Eine Veranschaulichung des Abplatzprozesses gibt die Abbildung 1. Die Beanspruchung ist aber sehr vom vorhandenen Wassergehalt und den durch die Betonrezeptur vorgegebenen Porenraum abhängig. Diese Abspaltungen können zum Teil mehrere Dezimeter in das Bauteil hineinreichen [3] [4] [5] [6] [7] [8]. Der kritische Feuchtegehalt im Beton ist nicht exakt bekannt. In der Literatur [9] [10] [11] werden Werte von 2 M-% bis 4 M-% angegeben, ohne dass die genaue Lage des Messpunktes spezifiziert wird. Kordina gibt eine Feuchte von < 2 M-% an [9]. Dieser Grenzwert wird auch durch das Forschungsprojekt [10] bestätigt. (Für UHPC muss der Wert aber um 0 % freies Wasser liegen.). Gemäß DIN EN 1992-1-2 [12] beträgt der empfohlene Feuchtegehalt  $k$  3 M-%. Nach Deutschem Nationalem Anhang gilt der Wert  $k = 4$  [13]. Nach derzeitig geltenden österreichischem Regelwerk, ÖNORM EN 1992-1-2 und ÖVB-Richtlinie „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Bauen für unterirdische Verkehrsbauwerke“ gilt ein Feuchtegehalt von > 2 M-% als kritisch für Abplatzerscheinungen. Die Regelwerke spezifizieren aber nicht, wo und wie die Feuchte gemessen wird. Außerdem sind auch weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen, somit gibt es keinen allgemeinen Grenzwert der Feuchtigkeit. Die Ergebnisse einer Tragwerksbemessung sind aber stark davon abhängig, ob Beton-Querschnittsverluste anzusetzen sind oder nicht.



**Abbildung 1: Thermohydraulische Prozesse in Betonbauteilen beim explosiven Abplatzen infolge Brandeinwirkung [14]**

### 3.2 Einflüsse der Feuchte auf das Abplatzen

In der Literatur ist allgemein anerkannt, dass die Betonfeuchte einen maßgebenden Einfluss auf das Abplatzverhalten hat und daher geschwindigkeitsbestimmend ist. Dabei muss im Porensystem des Betons, der sehr unterschiedlich große Poren aufweist zwischen freiem Kapillarwasser und physikalisch fest gebundenem Wasser unterschieden werden. Weiteres chemisch gebundenes Wasser wird abgegeben, wenn die C-S-H Phasen und das Calciumcarbonat und -hydroxid entwässert werden. Details dazu in [10, 15, 16, 17].

[18]: Der hygrisch aktive Bestandteil von Beton, der Zementstein, besteht aus den allgemeinen Hydratationsprodukten, Poren mit enthaltener Porenflüssigkeit sowie noch unreaktiertem Zementklinker. Die Poren im Gefüge werden nach ihrer Größe unterteilt. Mit zunehmender Porengröße findet eine Unterteilung in Mikroporen, Mesoporen, Mikrokapillaren, Kapillaren, Makrokapillaren und Grobporen statt. Das entstehende Zementgefüge ist abhängig von den Ausgangsstoffen, die in der Betonrezeptur eingesetzt werden. Das Feuchtespeicherpotential, das bei Beton auftritt, wird durch die Poren im Micro- und Nanometerbereich generiert. Die Kapillarporen und Gelporen (Mikro- und Mesoporen) entstehen durch die Hydratation, die die Umwandlung von Zementkörnern in Zementgel verursacht. [19]

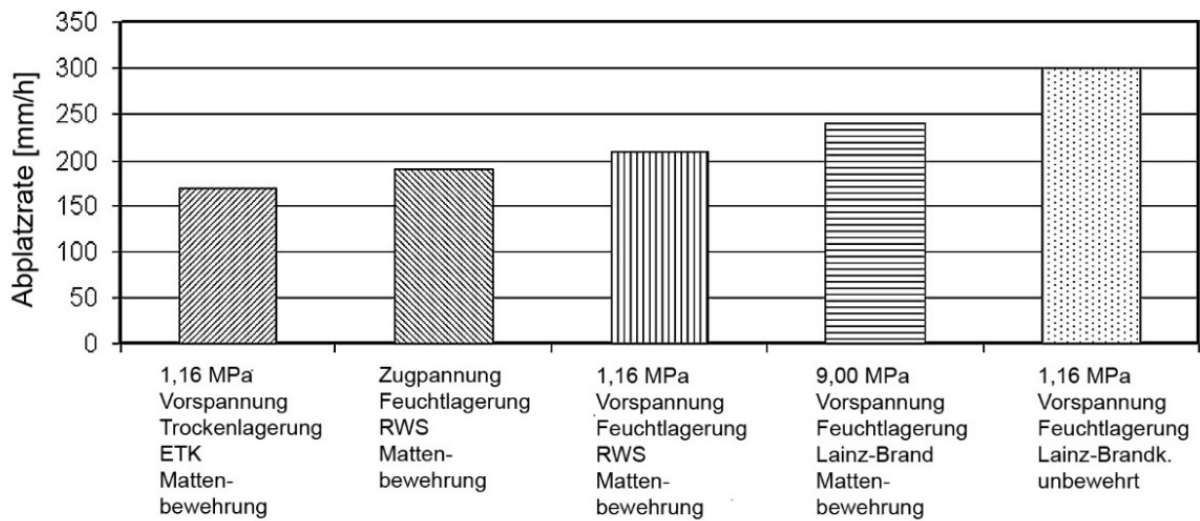
Das Porengefüge ist weiterhin von der Menge des eingesetzten Wassers abhängig. [19] beschreibt, dass Wasserzementwerte von rund 0,4 dazu führen, dass nach abgeschlossener Hydratation unhydratisierte Reste von Zementklinker in der Zementmatrix vorliegen. Wird mehr Wasser der Reaktion beigefügt, als zur Hydratation nötig, so entstehen durch das Überschusswasser größere Porenräume. Die dann entstehenden Poren werden als Kapillarporen bezeichnet. [19]

Die Speicherung von Feuchte durch offen poröse mineralische Baustoffe ist von der Porenstruktur abhängig. Die Porenstruktur selbst kann dabei durch eine Vielzahl von Parametern, etwa materialspezifisch durch den Wasserzementwert, das Betonalter und die Verdichtung oder chemisch durch den Karbonatisierungsfortschritt und die Versalzung, beeinflusst werden. Daraus ist ableitbar, dass eine Abbildung der Feuchtespeicherung bei der enormen Anzahl an Einflussgrößen gerade in der praktischen Anwendung äußerst schwierig ist. [19]

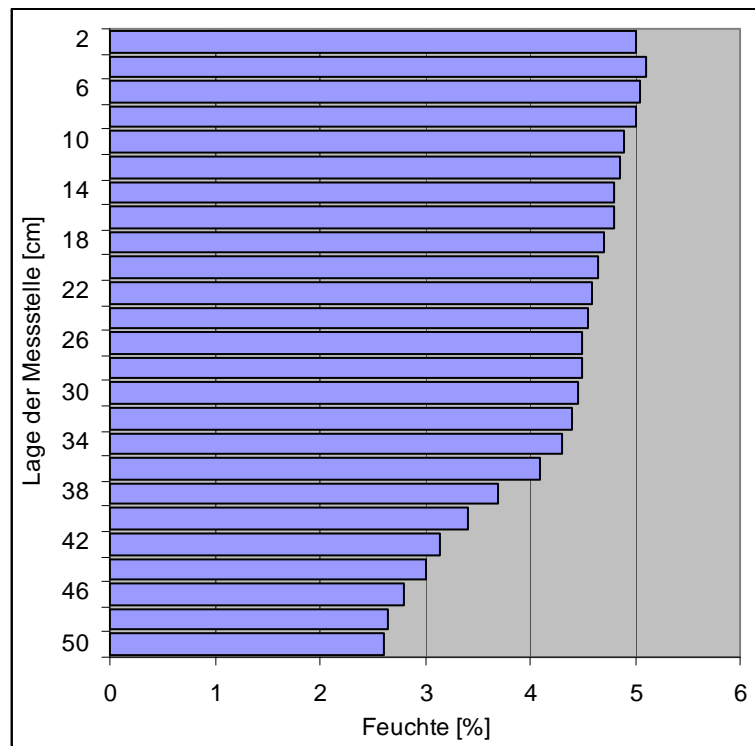
Es ist daher nötig, die Problemstellung umfassend zu betrachten. Für die Erstellung eines Prognosetools müssen möglichst alle Parameter erfasst werden. [20. 21]

Wenn man die Versuchsergebnisse von Probekörpern nach ÖBV-Richtlinie, die dehnungsbehindert geprüft wurden (Vorspannung 1,16 MPa) nach unterschiedlicher Lagerung gegenüberstellt [10], kann man folgendes feststellen (Abbildung 2): Die 50 cm dicken Probekörper, die feucht gelagert wurden, wiesen nach dieser Lagerung nach etwa 56 Tagen in oberflächennahen Schichten 5 M-% Feuchtigkeit auf. Trocken gelagerte Probekörper wiesen Feuchten von 3 M-% bis 3,3 M-% auf. Bei gleichen Randbedingungen steigt die Abplatzrate von 17 cm/h auf 21 cm/h an, wenn sich die Feuchte um diese 2 M-% erhöht.

Trotzdem sollten fixe Grenzwerte mit Vorsicht verwendet werden, da die unterschiedliche Mischungszusammensetzung einen starken Einfluss hat und die Angabe in M-% auch von der Betondichte abhängig ist, daher von der Dichte der Ausgangsstoffe und der Porosität des Betons [11].



**Abbildung 2: Vergleich der Abplatzraten unter unterschiedlichen Prüfbedingungen mit Probekörpern nach ÖBV-Richtlinie [10]**



**Abbildung 3: Feuchtegehalte über die Tiefe an Versuchsplatten nach Abbildung 2. Lagerung: 1 Jahr Feuchtlagerung [10]**

**Tabelle 1: Übersicht Feuchte der Versuchsplatten aus [10]**

Versuchskörper	Fasern	Lagerung Feuchte	Dicke	Betonsorte gem. ÖNORM B4200-10 und Richtlinie der ÖVBB	Gesteinskörnung Kalk, Quarz	Feuchtegehalt Brandseite Nullplatte [%]	Max. Feuchtegehalt Nullplatte [%]	Druckfestigkeit im Mittel [N/mm <sup>2</sup> ]
1	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
2	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
3	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			46,06
4	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
5	0	Trocken, Heizung	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk	<b>4,71</b>	<b>4,87</b>	37,80
6	0	Trocken, Heizung	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
7	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
8	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
9	Cocktail	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			n.b.
10	Cocktail	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk	<b>5,17</b>	<b>5,30</b>	
11	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			37,80
12	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
13	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
14	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
15	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			46,50
16	1,5 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
17	3,0 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
18	3,0 PP	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
19	0	Trocken, Luft	30	B30/300/WU/FB/SA/TS	Kalk			56,00
20	0	Trocken, Luft	30	B30/300/WU/FB/SA/TS	Kalk			
21	0	Trocken, Luft	30	B40/HL/FTB	Quarz			
22	0	Trocken, Luft	30	B40/HL/FTB	Quarz	<b>3,31</b>	<b>5,45</b>	65,67
23	3,0 PP	Trocken, Luft	30	B40/HL/FTB	Quarz			
24	3,0 PP	Trocken, Luft	30	B40/HL/FTB	Quarz			
25	1,5 PP	Trocken, Luft	30	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
26	1,5 PP	Trocken, Luft	30	B30/WU/FTB/BS1	Kalk	<b>3,20</b>	<b>5,06</b>	32,80
29	0	Trocken, Heizung	50	B30/WDI	Quarz			
30	0	Trocken, Heizung	50	B30/WDI	Quarz			
31	1,5 PP	Trocken, Heizung	50	B30/WDI	Quarz	<b>4,32</b>	<b>6,97</b>	52,24
32	1,5 PP	Trocken, Heizung	50	B30/WDI	Quarz			
33	0	Trocken, Heizung	50	B30/WU	Quarz			
34	0	Trocken, Heizung	50	B30/WU	Quarz			
35	1,5 PP	Trocken, Heizung	50	B30/WU	Quarz	<b>4,70</b>	<b>5,42</b>	52,37
36	1,5 PP	Trocken, Heizung	50	B30/WU	Quarz			
43	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Quarz			36,43
44	0	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Quarz			
51	1,0 PP	Trocken, Luft, 1 Jahr	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk	<b>2,00 – 3,20</b>	<b>5,78</b>	31,57
52	0	Trocken, Luft, 1 Jahr	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			
54	0	Trocken, Luft	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			n.b.
55	0	Trocken, Luft	50	B30/WU/FTB/BS1	Kalk			

56 bis 62 ohne Messwerte nicht dargestellt

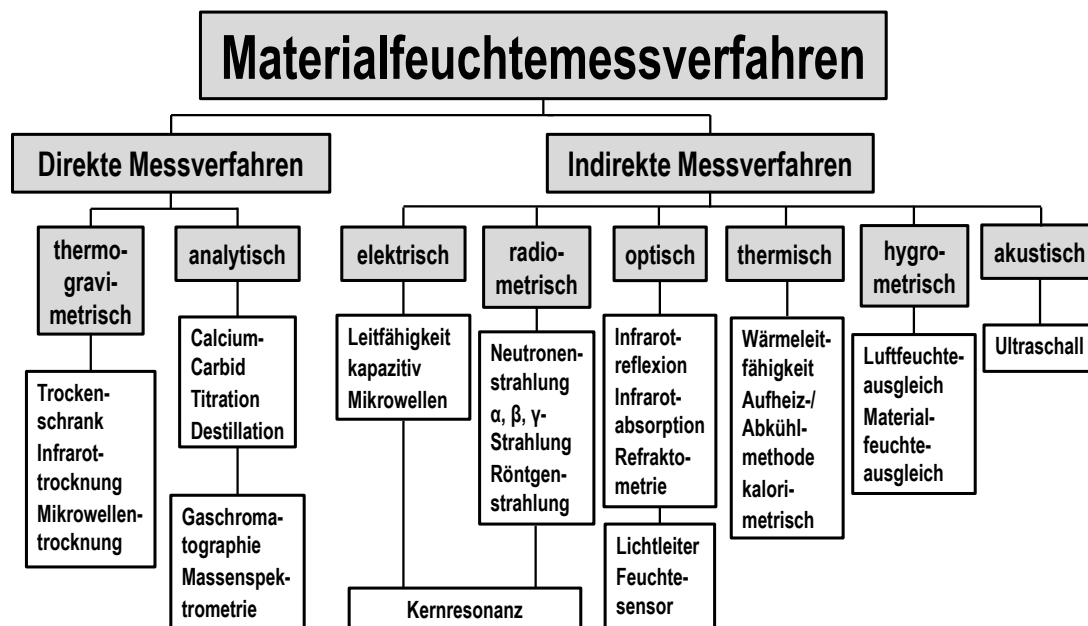


### 3.3 Feuchtemessung [2]

Wasser liegt in unterschiedlichen Bindungsformen im Beton vor. Zur Feuchtebestimmung ist dieses Wissen von großer Wichtigkeit, da die Messverfahren unterschiedlich auf die Bindungsformen reagieren. Für die Wahl des richtigen Feuchtemessverfahrens werden in diesem Kapitel mehrere Methoden genauer beschrieben. In der Praxis gibt es einige Anforderungen, die die Feuchtemessung erfüllen sollte:

- zerstörungsfrei bzw. zerstörungsarm
- schnell und kontinuierlich
- zuverlässig mit angemessener Genauigkeit
- unabhängig vom Gehalt an gelösten Salzen
- unabhängig von der Temperatur
- unabhängig von Dicke, Dichte und Struktur des Materials
- Messung in verschiedenen Tiefen

Die Materialfeuchtemessverfahren können in zwei große Bereiche eingeteilt werden. Es gibt zum einen die direkten und zum anderen die indirekten Feuchtemessverfahren. Die folgende Abbildung 4 liefert einen Überblick der verschiedenen Materialfeuchtemessverfahren. [22] [23]



**Abbildung 4: Einteilung der Materialfeuchtemessverfahren nach Kupfer [23]**

#### Direkte Messverfahren

Bei den direkten Messverfahren wird meist das Wasser vom Feststoff getrennt und der Wassergehalt im Baustoff direkt ermittelt. Diese Verfahren liefern eine wichtige Grundlage für die indirekten Feuchtemessverfahren, da sie als Bezugsmethode und demzufolge zur Kalibrierung dienen. [45] [80]

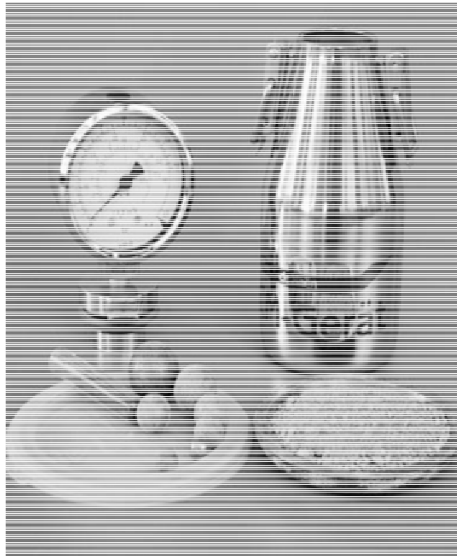
## Darrmethode

Die Darrmethode zählt zu den gravimetrischen Verfahren und ist die genaueste und am besten reproduzierbare Methode. Somit stellt das Darr-Verfahren, das Referenzverfahren für viele Feuchtemessungen dar. Die anderen, indirekten Feuchtemesstechniken können anhand dieses Verfahrens kalibriert werden. Allerdings ist diese Messung sehr zeitintensiv und benötigt eine Laborausrüstung, die für eine routinemäßige Feuchteuntersuchung auf der Baustelle eher schlecht geeignet ist. Bei dieser Methode handelt es sich um eine zerstörende Prüfung, die wie folgt durchzuführen ist. [22] [24]

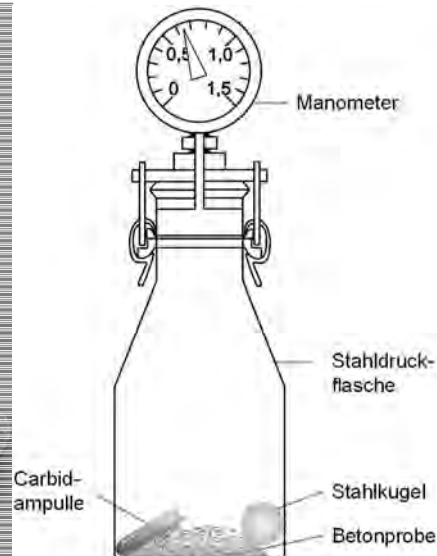
Vor Ort wird aus der Betonrandzone eine Probemenge mittels Hammer und Meißel entnommen. Das Probengewicht sollte über 100 g schwer sein. Es ist außerdem darauf zu achten, dass kein Betonmehl mit herausgenommen wird, da durch die Reibungswärme Feuchte verloren gehen könnte. Die Proben werden für den Transport ins Labor in geeignete Behälter gegeben, um möglichen Feuchteverlust oder -aufnahme zu vermeiden. Im Labor wird der massebezogene Wassergehalt der Baustoffprobe mittels Wägung und Trocknung ermittelt. Für die Trocknung wird normalerweise ein Trockenschrank mit einer Temperatur von 105°C verwendet. Die Trocknungstemperatur liegt minimal über der Siedetemperatur des Wassers. Die Probemasse muss solange getrocknet werden bis das freie und eventuell Teile des physikalisch gebundenen Wassers komplett freigesetzt wird. Davon kann man ausgehen, wenn die Masse der Probe innerhalb von 24 Stunden nicht mehr als 0,1 % abnimmt. Durch die präzise Wägung vor und nach der Trocknung, ergibt dieser Massenunterschied, der auf die Masse des getrockneten Betons bezogen wird, den Feuchtegehalt in M-%. Bestimmt wird der Wassergehalt  $w_m = (m_f - m_{tr})/m_{tr} \cdot 100$  [M-%]. Dieses Verfahren kann auch als Referenzverfahren angesehen werden. Es ist allerdings abhängig vom Größtkorn und der Probengewinnung auf Abmessungen von etwa > 2 cm beschränkt. Bei der Trocknung mit erhöhten Temperaturen ist zu beachten, dass ein Teil des Gelporenwassers verdampft und dadurch ein höheres Ergebnis möglich ist. Trotzdem ist die Darrmethode eines der Messverfahren, bei dem höchste Genauigkeitswerte erreicht werden können. [22] [24]

## Calciumcarbid-Methode

Eine quantitative Methode die Bauteilfeuchte zu bestimmen, ist das gravimetrische Analyseverfahren mit Hilfe der Calcium-Carbid-Methode (CM-Gerät). Bei der Entnahme der Bruchstücke oder Bohrkerne müssen die Proben sofort luftdicht verpackt werden, um Verfälschungen durch Austrocknung zu vermeiden, oder umgehend direkt vor Ort auf der Baustelle nach dem Feuchtegehalt untersucht werden. Dazu wird die Probe sorgfältig zerkleinert, abgeseibt, gewogen und zusammen mit einigen Stahlkugeln und einer Glasampulle, in der sich 5 g Calciumcarbid befinden, in eine Druckflasche gefüllt. Danach wird die Stahlflasche mit einem Deckel, auf welchem sich ein Manometeraufsatz befindet, verschlossen (Abbildung 5 und 6). Durch Schütteln zerschlagen die Stahlkugeln die Glaspatrone und das Prüfgut wird mit dem Calciumcarbid vermischt. Unter Bildung von Acetylgas reagiert die in den zerkleinerten Betonbruchstücken enthaltene Feuchte chemisch mit Calciumcarbid. Der dabei in einer geschlossenen Stahlflasche entstehende Gasdruck ist abhängig vom Feuchtegehalt des Betons und wird am Manometer abgelesen. Auf den gravimetrischen Wassergehalt kann mittels Umrechnungstabellen geschlossen werden. [22] [25] [26]



**Abbildung 5: CM-Gerät [22]**



**Abbildung 6: Feuchtebestimmung mit der Calcium-Carbid-Methode aus [22] nach [27]**

#### Indirekte Messverfahren

Zur zerstörungsfreien oder zerstörungsarmen Messung werden in der Literatur verschiedene Verfahren angegeben, die sich aber allesamt nicht als Standardverfahren durchgesetzt haben. Problematisch ist erstens der inhomogene Aufbau des Betons samt seinem über viele Größenordnungen sich erstreckenden Porensystem, zweitens die am Beginn hohe Feuchtigkeit und drittens das starke alkalische Milieu (und ev. eine Versalzung) des Porenwassers.

Bei den indirekten Feuchtemessverfahren werden Substanzeigenschaften gemessen, die auf den Wassergehalt schließen lassen. Sie bilden einen funktionellen Zusammenhang mit der Feuchte. Diese Messverfahren sind für die Praxis auf der Baustelle vor Ort besser geeignet, da sie schneller zum Ergebnis führen und dabei zerstörungsfrei bzw. zerstörungsarm sind. [23]

Für die hier behandelten Zwecke werden am häufigsten elektrische Verfahren, die über Leitfähigkeit, kapazitiv oder mit Mikrowellen messen, genannt. Das am öftesten in der deutschsprachigen Literatur genannte Verfahren ist die Multiringelektrode. Allerdings hat sie bei nachträglicher Einbringung das Problem der fachgerechten Ankoppelung. Vor allem in über Kopf angebrachten Bohrlöchern in Tunnels ist eine fehlerfreie Einbettung sehr schwer zu realisieren. Radiometrische Verfahren, akustische Verfahren und thermisch arbeitende Verfahren kommen hier nicht in Betracht. Optische Verfahren, z.B. über Lichtleiter Feuchtesensoren scheinen in Entwicklung zu sein. Hygrometrisch im Bohrloch messende Verfahren, die die RF messen, werden ebenfalls genannt. Diese Verfahren arbeiten recht problemlos. Um aber auf Masse-% schließen zu können, müssen Kalibrierkurven erstellt werden. Diese Zusammenhänge werden aber in Kleingeräten angewandt und sind auch in größeren Forschungsprojekten eingesetzt worden [28].

#### Kalibrierung

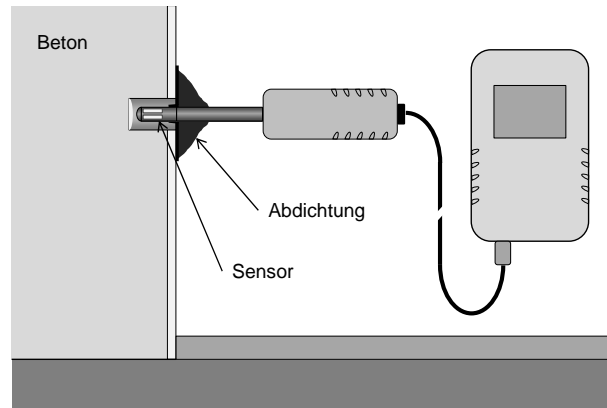
Für alle Stoffe, die für praktische Feuchtemessungen geeignet sind, werden analytische, direkte Bestimmungsverfahren benötigt. Diese sind in Normen oder Vorschriften niedergelegt

und dienen als Grundlage für die Kalibrierung indirekter Messverfahren. Bei der Feuchtemessung für Baustoffe wird vorzugsweise die Darmmethode als Referenzverfahren verwendet. Das Ziel jeder Messung sollte die Einheitlichkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sein. Bei den indirekten Messverfahren wird eine feuchteabhängige physikalische Größe an der Probe gemessen. Diese Verfahren benötigen eine Kalibrierung, also einen Vergleich mit einem Referenzverfahren, um die Feuchte bestimmen zu können. Bei der Messung spielen weitere Parameter, wie die Dichte, Temperatur, chemische Zusammensetzung, Struktur und die unterschiedlichen Bindungsformen des Wassers eine wichtige Rolle. Darum müssten theoretisch alle Einflussparameter konstant gehalten oder ihre Einflüsse kompensiert werden. Dies ist aber nicht realisierbar oder nur bei wenigen Parametern, wie der Temperatur und der Dichte möglich. Eine gewisse Streuung der Messergebnisse kann nicht verhindert werden. Es sollte aber darauf geachtet werden, dass bei der Durchführung keine weiteren Fehler auftreten. [29]

### Hygrometrische Verfahren

Das hygrometrische Verfahren wird auch als Feuchteausgleichsverfahren bezeichnet. Hierbei wird die Feuchte nicht direkt am Beton gemessen, sondern indirekt über die Luft oder Stoffe, die mit dem Baustoff in Kontakt stehen. Der Feuchteausgleich zwischen dem berührenden Medium und dem Beton findet so lange statt, bis ein Feuchtegleichgewicht entstanden ist. Es ist darauf zu achten, dass kein Feuchteausgleich mit der Umgebung möglich ist. Dieses Feuchtemessverfahren ist zwar sehr einfach in der Anwendung, jedoch muss man etwa einen halben Tag einplanen, da bei dichten Baustoffen wie Beton die Ausgleichsfeuchte sich erst nach einiger Zeit einstellt. Außerdem ist diese Technik nur im hygroskopischen Feuchtebereich des Betons anwendbar. Man kann zwischen zwei Vorgehensweisen unterscheiden. [22] [24]

Bei der Messung auf der Baustoffoberfläche wird der zu untersuchende Bereich des Betons mit luftundurchlässiger Folie abgedeckt, sodass ein kleiner Luftraum zwischen Beton und Folie entsteht, der von der übrigen Umgebungsluft abgedichtet ist. Der Messsensor wird ebenfalls in den Luftspalt eingebracht und sorgfältig abgeklebt, damit alles dicht ist. Nun kann sich die Luft in der geschaffenen Messkammer an die Feuchte der Betonoberfläche anpassen. Alternativ hierzu kann die Messung auch im Baustoff selbst erfolgen (vgl. Abbildung 7). Dafür muss das notwendige Bohrloch langsam in den Beton eingebracht werden, so dass kaum Hitze durch das Bohren entsteht. Nach dem Entfernen des Bohrmehls und der Abkühlung wird ein Messfühler oder ein Stück Holz in das Bohrloch eingeführt, und wieder luftdicht verschlossen. Sobald die Gleichgewichtsfeuchte eintritt kann der Feuchtegehalt abgelesen werden. Die Feuchte, die das Holzstück aufgenommen hat, kann sehr genau mit einem elektrischen Widerstandsmessgerät bestimmt werden. Mit diesem Verfahren ist es möglich eine tiefengestaffelte Feuchtemessung durchzuführen. [22] [24]



**Abbildung 7: Schematische Darstellung des hygrometrischen Feuchtemessgeräts nach [30]**

### Elektrische Widerstandsmessverfahren

Diese Methode gehört zu den zerstörungsfreien bzw. zerstörungsarmen Messverfahren. Durch Messung des Widerstands des Betonbauteils kann mittels zweier Elektroden auf die Feuchte im Beton geschlossen werden. Die Versuchsdurchführung ist relativ einfach und es wird wenig Zeit benötigt. Für zeitabhängige Messungen von Feuchteänderungen ist diese Methode genauso geeignet, wie für automatische Messwerverfassungen. Feuchte mineralische Baustoffe haben einen geringeren Widerstand und leiten elektrischen Strom infolgedessen besser als trockene Materialien. Die Schwierigkeit liegt beim Übergangswiderstand, da dieser konstant gehalten werden muss. Bei harten Baustoffen wie Beton gestaltet es sich jedoch schwierig, einen ausreichenden und gleichbleibenden Kontakt zwischen Sonde und Beton herzustellen. Das Messgerät errechnet den Widerstand über erzeugte Größen (Spannung und Messstrom). Der Messwert zeigt bei trockenen Baustoffen einen höheren Widerstand als bei feuchtem Baustoffen. [22] [24] [31]

Die Elektroden können auch direkt bei der Betonherstellung einbetoniert oder nachträglich in Bohrlöcher angebracht werden. Bei Letzteren ist es wichtig, dass ein Bohrer mit niedriger Drehzahl verwendet wird, um eine Erhitzung des Betons zu vermeiden. Der Raum zwischen der Sonde und der Bohrlochwandung muss mit Zementleim oder Ankopplungsmörtel verfüllt werden. Der hierfür verwendete Zement sollte dem der Betonherstellung sehr ähnlich sein. Um das Messergebnis nicht zu verfälschen, muss anschließend systembezogen kalibriert werden. [22] [32]



**Abbildung 8: Elektrische Widerstandsmessung mit einem Gerät der Firma GANN; geeignete Elektrodenpaare sind von 2,5 bis 30 cm Länge erhältlich [33]**

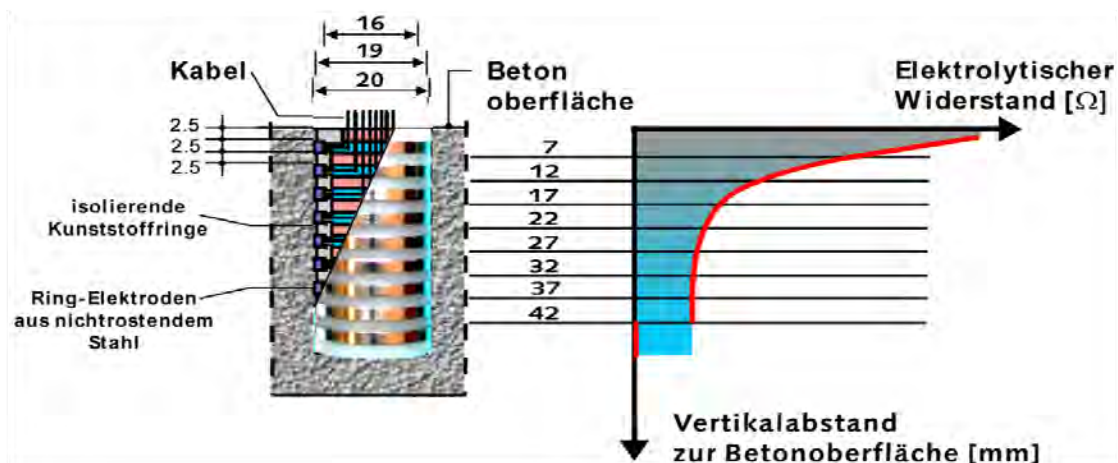
## Multi-Ring-Elektroden

Die sogenannten Multi-Ring-Elektroden sind für das elektrische Widerstandsmessverfahren besonders gut geeignet. Die Elektrode besteht meist aus neun Edelstahlmetallringen, die jeweils 2,5 mm dick sind, und dazwischenliegenden Isolierringen. Die als Steckbauweise ausgeführte Multi-Ring-Elektrode kann somit in ihrer Länge beliebig variiert werden. Das Tiefenprofil beträgt bei neun Metallringen ca. 50 mm und der Außendurchmesser 20 mm. Es kann ein Messprofil von acht Messpunkten erreicht werden, die im Abstand von 5 mm erfasst werden. Mit einem geeigneten Messgerät kann zwischen je zwei benachbarten Metallringen der Elektrolytwiderstand des Betons bestimmt werden und auf die Feuchte in der Betonrandzone geschlossen werden. [34] [32]



**Abbildung 9: Multi-Ring-Elektrode der Firma Sensortec GmbH [35]**

Die schematische Darstellung in Abbildung 10 zeigt neben einer Multiring-Elektrode ein typisches Widerstandsprofil eines austrocknenden Betons. Über das bekannte Wirkprinzip ist es möglich, ein Profil des spezifischen Widerstandes von 7 mm bis in 42 mm Tiefe zu erfassen. [86]



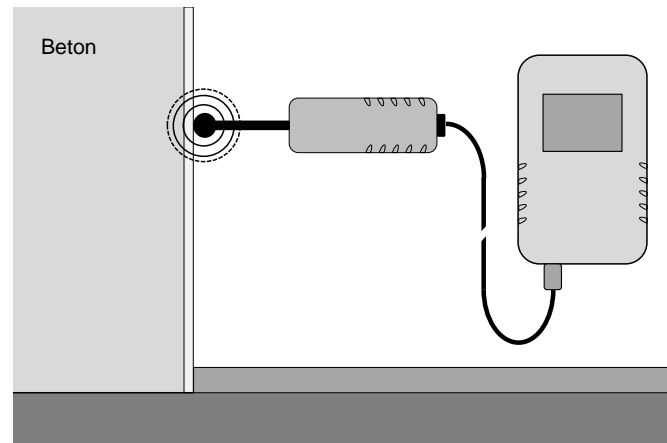
**Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Multiring-Elektrode und typisches Widerstandsprofil eines austrocknenden Betons [36]**

Die Leitfähigkeit ist aber sehr stark vom Salzgehalt im Beton abhängig.

## Kapazitive Messverfahren

Die kapazitive Messung zählt zu den niederfrequenten dielektrischen Messverfahren. Bei dieser zerstörungsfreien Messtechnik wird über das Frequenzfeld eines Kondensators die Dielektrizitätskonstante des Baustoffs gemessen. Der niederfrequente Bereich liegt bei Frequenzen unter 100 MHz. Das Messverfahren beruht auf dem Prinzip eines Kondensators, der üblicherweise aus zwei gegenüberliegenden, stromleitenden, sich nicht berührenden Platten besteht. Werden diese Platten mit Strom verbunden, so lädt sich eine Platte positiv und die andere negativ auf. Demzufolge baut sich zwischen den beiden Platten ein

elektrisches Feld auf. Die dadurch erzeugte elektrische Energie kann gespeichert werden. Dieses Speichervermögen wird als Kapazität bezeichnet. In der Praxis werden Messgeräte mit Kondensatorplatten oder Streufeldkondensatoren eingesetzt, wobei die Kondensatorplatte auch im Messgerät als kugelförmiger Kondensator integriert sein kann. [37] [38] [39]



**Abbildung 11: Schematische Darstellung des kapazitiven Messprinzips nach [30]**



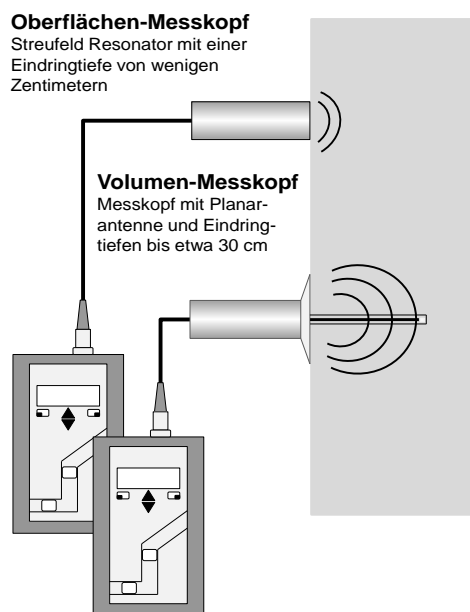
**Abbildung 12: Kapazitives Messgerät der Firma GANN, mit dem Feuchtemessungen bis zu einer Tiefe von 4 cm möglich sind [33]**

Die Dielektrizitätszahl von Luft liegt bei 1 und die von Wasser bei 80, somit erhöhen feuchte Baustoffe die Kapazität und den Messwert. Da jeder Baustoff eine andere Dielektrizitätszahl besitzt, müssen Referenzmessungen an einem trockenen Feststoff dieser Art durchgeführt und abgeglichen werden. Nur so kann ein brauchbares Ergebnis der Feuchte wiedergegeben werden. Das Messergebnis, das meist in digits angegeben wird, kann durch Salzablagerungen im Baustoff stark erhöht werden. Die Dichte des Baustoffes und die im Beton liegende Bewehrung haben ebenfalls Einfluss auf die Dielektrizitätskonstante und so auf den Messwert. [22] [39]

#### Mikrowellenmessverfahren

Das zerstörungsfreie Mikrowellenmessverfahren gehört zur Kategorie der hochfrequent dielektrischen Messtechniken und basiert auf den dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Da Wasser ein polares Molekül ist, beginnt dieses bei der Anlegung eines Mikrowellenfeldes mit der Frequenz des Feldes zu rotieren. Gekennzeichnet wird dieser Effekt durch die Dielektrizitätskonstante. Die Werte dieser Konstante weisen einen sehr großen Unterschied zwischen Wasser und dem zu untersuchenden Baustoff auf, den sich dieses Messverfahren zu Nutze macht. Bekanntlich liegt die Dielektrizitätskonstante von Wasser bei 80 und die von Baustoffen im Bereich von 2 bis 10 und vorzugsweise zwischen 3 und 6. Somit können auch kleinere Wassermengen ermittelt werden. Der Frequenzwert von 2,45 GHz hat sich als sinnvoll erwiesen, da hier die Wellenlänge für eine hohe Eindringtiefe noch ausreichend groß ist und die dielektrischen Verluste für die Messung des

Wassergehaltes bereits hoch genug sind. Hierbei gibt es verschiedene Messköpfe, die unterschiedliche Eindringtiefen erfassen können und eine tiefenabhängige Feuchtemessung ermöglichen. Die Messköpfe werden auf die Materialoberfläche aufgesetzt, wobei die in den Baustoff hineinlaufende elektromagnetische Welle als auch die vom Baustoff reflektierte Welle gemessen werden. Diese Messköpfe sind materialspezifisch über das Darr-Verfahren kalibriert. In Abbildung 3 sind die verschiedenen Eindringtiefen deutlich zu erkennen. Bei einem Oberflächenmesskopf dringt das Streufeld material- und feuchteabhängig ca. 1 bis 3 cm in den Baustoff ein. Der Volumenmesskopf besitzt eine Antennenanordnung und es können Feuchtemessungen bis zu einer Tiefe von 30 cm durchgeführt werden können. Eine schematische Darstellung der Messköpfe ist aus der Abbildung 3 zu entnehmen. Die Vorteile dieser Messmethode liegen klar darin, dass die Messungen von Salzen kaum beeinflusst werden. Die Messgenauigkeit, Messgeschwindigkeit und Reproduzierbarkeit ergeben ein gutes Gesamtpaket. [40] [41]



**Abbildung 13: Mikrowellenfeuchtemessung für die Oberflächen- und Volumenmessung aus [22] nach [41]**



**Abbildung 14: Messsystem mit Messköpfen der Moist-Serie der Firma hf sensor GmbH [43]**

Bei der sogenannten Mikrowellen-Rasterfeuchtemessung kann anhand von charakteristischen Merkmalen die Ursache für die vorhandene Feuchte ermittelt werden. Hierbei wird die Feuchte mittels Messpunkten, die in einem Raster angeordnet sind, sowohl an der Oberfläche als auch im Volumen aufgenommen. Bei der Auswertung kann nun festgestellt werden, ob es sich z.B. um Kondensatfeuchte, Baurestfeuchte oder aufsteigende Feuchte handelt. Die Feuchteverteilungsbilder, wie in Abbildung 5, sind eine große Hilfe bei der Klärung von Schadensursachen, da diese bestimmte Merkmale von unterschiedlichen Verteilungen der Feuchtypen wiedergeben. [42]



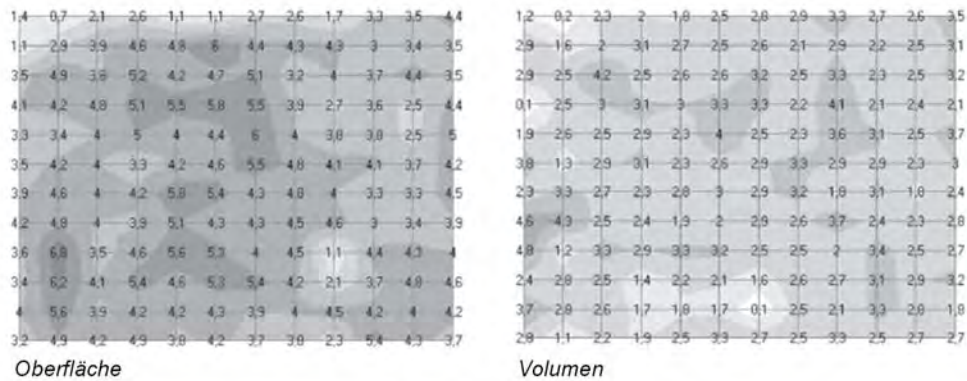


Abbildung 15: Kombinierte Kondensat- und Baurestfeuchte [42]

### Neutronenmessverfahren

Die Neutronenmessung gehört zu den Kernstrahlungsverfahren. Bei diesem Feuchtemessverfahren werden Neutronen mit hoher kinetischer Energie vom Messgerät in den Baustoff eingestrahlt. Die sogenannten schnellen Neutronen werden durch elastische Stöße mit Atomkerne kleinerer Masse, den Wasserstoffatomen, abgebremst. Mit der Rückstreuung ist dieser Effekt verhältnismäßig gut messbar. Umso höher der Feuchtegehalt im Baustoff, desto höher ist auch die Anzahl an Wasserstoffatomen. Demzufolge können mehr schnelle Neutronen in ihrer Geschwindigkeit reduziert und mit einem integrierten Zählrohr erfasst werden. Bei dem Messgerät handelt es sich um eine Neutronensonde (Abbildung 6), die akkubetrieben und mit ihren 4 kg relativ leicht zu transportieren ist. Die Auszählung der Elektronen erfolgt automatisch und wird auf einem LCD-Display angezeigt. Bei der Anwendung von Neutronenmessgeräten ist die Strahlenschutzbestimmung zu beachten und erfordert ein besonders geschultes Bedienpersonal mit speziellen Schutzvorkehrungen vor Ort. Bei diesem Messverfahren wird das chemisch gebundene Wasser ebenfalls erfasst und kann das Messergebnis verfälschen. [22] [23] [44] [45]

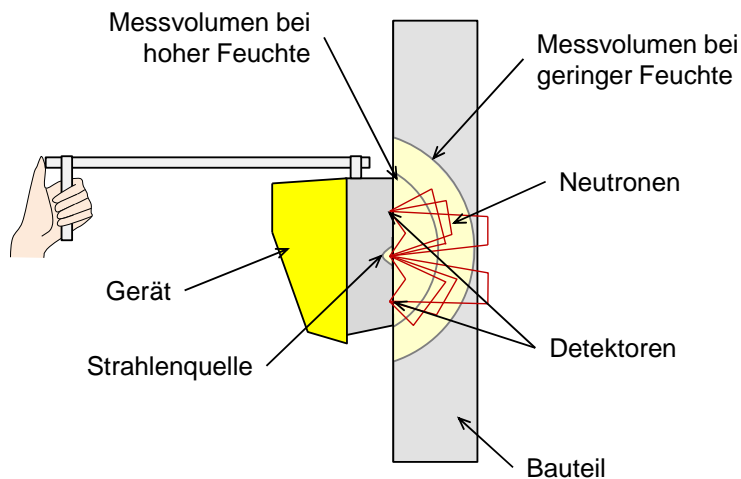


Abbildung 16: Neutronensonde nach [44]

In mineralischen Baustoffen ermöglicht die Neutronensonde eine zerstörungsfreie, genaue und relativ schnelle Feuchtemessung in oberflächennahen Bereichen. Bei dem Messergebnis handelt es sich um ein Maß für die im Baustoff enthaltenen Wasserstoffkerne je Volumeneinheit. Um den tatsächlich masse- oder volumenbezogenen Feuchtegehalt angeben zu können, ist eine baustoffbezogene Kalibrierung nötig. Die Messtiefe reicht bis zu 20 cm und nimmt bei höheren Feuchtegehalten ab. [22]

## Infrarotmessverfahren

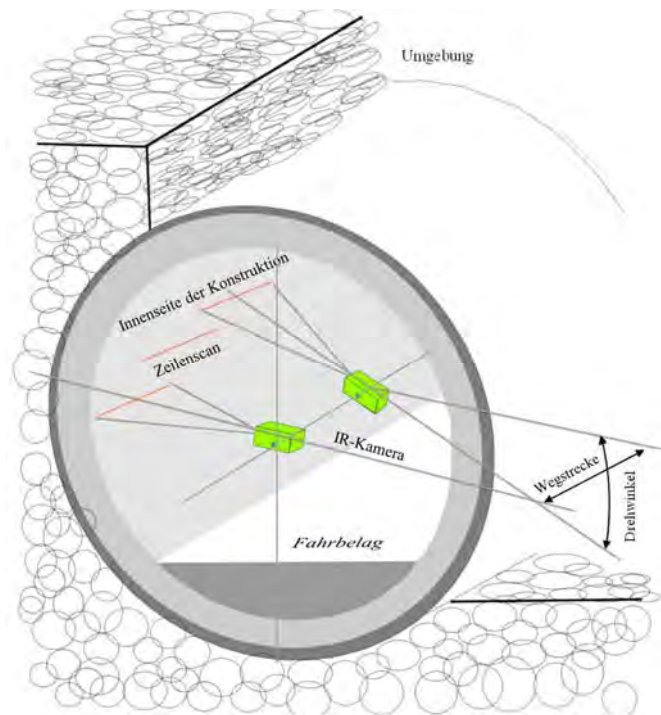
Das Infrarotmessverfahren oder die Infrarot-Reflektographie ermöglicht eine bildliche Darstellung der Feuchteverteilung auf Körperoberflächen. Das Wirkprinzip beläuft sich auf die sogenannten Absorptionsbanden, welche das Wasser im Spektrum der Infrarotstrahlung aufweist. Bei dieser Methode werden Energieimpulse auf eine Bauteiloberfläche gerichtet, wodurch dort ein Temperaturfeld entsteht und die Wellenlängenintervalle im Beton aufgrund des Wassers selektiv absorbiert werden. Die Intensitäten werden dazu bei kurz- und langwelliger Strahlung, in denen das Wasser stark bzw. schwach absorbiert wird, miteinander verglichen. Auf den Infrarotbildern sind die feuchten Bereiche als dunklere Stellen zu sehen. Die Abbildung 27 veranschaulicht dieses Phänomen deutlich. Die dunkle Zone zeigt den Bereich, in welchem die Infrarotstrahlung wegen des Wassers im Gefüge nicht reflektiert wird. So können vor allem Leckwasserstellen, Risse und Materialunebenheiten gefunden werden. [45a] [46]



**Abbildung 27: Datensatz einer Durchfeuchtung in einem Stollen [45a]**

Dieses Verfahren arbeitet zerstörungsfrei und erlaubt in kurzer Zeit einen Überblick der herrschenden Feuchteverhältnisse im Inneren eines Bauwerks. Somit zeigt diese Methode das Ausmaß und die Örtlichkeit einer Durchnässung. Es ist aber nicht dazu geeignet den Grad der Durchfeuchtung anzugeben. Man kann lediglich festhalten, dass je dunkler die Oberfläche abgebildet wird, desto durchnässter ist dieser Bereich. Das Prüfverfahren bedarf allerdings sowohl ein kostspieliges Equipment als auch eine aufwendige Auswertung der Messdaten im Labor. [45a]

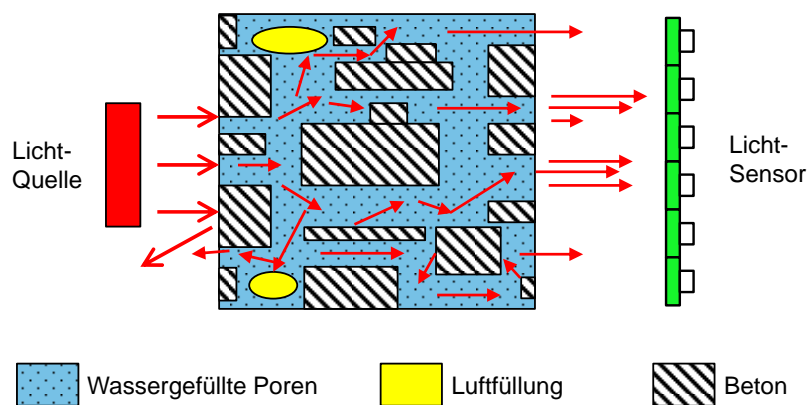
Die Infrarotkameras, die mit kurz- und langwelliger Strahlung die Oberfläche des Bauteils aufnehmen, können auf einem Fahrzeug montiert werden. Die Abbildung 8 skizziert eine Anwendungstechnik für die Infrarot-Inspektion einer Tunnelkonstruktion. Die Oberfläche wird mit einem Rotationsprisma kontinuierlich abgetastet. Dabei muss die Fahrgeschwindigkeit mit der Abtastgeschwindigkeit synchronisiert werden, da nur so sinnvolle Messergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt geometrisch exakt zugewiesen werden können. [45a]



**Abbildung 18: Skizze zur Anwendungstechnik für die Infrarot-Inspektion einer Tunnelkonstruktion [45a]**

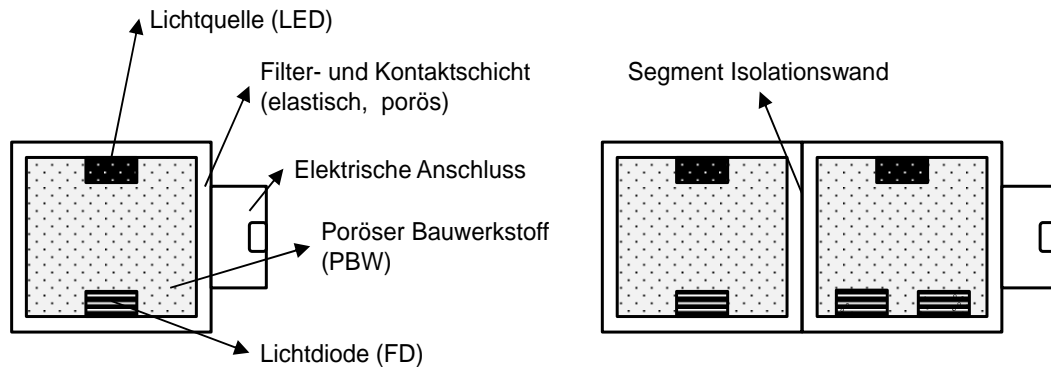
### Optisches Messverfahren

Bei den optischen Verfahren wird mit der Lichtdurchlässigkeit eines Stoffes gearbeitet. Der Feuchtegehalt im Bauteil kann bis zu einer Tiefe von neun Millimeter ermittelt werden. Poröse Baustoffe weisen durch den Porenfeuchtegehalt eine bestimmte Lichtdurchlässigkeit auf, wobei die Gefügebestandteile des Baustoffs eigentlich als weitgehend lichtundurchlässig gelten. Das Licht wird nur in wassergefüllten Poren durch die Probe gestreut. Je mehr Feuchte im Baustoff vorhanden ist, desto größer ist auch die Lichtdurchlässigkeit. Das Prinzip dieser Messung wird in Abbildung 3 verdeutlicht. Bei diesem stark vereinfachten Modell wird die Lichtstreuung hauptsächlich durch Beugungserscheinungen an Gefügebestandteilen wie Porenengstellen oder Oberflächenrauigkeiten hervorgerufen oder durch eine Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft. [47]



**Abbildung 39: Prinzip des Optischen Messverfahrens nach [47]**

Der lichtoptische Feuchtesensor besteht aus einem kleinen robusten Gehäuse, in dem Lichtquelle und -empfänger integriert sind (Abbildung 20). Mit Hilfe einer Infrarot-LED wird das Licht durch die Porenfeuchtigkeit transmittiert. Die Lichtintensität kann dann von der gegenüberliegenden Fotodiode aufgenommen werden. Die Werte von jedem Sensor werden im Labor mit verschiedenen Durchfeuchtungsgraden kalibriert. [47]



**Abbildung 20: Schematischer Aufbau des lichtoptischen Feuchtesensors nach [47]**

Das Modell des lichtoptischen Feuchtesensors kann als Ein- oder Mehrsegmentsensor ausgeführt werden. Durch seine kompakte Größe kann er direkt bei der Herstellung des Bauwerks oder nachträglich in das Bauteil eingebaut werden. Eine Langzeitfeuchtemessung ist demnach möglich. Zudem bietet diese Messung große Vorteile, wie beispielsweise die Unabhängigkeit der Messung vom Salzgehalt der Porenlösung und der Temperatur, was bei vielen anderen Messtechniken ein Problem darstellt. [47]

#### Thermische Messverfahren

Die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Baustoffes hängt allgemein von dessen Feuchtegehalt ab. Bei der Messung müssen die Wärmeleitfähigkeit und deren Abhängigkeit von der Baustofffeuchte bekannt sein. Wärmeleitungsprozesse sind an örtliche Temperaturdifferenzen gebunden, während Temperaturänderungen einen Feuchtetransport bewirken. Somit kann man mit der Wärmeleitfähigkeitsmessung auf die Feuchte des Materials schließen. Bei der Sondenmethode wird ein elektrisch beheizter Widerstandsdraht in das Bauteil eingeführt, dabei genügt ein Lochdurchmesser kleiner als 1 cm. Mit der Temperatur der direkten Umgebung des Drahtes kann in Verbindung mit der Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes den Feuchtegehalt abgeleitet werden. Eine baustoffspezifische Kalibrierung mit dem Darrverfahren ist dabei zu empfehlen. Dieses Verfahren arbeitet zerstörungsarm und erlaubt auch Feuchtemessungen in der Bauteiltiefe. [23] [48] Eine handelsübliche Messsonde ist in der Abbildung 21 dargestellt.



**Abbildung 21: Sonde zur Messung der Wärmeleitfähigkeit der Firma TeKa [49]**

**Tabelle 2: Gegenüberstellung der einzelnen Messverfahren – Überblick [2]**

<b>Messverfahren</b>	<b>Messtiefe</b>	<b>Vorteil</b>	<b>Nachteil</b>	<b>Einflüsse</b>
Darrmethode	Beliebige Tiefenmessung	Sehr genaue Ergebnisse	Starke Zerstörung	
Calciumcarbid-Methode	Tiefenmessung	Zur Kalibrierung geeignet	Mögliche Erwärmung bei Entnahme	
Feuchteausgleichsverfahren	Tiefengestaffelte Messung möglich	Zerstörungsarm Schnelles Ergebnis	Bohrlöcher für Tiefenmessung	Salze
Widerstandsmessverfahren	Unterschiedliche Tiefenprofile von 2,5 bis 30 cm	Zerstörungsfrei bzw. -arm Einfache Handhabung	Umrechnung nötig Meist Bohrlöcher nötig	Salze Metalle
Kapazitives Messverfahren	Oberflächennah bis 4 cm	Langzeitüberwachung möglich Zerstörungsfrei Handliches Messgerät	Messgerät muss ruhig stehen	Metalle Salze
Mikrowellenmessverfahren	Oberflächennah als auch in Tiefen bis zu 30 cm	Zerstörungsfrei Hohe Eindringtiefe Kurze Messzeit	Viele einzelne Messungen für flächiges Ergebnis notwendig	Materialdichte Materialkörnung
Neutronenmessverfahren	Tiefen bis zu 25 cm	Sehr schnelles Ergebnis Tiefenmessung möglich	Strahlenschutz erforderlich Chem. geb. Wasser wird miterfasst	Dichte des Baustoffes
Infrarotmessverfahren	Reine Oberflächenmessung	Berührungslos Gute Visualisierung	Witterungsabhängig	Regen Staub
Optisches Messverfahren	Oberflächennah bis 9 mm	Unabhängig von Salzgehalt und der Temperatur Langzeitfeuchtemessung möglich	Keine Angabe des Feuchtegehaltes Messeinrichtung kann nur schlecht nachträglich eingebaut werden	Dichte des Baustoffes
Thermische Messverfahren	Tiefenmessung möglich	Zerstörungsarm	Noch problematisch in der Anwendung und nicht reproduzierbar	

### 3.4 Feuchte im Beton

Der hygrisch aktive Bestandteil von Beton, der Zementstein, besteht aus den allgemeinen Hydratationsprodukten, Poren mit enthaltener Porenflüssigkeit sowie noch unreaktiertem Zementklinker. Das Porengefüge ist weiterhin von dem Bindemittel und der Menge des eingesetzten Wassers abhängig. Wasser kann in unterschiedlichen Arten im Beton vorkommen. Im Laufe der Hydratation kann das Wasser in verschiedenen Bindungszuständen vorliegen [50]: Als freies Wasser im Porenraum, als physikalisch gebundenen Wasser und als chemisch gebundenes Wasser. (Details in [2])

Die Ursache für eine Durchfeuchtung poriger Stoffe sind [2]:

#### Ausgleichsfeuchte mit Umgebungsluft

Die Umgebungsfeuchte ist ein wesentlicher Faktor zur Bestimmung der Feuchtigkeitsabgabe und -aufnahme im Beton. Beide Prozesse beruhen auf Sorptionsvorgängen und werden von der Porenstruktur des Baumaterials maßgeblich beeinflusst. Die Porenräume an der Oberfläche des porösen Baustoffes versuchen einen thermodynamischen Gleichgewichtszustand mit der wasserdampfhaltigen Luft der Umgebung zu erreichen. Durch Adsorption aufgrund der van der Waal'schen Anziehungskräfte können entsprechend der Feuchteverhältnisse der Umgebungsluft Wassermoleküle an den Porenwandoberflächen gebunden werden. Je kleiner die Porenradien sind, umso eher kommt es schon bei verhältnismäßig niedrigen Luftfeuchten zur Wasserdampfkondensation. Die Dicke der Wassermolekülschichten an den Porenwandungen nimmt während der Kondensation zu. Der hygroskopische Baustoff Beton, wird also so lange an den inneren Oberflächen seines Porensystems Wassermoleküle binden, bis er dem Feuchtezustand der umgebenden Luft entspricht. Da sich die Ausgleichsfeuchte in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte einstellt, kann die im Baustoff vorhandene Feuchtigkeit verschiedene Ausgleichsfeuchten annehmen. Diese Schwankungen können sich im Verlauf eines Tages als auch über einen kompletten Jahreszyklus hin verändern. Bei kurzfristigen Änderungen der Umgebungsfeuchte sind nur die oberflächennahen Schichten des Betons betroffen. Bei trockener Witterung kann demzufolge der Beton bis zu einer gewissen Tiefe austrocknen und Regenperioden bestimmen das Maß der Wassersättigung an der Betonoberfläche. Diese Randzone beschränkt sich in etwa auf die äußeren 15 mm und ist unabhängig davon, ob das Bauteil im Freien oder unter Dach der Witterung ausgesetzt ist. Die Kernfeuchte im Bauteilinneren bleibt dabei nahezu unberührt. Bei stetiger Steigerung der Umgebungsfeuchte ist hingegen auch die Kernfeuchte betroffen, wobei dort dann ebenfalls Veränderungen des Wassergehaltes zu verzeichnen sind. [22] [34] [51] [52] [53] [54]

#### Restfeuchte aus der Herstellung

Bei einem gewöhnlichen Bauprozess wird für die Betonherstellung Wasser benötigt. Dieses Anmachwasser wird vom Zement bei einem w/z-Wert von etwa 0,4 nach längerer Hydratation vollständig gebunden. Für eine bessere Verarbeitung auf der Baustelle wird der Beton häufig mit einem höheren w/z-Wert hergestellt. Der Anteil des überschüssigen Wassers bleibt als ungebundenes Wasser in der Konstruktion zurück. Mittels Trocknung bzw. Diffusion kann diese Restfeuchte soweit entweichen, bis sich die in Abhängigkeit der Umgebungsluft baustofftypische Ausgleichsfeuchte einstellt [54]. Die Geschwindigkeit der Austrocknung und die sich einstellenden Endwerte sind stark vom Bindemittel [55] und dem Wassergehalt bei der Herstellung sowie dem Hydratationsgrad abhängig.

## Tauwasser

Wenn feuchte Luft schnell abkühlt, und dabei keinen Wasserdampf abgeben kann, erhöht sich die relative Luftfeuchte kontinuierlich bis zu einem Wert von 100 %. Diese Luft ist wasserdampfgesättigt, besitzt also bei einer bestimmten Temperatur den maximal möglichen Wasserdampfgehalt. Die Luft erreicht ihren Taupunkt und Tauwasser fällt bei weiterer Temperaturabsenkung aus. Dieser Vorgang ist vor allem dann sehr gut zu beobachten, wenn der Wasserdampf aus der Luft auf Bauteile mit niedrigerer Temperatur trifft. Der Wasserdampf kondensiert in Form kleiner Tropfen an der Oberfläche. Der Ausfall von Tauwasser kann sowohl an der Außenseite von Bauteilen, als auch im Bauteilinneren entstehen. [56] [57]

## Oberflächenwasser, Schadwasser und Undichtigkeiten

Oberflächen- und Schadwasser sind weitere Feuchteursachen. Darunter fallen auch Spritzwasser, die vor allem in den Betonrandzonen zur Feuchteanreicherung durch kapillares Saugen und Diffusion führen können.

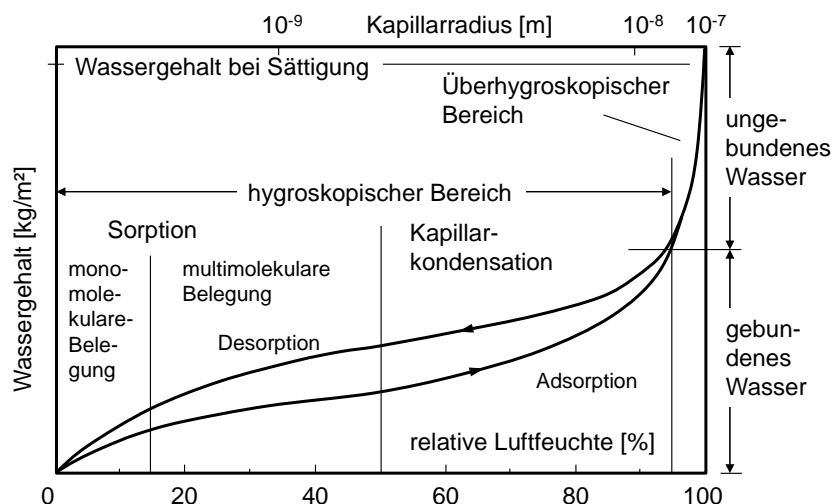
Durch Bauwerksbewegungen, Ausführungsfehler und äußere Einwirkungen können Undichtigkeiten in Form von Rissen entstehen, in die freies Wasser eindringen kann. Aber auch die durch den zu raschen Austrocknungsprozess entstandenen Schwindrisse stellen Schwachstellen in der Konstruktion dar.

## 3.5 Hygrische Eigenschaften des Betons

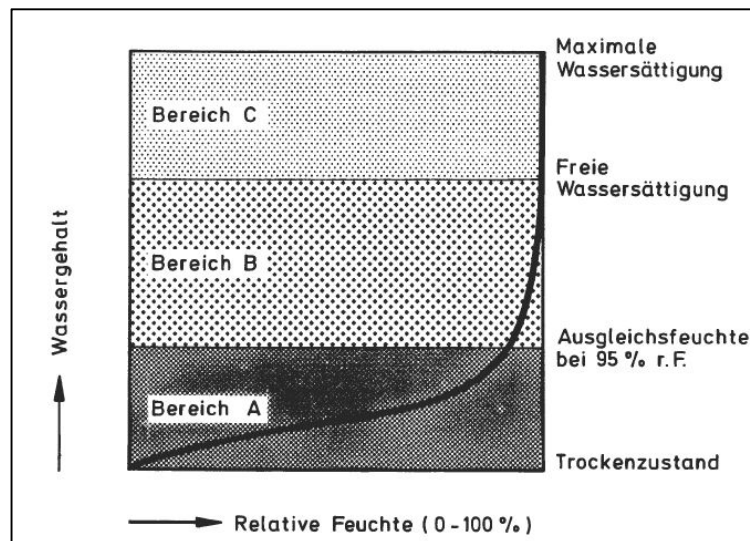
Zur Beurteilung der hygrischen Eigenschaften werden mehrere Ansätze verwendet:

### Feuchtespeicherung [18]

Die in einem Baustoff gespeicherte Feuchte kann in flüssiger, fester und dampfförmiger Form auftreten. [58] empfiehlt, aufgrund der nicht klar definierten Grenzen zwischen den einzelnen Zuständen und deren stetiger Änderung in Abhängigkeit der Umwelt, die Gesamtsumme dieser, den Gesamtwassergehalt, zu betrachten. Grundlegend lässt sich die Feuchtespeicherung von porösen mineralischen Baustoffen in drei Bereiche unterteilen (vgl. Abbildung 22 und 23), den Sorptionsfeuchtebereich (Bereich A), den Kapillarwasserbereich (Bereich B) und den Übersättigungsbereich (Bereich C). Für den Brandfall und Abplatzungen ist zudem das chemisch gebundene Wasser von Bedeutung, welches hingegen für die Berechnungen im Porenraum keine Bedeutung hat. [58, 59]



**Abbildung 22: Beispiel für eine Sorptionsisotherme von Beton [60]**



**Abbildung 23 Bereiche der Feuchtespeicherung [58]**

#### Sorptionsfeuchtebereich

Innerhalb des Sorptionsfeuchtebereichs findet im Beton die Anlagerung von Wasser aus der anliegenden Luft bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes statt. Das Verhältnis zwischen der Menge des im Beton angelagerten Wassers und der anliegenden relativen Feuchte wird durch die Sorptionsisotherme angegeben. [61]

Der Sorptionsfeuchtebereich kann dabei in unterschiedliche Teilbereiche untergliedert werden. Bis zu einer relativen Feuchte (r.F.) von 15 % liegt im Beton eine monomolekulare Belegung vor, bei welcher das Adsorbat direkt an eine Oberfläche gebunden wird. Zwischen 15 % r.F. und 50 % r.F. findet eine multimolekulare Anlagerung statt. An die Adsorbatschicht der monomolekularen Anlagerung werden nun weitere Sorbatschichten angehängt, weshalb die Wasserspeicherkapazität des Baustoffs steigt.

#### Kapillarwasserbereich

Oberhalb von 50% r.F. tritt die Kapillarkondensation auf (überhygroskopischer/hygroskopischer Bereich). Die Kapillarkondensation beschreibt die Kondensation von Wasser in engen Kapillarporen. Wasserdampf diffundiert hierbei zum geringeren Potential in kleinere Poren und kondensiert dort. Dies geschieht durch eine Verringerung des Sättigungsdampfdruckes aufgrund von konkav gekrümmten Menisken (Gesetz von Kelvin-Thomson). Die Annahme eines sphärischen Meniskus in einer Zylinderkapillare ermöglicht die Berechnung des Zeitpunktes der vollständigen Sättigung durch Kapillarkondensation mittels der Kelvin-Thomson-Beziehung. [61, 62]

Die freie Wassersättigung wird in [2] als die Sättigung beschrieben, die unter Normaldruck und ohne den Einfluss äußerer Kräfte erreicht werden kann. Beton, in Kontakt mit flüssigem Wasser, nimmt bis zur freien Wassersättigung stets Wasser auf. [2, 61]

Der physikalische Effekt, der diesem Phänomen zu Grunde liegt, ist die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten. Die Oberflächenspannung wird durch die Kohäsion, dem molekularen Zusammenhalt innerhalb eines Stoffes, beschrieben. Das kapillare Saugen wird durch die Adhäsions- und Kohäsionskräfte bestimmt. Die Adhäsion beschreibt den Zustand der Grenzschicht zwischen einer Flüssigkeit und einer Oberfläche. Durch das Bestreben des



Wassers Oberflächen zu benetzen kommt es nach [59] innerhalb einer Kapillare zum Aufsteigen und Ausbilden eines konkaven Meniskuses. [2, 19, 58]

Der Kapillardruck (Saugspannung) ist nach [58] als Ursache für das Ansteigen und Absinken des Wassers in der Kapillare (Kapillarszension und Kapillardepression) zu benennen. Das kapillare Saugen führt nach [61] auch dazu, dass beim in Kontakt treten zweier Baustoffe mit unterschiedlichem Kapillarporengehalt, der Baustoff mit niedrigerer Feuchte dem Feuchteren, diese solange entzieht, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der Gleichgewichtszustand ist daher durch den Kapillardruck definiert, weshalb zwei in kontaktstehende Baustoffe unterschiedliche Wassergehalte aufweisen können. Unterschiedlicher Kapillardruck lässt im Umkehrschluss darauf schließen, dass die Porengrößenverteilung zueinander abweicht. Für gleiche Materialien kann gefolgert werden, dass sich über die Schichtgrenzen hinweg ein Gleichgewicht einstellt. Die Saugspannungskurve beschreibt die Speicherfunktion von Wasser für den Kapillarwasserbereich. [58] verweist darauf, dass es zur Hysterese zwischen Be- und Entfeuchten kommen kann, jedoch verweist [58] auch auf einen geringfügigen Einfluss für die meisten mineralischen Baustoffe, da hier eine breite Porengrößenverteilung vorliegt und somit die für die Hysterese verantwortliche Saugspannungskurve flach ist. [61, 63]

#### Übersättigungsbereich

Der Übersättigungsbereich beschreibt nach [2, 19, 61] die Spanne zwischen der freien Wassersättigung und der maximal möglichen Sättigung. Bei der freien Wassersättigung sind Poren mit Wasser gefüllt, die unter natürlichen Bedingungen keine Wassersättigung erfahren würden. Eine freie Sättigung kann dabei, wie [61] festhält, nur dann erreicht werden, wenn an den Körper ein äußerer Druck angelegt wird oder sich Luft in Lufteinschlüssen im Porenwasser löst. Die Unterschreitung des Taupunktes führt zu einer hohen Sättigung im Baustoff aufgrund der erzwungenen Kondensation. Diese Effekte führen dazu, dass sich zwischen Feuchtepotential und Wassergehalt im Übersättigungsbereich kein eindeutiger Zusammenhang feststellen lässt. [19] hält fest, dass zudem zwischen übersättigten und kapillargesättigten Bereichen auch über einen längeren Zeitraum kein Feuchteausgleich durch Kapillartransport stattfindet. [2, 19, 61, 64]

#### Sorptionsisotherme und Feuchtespeicherfunktion

In der Literatur [19, 58, 59, 61] werden die Sorptionsisothermen als eine der wichtigsten hygri-schen Eigenschaften von porösen mineralischen Baustoffen, wie etwa Beton, betrachtet. Aufgrund von physikalischen Effekten unterscheiden sich die Sorptionsisothermen bei Adsorptions- und Desorptionsvorgängen. Je nach Detailgrad müssten die Sorptionsisothermen entsprechend ihrer Richtungen getrennt in ein Modell eingebunden werden. Die empirischen Untersuchungen von [58] belegen, dass die Hysterese für die meisten Baumaterialien nur sehr gering und damit vernachlässigbar ist. Weiterhin nennt [58] die Verwendung der Adsorptionsisotherme als Charakterisierung als ausreichend präzise. Die Sorptionsisothermen können durch Versuchsaufbauten im Labor bestimmt werden. Die DIN EN ISO 12571 [65] gibt ein potentiell Messverfahren vor. Dort werden in einem Exsikkator verschiedene Feuchtestufen erzeugt. Über gravimetrische Messungen des Probekörpers im Gleichgewichtszustand wird der aufgenommene Wassergehalt bei einer definierten anliegenden Luftfeuchte bestimmt. Dieses Verfahren führt zu einer hohen Genauigkeit bei der Bestimmung der Sorptionsisotherme. [65]

Eine weniger genaue Abschätzungsmöglichkeit der Sorptionsisotherme wird von [58] beschrieben. Dabei wird die Sorptionsisotherme anhand eines einzelnen Messpunktes bei 80 % r.F. approximiert.

Andererseits existieren auch detailreichere theoretische Modelle, die für die Bestimmung der Sorptionsisotherme verwendet werden können. Die meist bekannte Beschreibung findet sich im BET-Modell (Brunauer-Emmet-Teller-Modell nach [66]) wieder. Die BET-Theorie wurzelt auf der molekularen Anlagerung von Wasser an die Porenoberfläche. [59] verweist jedoch auf die Ungenauigkeit des Modells für zementbasierte Materialien für relative Feuchten von über 10 %, da unter solchen Umständen die theoretische und die tatsächliche multimolekulare Anlagerung nicht ausreichend genau beschrieben wird. Signifikant werden diese Abweichungen ab ca. 15 % relativer Feuchte. [59] bevorzugt die Verwendung des BSB-Modells (Brunauer-Skalny-Bodor-Modell [67]), da dieses Modell seine Messergebnisse besser beschreibt. Ein Vorteil des Modells ist, dass dieses lediglich den Wasserzementwert, den Zementtyp, die Erhärtingszeit und die Temperatur als Eingangsparameter benötigt. Darüber hinaus hat [59] das BSB-Modell modifiziert und mit empirischen Messungen belegt, dass es eine hohe Übereinstimmung der modellierten und gemessenen Werte aufzeigt. [19, 58, 59, 61, 66, 68, 69, 70, 71, 72].

Für die FEM-Simulation mit WUFI wird für die Beziehung zwischen der relativen Feuchte und dem Wassergehalt die Feuchtespeicherfunktion als Input-Parameter verwendet. Gemäß [73] sind die Sorptionsisothermen und die Feuchtespeicherfunktion bis zu einer relativen Feuchte von 95 % identisch. Eine Begründung dafür ist, dass im überhygroskopischen Bereich keine Diffusion stattfindet, auf welcher die Sorption beruht. Bei einer r.F. von 95 % sind nahezu alle Poren mit Wasser gefüllt und somit ist das Sorptionspotential überwunden. Da die Messung der Feuchtespeicherfunktion über Saugspannungsversuche stattfindet, können Werte oberhalb von 95 % Feuchte aufgenommen werden. Weiterhin sind die Sorptionsisotherme und die Feuchtespeicherfunktion „end-to-end“ verbunden und somit findet keine Unterscheidung im Anwendungsfall statt.

#### Feuchtetransporte [2, 18]

Die Feuchtetransportmechanismen in porösen Baustoffen können in flüssig und gasförmig aufgeteilt werden. Die wichtigsten Feuchtetransporte bilden die Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung. Vollständigkeit halber wird aber auf weitere Transportphänomene eingegangen. Die Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Transporteffekte mit ihren jeweiligen treibenden Potenzialen.

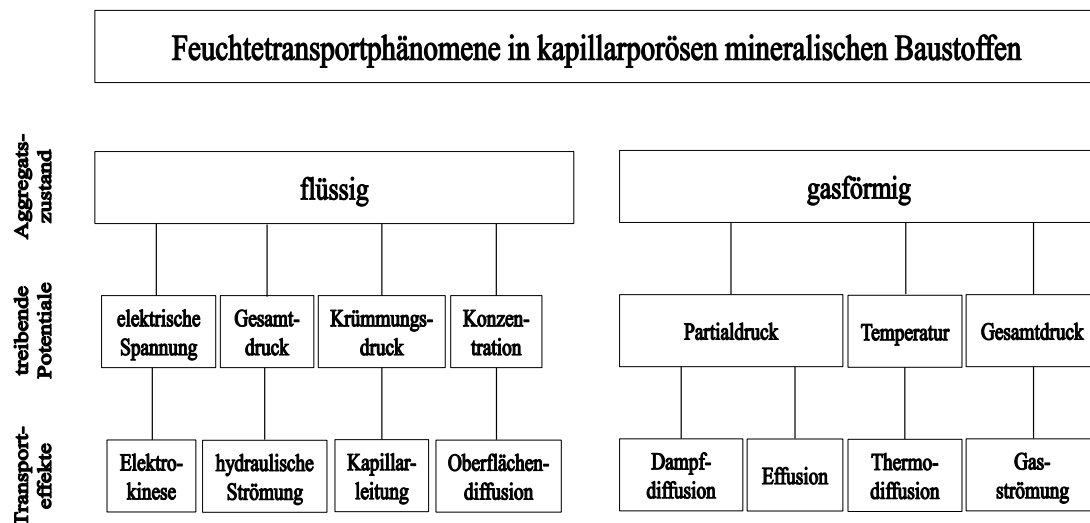
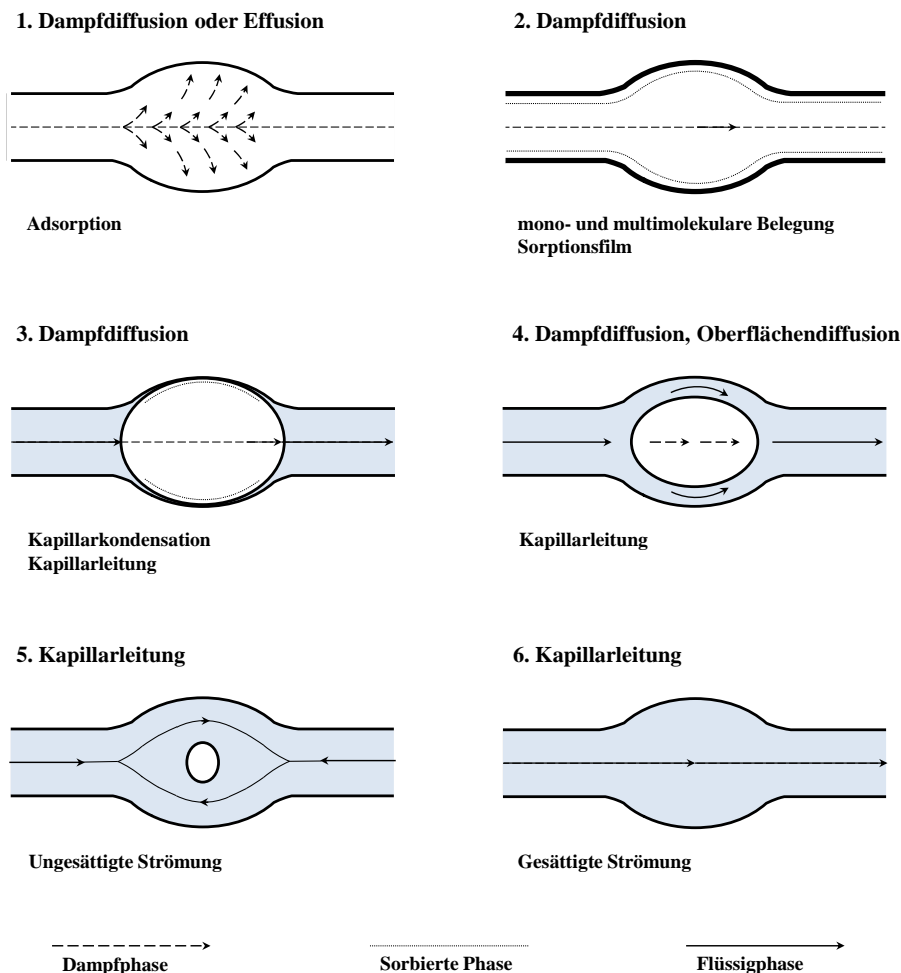


Abbildung 24: Zusammenstellung der Feuchttransportphänomene in kapillarporösen mineralischen Baustoffen aus [31] nach [74]

Rose [75] beschreibt die Abfolge unterschiedlicher Feuchtetransportphänomene bei zunehmender Bauteilfeuchte und unterscheidet dabei sechs verschiedene Phasen. [76]



**Abbildung 25: Feuchtetransportphasen bei zunehmender Bauteilfeuchte aus [76] nach [75]**

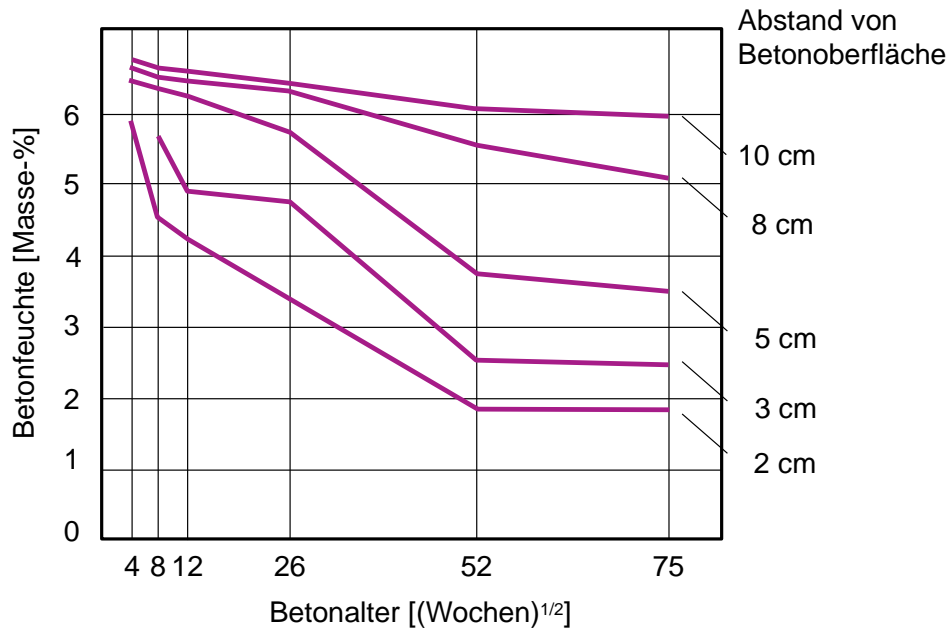
Eine genauere Beschreibung der Transportprozesse findet sich in den studentischen Arbeiten [2, 18].

### 3.6 Einflüsse auf die Betonfeuchte [2, 18]

Die komplexen Transport- und Speichermechanismen führen dazu, dass die Feuchteverteilungen entsprechend durch eine Vielzahl an Parametern beeinflusst werden können. Dies kann durch eine Änderung der Porenstruktur geschehen. Die Änderung kann von den eingesetzten Materialkomponenten, chemischen Prozessen und dem anliegenden instationären Klima hervorgerufen werden. Im Folgenden werden Parameter aufgeführt die aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge als einflussreich gewertet werden.

#### Zeitlicher Verlauf

Die Abbildung 46 verdeutlicht den Austrocknungsverlauf einer seitlich und unten abgedichteten 20 cm dicken Betonplatte (B25). Hier ist deutlich zu erkennen, dass mit der Zunahme des Betonalters der Feuchtegehalt in der Betonrandzone sinkt. Im Gegensatz dazu bleibt im Kernbereich des Betons die Feuchte nahezu unverändert.

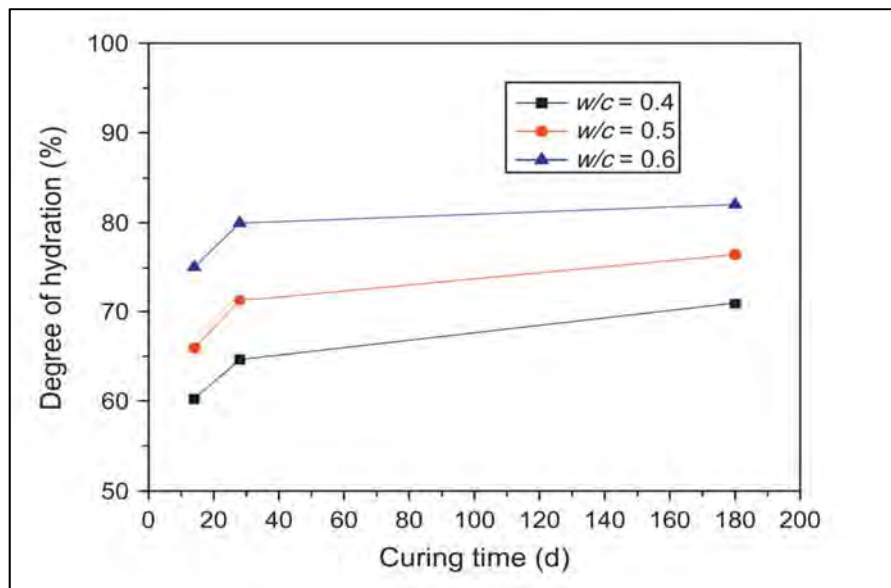


**Abbildung 46: Austrocknungsverlauf einer Betonplatte bei 50-60 % r. F. und 20 °C [77]**

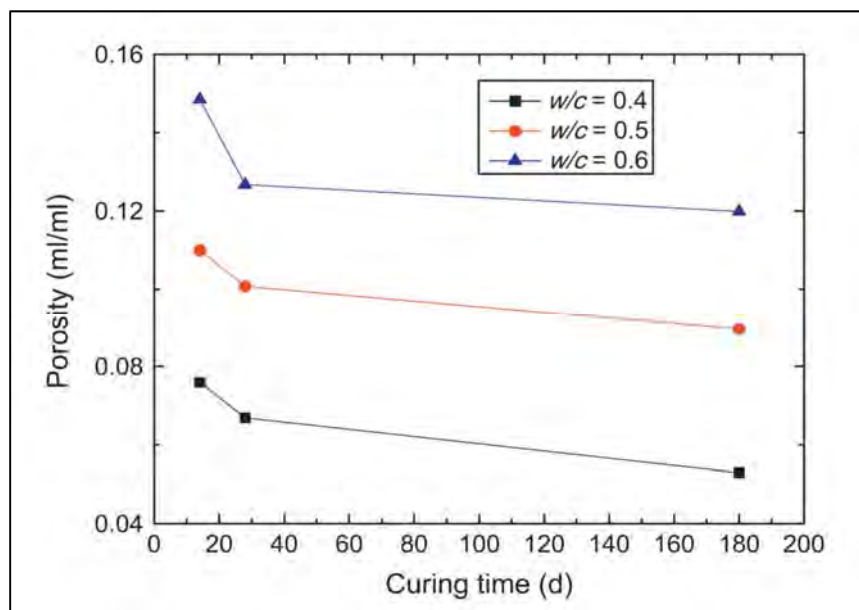
#### Wasserzement- und Wasser-Bindemittelwert

Der Wasserzementwert hat den größten Einfluss auf die sich bildende Porenstruktur. Bei der Mischung von Beton und der Verwendung eines Wasserzementwertes von unter 0,4, die Hydratation nicht vollständig stattfindet. Es verbleiben Reste von unhydratisiertem Zement. Wird mehr Wasser, als zur Hydratation benötigt hinzugegeben, so bilden sich Kapillarporen aus. [63, 78, 79]

Daher verändert Beton sein Porensystem mit fortschreitender Hydratation. Aus der Forschung [80] ist ersichtlich, dass vor allem Beton aufgrund von Erhärtungsprozessen während der ersten 28 Tagen die signifikanteste Porositätsveränderung, erfährt (vgl. Abbildung 27 und 28). Anschließend, bis zu einer verstrichenen Zeit von 180 Tagen, ist diese Änderung deutlich geringer. Mit dem Erreichen einer Erhärtungszeit von 180 Tagen ist der überwiegende Teil des Erhärtungsprozesses und somit der Wechsel der Gesamtporosität überwiegend abgeschlossen. In seiner Forschung untersucht [80] zusätzlich den Zusammenhang zwischen Wasserzementwert, Porosität und Erhärtungszeit. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie ersichtlich. Bei den untersuchten Proben wurde der Wasserzementwert variiert. Die Veränderung des Wasserzementwertes führt zu einem unterschiedlichen Porengefüge. Mit abnehmendem Gesamtporenvolumen (vorwiegend weniger Kapillarporen) sinkt auch das Potential zur Feuchtespeicherung und des Feuchtetransports, da weniger Poren zum Wassertransport und weniger Porenoberfläche zur Anlagerung von Wasser zur Verfügung stehen.



**Abbildung 27 Hydratationsfortschritt in Abhängigkeit der Erhärungszeit [80]**

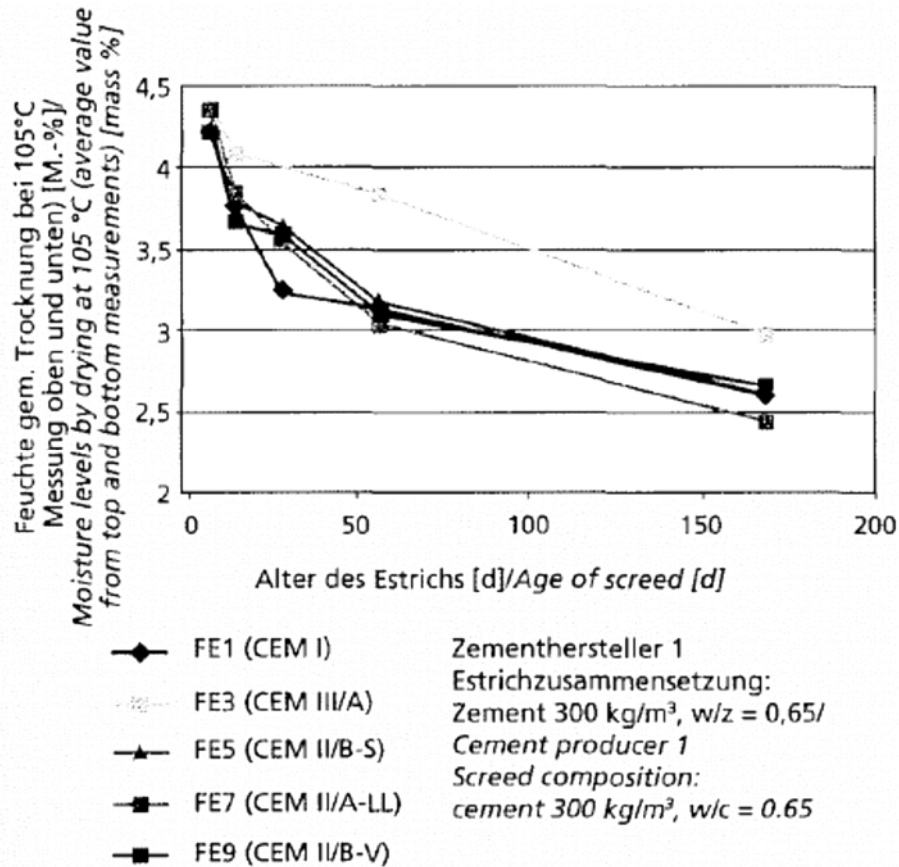


**Abbildung 58 Entwicklung der Porosität in Abhängigkeit der Erhärungszeit [80]**

In der Praxis wird hingegen der Wasserbindemittelwert (W/B-Wert) als Verhältnis zwischen Wasser und Zement inkl. weiterer Zusatzstoffe verwendet.

Einfluss des Bindemittels [55]

Auch das gewählte Bindemittel hat einen Einfluss auf die Porenstruktur und damit den Feuchtehaushalt im Beton. Exemplarisch wird das in Abbildung 29 für das Austrocknungsverhalten von Estrichen mit unterschiedlichem Bindemittel dargestellt [55].



**Abbildung 29 Mittels Ofentrocknung bei 105°C ermittelte Feuchtegehalte für Estriche mit einem Zementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> und einem w/z von 0,65 nach [55]**

#### Menge grober Gesteinskörnungen

Die Zugabe von groben Gesteinskörnungen in unterschiedlicher Menge und Größe nimmt Einfluss auf die hygrischen Eigenschaften von Beton. Eine Möglichkeit die Abhängigkeit des Betons von seinen Zuschlägen (Körnern) zu bestimmen, führt über die Herstellung seines Verhältnisses von Zementleimmatrix zu Korngehalt. Dabei werden die feuchtetechnischen Kenngrößen auf das zuvor genannte Verhältnis bezogen. Eine Änderung dieses Quotienten durch das Einbringen von Kieszuschlägen verringert das Volumen der Zementleimmatrix. Da die Zementleimmatrix für die Feuchteaufnahme und die Feuchtespeicherung ausschlaggebend ist, kann für eine geringere Zementleimmatrix eine geringere Feuchteaufnahme und Feuchtespeicherung angenommen werden. Voraussetzung sind nicht oder wenig saugende Gesteinskörnungen. Für dieses Vorgehen muss eine gleichmäßige Porenverteilung in der Zementleimmatrix und eine Abhängigkeit der Feuchtespeicherung und des Feuchte-transportes von der Porenanzahl und Porengröße angenommen werden. Dieser Zusammenhang wird zudem als linear angenommen. Für die kapillare Saugkraft gilt nach [19, 58, 61] eine direkte Proportionalität zum Porenradius. Für diese kann daher gefolgert werden, dass eine prozentuale Zunahme der Zementleimmatrix eine prozentuale Zunahme der Saugkraft erwirkt.

Für diesen Ansatz muss jedoch auch die inhomogene Verteilung der Zuschläge betrachtet werden. Die eingebrachten Zuschläge verändern den Zusammenschluss von Poren zueinander sowie deren Verlauf. Dies bedeutet, dass der Zusammenhang zwischen Porenanteil und hygrischen Eigenschaften in der Realität nicht linear verläuft.

Der Unterschied zwischen linearem und nicht-linearem Anstieg der hygri-schen Eigenschaften bei linearem Anstieg der Poren muss separat betrachtet werden. Für die vorliegenden Untersuchungen wird dieser zunächst als linear angenommen.

$$O_{hyg} = \Delta \frac{V_z}{V_{zu}} \times O_{0hyg}$$

mit

$O_{hyg}$	Hygrische Eigenschaft nach Änderung von $V_z/V_{zu}$	[-]
$V_z$	Volumen der Zementleimmatrix	[m <sup>3</sup> ]
$V_{zu}$	Volumen der Zuschläge	[m <sup>3</sup> ]
$O_{0hyg}$	Hygrische Eigenschaft vor Änderung von $V_z/V_{zu}$	[-]

### Versalzung

[19] erläutert, dass die Versalzung einen starken Einfluss auf die Feuchtespeicherung nimmt. Die Anlagerung von Wasserdipolen an die äußeren Ionen des Salz-Kristallgitters führt zu dessen Schwächung und Lockerung von Anionen und Kationen. Ab einer relativen Feuchte von 0,75, der Deliquescenz-Luftfeuchte für Natriumchlorid, kommt es nach [19] zum Zerfall des Kristallgitters und Ionen gehen als hydratisierte Ionen in Lösung. Die Besetzung der Flüssigkeitsoberfläche durch das gelöste Salz führt zu einer Dampfdruckerniedrigung über der Lösung. Die Aufnahme von Wassermolekülen aus der Umgebungsluft stellt wiederum ein Druckgleichgewicht her. Nach [19] ist diese Dampfdruckerniedrigung von der Konzentration abhängig und kann nach dem Raoult'schen Gesetz berechnet werden. Eine Beeinflussung der Sorptionsisothermen von Salzen, die Hydratstufen ausbilden, ist nur oberhalb der Deliquescenz-Luftfeuchte gegeben. Bei Salzen die keine Hydratstufen ausbilden, wird Wasser bereits unterhalb der Deliquescenz-Luftfeuchte ins Salzgitter eingelagert. Für beide Salzarten ist eine höhere Feuchtespeicherfunktion zu erwarten. Weiterhin führt [19] die Untersuchungen von [81] an, der für die Bestimmung der Sorptionsisotherme des salzhaltigen Baustoffs die Sorptionsisothermen des Baustoffs und die Sorptionsisotherme des Salzes addiert. [19, 58, 81, 82]

Die Feuchtespeicherfunktion wird deshalb in den Straßentunneln durch Salzeinwirkungen verändert. Unter stationären Klimarandbedingungen stellen sich im Beton Feuchten ein, die um einen stationären Zustand schwanken. Das im Beton vorhandene Salz sorgt nun dafür, dass mehr Wasser gespeichert wird. Dadurch kommt es in den tunnelinnenwandnahen Schichten zu einer Verschiebung des Wassergehalts im stationären Zustand und maximal vorhandener Wassergehalte, zu höheren Werten. Wieweit Tunnelbeschichtungen hier wirksam werden, ist noch nicht gänzlich geklärt. (Siehe auch [83])

Der Salzgehalt verändert zudem nach [9] lokal die Wasserdampfdurchlässigkeit, da das Salz in kristalliner Form den Querschnitt der Pore verringert. Gleichzeitig wird durch die Feuchtespeicherung ein Wasserdampfdiffusionsstrom in die Pore hervorgerufen. Der Wasserdampfdiffusionsstrom durch das gesamte Bauteil ist aufgrund des größeren Wasserdampfdiffusionswiderstands geringer. Somit kommt es zu einer geringeren Eindringtiefe der Feuchte bei instationären Klimarandbedingungen. [58, 84]

Weiterhin nimmt das Vorhandensein von Salz Einfluss auf den Flüssigwassertransport. Das gelöste Salz verändert die Oberflächenspannung des Wassers, dessen Viskosität sowie den Randwinkel der Flüssigkeit innerhalb der Poren. [58] beschreibt nach [84, 85] die Berechnungsmöglichkeit des Randwinkels unter Salzeinwirkung mittels folgender Gleichung.

$$\cos \theta_{Lsg.} = \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{Lsg.}}$$

mit

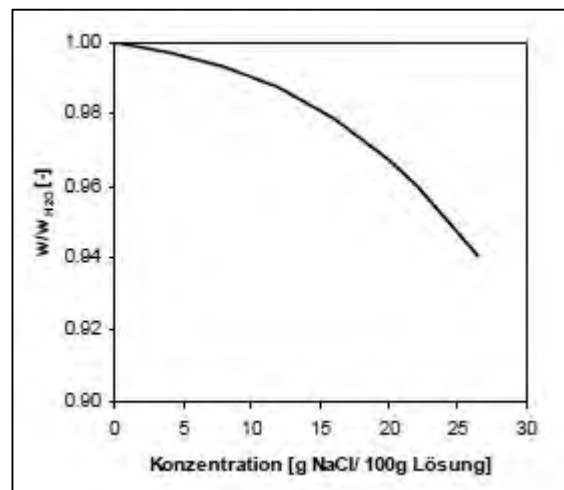
$\theta_{Lsg.}$	Randwinkel bzw. Benetzungswinkel der Lösung	[°]
$\sigma_{H_2O}$	Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung (Wasser)	[N/m]
$\sigma_{Lsg.}$	Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung (Lösung)	[N/m]

Für die Berechnung des Wassergehalts und der Flüssigtransportkoeffizienten unter Salzeinwirkung verweist [58] wiederum auf die Beziehungen von [84].

$$\frac{w_{Lsg.}}{w_{H_2O}} = \frac{\rho_{Lsg.}}{\rho_{H_2O}} \times \sqrt{\frac{\frac{\sigma_{Lsg.}}{\sigma_{H_2O}} \times \frac{\cos \theta_{Lsg.}}{\cos \theta_{H_2O}}}{\frac{\eta_{Lsg.}}{\eta_{H_2O}}}}$$

mit

$w_{Lsg.}$	Wassergehalt der Lösung	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_{H_2O}$	Wassergehalt (rein)	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{Lsg.}$	Dichte der Lösung	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{H_2O}$	Dichte des Wassers	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta_{Lsg.}$	Dynamische Viskosität der Lösung	[kg/(m×s)]
$\eta_{H_2O}$	Dynamische Viskosität des Wassers	[kg/(m×s)]



**Abbildung 30** Verhältnis des Wasseraufnahmekoeffizienten in Abhängigkeit der Porenwasser mit NaCl ( $w_{H_2O}$ ) zum Wasseraufnahmekoeffizienten für reines Porenwasser in Abhängigkeit der Salzkonzentration ( $w$ ); Abweichende Bezeichnung zum Text. [19]

$$\frac{D_{w,Lsg.}}{D_{w,H_2O}} = \frac{\frac{\sigma_{Lsg.}}{\sigma_{H_2O}} \times \frac{\cos \theta_{Lsg.}}{\cos \theta_{H_2O}}}{\frac{\eta_{Lsg.}}{\eta_{H_2O}}}$$



mit

$D_{w,Lsg.}$  Wassergehaltsabhängiger Transportkoeffizient der Lösung [m<sup>2</sup>/s]

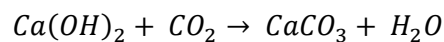
$D_{w,H_2O}$  Wassergehaltsabhängiger Transportkoeffizient für Wasser [m<sup>2</sup>/s]

[58] folgert aus diesem Zusammenhang, dass der Wasseraufnahmekoeffizient mit zunehmendem Salzgehalt abnimmt (vgl. Abbildung 30). Der gleiche Effekt führt zu einer Abnahme der Flüssigtransportkoeffizienten.

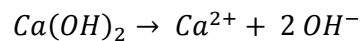
Die Einbindung der Materialeigenschaften der Tunnelinnenwand unter Einwirkung von Versalzung führt zu der Notwendigkeit, die salzgehaltabhängigen Materialparameter ins Simulationsmodell einzubinden.

### Karbonatisierung

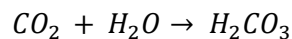
Die Karbonatisierung beschreibt die chemische Reaktion im Beton, unter der es zur Bildung von Wasser und Kalkstein kommt. Folgende Gleichungen beschreiben die stattfindende Reaktion und die Teilreaktionen.



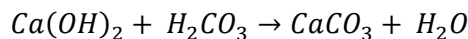
Auflösung des Portlandit:



Lösen von CO<sub>2</sub> im Wasser:

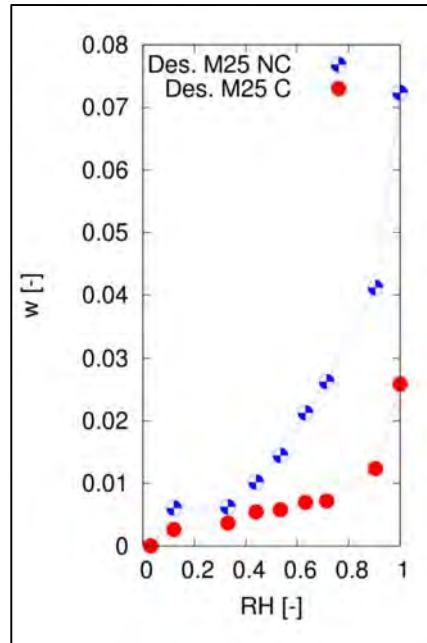


Neutralisation des alkalischen Milieus durch Neutralisation von Calciumhydroxid:



Die Karbonatisierung unterliegt dabei dem Wurzel-Zeit-Gesetz. Dies bedeutet, dass anhand der verstrichenen Zeit der Karbonatisierungsfortschritt berechnet werden kann. Weitere Einflüsse auf den Baustoff sind gegeben, denn mit der Karbonatisierung bildet sich Flüssigwasser im Baustoff, das unter hoher anliegender relativer Luftfeuchte nicht aus dem Baustoff transportiert wird.

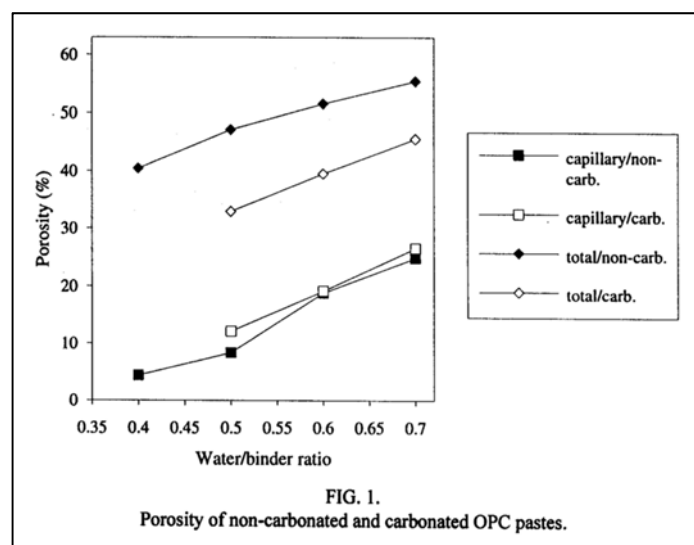
Der Einfluss der Karbonatisierung und die im Baustoff entstehende Feuchte kann jedoch als gering angenommen werden, da nach [86] das CO<sub>2</sub> nur dann tiefer in den Beton eindringen kann, wenn am Neutralisationsort alle Verbindungen neutralisiert wurden. Für Außenbauwerke mit einem Wasserzementwert von unter 0,61 und zeitweiliger Befeuchtung beläuft sich die Eindringtiefe der Karbonatisierung nach 10 Jahren Betrachtungszeit auf 10 mm. Aufgrund der noch oberflächennahen Lage wird in den trockenen Verläufen die Feuchte aus der Karbonatisierung an die Außenluft abgegeben.



**Abbildung 31 Wassergehalt in Abhängigkeit der Karbonatisierung [21]**

Die Karbonatisierung wirkt sich jedoch auf das Porengefüge im Beton aus. Durch die Produktion von  $\text{CaCO}_3$  kommt es nach [87] zu einer Verdichtung des Baustoffs und einer Verringerung des Porenvolumens, da das chemisch gebildete Produkt in den Poren gelagert wird. Die Verringerung der Gesamtporosität kann dabei bis zu 20 % betragen (vgl. Abbildung 31). [2, 87]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt [88], siehe Abbildung XX.

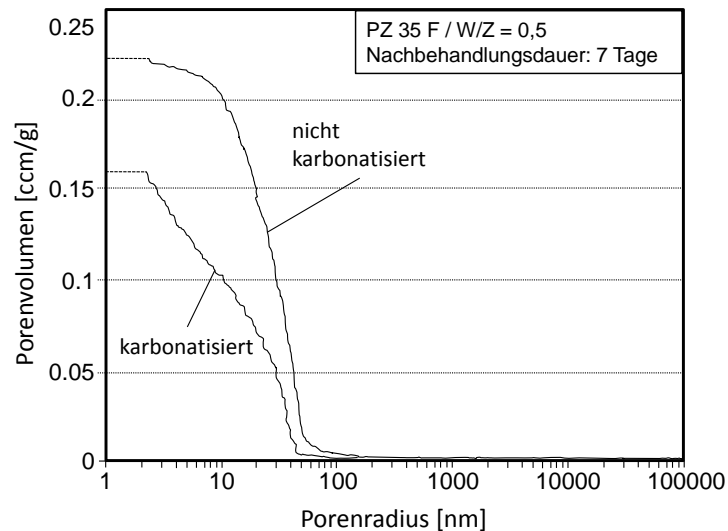
Die Untersuchungen von [21], bei denen dünne Platten vollständig unter  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre carbonatisiert wurden, bestätigen, dass die Porosität starke Änderungen erfährt. Für einen Wasserzementwert von 0,5 betrug die Änderung der Porosität -15 % und bei einem Wasserzementwert von 0,7 etwa -10 %.



**FIG. 1.**  
Porosity of non-carbonated and carbonated OPC pastes.

**Abbildung 32 Porosität in Abhängigkeit der Karbonatisierung [20]**

Ähnliche Ergebnisse erzielt [20] in seiner Untersuchung. Die Sorptionsisothermen des karbonatisierten Betons unter der 50 % CO<sub>2</sub>-Atmosphäre (Abbildung 32) zeigen eine deutliche Reduktion der Feuchtespeicherung im Baustoff. Mit steigender r.F. nimmt dabei die Differenz zwischen nicht-karbonatisiert und karbonatisiert zu. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch [88], siehe Abbildung 33.



**Abbildung 33: Summenporenverteilung von karbonatisiertem und nicht karbonatisiertem Zementstein aus Flugaschezement nach Karbonatisierung in natürlicher CO<sub>2</sub> – Konzentration [88]**

Temperatur

Grundlegend betrachtet [19] die steigende Bewegung der Wassermoleküle und deren abfallende Viskosität bei steigender Temperatur. Um die Relevanz bewerten zu können leitet [19] nach [89] den nachfolgenden Zusammenhang her.

$$D \sim \sqrt{T}$$

Die Beziehung zwischen den dynamischen Viskositäten in Abhängigkeit der Temperatur wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$\frac{\eta_0}{\eta_1} = e^{\left[ \alpha_\eta \times \left( \frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} \right) \right]}$$

mit

$\eta$	Dynamische Viskosität	[kg/(m×s)]
$\alpha_\eta$	Konstante zur Näherung von $\eta$	[-]

Die Oberflächenspannung in einer Kapillare bei unterschiedlichen Temperaturen wird folgend berechnet.

$$\sigma(T_1) = \sigma_0 - a_\sigma \times (T_1 - T_0)$$

mit

$a_\sigma$	Konstante zur Näherung von $\sigma$	[(mN)/(K×m)]
------------	-------------------------------------	--------------

Der unterschiedliche Dampfdruck zwischen den untersuchten Temperaturen wird nach folgender Gleichung ermittelt.

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = f(T) \times \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

mit

$f(T)$  monoton abnehmende Funktion

Der Transportkoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur über die Viskosität wird wie folgend bestimmt.

$$D_{w,H_2O}(\vartheta_1) = \frac{\eta(\vartheta_0)}{\eta(\vartheta_1)} \times D_{w,H_2O}(\vartheta_0)$$

Eine Änderung der Temperatur führt zu einer Änderung der Viskosität und somit resultiert eine unterschiedliche Oberflächenspannung. [19] folgert aufgrund des geringen Anteils an der gesamten kapillaren Zugkraft, dass eine Temperaturabhängigkeit des Wassergehalts nicht gegeben ist.

Die Untersuchungen von [59] zeigen, dass auch der Einfluss der Temperatur auf die Sorptionsisotherme vernachlässigt werden kann. Die unterschiedlichen Sorptionsisothermen weichen nur um geringe Mengen für unterschiedliche Temperaturen voneinander ab. Die Temperaturschwankungen in den Tunneln erwirken keinen nennenswerten Einfluss auf die Sorptionsisotherme. Auftretende Unterschiede des Wassergehalts durch den Temperatureinfluss sind vernachlässigbar.

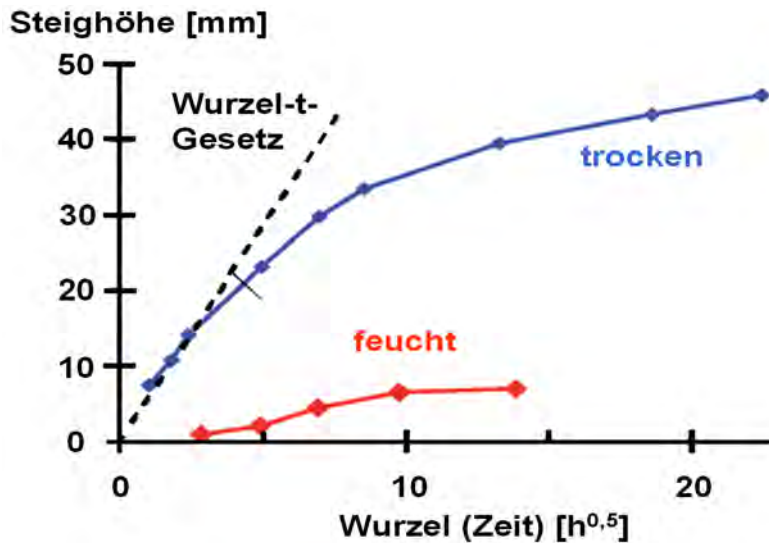
#### Selbstabdichtung von Beton

[82] beschreibt den Effekt der Selbstabdichtung von Beton anhand von eigenen Untersuchungen. In seiner Forschung kam der Feuchtetransport im Probekörper, der dem Außenklima ausgesetzt war, nach einer Zeit von etwa sechs Monaten zum Stillstand. Nach [82] tritt dieser Effekt in Baustoffen auf, die Wasser in ihr Festkörperskelett aufnehmen und wieder abgeben. Dadurch kommt es zu einer Veränderung der Materialcharakteristika.

[19] erläutert die Selbstabdichtung wie folgt: „Aufgrund ihrer feinporösen Struktur entstehen zwischen Wassermolekülen und der Festkörperoberfläche der Matrix zementgebundener Baustoffe Wechselwirkungen, die den Transport des Wassers durch den Werkstoff einschränken können. In der Literatur wird diese Wechselwirkung, die in einem Wasseraufnahmeverhalten abweichend vom „Wurzel-Zeit-Gesetz“ resultiert, häufig als Selbstabdichtung bezeichnet.“ [19, S.13]

Die Ursachen für die Selbstabdichtung sind nach heutigem Stand der Wissenschaft noch nicht exakt geklärt. [19] liefert verschiedene Gründe für diesen Effekt, wie etwa Nachhydratation oder das Bingham'sche Fließen des Betonkörpers. Eine Veranschaulichung zeigt Bild 34. Bei zementgebundenen Baustoffen, wie es bei Beton der Fall ist, weicht das Saugverhalten bereits nach geringer Saugzeit vom „Wurzel-Zeit-Gesetz“ ab.

Besonders bedeutsam für die Untersuchungen ist der zu erwartende Unterschied beim Wassertransport der Tunnelinnenschale. Für die Auswertungen der Messungen im Tunnel und mögliche Abweichungen zu den Messungen im Labor, muss dieser Effekt berücksichtigt und korrigiert werden.



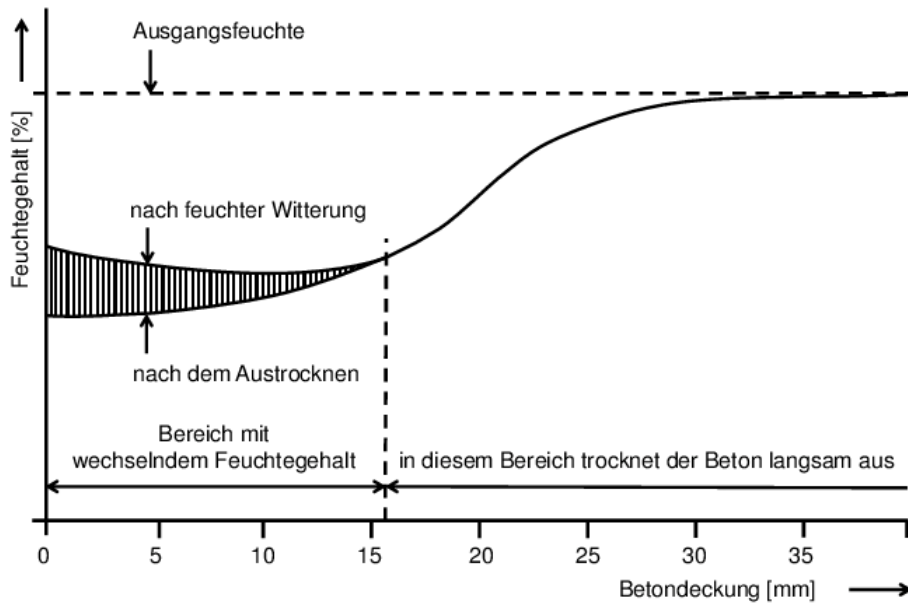
**Abbildung 34: Darstellung des kapillaren Saugens im trockenen und feuchten Zustand aus [90] nach [91], die die Selbstabdichtung veranschaulicht**

#### Inhomogenitäten [2]

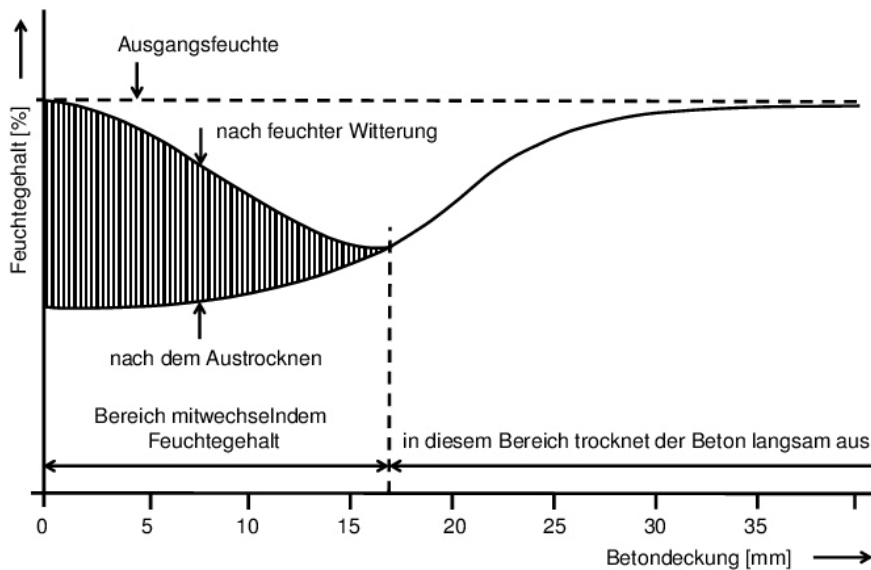
Bei Beton handelt es sich um einen inhomogenen Baustoff. Das bedeutet, dass er in seiner Struktur und Beschaffenheit keine einheitlichen Merkmale zeigt. Dies ist besonders bei der Porosität zu erkennen. Hier besitzt der Beton sehr kleine Poren, die nur einige Nanometer groß sind und gleichzeitig kommen größere Poren im Zentimeterbereich vor. Dessen Auswirkung ist klar in der Feuchteverteilung und -speicherung zu erkennen, da die unterschiedlichen Porentypen verschiedene Transportphänomene aufweisen und ein Wechsel im Porensystem dämpfend wirken kann. Deswegen stellt sich die Feuchtemessung auch aufwendiger als beispielsweise bei homogenen Stoffen dar. Dies lässt darauf schließen, dass mehrere Messungen in verschiedenen Tiefen des Bauteils notwendig sind.

### 3.7 Feuchtesituation in Tunnelinnenschalen [2, 92]

Den Feuchteverlauf in Innenschalenbetonen ist stark von den Umgebungsbedingungen und der Betonrezeptur abhängig und für jedes Tunnelbauwerk einzeln zu bestimmen. Beeinflusst wird der Feuchtegehalt durch die Betonrezeptur, das Betonalter, die Karbonatisierung, die Versalzung, den Umgebungsbedingungen sowie der Zeit. Bewiesen ist jedoch, dass sich der Feuchteverlauf nur in der Betonrandzone in bestimmten Tages- bzw. Jahreszyklen ändert. Die Dicke der Betonrandzone schwankt je nach Dichte der Betondeckung und des Tunnelklimas in einem Bereich um 15 mm Tiefe ab der Betonoberfläche. Im Kernbereich stellt sich nach einer bestimmten Zeit eine konstante Feuchtigkeit ein, die von kurzzeitigen Einflüssen aus der Umgebung weitgehend unberührt bleibt. Um genaue Daten zur realen Feuchteverteilung in der Tunnelinnenschale zu erhalten, ist der Einbau eines Sensorsystems mit kompakten Auswerte- und Speichereinheit erforderlich. Zudem können die erfassten Daten mit einem bauphysikalischen Modell und in Abhängigkeit der Betonrezeptur als Feuchteprognosen für andere Tunnelsituationen dienen. [93]



**Abbildung 35: Feuchteverlauf des Betons im Feien unter Dach aus [93] nach [94]**

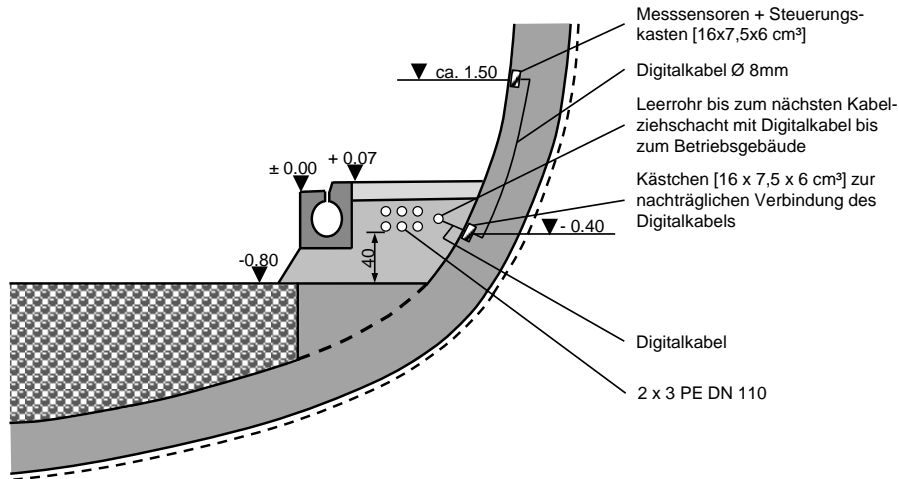


**Abbildung 36: Feuchteverlauf des Betons im Feien der Witterung ausgesetzt aus [93] nach [94]**

In der Literatur werden 2 Tunnelmessungen ausführlicher berichtet. Folgend eine Kurzbeschreibung aus [2]

#### Gäubahntunnel

Hierbei handelt es sich um einen 450 m langen Straßentunnel, der im Zuständigkeitsbereich Stuttgart liegt. Dort wurden Multiringelektroden (vgl. Kapitel 3.3) an vier Messpunkten installiert, im Portalbereich sowie bei 40 m, 100 m und 200 m in Tunnellängsrichtung. Die genaue Platzierung der Sensoren mit Steuerungskästchen und Kabeln zeigt die Abbildung 37. Die Datenübertragung erfolgte per Funkmodem, welche wöchentlich im halbstündlichen Takt Daten lieferte. [36]



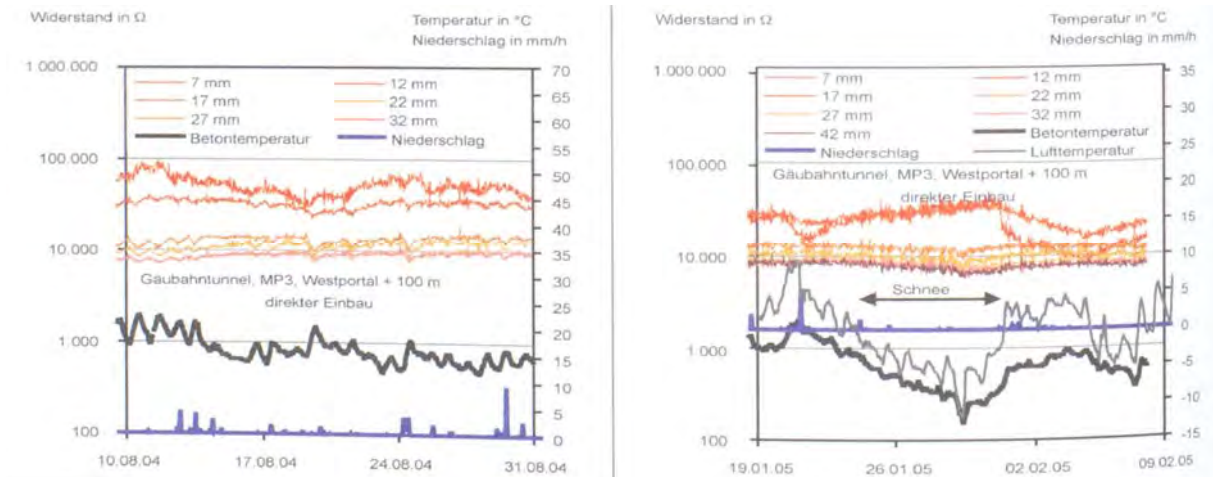
**Abbildung 37: Tunnelquerschnitt - Einbau der Sensoren nach [36]**

Die Betonzusammensetzung im Bereich der Messpunkte ist aus Tabelle 3 zu entnehmen. Dafür wurden ein handelsüblicher CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1:2004-08 ] und Flugasche nach DIN EN 450:1995-01 verwendet. Außerdem kamen ein Betonverflüssiger sowie Fließmittel zum Einsatz. [36]

**Tabelle 3: Betonzusammensetzung am Gäubahntunnel [36]**

Zementgehalt	Flugaschegehalt	Wassergehalt	Gesteinskörnung	w/z
310 kg/m <sup>3</sup>	80 kg/m <sup>3</sup>	172 kg/m <sup>3</sup>	1770 kg/m <sup>3</sup>	0,55

Die Datenaufzeichnung beinhaltete die Temperatur- und Widerstandsentwicklungen. Die Temperaturdaten wurden mit den Wetterdaten der nächstgelegenen Wetterstation verglichen. Dies diente zur Plausibilitätskontrolle und zur Darstellung der abweichenden Temperaturbeanspruchung, wie bspw. im Portalbereich durch Sonneneinstrahlung. Im Winter waren die Minimaltemperaturen bereits nach 40 m etwa 3 °C und nach 200 m 6 °C höher als im Portalbereich. Nach starkem Frost verbleibt die Betontemperatur auch bei steigender Umgebungstemperatur zunächst für einige Zeit in diesem Temperaturbereich. Im Sommer hingegen sind im Portalbereich durch Sonneneinstrahlung höhere Maximalwerte bzw. stärkere Schwankungen als im Inneren zu verzeichnen. Im Tunnelinneren wurden untereinander ähnliche Temperaturen gemessen und ein gleichmäßiger Temperaturverlauf festgestellt. Für die Ermittlung der Widerstandsentwicklung und für die Messung des Wassergehaltes im Beton ist eine möglichst genaue Berücksichtigung der Temperatur erforderlich. Tendenziell werden im Sommer höhere Widerstände, also eine geringere Feuchte, als im Winter gemessen. Die kurzfristigen Schwankungen stehen meist in Verbindungen mit Niederschlagsereignissen und reichen lediglich in Tiefen zwischen 7 und 12 mm. Ab einer Betontiefe von etwa 20 mm sind kaum Veränderungen aufgrund von Niederschlägen zu beobachten. Eine Beeinflussung durch Auftauen des Schnees wegen Sonneneinstrahlung und/oder durch Einsatz von Streusalz konnte im Portalbereich sogar bis zu einer Tiefe von 30 mm ein deutlicher Abfall des Widerstandes festgestellt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass im Winter schon geringere Niederschlagsmengen als vergleichsweise im Sommer ausreichen, um den Widerstand tiefer sinken zu lassen. Aufgrund niedriger Temperaturen und gleichzeitig höherer relativer Luftfeuchte besitzt die Luft nur eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit. Im Winter liegt über längere Zeit ein Wasserangebot an der Betonoberfläche vor. [36] Ein Beispiel für die kurzfristige Entwicklung des Elektrolytwiderstandes im Gäubahntunnel wird in der Abbildung 38 dargestellt.



**Abbildung 68: Elektrolytwiderstand eines Messpunktes im Sommer (links) und Winter (rechts) [36]**

Eine ausführliche Beschreibung der ermittelten Ergebnisse ist in [36] zu finden.

#### Tunnel Farchant

Dieser Tunnel ist ein 2.380 m langer Straßentunnel in der Nähe von Garmisch-Partenkirchen mit zwei parallel verlaufenden Röhren. Die Multi-Ring-Elektroden wurden an vier Messpunkten nachträglich in Bohrlöchern in der Weströhre im Spritzwasserbereich rund 1,00 m oberhalb der Fahrbahnoberkante eingebaut. Der erste Sensor befindet sich im Portalbereich, die weiteren im Abstand von 40 m, 100 m und 200 m in Tunnellängsrichtung. Die Messpunkte wurden in dem Bereich angebracht, in dem der Tunnel als Doppelrechteckquerschnitt in offener Bauweise erstellt wurde. Die Installation der Sensorelektronik fand in der Tunnelschale statt. Die Datenübertragung erfolgte aufgrund der unzureichenden Netzabdeckung manuell. [36]

Die Betonzusammensetzung bei den Messpunkten ist in der Tabelle 4 aufgelistet. Die Betone wurden als WU-Beton nach DIN 1045:1988-07 hergestellt. Ferner wurde ein Fließmittel und Luftporenbildner sowie eine Sieblinie A/B32 verwendet. [36]

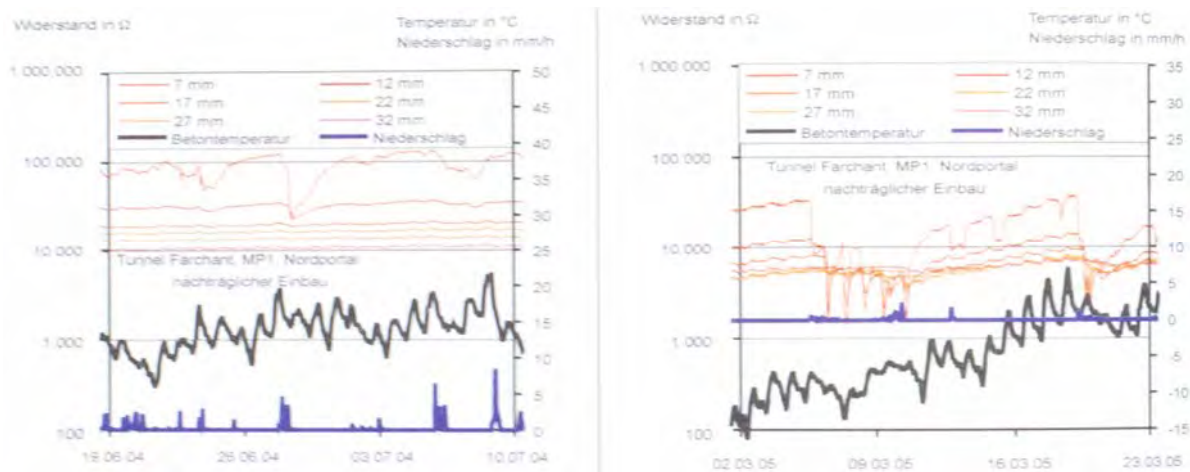
**Tabelle 4: Betonzusammensetzung des Tunnel Farchant [36]**

Tunnelabschnitt	Zementgehalt	Flugasgehalt	Wassergehalt	Gesteinskörnung	w/z
Nordportal	280 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>	152 kg/m <sup>3</sup>	1848 kg/m <sup>3</sup>	0,54
Nordportal + 40 m	340 kg/m <sup>3</sup>	-	167 kg/m <sup>3</sup>	1926 kg/m <sup>3</sup>	0,49
Nordportal + 100 m	280 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>	137 kg/m <sup>3</sup>	1891 kg/m <sup>3</sup>	0,49
Nordportal + 200 m	340 kg/m <sup>3</sup>	-	167 kg/m <sup>3</sup>	1926 kg/m <sup>3</sup>	0,49

Die Temperaturaufzeichnungen der Sensoren in 7 mm Tiefe wurden mit der Lufttemperatur an der Deutschen Wetterdienststation Garmisch-Partenkirchen verglichen. Dabei hat sich ergeben, dass die Betontemperatur der Messpunkte eindeutig der Umgebungstemperatur folgt. Die Daten liefern demnach plausible Ergebnisse und eine Auswertung wird möglich. Die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten sind am Tunnel Farchant geringer ausgeprägt als am Gäubahntunnel, trotzdem fallen über dem gesamten Tem-



peraturverlauf gesehen einige Parallelen zwischen den beiden Tunneln auf. Im Tunnel Farchant kommen beispielsweise deutlich häufiger Eistage vor. Diese Beanspruchung reicht bis zu einem Abstand von 100 m ins Innere des Tunnels. Erst bei einer Entfernung von 200 m vom Portal zeigt sich eine etwas geringere Anzahl an Eistagen. Die für die Frostbeanspruchung bedeutenden Frost-Tau-Wechsel sind hingegen seltener anzutreffen, da die Umgebungstemperaturen in dieser Gegend insgesamt auf einem niedrigeren Niveau als in Stuttgart liegen. Durch den nachträglichen Einbau der Sensoren entstand der Kontakt zum Altbeton über einen Ankopplungsmörtel, so dass im Wesentlichen der Widerstand des Ankopplungsmörtels gemessen wurde. Diese Tatsache muss für die Umrechnung der Widerstände in Wassergehalte besonders berücksichtigt werden. Dazu reicht aber eine herkömmliche Kalibrierung des Mörtels aus. Der Zusammenhang zwischen spezifischen Elektrolytwiderstand des Mörtels und seinem Wassergehalt wird damit bestimmt und es kann auf diese Weise auf den charakteristischen Wassergehalt des Ankopplungsmörtels und Betons geschlossen werden. Im Randbereich weisen die Messpunkte typische, kurzfristige durch Witterungseinflüsse schwankende Widerstandsverläufe auf. Im Sommer werden auch in diesem Tunnel höhere Widerstände als im Winter aufgezeichnet und im Betoninneren ein gleichmäßiger Verlauf beobachtet. Die beeinflusste Tiefe, hervorgerufen durch Witterung, liegt im Sommerzeitraum bei 17 mm. Im Winter steigen die Tiefen auf 20 mm und im Portalbereich, ähnlich wie im Gäubahntunnel, auf einen Wert von bis zu 40 mm. Der direkte Einfluss des Frostes, also das Gefrieren des Wassers in den Poren, hat zwar einen erheblichen Einfluss auf den Widerstand, wurde aber nicht untersucht und muss ggf. bei einer Wertung berücksichtigt werden. Im Sommer sind letztendlich niedrigere und im Winter teilweise höhere Sättigungsgrade in den Randbereichen vorzufinden. [36] Eine kurzfristige Entwicklung des Elektrolytwiderstandes im Tunnel Farchant wird in der Abbildung 79 dargestellt.



**Abbildung 79: Elektrolytwiderstand eines Messpunktes im Sommer (links) und Winter (rechts) [36]**

In der Abbildung 40 sind die gemessenen Widerstände in Ohm über die Tiefe und die Zeit aufgezeichnet. Das Bild 41 gibt die daraus folgende Feuchtigkeitsverteilung über die Tiefe und die Zeit wieder. Beide Diagramme (40 und 41) beziehen sich auf den ersten Sensor, der im Portalbereich eingesetzt wurde.

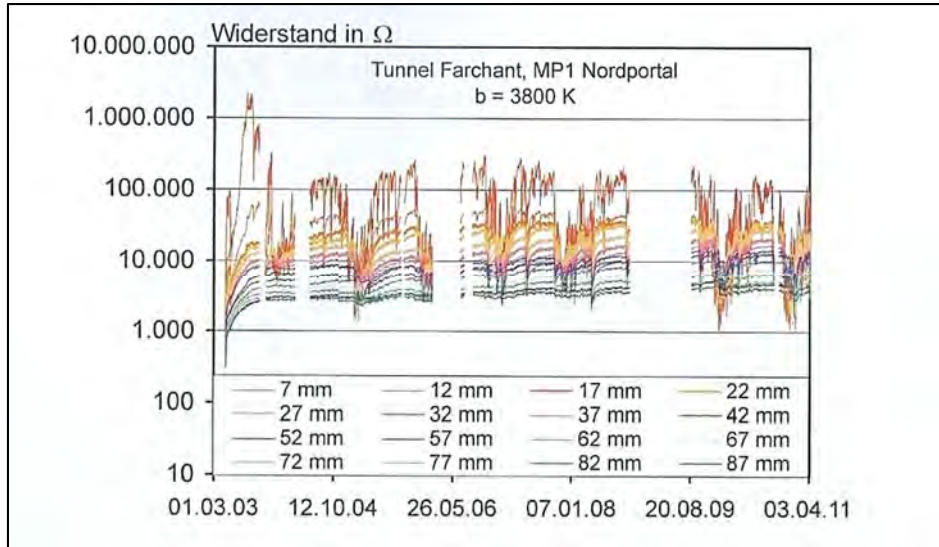


Abbildung 40: Verlauf des Elektrolytwiderstandes am Messpunkt 1 – Portalbereich aus [36]

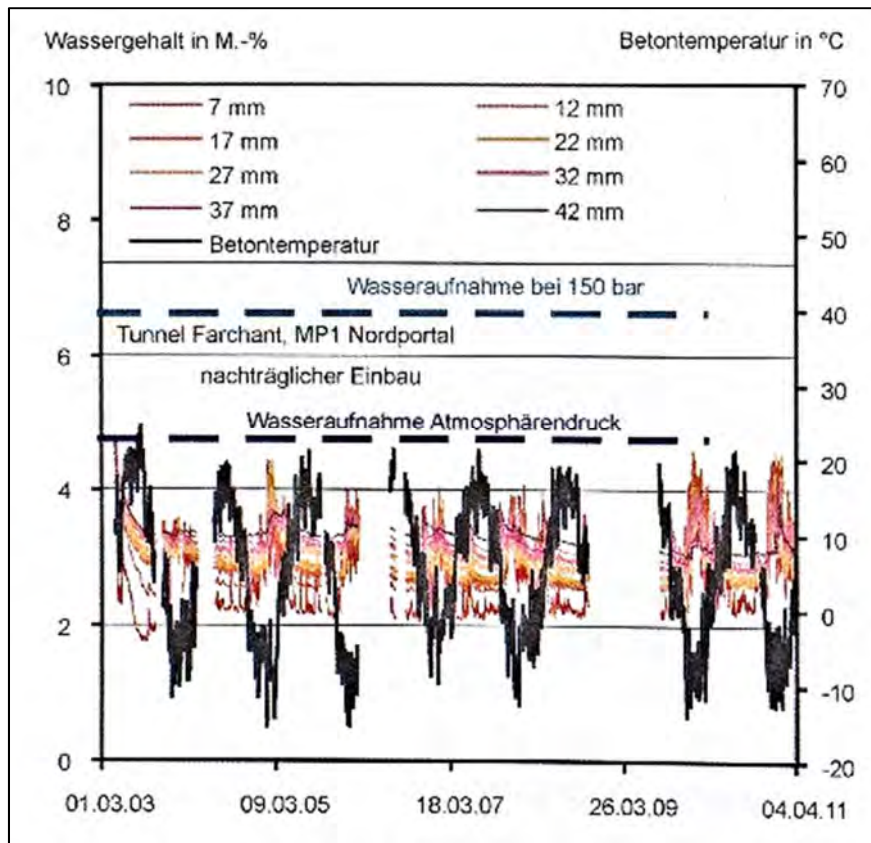
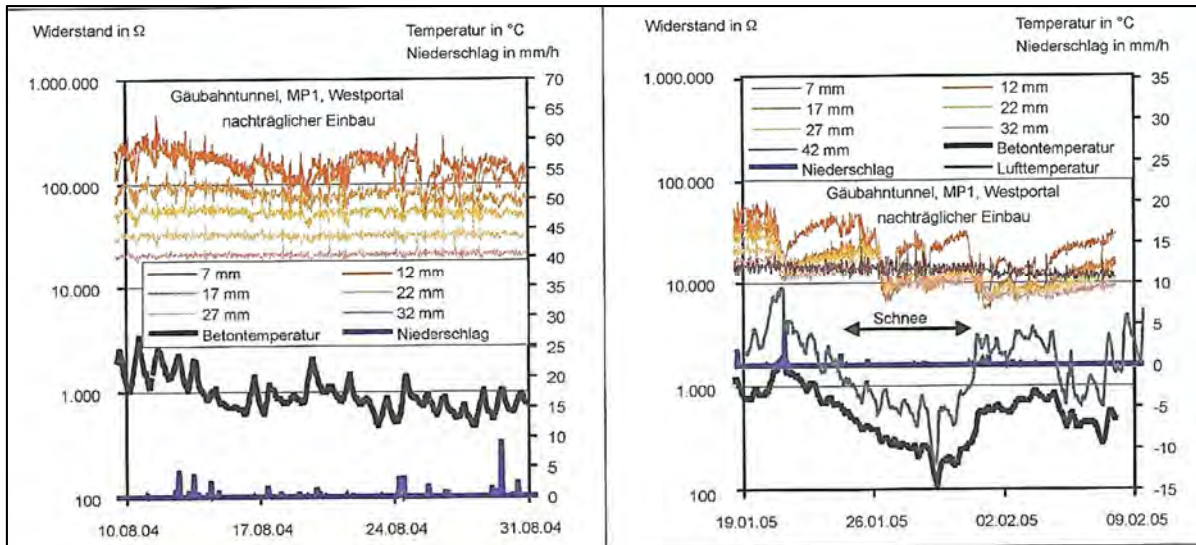


Abbildung 41: Verlauf des abgeschätzten Wassergehaltes am Messpunkt 1 - Portalbereich aus [36]

Im Betonrandbereich schwankt der Feuchtegehalt durch kurzfristige Witterungseinflüsse stärker als im Betoninneren. Im Inneren des Betons kann ein gleichmäßiger Feuchteverlauf beobachtet werden. Jedoch wird im Sommerzeitraum die Feuchte nur bis in eine Tiefe von 17 mm beeinflusst und im Winter bis in eine Tiefe von 22 mm. Die Abbildung 42 zeigt eine Gegenüberstellung der im Sommer und im Winter gemessenen Widerstände.

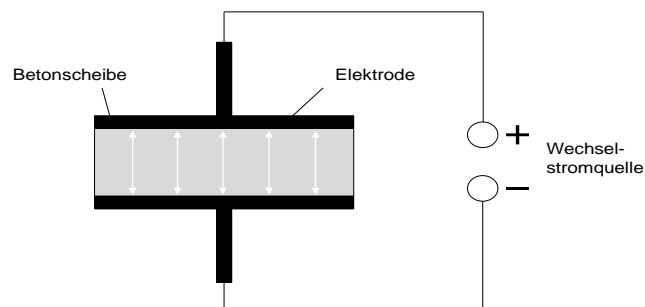


**Abbildung 42: Vergleich der Elektrolytwiderstandsverläufe im Sommer und Winter vom Messpunkt 1 – Portalbereich aus [36]**

Eine ausführliche Beschreibung der ermittelten Ergebnisse ist in [36] zu finden.

Kalibrierung der Multi-Ring-Elektroden für die beiden Beispiele

Bei den direkt während der Betonage eingebauten MRE stehen die Elektroden in direktem Kontakt zum zu prüfenden Beton. Eine geeignete Möglichkeit, vom gemessenen Elektrolytwiderstand des Betons auf den Wassergehalt zu schließen, bietet die Zwei-Elektroden-Methode (Two-Electrode-Method, TEM). Das Prinzip der Messmethode ist in der Abbildung 43 dargestellt.



**Abbildung 43: Prinzip der Widerstandsmessung mit der TEM [36]**

Durch Einstellung verschiedener Wassergehalte zwischen vollständiger Wassersättigung und trockenem Zustand bei gleichzeitiger Widerstandsmessung ist es möglich, einen funktionalen Zusammenhang über den gesamten Sättigungsbereich des zu untersuchenden Betons zu bestimmen.

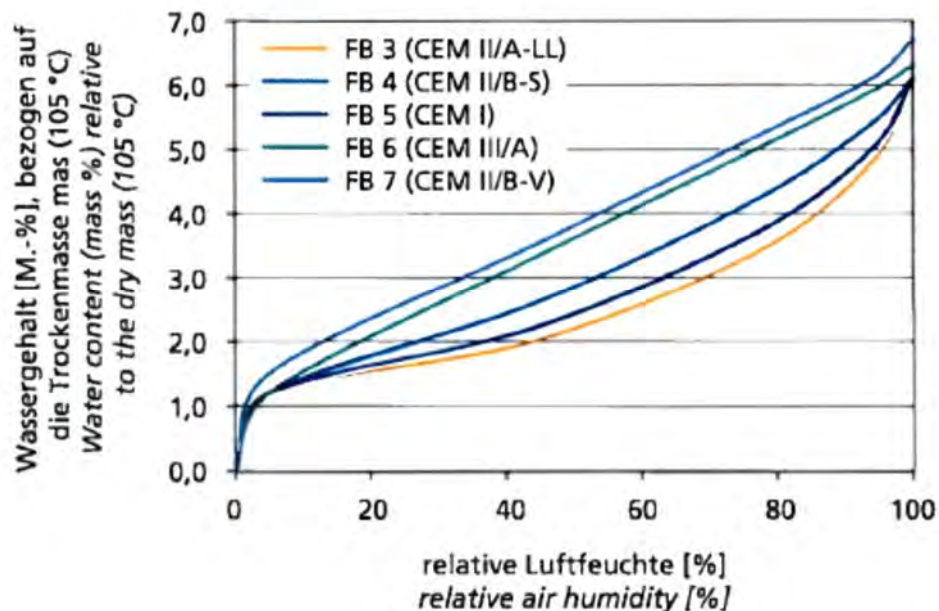
Beim nachträglichen Einbau der MRE kann die zuvor verwendete Kalibrierungsmethode nicht eingesetzt werden, da nicht der Widerstand des Betons, sondern im Wesentlichen der Widerstand des Ankopplungsmörtels gemessen wird. Um nun vom Widerstand des Ankopplungsmörtels auf den Wassergehalt des Altbetons zu schließen, wird als Voraussetzung für eine Kalibrierung angenommen, dass der Wassergehalt im Mörtel aufgrund der geringen Dicke der Mörtelschicht relativ schnell die Ausgleichsfeuchte vom umgebenden Beton annimmt. Der Ansatz ist, die Adsorptionsisothermen des Betons und des Ankopplungsmörtels für eine Auswertung heranzuziehen. Dazu wird die Ausgleichsfeuchte zwischen

Altbeton und Ankopplungsmörtel anhand der Ausgleichsfeuchte des Altbetons bzw. des Ankopplungsmörtels mit der Raumluft beschrieben. [36]

Die Kalibrierung der Multi-Ring-Elektroden mit jeweiligen Abmessungen der Probekörper und dem Prüfverfahren mit entsprechenden Formeln für direkte bzw. nachträglich eingebaute Sensoren wird ausführlich in [36] beschrieben.

Betone für Brandversuche

Reiners [55] gibt Desorptionsisothermen von verschiedenen Betonen an, die im sogenannten PTN-Versuch auf Brand geprüft wurden. Der Feuchtegehalt in den Proben wurde dann mit WUFI berechnet. Im relativen Beitrag kommt er zum Schluss, dass hohe Porendrücke nicht die Hauptursache von explosiven Abplatzen sind.

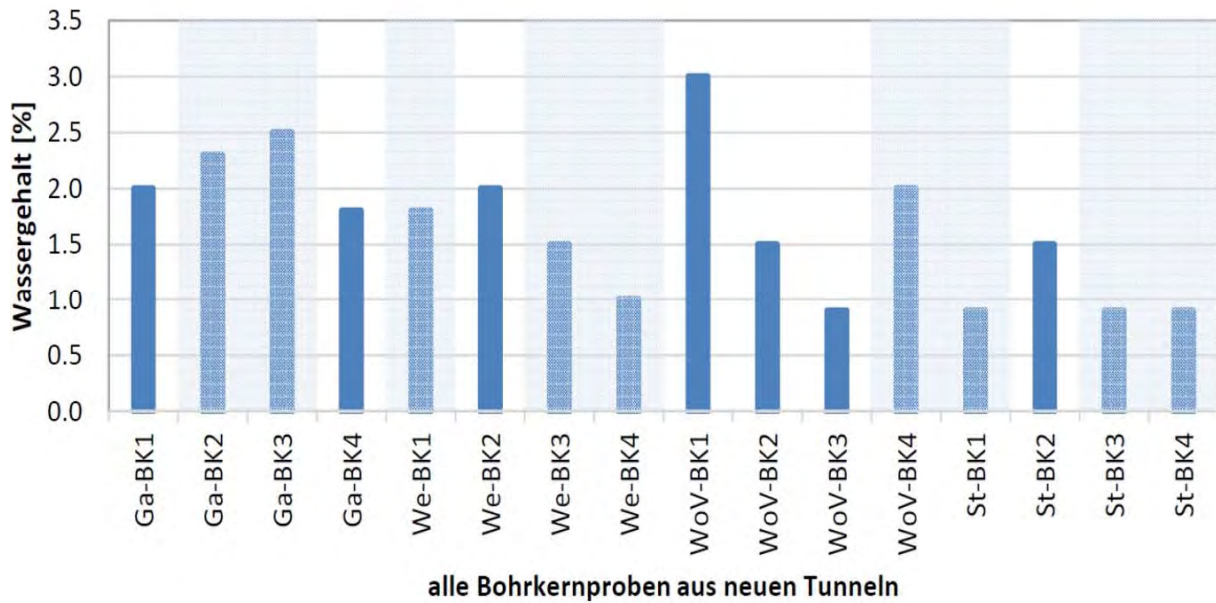


**Abbildung 44: Desorptionsisothermen ausgewählter Betone nach [55]**

Typische Innenbauteile stellen sich bei ca.50% r.F ein, Außenbauteile bei 75% bis 80% r.F. Beide Werte würden laut der angegebenen Sorptionsisothermen zu relativ hohen Feuchtegehalten in M-% führen. Für Außenbauteile gibt er 3,5 M-% bis 6,0 M-% an, für offene Parkhäuser etwa 3,0 M-%. Wo im Querschnitt sich die „Messtelle“ befindet wurde nicht angegeben.

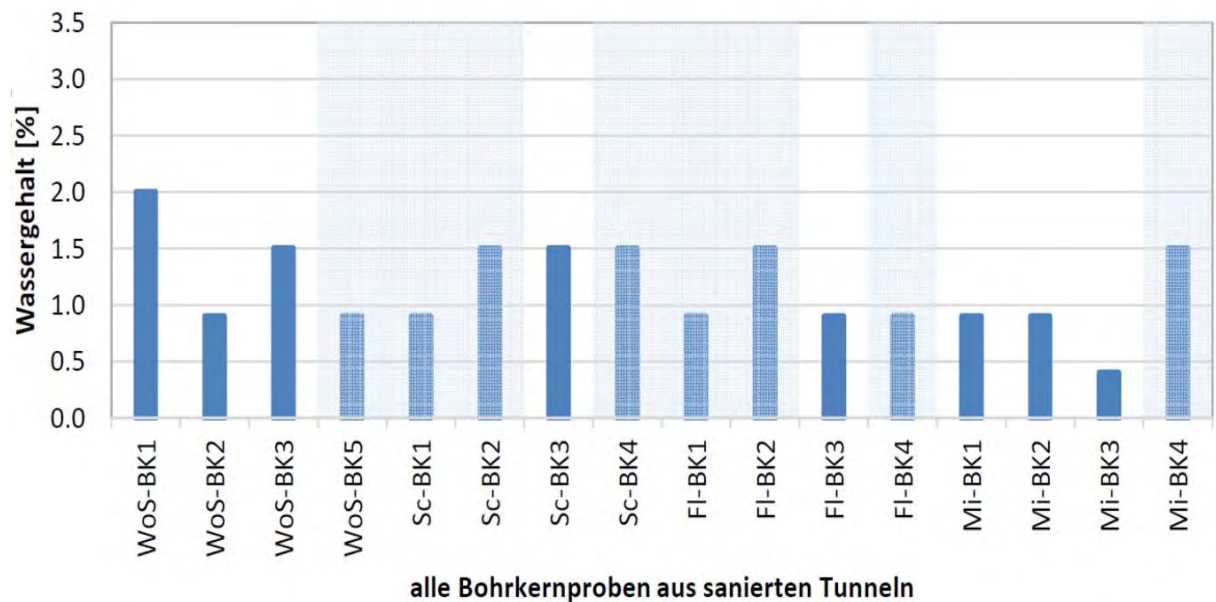
Feuchte und Tunnelbeschichtungen

Weitere Tunneluntersuchungen wurden im Forschungsprojekt TUNNAN durchgeführt [83] Eine Kurzbeschreibung findet sich in [95]. Berichtet wird über umfangreiche Untersuchungen am Tunnel Strengen und weiteren Tunnels.



**Abbildung 45: Wassergehalt für alle Bohrkerne aus neuen Tunneln (Bohrkerne mit intakter Beschichtung sind hellblau hinterlegt) [83]**

Bei einer Gegenüberstellung des Wassergehalts fallen die generell sehr niedrigen Werte für den Tunnel Strengen auf.



**Abbildung 46: Wassergehalt für alle Bohrkerne aus sanierten Tunneln (Bohrkerne mit intakter Beschichtung sind hellblau hinterlegt) [83]**

Auch bei den Sanierungen war der Wassergehalt generell bei allen Bohrkerne sehr niedrig.

### 3.8 Berechnungsverfahren WUFI [18]

Künzel [58] hat im Rahmen seiner Dissertation ein Programm „Wärme und Feuchte instationär“, kurz WUFI entwickelt, das den 2-dimensionalen Wärme- und Feuchtetransport durch Bauteile berechnet.

WUFI eignet sich vor allem zur Bestimmung

- der Austrocknungszeit von Baufeuchte
- der Tauwassergefahr in Bauteilen
- des Einflusses von Schlagregen auf Außenbauteile
- der Auswirkungen von Umbau- oder Sanierungsmaßnahmen und

des hygrothermischen Verhaltens von Dach- und Wandkonstruktionen bei Nutzungsänderung oder in unterschiedlichen Klimazonen. [97]

Eine ausführliche Beschreibung und die Anwendung von WUFI für die Berechnung von Tunnelinnenschalen finden sich in [18]. Eine Erweiterung der Erkenntnisse von Malz wurde in [96] vorgenommen. Weitere Berechnungsverfahren werden kurz in [2] beschrieben.

## 4 LÖSUNGSVORSCHLÄGE UND VORGEHENSWEISE

Der Forschungsansatz verfolgt eine indirekte Messung der Feuchte in unterschiedlich tiefen Bohrlöchern, die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen Messwert der Fühler und Betonfeuchte in M-% und Modellrechnungen mit dem Programm WUFI der Fraunhofer Gesellschaft.

Dazu wurde im gegenständliche Forschungsvorhaben folgende Vorgehensweise gewählt:

- Die Auswahl geeigneter Sensoren (für Feuchte und Temperatur) zur Messung in unterschiedlichen Tiefen in bestehendem Beton (auch Überkopf)
- Die Befestigung und Abschließung der Sensoren in Bohrlöchern mittels geeigneten Packern
- Die Kalibrierung solcher Sensoren
- Den Aufbau kleiner Erfassungs- und Speichereinheiten
- Die Aufnahme von Feuchteprofilen an mit der ÖBB und ASFINAG ausgewählten typischen Tunnelquerschnitten über einen Jahreszyklus
- Die Aufnahme von Feuchteprofilen an verschiedenen Tunnelinnenschalenbeton-Mischungen im Klimaraum
- Die Sammlung und Auswertung der Daten
- Die Einpflegung in eine bauphysikalische Modellrechnung

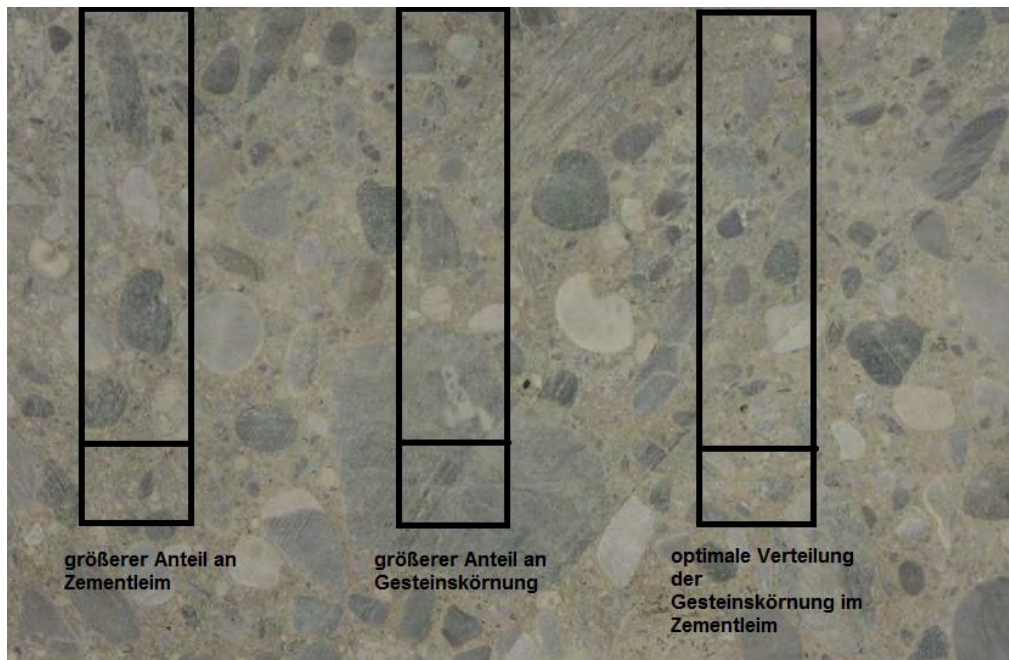
## 5 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Die durchgeführten Arbeiten waren modular gestaltet, die Arbeitsschritte bauten aufeinander auf.

### 5.1 Problematik inhomogenes Betongefüge [92]

Die in Kapitel 3.3 und 5.3 erläuterten indirekten Feuchtigkeitsmessverfahren werden nur in kleinen Bereichen des Betonbauteils eingebracht. Um trotz dessen aussagekräftige Messergebnisse über die Feuchte im Material, zu erhalten, ist eine genaue Analyse der Betonoberfläche im Messbereich notwendig. In der Theorie wird immer von einem homogenen Betongefüge ausgegangen, in dem der Gesteinszuschlag gleichmäßig in dem Zementleim verteilt ist. Durch eine Vielzahl an Einflussfaktoren bei der Herstellung und beim Einbau des Materials, repräsentiert ein inhomogenes Gefüge besser die Realität. Zu beachten ist, dass der Zementleim einen viel höheren Feuchtetransport ermöglicht, als die dichtere Zuschlagskörnung. Dies lässt sich auf die Vielzahl an offenen Kapillarporen zurückführen, die beim Aushärtungsprozess entstehen. Durch die Inhomogenität des Betons ist davon auszugehen, dass die Betonoberfläche im Hohlraum keine gleichmäßige Verteilung der Betonbestandteile aufweist. So wäre es denkbar, dass ein Feuchtigkeitsmesssensor nur die Feuchte der Gesteinskörnung misst und nicht die der Tunnelinnenschale. Deshalb ist es sinnvoll die Hohlraumoberflächen der Messstellen vor Ort zu dokumentieren, um gewonnene Ergebnisse besser auswerten zu können.

Die Abbildung 47 veranschaulicht die Problematik bei inhomogenen Betongefügen. In den weiteren Arbeiten wurde dies berücksichtigt.



**Abbildung 47: Problematik bei inhomogenem Betongefüge [92]**

## 5.2 Tunnelklima [98]

Die Einflussfaktoren auf die Klimabedingungen in Tunnelbauwerken sind komplex. Daher lassen sich keine allgemeinen Aussagen über die zu erwartenden Bedingungen in Tunnelbauwerken treffen. Während sowohl die geographische Lage der Tunnel, bauliche Merkmale und die Tunnelausstattung das Tunnelklima maßgeblich beeinflussen, muss deren Zusammenwirken für jedes Bauwerk einzeln betrachtet werden.

Diese Einflussfaktoren sind

- Die geographische Lage des Bauwerks in Bezug auf Ort und Höhenlage
- Klimazone (jahreszeitliche Entwicklung von Temperatur und relativer Luftfeuchte) außerhalb des Bauwerkes
- Sonnentage und Niederschlagshäufigkeit
- Windgeschwindigkeiten
- Länge, Trassierung und Steigung der Tunnel
- Querschnittsgestaltung und Bauweise
- Be- und Entlüftung der Tunnelröhre (z.B. über Strahlventilatoren und durch Absaugen der Tunnelabluft in eine Zwischendecke nach [92] aus [99])
- Nutzung (Verkehrs- oder Bahntunnel)
- Befahrung (in eine Richtung oder Gegenläufig)

Um das Klima in den in dieser Arbeit zu untersuchenden Tunnel und den Einfluss auf die Feuchtemessung darstellen zu können, müssen die oben genannten Faktoren für jeden Tunnel beurteilt werden.



### 5.3 Überblick über das gewählte Messsystem [Text Sindensberger]

Das gewählte System dient zur Erfassung der Luftfeuchte und der Temperatur in einem definierten Messraum innerhalb der Betoninnenschalen, der Erfassung auf der Oberfläche der Betoninnenschalen und der Erfassung der Klimadaten der äußeren Umgebung der jeweiligen Messstelle.

Pro Tunnel wurden drei Messabschnitte angelegt, wobei ein Messabschnitt jeweils aus zwei Messstellen besteht. Die Messstellen teilen sich in Ulme und Firste auf und bestehen jeweils aus sieben kreisförmig angeordneten Sensoren, wobei sechs Sensoren die Werte der Betonschale und ein Sensor die Umgebungswerte aufnimmt.

Die Sensoren übermitteln die Messdaten per I2C-Bussystem an die Datenerfassungseinheit. Hierfür werden die einzelnen Sensoren sternförmig, für Ulme und Firste getrennt, in einer Verteilung zusammengefasst und die beiden Verteilungen einzeln und getrennt bis zur Datenerfassungseinheit weitergeführt. Die Datenerfassungseinheit frägt die Sensoren in vorgegebenen Messintervallen ab und speichert die Daten im Rechner der Erfassungseinheit und auf einem externen Datenträger. Die Messwerte eines Tages werden täglich per Email verschickt, wobei der Datenbestand in der Messeinheit weiter verbleibt. Die drei Messeinheiten eines Tunnels zeichnen die Daten unabhängig voneinander auf.

Die bei der Installation aufgetretenen Luftbewegungen, führten zur Auswahl von drei Tunneln zur Installation von Anemometern. Die Messwerte der Anemometer werden analog zu den Sensordaten aufgezeichnet und gesendet.

Die Ausführung der Gehäuse und der Kabel wurden so gewählt, dass diese dem IP67 Standard entsprechen und gleichzeitig einen Schutz gegenüber elektromagnetischen Störungen bieten. Die Montage erfolgte über der Grenzhöhe des Rettungsweges. Die Kabelführungen wurden durch Kabelrohre realisiert, die je nach Anforderungen des Tunnels aus Kunststoff oder Edelstahl bestanden. Die verwendeten Kunststoffe der Kabelführungen und der Kabelisolierungen sind schwer entflammbar, zeigen nur eine geringe Rauchentwicklung und sind halogenfrei.

#### Datenübertragung aus den Tunnels

Generell werden die Daten von zwei Sensornetzen bei jedem Messabschnitt von einer Dateneinheit aufgezeichnet. Geplant war die Übertragung der Daten an die OTH Regensburg durch die Nutzung des GSM-Funknetzes lokaler Mobilfunkanbieter.

Die unterschiedlichen Gegebenheiten der Tunnel erforderten eine Anpassung der ursprünglich geplanten Datenübertragung, da nicht in jedem Tunnel eine ausreichende Netzabdeckung vorhanden war. Eingesetzt wurden hierfür verschiedene Methoden.

**Tabelle 5 Übertragungsmethoden der 4 ausgewählten Tunnels**

Tunnel	Übertragungsmethode
Inntaltunnel	Zwei der Dateneinheiten kommunizieren über im Tunnel vorhandene Modemverbindungen mit dem Betriebshaus. Ein Server im Betriebshaus überträgt die Daten mittels Mobilfunknetz.  Die Dateneinheit in Portal- bzw. Betriebshausnähe verfügt noch über ausreichend Netzabdeckung und überträgt selbständig.
Hengsbergtunnel	Die geringe Netzabdeckung in diesem Tunnel erforderte die Nachrüstung von leistungsstärkeren UMTS-Einheiten und den Einsatz von Richtfunkantennen zur Steigerung des Empfangs.
Tunnel Selzthal	Einsatz von gängigen UMTS-Einheiten.
Tunnel Strengen	Einsatz von gängigen UMTS-Einheiten.

Die geringere Netzabdeckung der Eisenbahntunnel konnte mit entsprechenden Lösungen ausgeglichen werden. Die Netzabdeckung der Straßentunnel war in der Regel ausreichend.



**Abbildung 48: Datenerfassungseinheit mit zusätzlicher Richtantenne und aufgesetztem Anemometer (rot)**

### Auswahl des Temperatur- und Feuchtsensors und des Anemometers

Die Wahl des Sensors fiel nach Literaturrecherche [100] und Laborversuchen (Kapitel 5.5) auf den Sensirion SHT21, wobei mehrere Sensoren unterschiedlicher Hersteller und Typs auf ihre Eignung hin geprüft wurden.

Der SHT21 verfügt über eine ausreichende Auflösung der Messwerte und zeigt zusätzlich eine ausreichende Resistivität gegenüber den im Beton bzw. im Hohlraum der Messung herrschenden Umweltbedingungen. Die hierbei hauptsächliche Eigenschaft ist die Widerstandsfähigkeit gegenüber dem hohen pH-Wert.



**Abbildung 49: Verwendeter Sensortyp SHT21 des Herstellers Sensirion**

Der Sensor SHT21 besitzt hierbei eine Dimension von 3 x 3 x 1,1 mm und beeinflusst die resultierende Größe der verwendeten Platine dadurch positiv. Der Sensor wird über eine niedrige Gleichspannung versorgt und besitzt ein I2C-Bussystem zur Übertragung der Messdaten. Zusätzliche Peripherie ist nicht bzw. nur in geringem Umfang notwendig, weshalb das Platinendesign einfach ausfallen kann.

Ein ergänzender Schutz des Sensors wurde durch den Einsatz eines Filterbauteils erreicht, das den Sensor abdeckt. Eine in das Filterbauteil integrierte Membran erlaubt den Austausch von Feuchtigkeit, hält aber eventuell auftretenden Stäube zurück.



**Abbildung 50: Filterkappe zum Schutz des Sensors**

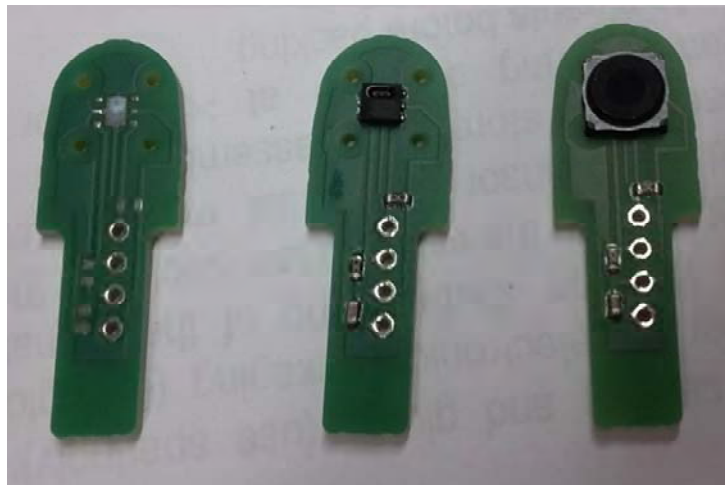
**Tabelle 6: Datenblatt Sensirion**

**Datenblattauszug zu Sensirion SHT21**

Typische Feuchte [%RH]	+/- 2
Auflösung Feuchte bei 8 Bit [%RH]	0,7
Typische Temperatur [°C]	+/- 0,3
Auflösung Temperatur bei 12 Bit [°C]	0,04
Spannungsbereich [V]	2,1 – 3,6
Energieverbrauch [µW]	3,2

**Platinendesign**

Das einfache Design der resultierenden Platine wird mit analogen elektronischen Bauteilen bestückt und bietet daher nur wenige Möglichkeiten zur Fehleranfälligkeit im Einsatz.



**Abbildung 51: Schrittweise Bestückung der Platine**

Form und Ränder der Platine wurden so gewählt, dass der Kontakt der Sensorplatine mit den Rändern und dem Ende der Bohrungen eine mechanische Beschädigung bei der Installation ausschließt. Die Installation kann dadurch mit nur minimaler Rücksichtnahme auf den Sensor erfolgen.

Die Verwendung von analogen, vergleichsweise unempfindlichen, elektronischen Bauteilen und der Filterkappe erlauben den Einsatz von Spezialdichtmasse. Die Dichtmasse versiegelt hierbei gleichzeitig die elektronischen Bauteile und die Platine selbst gegenüber der Umgebung und schließt den verwendeten Packer gegenüber dem Tunnel luftdicht ab. Hierdurch muss lediglich die Membranfläche der Filterkappe freibleiben.



**Abbildung 52: Position der Sensorplatine im Packer**

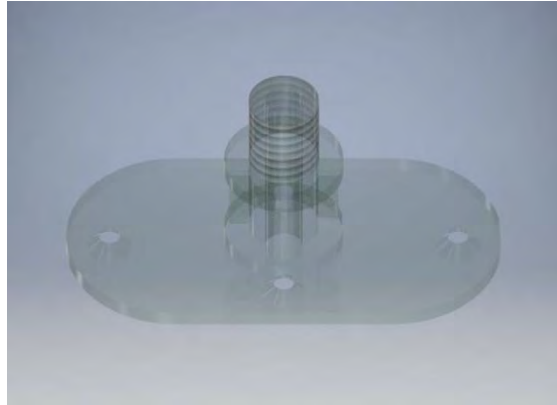


**Abbildung 53: Abdichtung der Platine durch Dichtmittel**

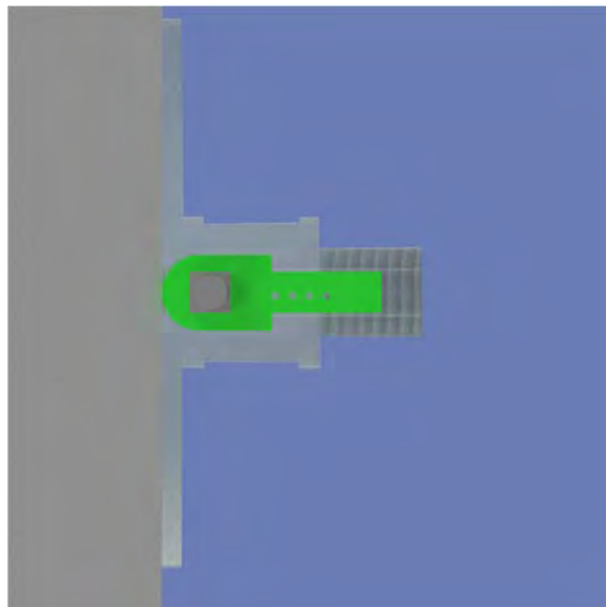
### Messung der relativen Luftfeuchte

Die Messung der Betonfeuchte geschieht indirekt über die sich einstellende Luftfeuchte innerhalb des Hohlraums der Bohrung. Der verwendete Packer verschließt hierbei den durch die Bohrung entstandenen Halbkörper der Bohrung und unterbindet zusammen mit dem Dichtmaterial einen Luftaustausch mit dem Tunnel. Die Messungen finden in verschiedenen Tiefenstufen der Innenschale statt und werden durch eine Messung der Tunnelluft ergänzt. Zur Auswahl der Packer siehe auch Kapitel 5.5.

Zur Anwendung kommen zwei verschiedenen Typen von Packern. Zur Messung der Bedingungen im Tunnel und zur Messung der 0 cm und 1 cm Bohrtiefe kommt ein Oberflächenpacker zum Einsatz.

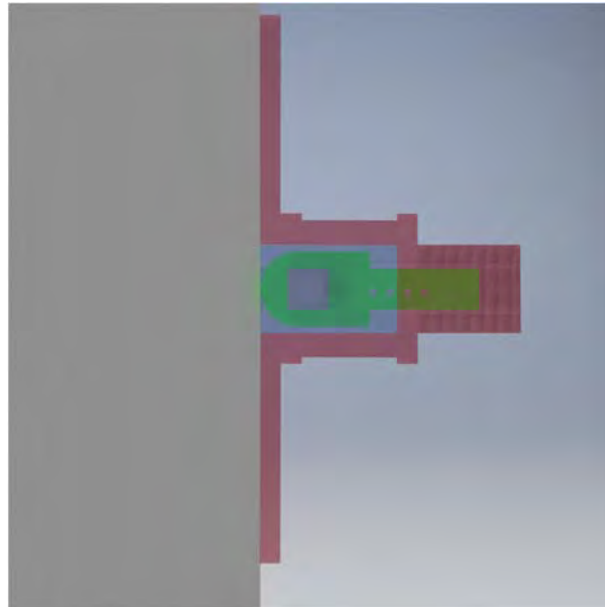


**Abbildung 54: Oberflächenpacker**



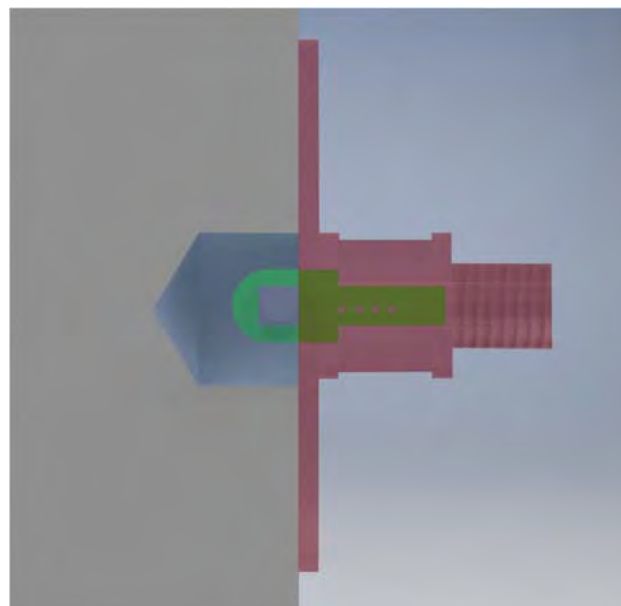
**Abbildung 55: Oberflächenpacker zur Messung der Tunnelumgebung**

Bei der Messung der Umgebungsluft im Tunnel wurden die Seiten des Packers geöffnet und das Dichtmittel lediglich zur Fixierung des Sensorkabels eingesetzt. Der Packer wird hierbei nur an der Innenschale aufgesetzt und befestigt.



**Abbildung 56: Oberflächenpacker zur Messung der Oberfläche (Blaue Fläche zeigt das Messvolumen, rote Fläche die effektive Dichtung).**

Die Messung an der Oberfläche der Innenschale geschieht durch einen abgedichteten Oberflächenpacker. Der Innenraum des abgedichteten Packers ergibt das Messvolumen für die relative Luftfeuchte. Die Dichtung wird durch ein Dichtmittel um den Rand des Packers und an der Durchführung des Sensorkabels erreicht.



**Abbildung 57: Oberflächenpacker zur Messung in 1 cm Tiefe (Blaue Fläche zeigt das Messvolumen, rote Fläche die effektive Dichtung).**

Für die Messung der Feuchte und der Temperatur in einer Tiefe von 1 cm wird ebenfalls der Oberflächenpacker verwendet. Das Messvolumen wird hierbei durch den Packer begrenzt und die Dichtheit durch Dichtmittel erreicht.

Die Messungen in den tieferen Stufen wurden mit einem Schlagpacker realisiert, der für die jeweilige Tiefenstufe gekürzt wurde. Die Dichtung erfolgte hierbei durch die Randlamellen des Packers und durch ein Dichtmittel.



**Abbildung 58: Schlagpacker für tiefere Messstufen (Blaue Fläche zeigt das Messvolumen, rote Fläche die effektive Dichtung).**

Alternative Messsysteme, speziell Multiringelektrode finden sich in Kapitel 3.3 und [35] Kalibrierung siehe Kapitel 3.7.



**Abbildung 59: Übersicht Messeinrichtung vor Tunnelmontage**

#### Anemometer

Die Auswahl des Anemometers wurde durch dessen Größe und die Sicherheitsvorschriften der Tunnelbetreiber beschränkt. Zum Einsatz kam daher ein Flügelradanemometer des Herstellers Schiltknecht, Typ MiniAir 64. Das Anemometer besteht aus der in den Haltestab integrierten Auswerteinheit und einem Kopf mit dem Flügelrad. Beide Teile sind voneinander unabhängig und bieten im Falle eines Ablösens durch ihr geringes Gewicht äußerst wenig Schadensrisiko.



**Tabelle 6: Schiltknecht Anemometer**



Datenblattauszug zu Schiltknecht MiniAir 64

Messbereich [m/s]	0 - 40
Fühlergesamtlänge [mm]	175

#### 5.4 Einsatz der Sensoren

Die Sensoren geben einen Messwert, der aber noch auf verschiedene Weise kalibriert werden muss (Siehe Kapitel 6.1 und 6.2). Die Kalibrierung erfolgt auf folgende Weisen:

- Temperaturkompensation nach Herstellerangaben
- Sorptionsisothermen (klassisch und mit VSorp)
- Massenmäßige Ermittlung aus Klimakammeruntersuchungen (ansteigende und abfallende Feuchteprofile)
- Vergleich mit der Ringelektrode

#### 5.5 Befestigung der Sensoren [92]

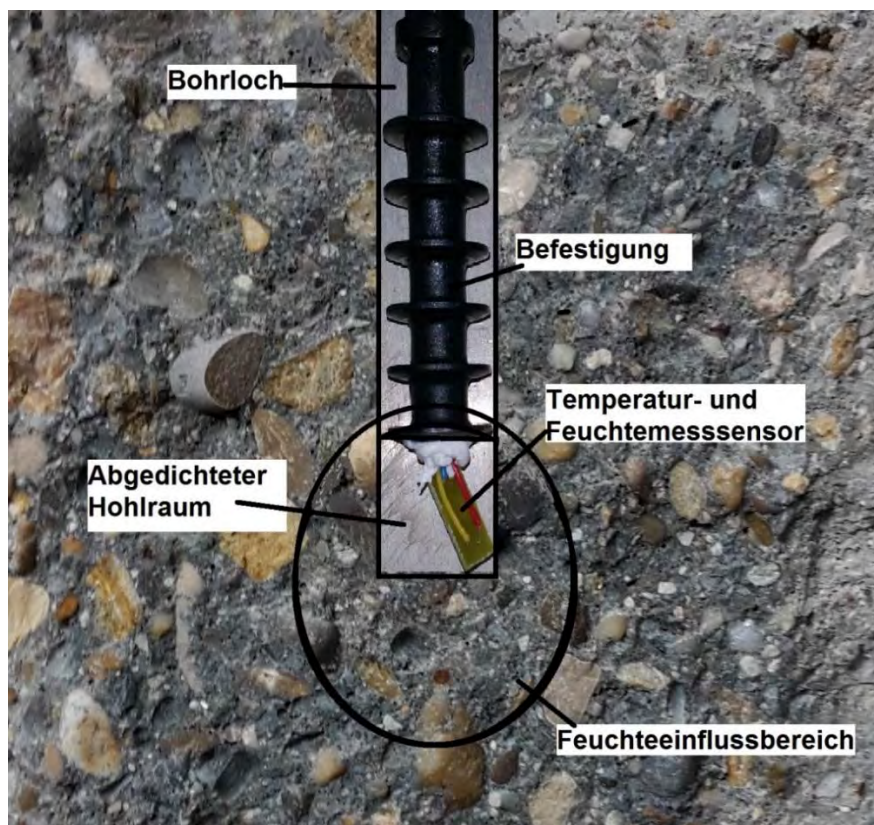
##### Beeinflussung der Temperatur und der Feuchte im Bohrloch [92]

Bei den Befestigungsvarianten der Fühler im Bohrloch liegt das Hauptaugenmerk auf der vollkommenen Abschirmung der Sensoren von den Umgebungseinflüssen an der Betonoberfläche. Dies bedeutet, dass die Befestigungsvorrichtung die sensiblen Messeinheiten im Hinblick auf Temperatur und relative Luftfeuchte nicht beeinflussen darf, da sonst die Messergebnisse stark verfälscht würden.

Somit muss die Befestigung zum einen den vorgesehenen Hohlraum sicher luftdicht verschließen und zum anderen darf das Befestigungsmaterial selbst auch keine Temperatur beziehungsweise Feuchte zum Sensor transportieren. Wenn auf diesen Kriterien genügend eingegangen wird, ist es möglich einen Befestigungsaufbau zu konstruieren, der die reale Feuchte- und Temperaturverteilung über den Betonquerschnitt mit sehr geringen Ungenauigkeiten widerspiegelt.

## Konstantes Hohlraumvolumen

Um in den unterschiedlichen Messtiefen die Messwerte optimal vergleichen zu können, ist es sinnvoll ein identisches Hohlraumvolumen anzustreben. Dieser wird hauptsächlich durch die Größe der Messinstrumente bestimmt. Im Laufe der ersten Klimakammerversuche gelang es die Sensoren zu verkleinern und somit auch die Hohlraumtiefe auf 2 cm und einem Bohrdurchmesser von 18 mm zu minimieren. Dadurch ist es möglich die Feuchteverteilung über den Bauteilquerschnitt detaillierter darzustellen. Vor allem in der Betonrandzone stellt dies eine erhebliche Verbesserung dar. Um immer das gleiche Volumen zu garantieren, muss der Monteur besonders genau arbeiten. Mit Hilfe eines markierten Abstandhalters an der Bohrmaschine, ist es möglich ohne großen Aufwand nacheinander die unterschiedlich tiefen Löcher zu bohren. Zudem wurde für das Projekt extra eine spezielle Einschlaghilfe angefertigt, die es erleichtert den verkabelten Packer exakt einzuschlagen. Durch diese Hilfen wird sichergestellt, dass der nötige Platz für die Sensorik immer gewährleistet wird und zudem das Hohlraumvolumen in den unterschiedlichen Tiefen identisch ist. Der Feuchtegehalt wird bei der späteren Auswertung der Messergebnisse in Massen - % angegeben, abgeleitet wird dieser über das immer gleiche Hohlraumvolumen, die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte im Bohrloch mit Hilfe von Sorptionsisothermen. Die Abbildung 60 zeigt schematisch den Feuchteinflussbereich auf das Hohlraumvolumen.



**Abbildung 60: Darstellung des Feuchteinflussbereichs auf das Hohlraumvolumen**

## Denkbare Befestigungssysteme

Die enorme Vielfalt der Befestigungssysteme ist eine genaue Analyse der Anforderungen notwendig. Die nötige Kraftübertragung wird hauptsächlich über die entstehende Reibung zwischen Befestigung und Bohrlochwand erreicht. Diese kann durch einen Klebstoff, der

eingepresst wird, oder durch eine einspreizende Form der Befestigung im Bohrloch verbessert werden. Da das System nur für die Zeit der Versuchsdurchführung im Tunnel verbleiben soll, wurden Klebevarianten ausgeschlossen.

Zudem ist es von größter Wichtigkeit, dass der abgeschlossene Hohlraum nicht durch die Befestigungsvariante beeinflusst werden kann. Somit fallen zum einen alle metallischen Materialien aus der engeren Auswahl, da diese besonders gut Wärme leiten und dadurch eine Veränderung der Temperatur im Bohrloch bewirken würden. Zum anderen sind auch alle porösen Materialien auszuschließen. Durch solch eine Befestigung wäre eine Beeinflussung der relativen Luftfeuchte denkbar und die gesammelten Messergebnisse wären nicht mehr tragbar. Übrig bleiben deshalb die resistenten Kunststoffprodukte, die auf dem Markt in einer erheblichen Vielfalt angeboten werden.

Um das große Angebot weiter einzugrenzen, ist auf die verbaute Technik im Bohrloch genauer einzugehen. Jeder einzelne Sensor überträgt seine gesammelten Messdaten mittels eines Kabels, dadurch muss das Befestigungssystem eine Möglichkeit der Kabeldurchführung bieten. In Folge dieser Anforderung kristallisierten sich die Injektionspacker klar aus dem großen Spektrum der Befestigungssysteme heraus. Diese bieten eine zentrische Bohrung, die in der Praxis zum Einpressen der Injektionsflüssigkeit dient. Für den an der Oberfläche zu befestigende Sensor, wird ein Klebepacker aus hartem Polycarbonat vorgesehen.

#### Injektionspacker Vor- und Nachteile

Einen möglichen Nachteil der Kunststoffpacker, stellen die hohen Anforderungen an die Einbaugenauigkeit dar. Denn der Einsatz der Packer, ist nur dann sinnvoll, wenn eine exakte und saubere Arbeitsweise möglich ist. Die Bohrungen müssen rund und gleichmäßig in die Betoninnenschale gearbeitet werden, da die Injektionspacker nur dann richtig befestigt werden können. Ein weiterer Nachteil entsteht durch die Verformung der Lamellen beim Einschlagen des Packers, da dadurch kleine Durchlässe zwischen Betonoberfläche und Lamellen entstehen können. Um die absolute Dichtigkeit zu garantieren, ist es nötig das System von außen mit einer Dichtmasse zu versiegeln. Da die Injektionspacker in allen möglichen Formen, Größen und Materialien auf dem Markt vertreten sind, ist diese Vielfalt als großer Pluspunkt zu bewerten. So war es möglich, einige Modelle auf ihre Eignung in Bezug auf das Projekt zu testen, um später optimale Messergebnisse zu erzielen. Zudem ist es eine sehr leichte und kostengünstige Befestigungsvariante, die auch bei gekürzter Länge die Sensorik sicher im Bohrloch verankert. Ein weiteres praktisches Merkmal an den Injektionspackern ist außerdem das zentrierte, durchgehende Loch, welches als Kabeldurchführung für den Informationsaustausch zwischen Speichermedium und Sensor leicht genutzt werden kann. Mittels der zugehörigen Einschlaghilfe ist es möglich das Befestigungssystem präzise in die Öffnung zu schlagen, ohne dass der Packer zu weit in das Bohrloch geschoben werden kann. Als letzter positiver Aspekt ist die Austauschbarkeit des Systems zu nennen, da dies nur für eine bestimmte Dauer genutzt werden soll.

#### Arbeitsvorgänge

Die Arbeitsschritte beziehen sich auf drei Schritte:

Zunächst sind die Bohrungen zu setzen. Es ist darauf zu achten, dass der Bohrer ganz eingeschoben ist, wenn der Abstandshalter eingemessen wird. Für die spätere Montage im Tunnel erleichtern Markierungen am Abstandshalter die Arbeit. Das Bohren mit einem speziellen Hohlbohrer ist ideal für die Arbeiten im Tunnelbereich, da dieser bereits beim

Bohren den Staub absaugt. Dadurch werden die Arbeitsbedingungen optimiert und zudem entfällt das Ausblasen der Bohrung. Sobald alle Tiefen gefertigt wurden ist es sinnvoll die Tiefen noch einmal nachzumessen und die Bohrungen anschließend zu beschriften. Mit Hilfe eines Endoskops kann die Bohrlochwandung hinsichtlich Homogenität untersucht und dokumentiert werden. Es wichtig eine gleichmäßige Verteilung des Zuschlags im Zementleim vorzufinden. Andernfalls werden die Feuchtemessergebnisse verfälscht.

Der zweite Arbeitsschritt bezieht sich auf die Befestigung der Sensorik mit den Injektionspackern. Diese müssen vorab auf die unterschiedlichen Bohrlochtiefen zugeschnitten werden, um den Hohlraum konstant zu halten.

Die Sensoren stellen das dritte und wichtigste Bauteil dar. Sie werden mit dem Kunststoffpacker bereits im Labor verbunden, da kein nachträglicher Einbau möglich ist. Dabei ist darauf zu achten, dass die Platine fest an der Spitze der Befestigung sitzt, sonst besteht die Gefahr einer Beschädigung beim Einschlagen. Über die mittige Bohrung wird das Kabel, welches die Messstelle mit dem Speichermedium verbindet, verlegt und abgedichtet. Es ist darauf zu achten, dass besonders die Durchführung, die im Hohlraum endet, sauber abgedichtet wird, nur so ist es möglich einen Feuchtetransport auszuschließen.

Die bereits verbundenen Bauteile werden in einem letzten Arbeitsschritt mittels einer extra angefertigten Einschlaghilfe in den Beton eingebracht. Diese spezielle Einschlaghilfe besteht aus einem Stahlrohr, welches für die Kabeldurchführung geschlitzt wurde. Außerdem ist es sinnvoll einen schweren Hammer zu verwenden, da dieser die nötigen Schläge reduziert und dadurch die sensible Sensorik schont. Schlussendlich erfolgt noch eine Abdichtung mit Dichtmasse.

#### Auswahl, Entwicklung von Befestigungen für Sensoren im Bohrloch

Zur Auswahl standen 5 verschiedene Packer von 4 verschiedenen Herstellern. Alle Befestigungsvarianten besitzen unterschiedliche Lamellen und eine Möglichkeit der Kabeldurchführung. Die Lamellen sorgen für einen stabilen halt, durch Reibung an der Bohrlochwand und dichten den inneren Hohlraum zusätzlich vor Feuchtetransport ab. In der folgenden Tabelle 7 und in den Abbildungen 61 bis 65 sind alle verwendeten Packer aufgelistet.

**Tabelle 7: Übersicht über die getesteten Kunststoffpacker des Balken 1**

Packer	Bezeichnung	Bohrloch	Abbildung
1	<b>Dittmann</b> Packer 18mm mit Kegelnippel AM 2-10010	1	61
2	<b>Dittmann</b> Packer 18mm mit Kegelnippel NM 2-10011	2	62
3	<b>b&amp;m</b> GmbH Schlagpacker Durchlauf ohne Ventil D18mm	3	63
4	<b>SKP</b> Kunststoffpacker D18mm mit Anschlagteller	4	64
5	<b>Desoi</b> Lamellenschlagpacker D18mm	5	65

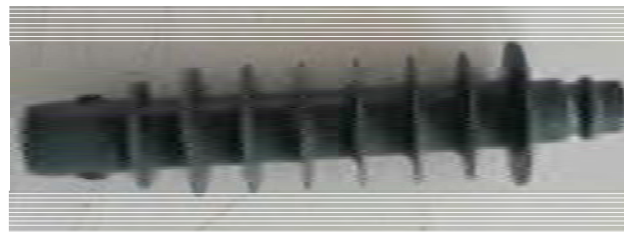


**Abbildung 61: Dittmann Packer AM 2-10010**

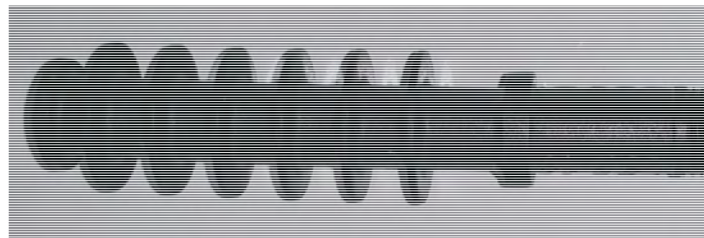
**Abbildung 62: Dittmann Packer NM 2-10011**



**Abbildung 63: b&m Packer**



**Abbildung 64: SKP Packer**



**Abbildung 65: DESOI Packer**

### Prüfung gegen Herausfallen

Die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer steht an oberster Stelle, somit ist es wichtig, dass die Kunststoffpacker kraftschlüssig mit dem Beton verbunden sind. Außerdem kennzeichnet ein fester Sitz in der Tunnelinnenschale eine gute Abdichtung des Prüfraums. Da dies das ausschlaggebende Kriterium ist, wurden alle in Frage kommenden Injektionspacker, in einem Ausschiebeversuch getestet.

Zur Versuchsdurchführung wurden fünf durchgehende Löcher, mit dem Durchmesser von 18 mm in einen Betonbalken gebohrt (erster Bohrversuch).

Mittels einer selbst hergestellten Schlaghilfe aus einem Stahlrohr, mit einem Außendurchmesser von 16 mm und einem Innendurchmesser von 14 mm, wurden die Packer eingeschlagen. Im Bohrloch 1 befindet sich der Packer 1 von Dittmann. Dieser Packer war nur sehr mühsam einzuschlagen. Nach den ersten zwei Lamellen bricht dieser Packer an seiner schwachen Stelle. Packer 2, ebenso von Dittmann, wiederum war sehr leicht einzuschlagen, aber die Einschlagseite verbog sich durch die Schläge, so dass keine Kabelführung durch diese mehr möglich wäre. Für den Packer 3 von b&m, Basis-Injektor

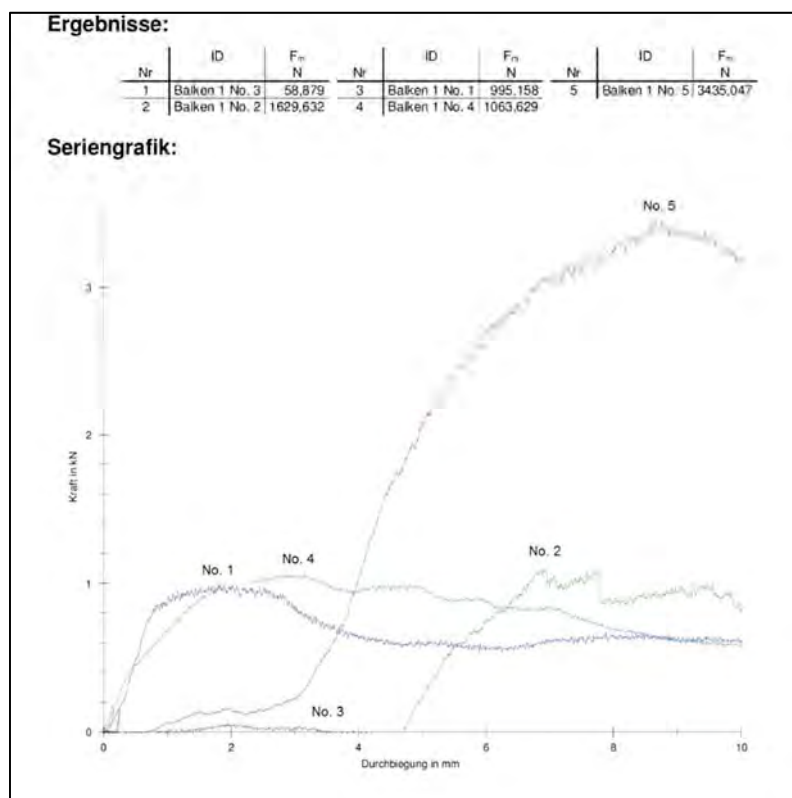
D18 ND, reichten ein paar leichte Schläge um diese komplett im Balken zu versenken und der Kopf erlitt keine Beschädigung. Der Kunststoffpacker D18mm mit Anschlagteller von SKP ist dem Packer 3 gleichzusetzen, dieser ließ sich ebenfalls sehr leicht einsenken. Der Unterschied zwischen diesen Packern 3 und 4 ist, dass Packer 4 an der ersten Lamelle einen größeren Durchmesser und eine abdichtende Funktion an der Bohroberkante hat. Der letzte Packer im Bohrloch 5 ist der von DESOI, Lamellenpacker mit Außengewinde R ¼" und freiem Durchgang  $\varnothing$  7mm. Dieser weist robustere Lamellen auf, als alle anderen Befestigungsvarianten. Nur mit gezielten und wuchtigen Schlägen ließ sich dieser einsenken und dennoch blieb der Desoi-Packer sehr stabil.

Der erste Betonbalken mit den fünf eingeschlagenen Befestigungsvarianten zeigt die Abbildung 66.



**Abbildung 66: 1. Bohrversuch**

Mit Hilfe einer umgebauten Universalprüfmaschine ist es möglich, die Kunststoffbefestigungen gegen ihre Einschlagrichtung auszudrücken. Dabei zeichnet das Prüfgerät ein Kraft-Weg-Diagramm auf und hält die Maximalwerte in einer Tabelle fest. Die Abbildung 67 stellt einen Auszug aus [92] dar.



**Abbildung 67: Auswertung des Ausschiebeversuchs am ersten Balken, Auszug aus [92]**

Das ausgegebene Diagramm zeigt deutlich, dass sich eine Befestigung deutlich von den Restlichen abhebt. Es handelt sich um den Lamellenschlagpacker der Firma DESOI. Für Packer 5 musste eine circa 3,4-fache Kraft aufgewendet werden, um ihn aus dem Bohrloch zu schieben.

Auf den folgenden Abbildungen sind die Packer nach den Versuchen dargestellt. Darauf ist zu erkennen, dass sich die Lamellen, nicht bei jedem Model, optimal an die Bohrlochoberfläche anlegen. Die Lamellen aus sehr weichen Materialien verziehen sich beim Einschlagen zu stark, um den Hohlraum ausreichend abzudichten. Nur das Produkt des Herstellers Desoi kann durch seine stabile Bauweise überzeugen.



**Abbildung 68: Packer 1 von Dittmann**



**Abbildung 69: Packer 2 von Dittmann**



**Abbildung 70: Packer 3 von b&m**



**Abbildung 71: Packer 4 von SKP**

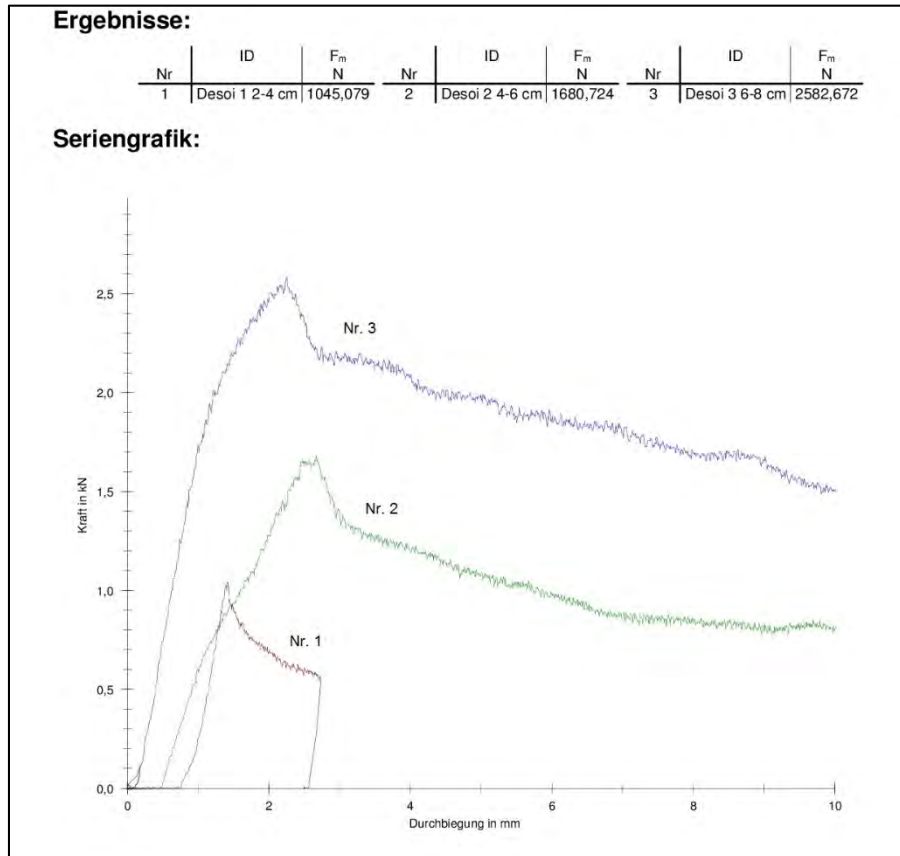


**Abbildung 72: Packer 5 vom Hersteller Desoi**

In einer zweiten Versuchsreihe wurde ausschließlich der Packer von Desoi getestet. Da für die Feuchteverteilung über den Querschnitt, Hohlräume in unterschiedlichen Tiefen erforderlich sind, müssen die Kunststoffpacker zum Teil gekürzt werden. In diesem Versuch wurde überprüft, ob die bearbeiteten Packer dennoch einen ausreichenden Halt aufweisen. Für die Tiefe 2-5 cm ergeben sich insgesamt 3 Lamellen, in der Tiefe 4-7 cm 5 Lamellen und

die restlichen Tiefen bleibt die gesamte Länge erhalten, also 6 Lamellen. Die Ergebnisse des zweiten Ausschiebeversuchs werden in der Abbildung 73 aufgezeichnet.

Da man für das Herausdrücken des am stärksten gekürzten Packer, eine Kraft von über 1000 Newton benötigt, kann man von einem festen Sitz in der Betoninnenschale ausgehen. Vor allem da die Sensoren nur ein sehr geringes Gewicht aufweisen, ist dieser Wert mehr als ausreichend.



**Abbildung 73: Auswertung des Ausschiebeversuchs am zweiten Balken mit unterschiedlicher Verankerungstiefe des DESOI Lamellenschlagpackers [92]**

#### Prüfung der Dichtigkeit [92]

Die vorangegangenen Versuche an der Biegezugprüfmaschine stellen zwar einen Anhaltspunkt für die Dichtigkeit der Injektionspacker dar, dennoch ist es sinnvoll separate Untersuchungen durchzuführen. Die Genauigkeit der Messergebnisse hängt stark von der Dichtigkeit des Hohlraums ab, deshalb ist zu prüfen, ob die Messstellen zusätzlich mit einer Dichtmasse versiegelt werden müssen. Bei der Auswahl des Klebstoffs ist auf einige Besonderheiten Rücksicht zu nehmen. Auf die Lösungsmittelfreiheit der Masse ist, wegen der empfindlichen Sensoren, besonders zu achten. Außerdem sollte eine gute Verarbeitbarkeit, Witterungsbeständigkeit sowie eine gute Haftung auf den unterschiedlichen Materialien zu den Eigenschaften des Dichtstoffs zählen. Für die Versuchsreihe wird deshalb der hochwertige Dichtstoff „Sikaflex AT-Connection“ verwendet.

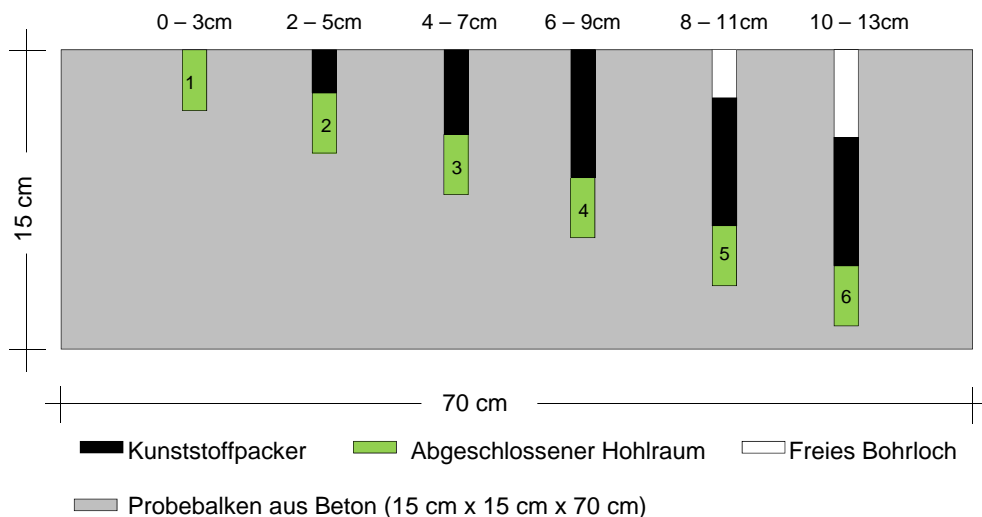
Für die Durchführung des Versuchs wurde zunächst ein balkenförmiger Probekörper mit den unterschiedlich tiefen Bohrungen ausgestattet. Zu jeder Bohrung gehört ein angepasster Kunststoffpacker, diese wurden in die vorgesehenen Löcher eingeschlagen. Ein abgeschlossenes Volumen ist nötig, um den Druckabfall über die Zeit zu dokumentieren. Dazu



dient ein Druckluftbehälter, der über einen Schlauch mit Injektionspacker verbunden wurde. Dadurch kann die Druckluft nur noch zwischen Bohrlochwand und Befestigung entweichen. Der Versuchsaufbau zur Druckluftprüfung ist in der Abbildung 74 dargestellt. Getestet wurde an den Messstellen zwei bis vier. Dabei sind die ersten zwei besonders kritisch, da diese durch die gekürzten Injektionspacker abgedichtet werden. Messstelle vier diente als Vergleichsobjekt und repräsentiert alle tiefergehenden Hohlräume mit ungekürzten Packer. Eine Übersicht der Messstellen im Probekörper bietet die Abbildung 75.

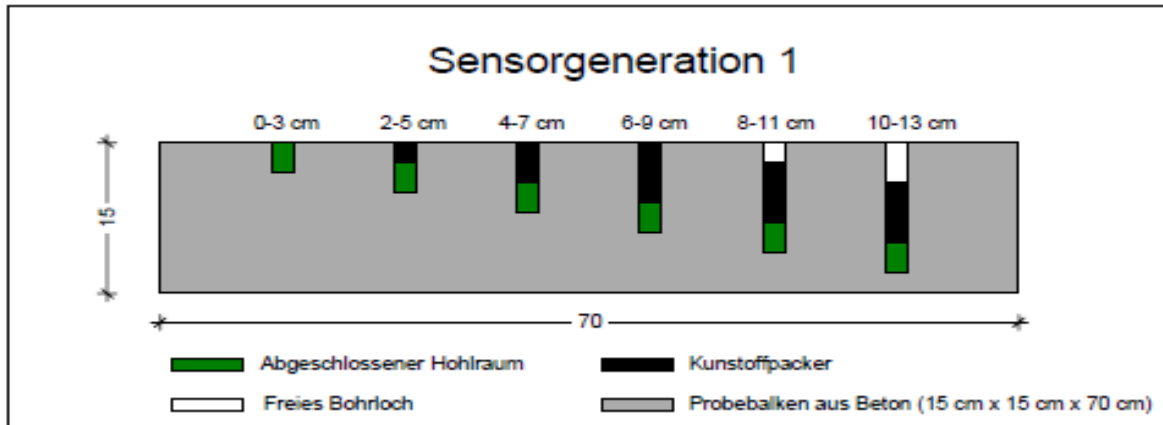


**Abbildung 74: Versuchsaufbau zur Prüfung der Dichtigkeit**

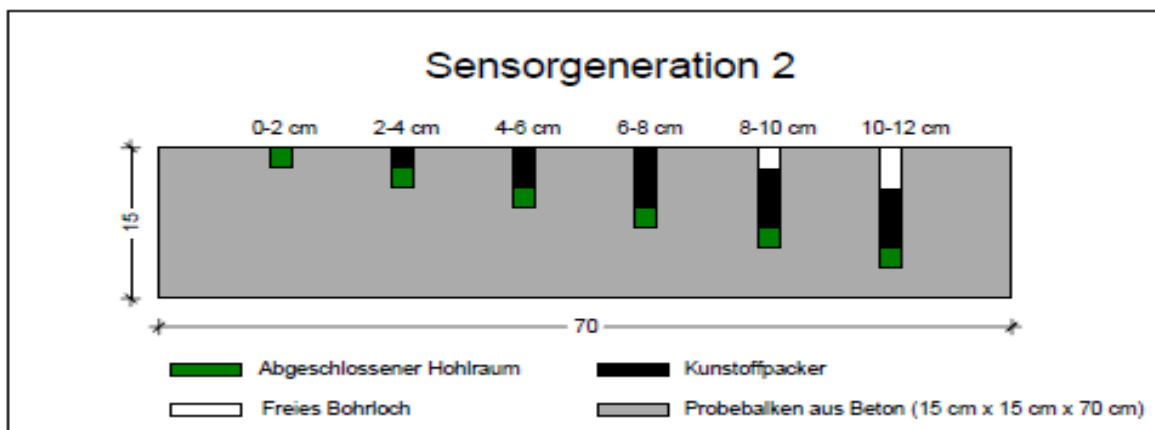


**Abbildung 75: Übersicht der Einbauten im Probekörper**

In den Abbildungen 76 und 77 sind die Montagegenauigkeiten der Sensorgeneration 1 und 2 dargestellt.

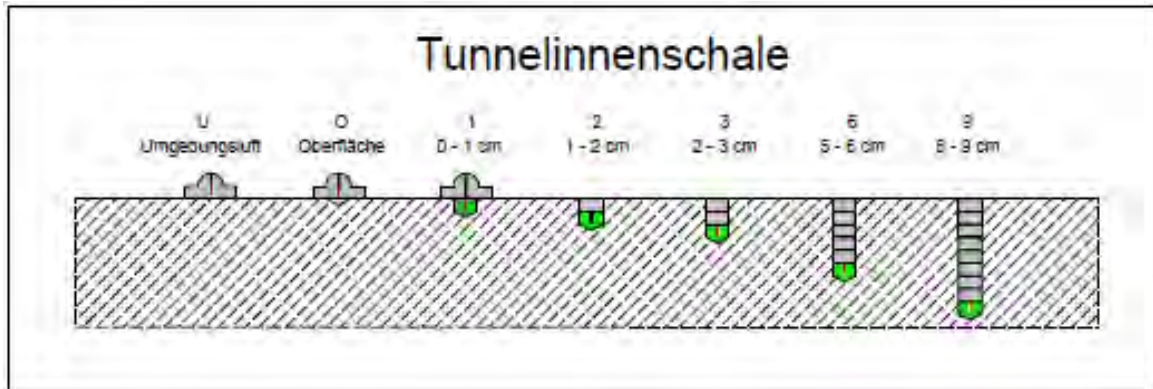


**Abbildung 76: Montagegenauigkeit und Hohlraumvolumen Sensorgeneration 1 [98]**

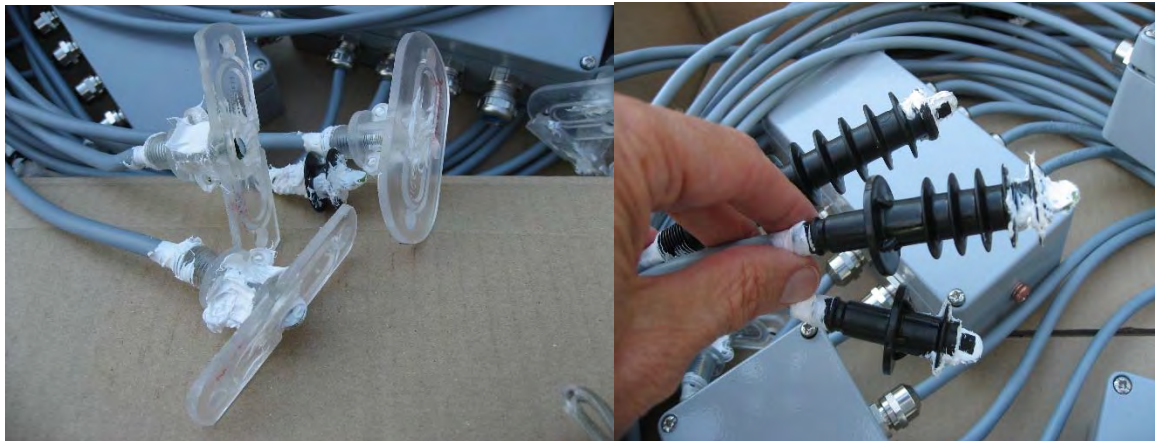


**Abbildung 77: Montagegenauigkeit und Hohlraumvolumen Sensorgeneration 2 [98]**

Die Annahme, dass der massenbezogene Feuchtegehalt in Tunnelinnenschalen nur im Randbereich starken Schwankungen unterliegt, führte darüber hinaus zu einer weiteren Verfeinerung der Messbereiche im Oberflächenbereich der Tunnelinnenschale [36] [52]. Ziel ist es, die Bereiche, die einen ausgeprägten Feuchteaustausch mit den Umgebungsbedingungen im Tunnel aufweisen, detaillierter darstellen zu können [98]. Wie bereits erwähnt, konnte anhand von Forschungen im Bereich der Brandsicherheit von Tunnel nachgewiesen werden, dass im Brandfall Abplatzungen hauptsächlich in diesem Bereich der Betonoberfläche auftreten [10]. Um Bereiche in der Betonrandzone darstellen zu können, wurden neben den Schlagpackern Klebpacker verwendet, die einer Montage der Sensoren im Oberflächenbereich zulassen. Abbildung 78 zeigt den Messaufbau mit zugehörigen Bohrloch und Hohlraumtiefen in den Tunneln.



**Abbildung 78: Montagegenauigkeiten im Tunnel.**



**Abbildung 79: Gesamtes Sensorpaket für Montagen in den Tunneln; Links Klebepacker; rechts Schlagpacker [98]**

Details zur Montage in den Tunnels finden sich in [98].

In den Diagrammen aus Abbildung 80 und 81 ist der Druckabfall über die Zeit dargestellt. Bei der Auswertung der Daten wurde deutlich, dass die oberflächennahen, gekürzten Packer eine deutlich bessere Dichtigkeit durch die Abdichtungsmaßnahme aufweisen [92]. Anders ist es bei den tiefergelegenen Messstellen, hier flacht die Effektivität der Dichtmasse ab. Dies kann auf die bereits vorherrschenden guten Abdichtungseigenschaften der Packer zurückgeführt werden.

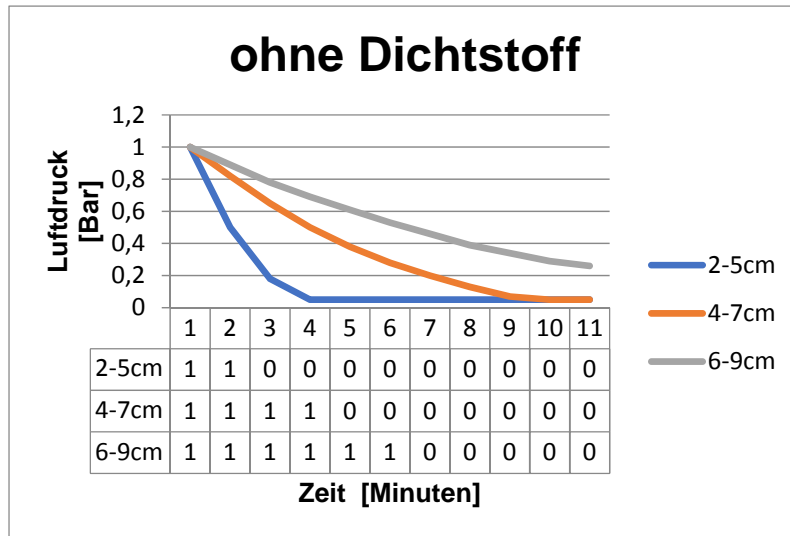


Abbildung 80: Dichtigkeitsprüfung ohne Dichtmasse [92]

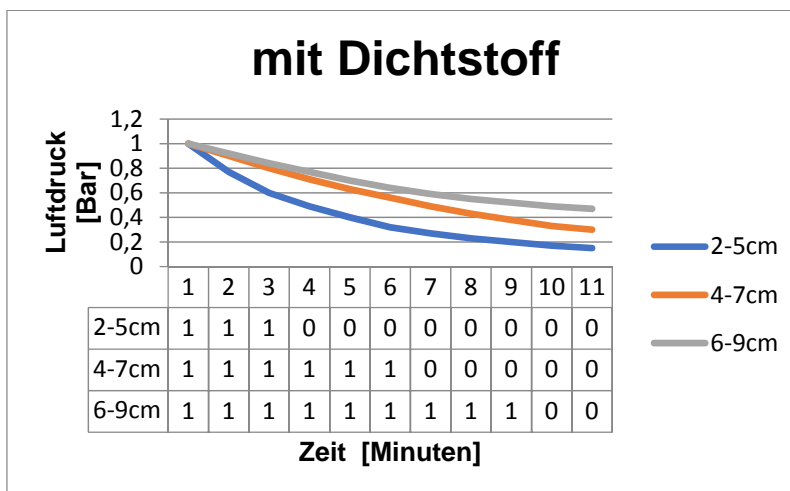
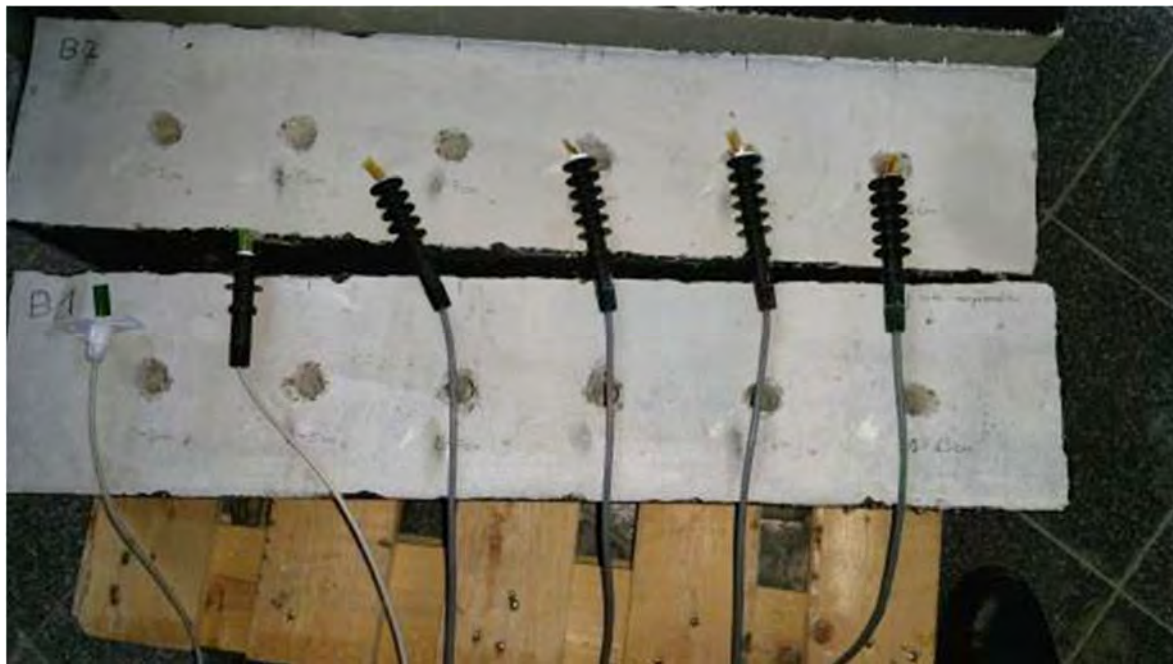


Abbildung 81: Dichtigkeitsprüfung mit Dichtmasse [92]

#### Test des Prüfaufbaus im Klimaschrank [92]

Für den Versuch sind die Probekörper aus der Versuchsreihe V.1 (Bezeichnungen siehe Kapitel 5.8) mit einem Mischgut aus der OTH Regensburg bestückt. Mit diesem Test sollte gezeigt werden, dass die Sensoren bei einer Temperatur- und Feuchteänderung auch wirklich funktionieren und richtige Ergebnisse zur Auswertung herausgeben. Hierfür werden 2 Balken mit Sensoren in den verschiedenen Tiefen mit dem DESOI Packer eingesetzt. Für die Tiefe 0-3 cm ist ein Klebepacker rund mit Kegelpacknippel von der Firma Dittmann aufgeschraubt und verklebt, Abbildung 82.

Um später Rückschlüsse aus den Messergebnissen ziehen zu können, wurden von allen Bohrungen Fotos gemacht. Die Aufnahmen zeigen das Betongefüge im Hohlrumbereich. Dadurch wird sichergestellt, dass der Messraum gleichmäßig von Zementleim und Zuschlag umgeben ist. Eine genaue Beschreibung der Problematik des inhomogenen Betongefüges findet sich in Kapitel 5.1.



**Abbildung 82: B1 und B2 (V1.1.1 und 2) beim Bestücken**

Der Probekörper, mit der Bezeichnung B1, ist mit Sensoren der ersten Herstellungsreihe bestückt. Auf der Unterseite der Tiefe 10-13 cm ist dieser beim Bohren ausgebrochen. Provisorisch wurde dieser auf der Unterseite mit den Ausbruchstücken, mit der Bitumenbeschichtung zusammengeklebt. Probekörper B2 ist mit der neuen und etwas größeren Serie Sensoren bestückt. Die Klebepacker sind einseitig verschraubt und mit einem „Sikaflex AT-Connection“ verklebt. Für einen schnelleren Einbau ist es notwendig die Sensoren vor dem Einschlagen auf den Packern zu installieren und mit dem „Sikaflex AT-Connection“ zu verkleben. Es ist hierbei besonders darauf zu achten, dass die Sensoren gerade auf den Packern aufsitzen, sonst besteht die Gefahr des Umknickens während des Einschlagens. Ein Sensor hängt frei in der Klimakammer, um eine zusätzliche Sicherheit der Funktionalität der Kammer zu gewährleisten. Als weitere Sicherheit zu Feuchte- und Temperaturmessung hilft ein Hygrometer, dass in der Klimakammer startgleich misst. Zur Referenzmessung sind 2 weitere Balken ohne Sensoren in die Klimakammer eingesetzt, Abbildung 83. Mit diesen wird dann später durch Spalten der Proben eine Feuchtemessung durchgeführt, siehe Kapitel 6.1 Referenzfeuchtemessung.



**Abbildung 83: B1, B2, 2 Referenzbalken und Hygrometer in der Klimakammer**

#### Test beim Einfrieren und Auftauen

Durch das plötzliche Herausnehmen der Sensoren bei  $-5\text{ C}^\circ$  aus dem Gefrierschrank, kondensiert sofort die Luftfeuchtigkeit bei einer Temperaturerhöhung auf  $+20\text{ C}^\circ$  am Sensor und erhöht dann den Wert der Feuchte, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Die Sensoren funktionieren aber weiterhin und geben richtige Ergebnisse heraus, nach dem sich das Gleichgewicht eingestellt hat. In einem Tunnel wird man in der Innenschale außer im Portalbereich selten Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erreichen.

#### Test auf Ausbaubarkeit

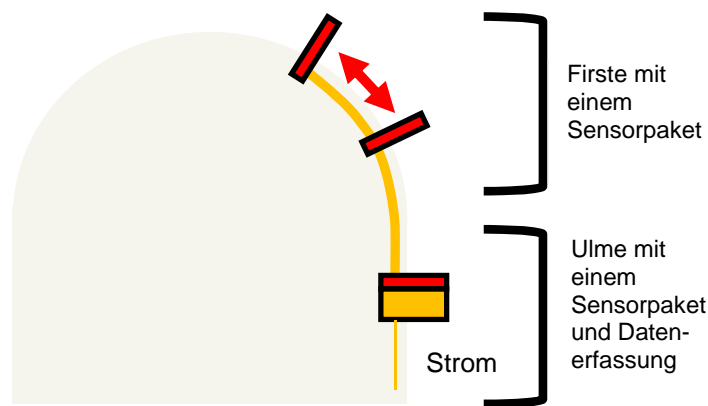
Das Aus- und wieder Einbauen derselben Packer ist nicht zu empfehlen. Die abdichtende Funktion der Lamellen ist durch die mechanische Beanspruchung nicht mehr gewährleistet. Die Packer sind nur mit einem großen Kraftaufwand wieder herauszuziehen und dieser Vorgang kann leicht Schäden am Packer verursachen. Der Sensor kann weiterhin benutzt werden, falls dieser beim Herausziehen nicht beschädigt wurde. Falls es dazu kommt, dass der Sensor keine Daten mehr sendet, muss der komplette Sensor mit dem Kabel ausgetauscht werden.



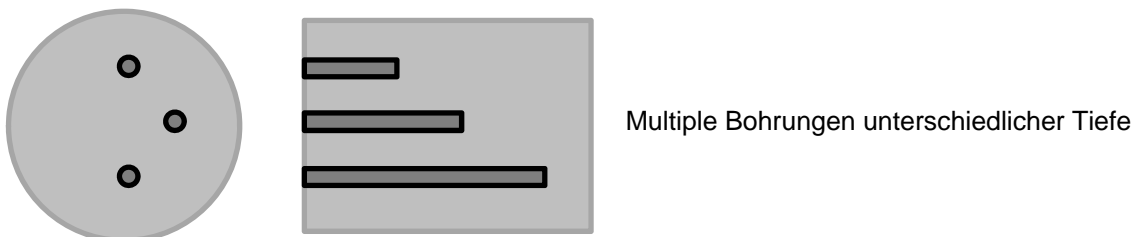
**Abbildung 84: DESOI Packer nach dem Ausdrücken**

### 5.6 Montage in den Tunnels [98]

Vorgesehen wurden für die Montage drei Messquerschnitte im jeweiligen Tunnelbereich mit jeweils zwei Messstellen. Um die Bereiche gut abzudecken wurde daher jeweils ein Sensorpaket im Bereich der Ulme und im Bereich der Firste an den ausgewählten Querschnitten montiert und in Betrieb genommen.



**Abbildung 85: Positionierung der Messstellen an der Tunnelinnenschale aus [101]**



**Abbildung 86: Verteilung der Messsensoren in der Tunnelinnenschale aus [101].**

## Arbeitsschritte

Der Einbau erfolgte in folgenden Arbeitsschritten:

### Reinigung und Vorbereitung der Messstellen [98]

Zunächst wurden die entsprechenden Stellen für das Anbringen der Sensorik gereinigt. Anschließend wurde eine Markierung mit einem Radius von 30 cm an diesen Stellen angezeichnet, auf denen die Sensoren später platziert wurden. An jeder Messstelle wird mit sieben Sensoren gemessen. Der Sensor mit der Bezeichnung U misst die Temperatur und relative Luftfeuchte der Umgebungsluft. Der Sensor mit der Bezeichnung 0 misst an der Oberfläche der Innenschale und 1 cm darunter. Die übrigen Sensoren messen in Bohrlöchern der Tiefen 1 cm, in 2 cm, in 3 cm, in 6 cm und 9 cm. Dabei ergibt sich die tatsächliche Messtiefe, in der die Sensoren sitzen, nach einem noch nicht vollständig bekannten tatsächlichen Einflussbereich (vgl. *Abbildung 60, Kapitel 5.5*).



**Abbildung 87: Anzeichnen der Bohrungen auf der Betonoberfläche**

### Einbringen der Bohrlöcher

Im Anschluss wurden die Löcher für die Sensoren in den entsprechenden Tiefen gebohrt. Hier kam eine Schlagbohrmaschine mit einem 18 mm Bohrkopf zum Einsatz. Mithilfe eines Anschlages, der sich an der Bohrmaschine befindet und der für die Messung der Tiefen verwendet wurde, konnten die Bohrungen exakt durchgeführt werden (vgl. Kapitel 5.3). Im Anschluss wurde jedes Bohrloch gereinigt. Dies geschah zum einen, damit keine Verunreinigungen die Messungen in den entsprechenden Tiefen verhindern können, zum anderen um zu überprüfen ob man auf ein Bereich gestoßen ist, an dem sich eine günstige Verteilung von Zementleim und Gesteinskörnungen befindet oder ob man in einem Bereich liegt, an dem ein größerer Anteil an Gesteinskörnung anzutreffen ist, welcher die Messungen negativ beeinflussen würde. Vorerst wurde dies durch ein Endoskop und Fotos gemacht, später nur mehr optisch, da die Zeitfenster der Arbeiten keine langen Verzögerungen erlaubten.





**Abbildung 88: Gereinigtes Bohrloch**

#### Montage des Verteilers

Danach wurde der Verteiler, der die Übertragung der Messdaten zur Speichereinheit sicherstellt, in der Mitte des Messkreises montiert. Dazu wurden Löcher gebohrt, um diesen mit Hilfe von Betonschrauben zu verankern. Im Anschluss daran, wurde die Verkabelung des Verteilers für den Anschluss an der Speichereinheit durchgeführt. Die Kabel selbst wurden mithilfe von Schellen, die im Beton verschraubt wurden, und mit Klemmdübel sowie mit Kabelbindern fixiert. Später wurden aus Zeitgründen die Sensoren im Labor an den Verteiler angeschlossen, was aber etwas längere Kabel erfordert.

#### Einbau der Sensorik

Die im Labor in den Packern verbauten Sensoren wurden nun in die zugehörigen Bohrlöcher eingeschlagen. Um die genaue Einschlagtiefe zu erreichen, wurden die Packer vorher im Labor auf die entsprechende Länge gekürzt, damit man sie nur noch bis zur letzten Lamelle einschlagen musste, um auf die vorgesehene Tiefe zu kommen. Für das Einschlagen der Packer nutzte man eine eigens dafür angefertigte Einschlaghilfe aus Stahl. Diese besitzt einen Schlitz an der unteren Seite, an der sie auf dem Packer aufliegt und ermöglicht, dass das Kabel an der Seite vorbeigeführt werden kann. Dies verhindert, dass die Kabel, an denen die Sensoren hängen, beim Einschlagen beschädigt werden.

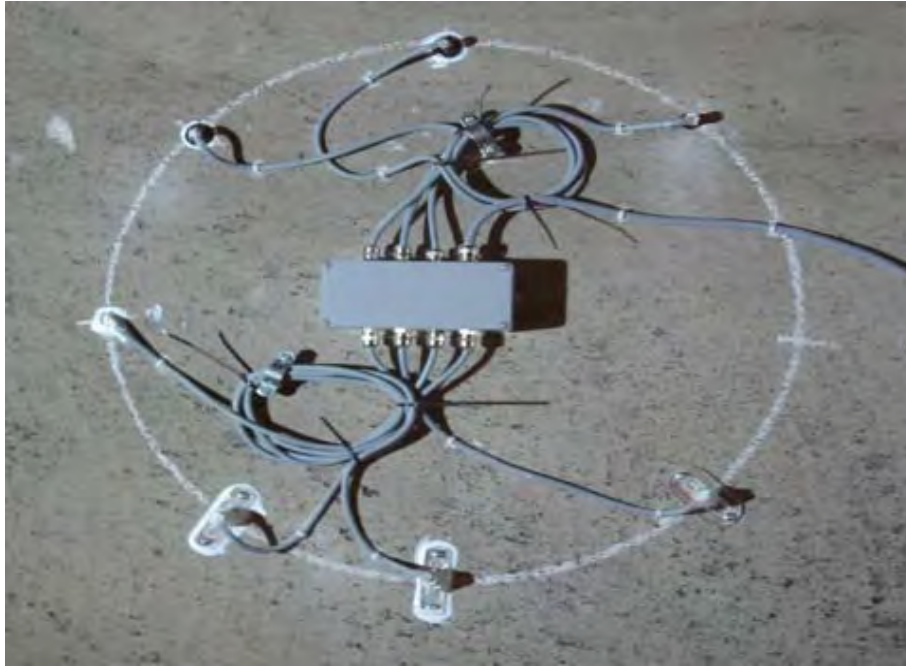


Abbildung 89: Endmontierte Messstelle

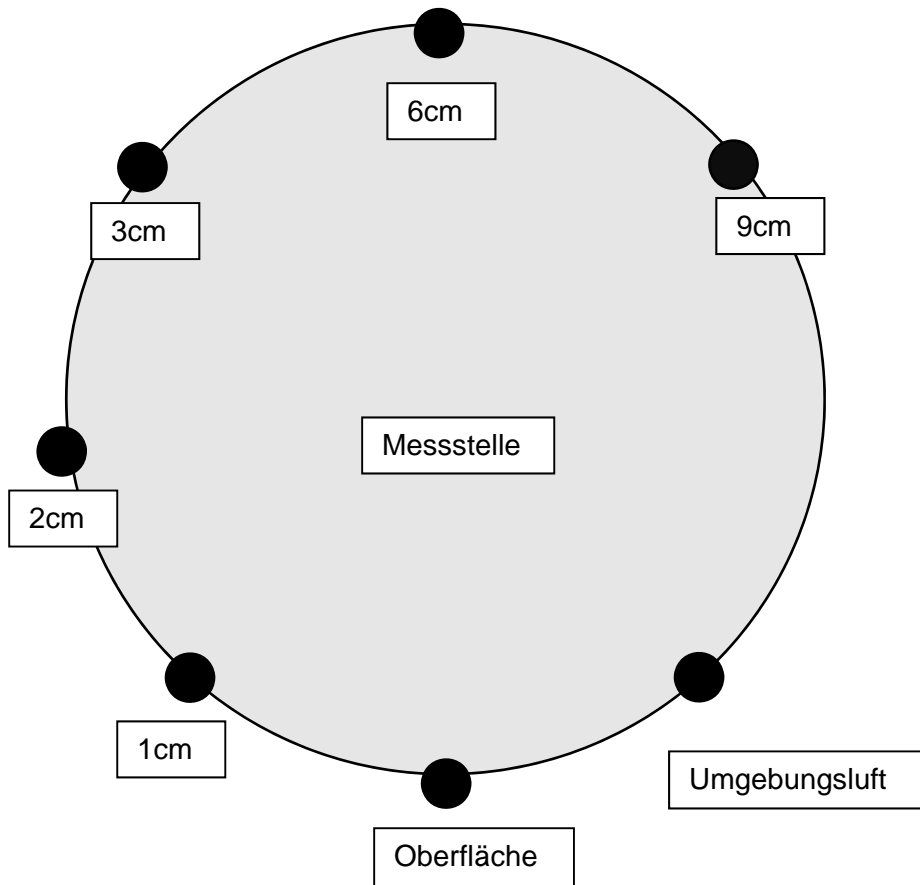
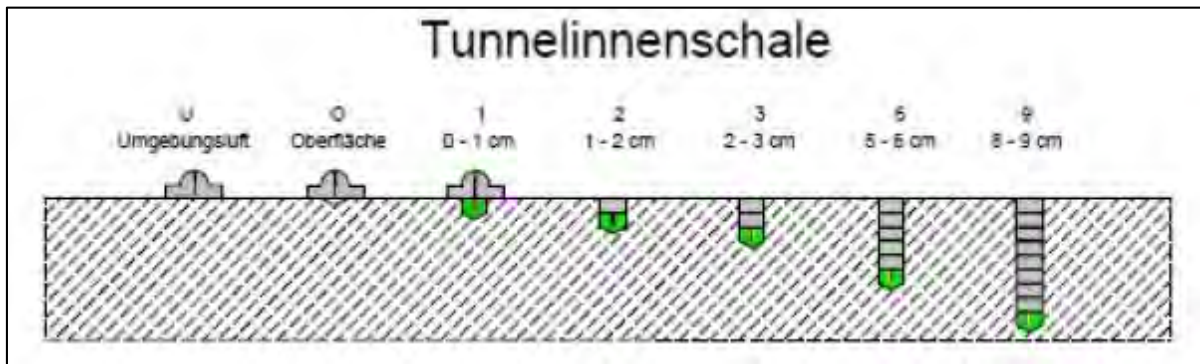
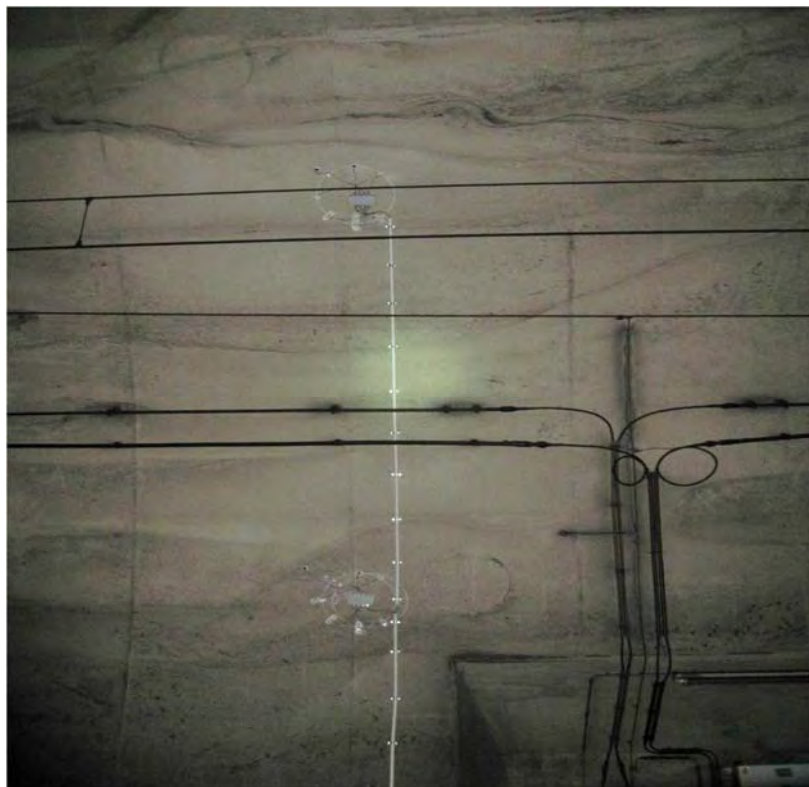


Abbildung 90: Zuordnung der Sensortiefen zu Auswertungen im Inntaltunnel (Bild Sindlersberger)



**Abbildung 91 Tatsächliche Sensortiefen**

Nachdem die Messstelle im Firstbereich eingerichtet war, wurde die Kabelführung sowohl für die Messstelle im First als auch für die Messstelle in der Ulme zum Anschluss an die Speichereinheit montiert. Grund hierfür war es, die Kabel vor möglichen Beschädigungen zu schützen. Zum Einsatz kamen hierfür schwer entflammbare Kunststoffrohre. Diese wurden auf Grund ihrer Flexibilität gewählt, da sie sich an die runde Form des Tunnelquerschnitts sehr gut anpassen, ohne dabei beschädigt zu werden. Fixiert wurden diese über Edelstahlchellen, die mit Betonschrauben an der Innenschale befestigt werden. Im Anschluss daran wurde die zweite Messstelle angebracht und die Speichereinheit montiert. Danach wurde die Verkabelung beider Messstationen mit der Speichereinheit hergestellt und diese an die Stromquelle angeschlossen.



**Abbildung 92: Messstellen im Firstbereich und der Ulme; Kabelführung zur Speichereinheit**



**Abbildung 93: Positionierung der Speichereinheit und Stromversorgung**

## 5.7 Auswahl der Tunnels und Position der Fühler [98, 18]

Für die Messungen an den Tunnels wurden 2 Straßen- und 2 Eisenbahntunnels ausgewählt. Dabei wurde versucht möglichst unterschiedliche Bedingungen zu erfassen. Die Auswahl war aber durch die notwendige Zugänglichkeit eingeschränkt.

### Inntaltunnel Nordseite

Der Inntaltunnel ist ein zweigleisiger Eisenbahntunnel mit einer Länge von 12,696 Kilometern. Die Inbetriebnahme erfolgte 1994. Seitdem stellt der Inntaltunnel die Verbindung zwischen dem Inntal und dem Wipptal in Tirol sicher. Der Tunnel besitzt im Gegensatz zu neueren Eisenbahntunnel keine feste Fahrbahn, sondern wurde konventionell mit einem Schotteroberbau und mit Betonschwellen ausgestattet. Erbaut wurde er nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT). Die Tunnelkonstruktion sowie die verwendete Betonrezeptur kann dem Anhang 9.3 entnommen werden.



**Abbildung 94 Nordportal des Inntaltunnels (Bild: Sindesberger)**

#### Zuordnung der Messstationen **Inntaltunnel** [98]

Im Inntaltunnel wird an drei Querschnitten gemessen. Diese befinden sich in den Blöcken 10 (Portalbereich, 135 m vom Portal), 45 (Übergangsbereich, 532 m vom Portal) und 97 (für Mittelbereich, 1131 m vom Nordportal). An jedem Block wurde je eine Messstelle im Firstbereich sowie der Ulme installiert. Ein Längsschnitt der Tunnelröhre mit genauer Position der Tunnelblöcke ist dem Anhang 9.3 zu entnehmen.

#### Tunnel Selzthal Oströhre

Der Tunnel Selzthal ist ein zweiröhriger Straßentunnel in der Steiermark (Pyhrnautobahn A9) bei Selzthal in Österreich. Die Gesamtlänge des Tunnels beträgt 890 Meter. Dieser besteht aus 87 Blöcken mit einer Ausbruchfläche von 55,7 m<sup>2</sup>. Eine zweite Röhre wurde im Jahr 2000 mit einer neuen Ausfahrt Liezen/Ennstal in Betrieb genommen. Die beiden Tunnelröhren werden durch einen Querschlag in der Mitte verbunden.

Die Messstationen befinden sich in Block 11 (107 m vom Nordportal), 42 (490 m vom Nordportal), 74 (75 m vom Südportal). Der Tunnel wird seit November 2016 im Gegenverkehrsbetrieb für Straßenfahrzeuge betrieben. An der seitlichen Messstation in den Blöcken 11 und 42 wurde die Tunnelwandbeschichtung entfernt. Die Sensoren mit den Messtiefen 3, 6 und 9 cm liegen oberhalb der ursprünglichen Tunnelwandbeschichtung. Die Messstation in Block 74 wurde auf der beschichteten Wand angebracht.

#### Montage und Betrieb von Messstationen im **Tunnel Selzthal Oströhre**

Die Montage im Tunnel Selzthal unterscheidet sich lediglich in der Materialauswahl für die Kabelführungen sowie der Stromversorgung der Speichereinheit von den Montagen im Inntaltunnel. Für die Kabelführung kamen im Tunnel Selzthal Edelstahlrohre zum Einsatz. Diese wurden aufgrund von Korrosionsgefahr durch Spritzwasser und Streusalzeintrag gewählt. Im Bereich der Ulme befand sich eine alte Beschichtung, die durch maschinelles Abschleifen entfernt wurde. Bei Block 11 und Block 42 wurde die untere Messstelle an der Grenze der Tunnelbeschichtung montiert. Die Beschichtung wurde weggebürstet. Bei Block 74 befindet sich die untere Messstelle im Bereich beschädigter Beschichtung. Zudem musste

die Stromversorgung über beleuchtete Fluchtwegschilder fachmännisch angeschlossen werden. Ein Längsquerschnitt und die Regelquerschnitte finden sich in 9.3.



**Abbildung 95: Kabelführung zum Fluchtwegweiser**



**Abbildung 8: Anschluss an das Stromnetz**

### Hengsbergtunnel

Der Hengsbergtunnel ist ein zweigleisiger Eisenbahntunnel in der Steiermark. Er besteht aus einer Tunnelöhre mit einer Gesamtlänge von 1695 Meter. Der Tunnel wird noch nicht endgültig voll genutzt. Die geplante Fertigstellung der Strecke ist im Jahre 2020, der Tunnel wird aber seit Dezember 2010 eingeschränkt genutzt. Das Bauwerk wird in drei verschiedenen Bauweisen errichtet. Diese sind der Spreng-Baggervortrieb (Bergmännische Bauweise), nach den Prinzipien der neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT), die offene Bauweise und die Deckelbauweise. Im Hengsbergtunnel ist die Feuchtebelastung besonders hoch. Es kommt zu Tauwasser- und Schimmelbildung [Gutachten Schweiz].

Die Messungen erfolgen in den Blöcken 9 (bergmännische Bauweise, 110 m vom Nordportal), 97 1132 m vom Nordportale/ 563 m vom Südportal) und 130 (jeweils in offener Bauweise, 186 m vom Südportal).



**Abbildung 97; Tunnel Hengsberg Nordportal**



**Abbildung 98: Tunnel Hengsberg Südportal**

### S16 Arlbergschnellstraße – Tunnel Strengen

Der Straßentunnel Strengen wurde im Zuge des Ausbaus der S16-Arlbergschnellstraße im Jahre 2000-2006 gebaut. Dieser besteht aus der Nordröhre mit einer Länge von 5740 m und einer Südröhre mit einer Länge von 5659 m, sowie Voreinschnitte und Straßenbau. Der Abschnitt Pians-Flirsch war das letzte noch nicht ausgebaute Teilstück der S16 in Tirol. Diese Ausbaulücke wurde mit zwei Tunnelröhren mit 86 m<sup>2</sup> Ausbruchsfläche von ca. je 5,7

km geschlossen. Als Baumethode wurde die Neue Österreichische Tunnelbauweise angewandt. In den Portal- und Tunneleingangsbereichen (offene Bauweisen und Galerien), wurde in stark druckhaften Abschnitten und Abstellnischen die Innenschale bewehrt.

In der Südröhre wurden die Messstationen appliziert wurden. Die Montageorte der jeweiligen Messstationen befinden sich in den Blöcken 20, 275 und 446. FLN2 252 m vom Ostportal, FLN26 3235 m vom Ostportal, FLN42 5221 m vom Ostportal, 438 m vom Westportal! Die unteren Messstellen in Block 296 und 446 sind über der Beschichtung, Im Block 20 in intakter Beschichtung. Seit 14.12.2016 wird der Tunnel nur in einseitiger Richtung befahren. Der Verkehr fährt in Richtung Kufstein, ebenso fällt das Gefälle der Röhre.



**Abbildung 99; Tunnel Strengen Westportal, Südröhre**

#### Übersicht beprobte Tunnel

In Tabelle 8 werden die beprobten Tunnel nochmals aufgelistet. Die Tunnelquerschnitte werden im Anhang 9.3, die Betonrezepturen im Kapitel 5.8 und 5.9 wiedergegeben, die ermittelten Kennwerte der Bohrkern in Kapitel 5.9.



**Tabelle 8 Übersicht Tunnel mit Sensoren**

Tunnel/Daten	Inntal Nordportal	Hengsberg	Selzthal Ost	Strengen Süd
Nutzung	Bahn		Straße	
Bau	1994	2010	1990	2006
Block	10, 45 und 97	9, 97 und 130	11, 42 und 74	FLN 2 (Block <b>20</b> ), FLN 26 (Block <b>275</b> ), FLN 42 (Block <b>446</b> )
Messquerschnitte	135 m, 532 m und 1131 m vom Nordportal	110 m vom Nordportal, 1132 m vom Nord/ 563 m vom Südportal, 186 m vom Südportal	107 m vom Nordportal, 490 m vom Nordportal und 875 von Nord/75 von Südportal	FLN2 252 m vom Ostportal, FLN26 3235 m vom Ostportal, FLN42 5221 m vom Ostportal, 438 m vom Westportal!
Bauweise	Bergmännisch	Bergmännisch Offen Gewölbe Offen Rechteck	Bergmännisch	Bergmännisch
Messzeitraum	6/2016 bis heute	7/2016, Nachbesserung 1/2017 bis heute	28.12. 16 bis 8/2017 dann Sanierung Oströhre	10/2016 bis heute
Verkehr	Güterzüge	Lokalzüge	seit 11/2016 Gegenverkehr	10/2016 Wechsel GC von Süd auf Nordröhre seit 12/2017 beide Röhren offen
Luftzug	gering kein Messgerät	gering Messgerät	stark Messgerät	stark Messgerät
Ende der Messung	läuft	läuft	Ausbau Messgeräte 8/2017	läuft

## 5.8 Innenschalenbetone [2]

In Österreich gibt es viel Erfahrung bei der Herstellung von Tunnelinnenschalen. Diese Erfahrungen sind ab 2003 in Richtlinien der öbv festgehalten worden. Soweit sie dieses Forschungsprojekt betreffen, sind sie hier wiedergegeben worden.

Die Anforderungen sind in den Rezepturvorschlägen für die RL 2012 [103] in den Tabellen 9 bis 11, für die RL 2003 [102] in Tabelle 12 angegeben. Für die Zeit davor hat Dr. Huber folgende Angaben gemacht:

Zement /Flugasche 250/70 bis 270/50 kg/m<sup>3</sup>

Bindemittel also rund 320

Zement: alter Tunnelzement entspricht heute dem WT38

Mehr Wasser als jetzt üblich 190-195 l/m<sup>3</sup>

Arlberg und Inntal: GK 63 mm

„Primitive Zusatzmittel“ wie LPV

Konsistenz 44 cm

## Beton für Tunnelinnenschalen

Der Innenschalenbeton muss gegenüber Normalbeton einige besondere Anforderungen erfüllen. Der Betonierabschnitt wird üblicherweise in einem 24-Stunden-Takt hergestellt, somit sind für den Gewölbebeton Ausschallfristen von 10 bis 14 Stunden nötig. Eine rasche Festigkeitsbildung in Verbindung mit geringer Wärmeentwicklung ist von großer Wichtigkeit. Die Frischbetontemperatur hat mit 13 °C bis 18 °C die optimale Temperatur um eine ausreichende Festigkeit zu entwickeln und die Rissanfälligkeit zu minimieren, baupraktisch liegt sie aber oft bei 20 °C. Die Druckfestigkeitsklasse von Innenschalenbeton beträgt in der Regel C 20/25 oder C 25/30. C<sub>3</sub>A-freie Zemente oder Zemente des Typs CEM II sind besonders geeignet, da sie die Gefahr von Temperaturspannungsrissen verringern. Zusatzstoffe mit hoher Feinheit können die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die Dichtigkeit des Betongefüges verbessern. Dabei muss der Beton gut pumpbar sein sowie leicht verteilt und verdichtet werden können. Für den Betonzuschlag werden Sand und Kies mit geringem Wasseranspruch und kontrollierter Eigenfeuchte eingesetzt. Wasser ersparende Zusatzmittel wie Betonverflüssiger und Fließmittel können ebenfalls zum Einsatz kommen. In Österreich wird auch Luftporenmittel zugesetzt um die Verarbeitbarkeit günstig zu beeinflussen. [103] [104] [36]

## Wasserundurchlässiger Beton

Wasserundurchlässiger Beton wird als WU-Beton bezeichnet. Für seine Zusammensetzung ist eine hohe Gefügedichtigkeit angestrebt, die vor allem durch einen niedrigen Wasser-Bindemittel-Wert (oder Gesamtwassermenge) und eine ausreichende Menge an Bindemittel und Mehlkorn erreicht wird. In [16] werden daher Bindemittelgehalte von mindestens 300 kg/m<sup>3</sup> (gegenüber 290 kg/m<sup>3</sup> bei normalen Innenschalenbetonen) und ein maximaler Gesamtwassergehalt von ≤170 kg/m<sup>3</sup> (gegenüber ≤ 190 kg/m<sup>3</sup> bei normalen Innenschalenbetonen) gefordert. Um eine gute Verarbeitbarkeit und ein geschlossenes Gefüge zu erhalten, muss zusätzlich eine bestimmte Menge an Mehlkorn beigemischt werden. Bei einem Größtkorn von 16 mm ist ein Mehlkorngehalt von ≥390 kg/m<sup>3</sup> anzusetzen. Zusatzmittel können lediglich Hilfen bei der Herstellung des wasserundurchlässigen Betons sein. Die sorgfältige Verarbeitung und die Nachbehandlung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Der Beton sollte folglich mindestens sieben Tage nass nachbehandelt werden. [103] [105] Der Nachweis der Gefügedichtigkeit erfolgt am Festbeton. In der Regel sind weitere Maßnahmen notwendig um die Schale wasserdicht zu erstellen.

**Tabelle 9: Vorschläge für die Zusammensetzung für Tunnelinnenschalenbeton aus [103]  
Ausgabe Dezember 2012**

Anwendung	Normalbereich	
	Gewölbebeton	Sohle, Sohlgewölbe, Widerlager
Abkürzungen der Betonsorte	IG	IS
Empfohlener Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	250-270	210-240
Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) [kg/m <sup>3</sup> ]	50-70	60-80
Gesamtbindemittelgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	300-340	270-320
Maximaler Gesamtwassergehalt [l/m <sup>3</sup> ]	≤ 190	≤ 190
Größtkorn der Gesteinskörnung	GK16, GK22, GK 32	GK32, GK45
Gesteinskörnungen	Innerhalb der empfohlenen Sieblinienbereiche	
Zusatzmittel BV, FM, LP	(siehe Kapitel 2.1 der RL Zusatzmittel)	
Luftgehalt [%]	2,5-5,0	2,5-5,0
W/B-Wert	≤ 0,63	≤ 0,63
Zementart gem. ÖNORM B 3327-1	WT38, WT42	WT38

**Tabelle 10: Vorschläge für die Zusammensetzung für Tunnelinnenschalenbeton aus [103]  
Ausgabe Dezember 2012**

Anwendung	Gewölbebeton und Sohlbeton mit besonderen Eigenschaften		
	Frostangriff mit Taumittel, ohne Tunnelanstrich	Wasserundurchlässige Innenschale	Sulfatangriff SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 200-3.000 mg/l
Abkürzungen der Betonsorte	IT	WDI	IXAL-A, IXAL-B, IXAL-C
Empfohlener Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	270-290	250-280	250-280
AHWZ [kg/m <sup>3</sup> ]	60-80	50-70	50-90
Gesamtbindemittelgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	330-370	300-340	300-350
Max. Gesamtwassergehalt [l/m <sup>3</sup> ]	≤ 170	≤ 170	≤ 170
Größtkorn der Gesteinskörnung	GK22, GK32	GK16, GK22	GK22, GK32
Gesteinskörnungen	Innerhalb der empfohlenen Sieblinienbereiche		
Zusatzmittel BV, FM, LP	(siehe Kapitel 2.1 der RL Zusatzmittel)		
Luftgehalt [%]	4,0-8,0	2,5-5,0	2,5-5,0
W/B-Wert	≤ 0,50	≤ 0,60	≤ 0,58
Zementart gemäß ÖNORM B 3327-1	WT38, WT38 C <sub>3</sub> A-frei	WT38 C <sub>3</sub> A-frei, WT33 C <sub>3</sub> A-frei, bei dicken Sohlen < 0,9m: mind. WT33 C <sub>3</sub> A-frei, empfohlen WT27 C <sub>3</sub> A-frei	WT38 C <sub>3</sub> A-frei, WT33 C <sub>3</sub> A-frei, WT27 C <sub>3</sub> A-frei

**Tabelle 11: Vorschläge für die Zusammensetzung für Tunnelinnenschalenbeton aus [103]  
Ausgabe Dezember 2012**

Anwendung	Gewölbebeton und Sohlbeton mit besonderen Eigenschaften		
	Lösender Angriff	Erhöhter Brandschutz für Innenschalen	Erhöhter Brandschutz für WDI
Abkürzungen der Betonsorte	IXAL-A, IXAL-B, IXAL-C	I/BBG	WDI/BBG
Empfohlener Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	250-280	250-280	250-280
AHWZ [kg/m <sup>3</sup> ]	50-90	80-140	80-140
Gesamtbindemittelgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	300-350	330-410	330-420
Max. Gesamtwassergehalt [l/m <sup>3</sup> ]	≤ 170 ≤ 190	≤ 195	≤ 185
Größtkorn der Gesteinskörnung	GK22, GK32	GK22, GK32	GK16, GK22
Gesteinskörnungen	Innerhalb der empfohlenen Sieblinienbereiche		
Zusatzmittel BV, FM, LP	(siehe Kapitel 2.1 der RL Zusatzmittel)		
BBG-Fasern [kg/m <sup>3</sup> ]	-	1,2-2,0	1,2-2,0
Luftgehalt [%]	2,5-5,0	2,5-8,0	2,5-8,0
W/B-Wert	≤ 0,58	≤ 0,63	≤ 0,58
Zementart gemäß ÖNORM B 3327-1	WT38, WT42	WT38, WT42	WT38 C <sub>3</sub> A-frei, WT38 C <sub>3</sub> A-frei, bei dicken Sohlen < 0,9m: mind. WT33 C <sub>3</sub> A-frei, empfohlen WT27 C <sub>3</sub> A-frei

**Tabelle 12: ÖBV\_RL Innenschalenbeton Oktober 2003 [102]**

Tab. 3/3 Vorschlag für die Zusammensetzung (Mischungsverhältnis) von Innenschalenbeton mit Nachweis am Festbeton

	Gewölbebeton (Normalbereich)	Sohle, Sohl-Gewölbe, Widerlager (Normalbereich)	Gewölbebeton und Sohlbeton mit besonderen Eigenschaften				
			Frostangriff ohne Taumittel bzw. mit Tunnelanstrich (Portalbereich)	Frostangriff mit Taumittel ohne Tunnelanstrich	WDI	Sulfatangriff SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> 400-1500mg/l	lösender Angriff
Abkürzungen für Betonsorte	C20/25(56) IG/ GK.. <sup>2)</sup>	C20/25 (56) IS/ GK.. <sup>2)</sup>	C20/25(56) IGP/ISP/ GK.. <sup>2)</sup>	C25/30(56) IGT/ GK.. <sup>2)</sup>	C25/30(56) WDI/ GK.. <sup>2)</sup>	C25/30(56) IXAT/ GK.. <sup>2)</sup>	C25/30(56) IXAL/ GK.. <sup>2)</sup>
Empfohlener Zementgehalt <sup>1)</sup> kg/m <sup>3</sup>	250-270	210-240	250-270	270-290	250-270	250-270	250-270
Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) kg/m <sup>3</sup>	70 - 50	80 - 60	70 - 50	80 - 60	70 - 50	70 - 50	70 - 50
Maximaler Gesamtwassergehalt l/m <sup>3</sup>	≤ 190	< 190	≤ 190	≤ 170	≤ 170	≤ 170	≤ 170
Größtkorn der Gesteinskörnung	GK 16, GK 22, GK 32	GK 32, GK 45	GK 22, GK 32	GK 22, GK 32	GK 16, GK 22	GK 22, GK 32	GK 22, GK 32
Gesteinskörnungen Bereich 2/3 (A+B) – B bei ρ = 2700 kg/m <sup>3</sup>	1850 - 1920	1870 - 1940	1850 - 1920	1750 - 1870	1850 - 1920	1850 - 1920	1850 - 1920
Zusatzmittel BV, FM, LP, LPV	Dosierung laut Erfordernis für Luftgehalt und Verarbeitbarkeit						
Luftgehalt %	2,5 – 5,0	2,5 – 5,0	2,5 – 5,0	4,0 – 7,0	2,5 – 5,0	2,5 – 5,0	2,5 – 5,0
W/B-Wert (Zielwert)	≤ 0,63	≤ 0,63	≤ 0,63	≤ 0,50	≤ 0,58	≤ 0,58	≤ 0,58
Zementart gemäß ON B 3327-1	WT38, WT42	WT38, bei dicken Sohlen > 1,2m: WT33 C <sub>3</sub> A-frei	WT38, WT42	WT38 WT38 C <sub>3</sub> A-frei	WT33 C <sub>3</sub> A-frei WT38 C <sub>3</sub> A-frei bei dicken Sohlen > 1,2m: WT33 C <sub>3</sub> A-frei	WT38 C <sub>3</sub> A-frei WT42 C <sub>3</sub> A-frei	WT38 WT42

 1) Zementgehalt von > 250 kg/m<sup>3</sup> zur Einhaltung der üblichen Ausschallfrist erforderlich.

2) Für unbewehrte Innenschalen gilt GK 32 als Standardgrößtkorn, für bewehrte Innenschalen GK 22.

Betone der geprüften Tunneln [95]

(siehe auch Kapitel 5.9)

Nachdem von der Materialseite vor allem die Porigkeit der Betone und deren Alter für den sich später einstellenden Wassergehalt verantwortlich ist, sind die wichtigsten Kennwerte in Tabellen 13 und 14 angegeben.

**Tabelle 13: Wasser-Bindemittelwerte (für k = 0,8), Wasserzementwerte und Alter der Tunnel [18]**

Tunnel	W/B-Wert	W/Z-Wert	Alter [a]
Inntaltunnel	0,47	0,53	~ 28
Tunnel Strengen	0,54	0,66	~ 12
Hengsberggtunnel (offene Bauweise)	0,48	0,67	~ 8
Hengsberggtunnel (bergm. Bauweise)	0,54	0,67	~ 8
Tunnel Selzthal	Keine Unterlagen	Keine Unterlagen	~ 18

**Tabelle 14: Übersicht über die untersuchten Tunnelrezepturen (in Arbeit)**

Tunnel	Inntal	Selzthal	Hengsberg geschlossen	Hengsberg offen	Strengen		Klaus	
Zement	260 PZ 275 (F20)		275 CEM II /A-S 277 (red. Wasser)	270 CEM I C <sub>3</sub> A-frei	240-270 CEM A-M (S-L)	260 CEM A-M (S-L)	260 CEM II/A-M (S-L)	360
Flugasche	50 Fluasit C		80 Fluamix C	130 Fluamix C	50-70 Hydrolith M	70 Hydrolith M	80 AHWZ	109
Gesteinskörnung	GK 50		32	32	32	32	32	4 Mörtel!
Sand geschätzt <0,125	887		834		952			
LP	3,3%							
Wasser	140		183 162 red.	178	160-170	166-176	185 (165, 210)	253
Fasern			PP Fasern	PP-Fasern				
Bindemittel	310		355	400	310	330	340	469
B+W	450		538	582	470	500	525	722
W/B K=1	0,452		0,52 (0,45 red Wasser)	0,45	0,51	0,51	0,54	0,54
Porosität	13,4 15 (Kern)	17,43 (Kern)	13,41 für reduzierten w (14, 3 Kern)	16,13	13,54 13,11(Kern)			24,5
Sättigungsfeuchte								
Sorptionsisothermen Widersprechend Ergebnisse		tiefste höchste höchste			tiefste tiefste tiefste			höchste
DF	48			62	48 50		54 (66, 51?)	52

Die genauen Rezepte, weiteren Einflussfaktoren wie Karbonatisierung und Chloridgehalte sind in Kapitel 5.9 angeführt. Auch die Sorptionsisothermen wurden für alle Betone bestimmt (Kapitel 6.2).

## 5.9 Laboruntersuchungen

Im Labor wurden

- Proben aus den Bohrkernen geprüft
- Balken und Würfel nach Originalrezepten hergestellt
- die hygrischen Eigenschaften an diesen Proben ermittelt

Übersicht über Laborproben

**Tabelle 15: Übersicht Laborproben**

Bezeichnung	Spezifikation	Rezept in Tabelle
V1	Vorserie nach RL	Tab.18
V2	Tunnelkette Klaus	Tab.19
V3	Tunnelkette Klaus, hoher Wassergehalt	Tab. 20
V4	Tunnelkette Klaus, niedriger Wassergehalt	Tab. 21
V5	Tunnelkette Klaus, Mörtelrezeptur	Tab.22
V6	Inntal Nord	Tab. 24
V7	Strengen	Tab. 27
V8	Hengsberg Block 130 und 97	Tab. 28
V9	Hengsberg Block 9 (V9a) und Rettungsstollen gleich mit red. Wassergehalt (V9)	Tab. 30 Tab. 29
Zusätzlich Proben aus Bohrkernen		
Inntal	Nische im Block 45	Tab. 23
Strengen	aus Block 310 bei Querschlag	Tab. 25
Selzthal	aus Blöck 42 und 74	keine Rezeptur verfügbar
Hengsberg Block 9 und Rettungsstollen	aus Rettungsstollen	Tab. 27

## Rezepte und Betonagen

Im Labor wurden vorab Betone nach Richtlinie (V1), dem Rezept der Tunnelkette Klaus (V2) mit Variation des Wassergehalts (V3 und 4) und mit einer Mörtelmischung (V5) betoniert und später wurden, soweit es möglich war, die Rezepte der Tunnelbauwerke nachgestellt.

**Tabelle 16: Übersicht über die Versuche V1 bis V5**

	V1	V2	V3	V4	V5
Betoniert	11.11.2015	18.11.2015	25.11.2015	09.12.2015	02.06.2016
Ausgeschalt	12.11.2015	19.11.2015	26.11.2015	10.12.2015	03.06.2016
Ausgangs-Stoffe	Donau	Original/ Österreich	Original/ Österreich	Original/ Österreich	Original/ Österreich/
Ausgangs-Rezept	RL	Tunnelkette Klaus	Tunnelkette Klaus	Tunnelkette Klaus	Tunnelkette Klaus
Unterschied der Betonrezepte	Vorserie	Originalrezept	Wie V2 aber höherer W/B-Wert	Wie V2 aber geringerer W/B-Wert	Mörtelrezept aus Rezept V2

**Tabellen 17: Übersicht über die hergestellten Proben im Labor**

## Würfel

Würfel				
Art	Bezeichnung	Bemerkung	Herstelldatum	Lagerung
V1 - RL	V1.1.1		11.11.2015	
	V1.1.2		11.11.2015	
	V1.2.1		11.11.2015	
	V1.2.2		11.11.2015	
	V1.3.1		11.11.2015	
	V1.3.2		11.11.2015	
V2 -Klaus	V2.1.1	etwa 195 l w	18.11.2015	Wassertank Prüfening
	V2.1.2		18.11.2015	Wassertank Prüfening
	V2.2.1	etwa 200 l w	18.11.2015	Wassertank Prüfening
	V2.2.2		18.11.2015	Wassertank Prüfening
	V2.3.1	etwa 210 l w	18.11.2015	Wassertank Prüfening
	V2.3.2	halber Würfel	18.11.2015	Wassertank Prüfening
V3 - Klaus niedriger W/B Wert	V3.1.1	165 l w	25.11.2015	Wassertank Prüfening
	V3.1.2		25.11.2015	Wassertank Prüfening
	V3.2.1		25.11.2015	Wassertank Prüfening
	V3.2.2		25.11.2015	
	V3.3.1		25.11.2015	Wassertank Prüfening
	V3.3.2	1,5 Würfel	25.11.2015	Wassertank Prüfening
V4 - Klaus hoher W/B Wert	V4.1.1	205 l w	02.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.1.2		02.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.2.1		02.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.2.2		02.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.3.1		02.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.3.2		02.12.2015	Wassertank Prüfening
V5 Klaus Mörtel	V5.1.1	253 l w	02.06.2016	
	V5.1.2		02.06.2016	Wassertank Prüfening
	V5.1.3		02.06.2016	Wassertank Prüfening
V6 - Inntal Nord	2/1		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	2/2		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	Inntal		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
V7 - Strengen	Strengen		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	Strengen		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
V8 - Hengsberg	1/1	Mischung 2, Block 130	18.04.2017	Wassertank Galgenberg
V9 - Hengsberg	1/1	Block 9, red. Wassergehalt	04.04.2017	Wassertank Galgenberg
V9a Hengsberg	???	original, Block 9	11.04.2017	

**Balken**

Balken				
Art	Bezeichnung	Bemerkung	Herstelldatum	Lagerung
V1 - RL	V1.1.1 (B1)	185 l	11.11.2015	Klimakammer Klimakammer grav. Referenzprüfung in [98]
	V1.1.2 (B2)		11.11.2015	
	V1.2.1 (B3)		11.11.2015	
	V1.2.2 (B4)		11.11.2015	
	V1.3.1 (B5)		11.11.2015	
	V1.3.2 (B6)		11.11.2015	
V2 - Klaus	V2.1.1 (B7)	etwa 195 l w	18.11.2015	Klimakammer Klimakammer
	V2.1.2 (B8)		18.11.2015	
	V2.2.1	etwa 200 l w	18.11.2015	Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening
	V2.2.2		18.11.2015	
	V2.3.1	etwa 210 l w	18.11.2015	
	V2.3.2		18.11.2015	
V3 - Klaus niedriger W/B Wert	V3.1.1	165 l w	25.11.2015	Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening
	V3.1.2		25.11.2015	
	V3.2.1		25.11.2015	
	V3.2.2		25.11.2015	
	V3.3.1		25.11.2015	
	V3.3.2		25.11.2015	
V4 - Klaus hoher W/B Wert	V4.1.1	2 Balken	09.12.2015	Wassertank Prüfening
	V4.1.2	205 l w	09.12.2015	
	V4.2.1	2 Balken	09.12.2015	Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening Wassertank Prüfening
	V4.2.2		09.12.2015	
	V4.3.1		09.12.2015	
	V4.3.2		09.12.2015	
V5 - Klaus Mörtel	V5.1.1 (B9)	253 l w	02.06.2016	Klimakammer grav. Referenzprüfung [95]
	V5.1.2 (B10)		02.06.2016	



Balken				
Art	Bezeichnung	Bemerkung	Herstelldatum	Lagerung
V6 - Inntal Nord	1/1	140 l	28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	1/2		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	1/2		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	2/2		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	1/3		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
	2/3		28.11.2016	Wassertank Galgenberg
V7 - Strengen	1/1	160 l	19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	1/2		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	1/2		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	2/2		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	1/3		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
	2/3		19.12.2016	Wassertank Galgenberg
V8 - Hengenberg	V8	Mischung 1, Block 130, 178 l	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V8	Mischung 1, Block 130	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V8	Mischung 1, Block 130	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V8	Mischung 2, Block 130	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V8	Mischung 2, Block 130	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V8	Mischung 2, Block 130	18.4.2017	Wassertank Galgenberg
V9 – V9a Hengenberg	1/1	reduzierter Wassergehalt 162 l	4.4.2017	Wassertank Galgenberg
	2/1	reduzierter Wassergehalt	4.4.2017	Wassertank Galgenberg
	3/1	reduzierter Wassergehalt	4.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V9a	Block 9 nach Rezept 183 l	11.4.2017	Wassertank Galgenberg
	V9a	Block 9 nach Rezept	11.4.2017	Wassertank Galgenberg

V.1 (W/B = 0,53)

**Tabelle 18: Übersicht der Ausgangsstoffe von Klaus und der OTH Regensburg**

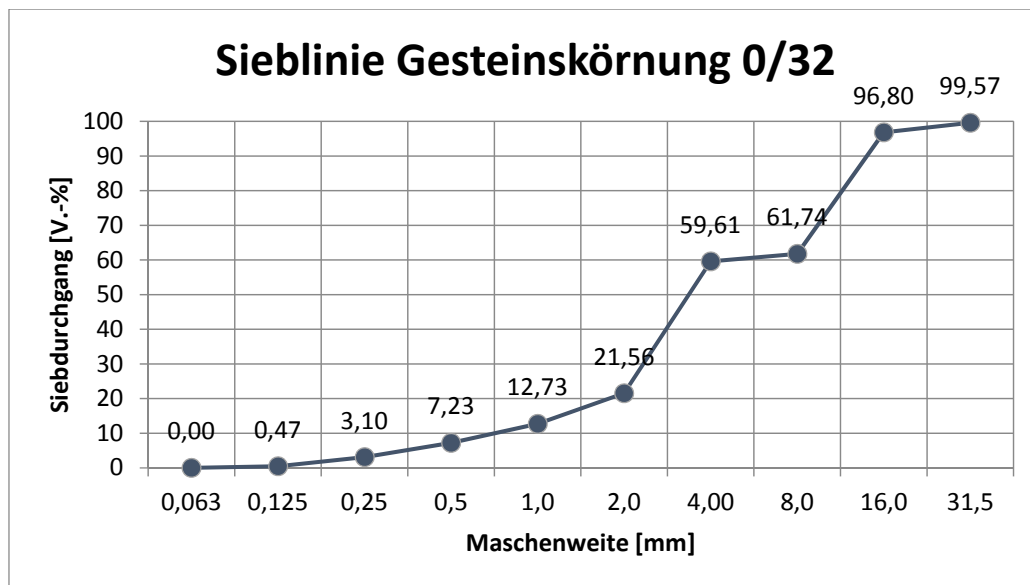
	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-M(S-L)42,5N WT33	260
AHWZ	80
FM BASF	2,6
LP MasterAir 125	0,52
Wasser	185
0/4 Naab	840
4/8 Naab	393
8/16 Naab	578

Die Betonzusammensetzung für die Tunnelkette Klaus setzt sich zusammen aus:

V.2 (W/B = 0,54 mit K=1)

**Tabelle 19: Übersicht der Ausgangsstoffe der Tunnelkette-Klaus**

	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-M(S-L)42,5N WT33	260
AHWZ	80
FM Glenium Sky 777	231
LP MasterAir 9030	0.52
Wasser	185
0/2	329
0/4	764
8/16	513
16/32	220



**Abbildung 100: Sieblinie Gesteinskörnung 0/32, Gesteinskörnung der Tunnelkette-Klaus**

**Frischbetonprüfungen V.2.1:**

 Gesamtwasser etwa 195 l/m<sup>3</sup>

- Temperatur: 23,5 °C
- Dichte: 2,325 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 58 cm
- Luftgehalt: 4,3 %

**Frischbetonprüfungen V.2.2:**

 Gesamtwasser etwa 200 l/m<sup>3</sup>

- Temperatur: 23,2 °C
- Dichte: 2,316 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 56 cm
- Luftgehalt: 4,75 %

**Frischbetonprüfungen V.2.3:**

 Gesamtwasser etwa 2010 l/m<sup>3</sup>

- Temperatur: 23,0 °C
- Dichte: 2,337 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 62,5 cm
- Luftgehalt: 2,9 %

Bei Versuch 2 wurde die Feuchte der Gesteinskörnung nicht ausreichend beachtet und bei V.2.3 war diese besonders feucht, daher kommt auch das zu große Ausbreitmaß. In den nachfolgenden Versuchsreihen ist das Zugabe Wasser herunter gerechnet und die Gesteinskörnungen angepasst worden. (Bei der Lagerung in Plastiktüten hat man das Problem, dass sich die Feuchte im unteren Bereich sammelt.)

**V.3 (W/B = 0,48, K=1); betoniert am 25.11.2015**
**Tabelle 20: Übersicht Betonzusammensetzung Versuch 3**

	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-M(S-L)42,5N WT33	260
AHWZ	80
FM	4,17
LP	0,26
Wasser	165
0/2	330
0/4	767
8/16	515
16/32	220,9

**Frischbetonprüfungen V.3.1:**

 Gesamtwasser etwa 165l/m<sup>3</sup>

- Temperatur: 22,0 °C
- Dichte: 2,397 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 51,5 cm
- Luftgehalt: 3,9 %

**Frischbetonprüfungen V.3.2:**

- Temperatur: 22,0 °C
- Dichte: 2,435 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 58,0 cm
- Luftgehalt: 2,0 %

**Frischbetonprüfungen V.3.3:**

- Temperatur: 21,6°C
- Dichte: 2,185 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 61,0 cm
- Luftgehalt: 2,05 %

**V.4 (W/B = 0,60, K=1); betoniert am 02.12.2015**
**Tabelle 21: Übersicht Betonzusammensetzung Versuch 4**

	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-M(S-L)42,5N WT33	260
AHWZ	80
FM	0
LP	0,52
Wasser	205
0/2	327,7
0/4	760,9
8/16	510,9
16/32	219,1

**Frischbetonprüfungen V.4.1:**

 Gesamtwasser 205 l/m<sup>3</sup>

- Temperatur: 21,4 °C
- Dichte: 2,349 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 55,5 cm
- Luftgehalt: 1,4 %

**Frischbetonprüfungen V.4.2:**

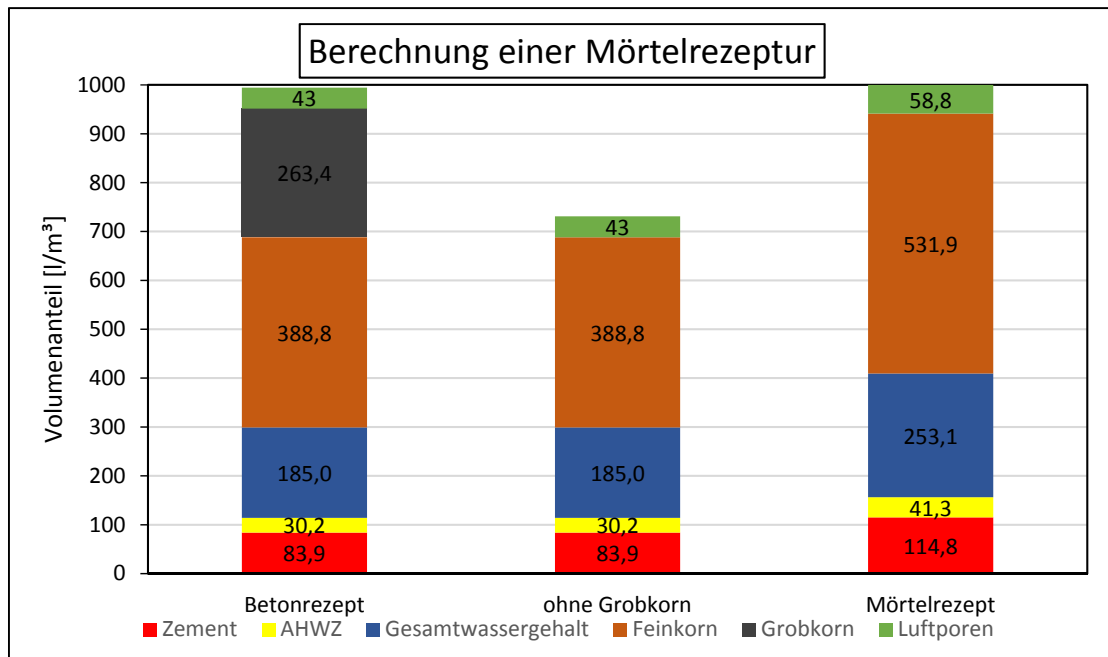
- Temperatur: 21,9 °C
- Dichte: 2,325 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 55,0 cm
- Luftgehalt: 2,0 %

**Frischbetonprüfungen V.4.3:**

- Temperatur: 21,6 °C
- Dichte: 2,308 kg/dm<sup>3</sup>
- Ausbreitmaß: 57,5 cm
- Luftgehalt: 2,0 %

Alle Probefläche und Probewürfel, von Versuch 1 – 4, sind nach 24 Stunden ausgeschalt und unter Wasser gelagert worden.

Von [98] wurde aus dem Rezept Klaus ein Mörtelrezept hergeleitet. Dabei wurde ein einfaches Verfahren nach Abbildung 101 angewandt.



**Abbildung 101: Errechnung eines Mörtelrezepts auf Grundlage des Betonrezepts der Tunnelkette Klaus**

**V.5** (W/B = 0,55, K=1); betoniert am 02.06.2016

**Tabelle 22: Übersicht Mörtelzusammensetzung Versuch 5**

	kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-M(S-L)42,5N WT33	355
AHWZ	109
FM	0
LP	0,52
Wasser	253
0/2	447
0/4	1042

Die zuerst für die Laboruntersuchungen hergestellten Betonprismen decken nur einen geringen Teil an Betonen ab, der für Tunnelinnenschalen zum Einsatz kommt. Deshalb wurden von den untersuchten Tunnels Proben hergestellt, die in den Tabellen 23 - 30 dargestellt sind. Eine genauere Beschreibung der Tunnel, die im Zuge des Forschungsprojektes untersucht werden, findet sich in Kapitel 5.7.

## Innaltunnel Betonrezept

**Tabelle 23: Rezepte Innaltunnel**

Innaltunnel	Nord	Süd
Betonsorte	B 300 (56) / WU / FB / 32 / K 3 - 4	B 300 (56) / WU / FB / 32 / K 3 - 4
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	260	260
Zusatzstoffe [kg/m <sup>3</sup> ]	PZ 275 (F20) Kirchbichl	PZ 275 (F20) Eiberg
Zugabewasser [kg/m <sup>3</sup> ]	50 (Fluasit C)	50 (Fluasit C)
Zuschlag [kg/m <sup>3</sup> ]	140	175
	47 % 0/4	50 % 0/4
	20 % 4/12	6 % 4/8
	21 % 8/16	14 % 8/12
	12 % 16/50	30% 12/32
Luftporenbildner	Addiment LPV 101	Addiment BV1 und LPV 101
Ausbreitmaß AM/	AM = 44	AM = 40
LP-Gehalt [%]/	LP = 3,6 %	LP = 3,9 %
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	ρ = 2415	ρ = 2360

**Tabelle 24: Innaltunnel Rezept Labornachstellung V6**

### Inntal Nord Labor V6

			Masse kg/m <sup>3</sup>
CEM	Heidelberg CEM I 42,5N		260
Zusatzstoff	Hydraulith M		50
Gesteinskörnung	gesamt	100%	
Donaukies	0/4	47%	887
	4/8	20%	377
	8/16	21%	396
	16/32	12%	226
Wasser			140
Luft		4%	---
Fließmittel		0%	0
Luftporenbildner	Addiment LPV 101	0.40%	1.04
		Rohdichte	2337

## Tunnel Strengen Betonrezept

**Tabelle 25: Rezept Autobahntunnel Strengen**

Betonsorte	B225	B300
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	240 – 270	260
	CEM II A-M (S-L) 32,5R	CEM II A-M (S-L) 32,5R
Zusatzstoffe [kg/m <sup>3</sup> ]	50 – 70	70
	Hydrolith M	Hydrolith M
Zugabewasser [kg/m <sup>3</sup> ]	160 – 170	166 - 176
Luftporenbildner	Degussa oder Mapei LPV	Degussa oder Mapei LPV
	0/4	0/4
Faserbewehrung	4/8	4/8
	8/16	8/16
	16/32	16/32

**Tabelle 26: Strengen Rezept Labornachstellung V7**

**Tunnel Strengen V7**

			Masse kg/m <sup>3</sup>
CEM	CEM II / A-M (S-L) 32,5 R	Schretter	240
Zusatzstoff	Hydraulith M		70
Gesteinskörnung	gesamt		
alle tba Zams	0/4		952
	4/8		119
	8/16		396
	16/32		515
Wasser			160
Luft		4%	---
Fließmittel	Sika 1020X	0.90%	2.16
Luftporenbildner	Addiment LPV 101	0.40%	0.96
		Rohdichte	2452

**Hengsbergtunnel Betonrezepte**

**Tabelle 27: Rezepte Hengsbergtunnel**

<b>Bauweise</b>	<b>Geschlossene Bauweise V9</b>	<b>Offene Bauweise V8</b>
Betonsorte	C25/30 (56) / IGP / GK22	C25/30 (56) / BS1D / GK22
Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	275 CEM II / A-S 42,5R	270 CEM I 42,5N C <sub>3</sub> A-frei
Zusatzstoffe [kg/m <sup>3</sup> ]	80 Fluamix C	130 Fluamix C
Zugabewasser [kg/m <sup>3</sup> ]	183 0/1 0/4	182 0/4 4/8
Zuschlag [kg/m <sup>3</sup> ]	4/8 8/16 16/32	8/16 16/32
Luftporenbildner	BT3 LZF und LPS5	BT3 LZF und LPS5
Faserbewehrung [kg]	1,2 Fasern PM 03/15	1,2 Fasern PM 03/15

**Tabelle 28: Tunnel Hengsberg, Rezept Labornachstellung V8**

**Hengsbergtunnel Block 130 und 97 V8**

		Masse	
		kg/m <sup>3</sup>	
CEM	CEM I 42,5 N C <sub>3</sub> A frei	270	
Zusatzstoff	Fluamix C	130	
Gesteinskörnung	RK 0/4	876	
	RK 8/16	385	
	RK 16/22	350	
	KK 4/8	139	
	Wasser		178
Luft	3%	---	
Fließmittel	LZF 35	0.9%	2.5
Luftporenbildner	LP 45	0.04%	0.10
Fasern	PP Fasern Fibrin PM03/15		1.19
		Rohdichte	2328

**Tabelle 29: Tunnel Hengsberg, Rezept Labornachstellung V9**

**Hengsbergtunnel Block 9 und Rettungsstollen V9  
(Rezeptur mit reduziertem Wassergehalt)**

		Masse	
		kg/m <sup>3</sup>	
CEM	CEM II/A-S 42,5 R	277	
Zusatzstoff	Fluamix C	80.5	
Gesteinskörnung	0/1	98	
	0/4	736	
	KK 4/8	92	
	8/16	568	
	16/22	366	
	Wasser		162
Luft	3%	---	
Fließmittel	LZF 35	0,81%	5
Luftporenbildner	LP 45	0.02%	0.05
Fasern	PP Fasern Fibrin PM03/15		1,19
		Rohdichte	2380



**Tabelle 30: Tunnel Hengsberg, Rezept Labornachstellung V9a**

**Hengsbergtunnel Block 9 und Rettungsstollen V9a**

		Masse kg/m <sup>3</sup>
CEM	CEM II/A-S 42,5 R	275
Zusatzstoff	Fluamix C	80
Gesteinskörnung	gesamt	
	0/1F	89
	0/4	696
	KK 4/8	91
	8/16	554
	16/22	357
Wasser		183
Luft		3%
Fließmittel	LZF 35	0,81%
Luftporenbildner	LP 45	0.02%
Fasern	PP Fasern Fibrin PM03/15	1,19
	Rohdichte	2325

**Tunnel Selzthal Betonrezept**

Vom Tunnel Selzthal konnten weder beim Bauherrn, der Baufirma noch der Prüfanstalt Rezepte erhoben werden.

**Zusätzliche Untersuchungen**

Karbonatisierung und Chloridgehalt konnten im Labor nicht nachgestellt werden.

Hier seien die Werte aus den Bohrkernuntersuchungen zusammengefasst. Die Detailergebnisse finden sich in [95].

**Tabelle 1: Ergebnisse Druckfestigkeitsversuch Bohrkern (ungenaue Werte hinterlegt)**

Nr	ID	d mm	A mm <sup>2</sup>	h mm	Masse kg	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	F <sub>m</sub> kN	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>
1	BK Strengen 1	101,2	8462,2	103,2	2,184	2,42	364,89	43,12
5	BK Strengen 2	104,2	8527,6	98,5	2,100	2,39	416,76	48,87
7	BK Hengsberg 1	98,9	7744,4	96,0	1,974	2,36	114,48	14,78
8	BK Hengsberg 2	98,6	7635,6	97,7	1,962	2,63	358,31	46,93
9	BK Selzthal 2	98,8	7666,6	104,5	1,844	2,30	228,61	29,82
10	BK Selzthal 1	98,8	7666,6	104,5	1,818	2,30	352,09	45,93
13	BK Inntal 1	99,0	7697,7	98,9	2,154	2,83	365,43	47,47

**Tabelle 2: Ergebnisse Druckfestigkeitsversuche Würfel (hinterlegter Bereich fraglich)**

Nr	ID	Masse kg	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	Fm kN	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>
1	V8 (Hengsb. 18.04.17) 1/1 Block 130 Misch. 2	8,06	2,35	1414,68	61,69
2	V9 (Hengsb. 04.04.17) 1/1 red. W	8,14	2,41	1678,50	74,35
3	V6 Inntal Nord (28.11.16) 2/2	7,36	2,18	891,74	39,58
4	V7 Strengen (16.12.16) 1/2	7,9	2,33	1139,68	50,38
5	V.5.1.2 (02.06.16) Klaus Mörtel	7,96	2,41	1160,95	52,61
6	V.2.1.1 (18.11.15) Klaus Original	7,84	2,33	1209,45	53,97
7	V.3.1.1 (25.11.15) Klaus niedriger Wassergehalt	8,02	2,39	1480,24	66,10

**Tabelle 33: Übersicht Karbonatisierung**

Tunnel	Entnahmestelle	Beschichtung	Tiefe der Karbonatisierungs front in mm
Inntal	Nische 45, 1m über Fußweg	keine	14mm
Hengsberg			f.b.
Selzthal			f.b.
Strengen			f.b.

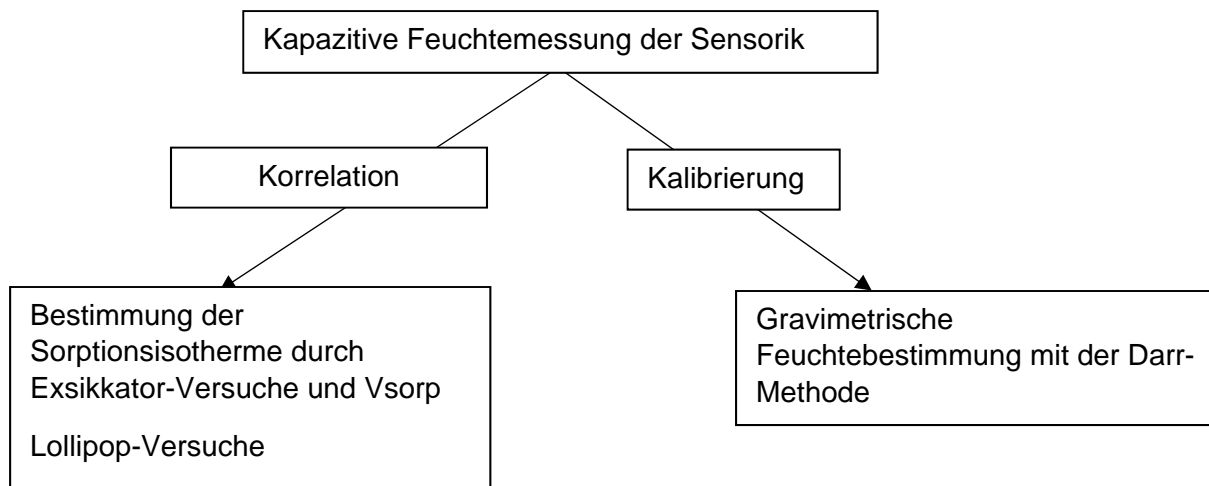
**Tabelle 34 Chloridanalysen Tunnel Selzthal, Durchführung Uni Innsbruck  
Bohrmehlentnahme 17.8. 2017**

Block	Zustand Beschichtung	NR	Tiefe cm	Chlorid auf Beton %	Chlorid auf Zement %
74	Zerstört, Ablösungen	1	0-2	0,57	>3,00
74	Zerstört, Ablösungen	2	2-4	0,45	>3,00
74	Zerstört, Ablösungen	3	4-6	0,11	1,06
42	intakt	4	0-2	0,21	2,38
42	intakt	5	2-4	<0,01	<0,15
42	intakt	6	4-6	<0,01	<0,15
11	intakt	7	0-2	0,31	>3,00
11	intakt	8	2-4	0,05	0,68
11	intakt	9	4-6	<0,01	<0,12
11 oberh.	Keine vorhanden	10	0-2	0,24	2,83

## 5.10 Vorgehen zur Kalibrierung

Um exakte Messwerte der relativen Luftfeuchte in den Bohrlöchern zu generieren und diesen massebezogene Feuchtegehalte zuordnen zu können, ist eine Korrelation bzw. zusätzlich eine Kalibrierung notwendig. Zum einen hat das Medium Beton, wie in Kapitel 5.1 und 5.3 erwähnt, einen Einfluss auf die kapazitive Messung der Sensoren. Zum anderen muss von der gemessenen rel. Luftfeuchte auf den zugehörigen massebezogenen Wassergehalt geschlossen werden. [98]

Den Einfluss des Betons auf die Messwerte soll anhand einer möglichst großen Bandbreite an Betonen zur Versuchsdurchführung sichtbar gemacht werden. Gleichzeitig werden die Sorptionsisothermen der jeweiligen Betone ermittelt, um die Wassergehalte bei verschiedenen Umgebungsfeuchten bestimmen zu können. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse werden zusätzlich die Wassergehalte gravimetrisch an Referenzbalken festgestellt.



**Abb. 102: Schema für die Kalibrierung [98]**

## 5.11 Bestimmung der Sorptionsisothermen für Versuchsbetone [98]

Die hygrischen Eigenschaften der im Labor verwendeten Betone sollten in [18] die Sorptionsisothermen anhand von Exsikkator-Versuchen nach DIN ISO 12571 [65] ermittelt werden. Dabei werden über Salz-Wasser-Lösungen verschiedene relative Luftfeuchten im Exsikkator erzeugt und die Gewichtszunahme bzw. -abnahme von eingebrachten Betonproben bestimmt. Durch stufenweise Änderung der Feuchte und das sich im Gleichgewichtszustand ergebende Probengewicht werden die Verläufe der Sorptionskurven bestimmt. Dabei wird sowohl für eine feuchte Probe mit stetig abnehmenden Außenfeuchte die Desorptionskurve bestimmt, als auch im umgekehrten Verfahren die Adsorptionskurve [2] nach [106]. Beispiele für Sorptionsisothermen finden sich ebenfalls in [2].

### Exsikkator Prüfungen [98]

In dieser Arbeit wurden von Probekörpern je zwei Schnitte mit einer Stärke von 1 cm gesägt und für die Exsikkator-Versuche noch einmal unterteilt. Je dicker die Probe, desto länger dauert der Versuch, je dünner die Probe umso größer ist der Einfluss der groben Gesteinskörnungen. Abbildung 103 zeigt die Proben, die den Probekörpern aus Kapitel 5.9

(Tabelle 17) entnommen wurden. Bei der Probeentnahme war sicherzustellen, dass nicht der direkte Randbereich der Probekörper für die Versuche herangezogen wird, da dieser eine andere Porenstruktur aufweist als das innere Betongefüge. Daher wurden von den Balken die ersten 0,5 cm als Ausschuss abgesägt.



**Abbildung 103: Proben für Exsikkator-Versuche**

## V-Sorp

Im Laufe des Forschungsprogramms wurde auch ein automatischer Sorptionstester Vsorp Enhanced [35a] angeschafft.

Die Messungen erfolgten zuerst als Desorptionsmessungen mit 4 Feuchtestufen. Die relative Luftfeuchte von 0 % wurde auch mit dem Gerät angefahren. Anschließend erfolgte die Messung der Adsorptionsisothermen.

Die Versuche wurden von [95] an folgenden Probekörpern durchgeführt:

Bohrkerne von den Tunnels Strengen, Selzthal, Hengsberg und Inntal.

Später wurden weitere Proben angesetzt.

## 5.12 Spalten und Gravimetrische Feuchte-Bestimmung [92]

Um die Ergebnisse der Sensorauswertung vergleichen zu können, wird der Feuchtegehalt von Referenzproben mittels Darmmethode bestimmt. Da sich die zu untersuchenden Messbereiche überschneiden wird der Betonbalken zunächst an drei Stellen gespalten. Dadurch ergibt sich eine größere Entnahmefläche.

Das Spalten erfolgt durch eine Druckfestigkeit - Prüfmaschine. Dabei werden zwischen Probekörper und Druckplatten Stahlstifte eingelegt, um die Bruchstelle zu definieren. In Abbildung 104 wird der Spaltvorgang dargestellt.



**Abbildung 104: Versuchsaufbau beim Spalten in der Prüfmaschine**

Die Probenentnahme erfolgte mit einem Hammer und einem Meißel auf einer sauberen, abgeschirmten Unterlage (siehe Abbildung 105). Für diesen Versuch wurden für jede Messtiefe 100 g Beton entnommen. Wichtig ist das Betonmehl von der Feuchtemessung auszuschließen. Dies ist sinnvoll, weil dieses Mehl sehr schnell Feuchte aufnimmt bzw. abgibt und dies die Ergebnisse negativ beeinflussen würde. Der Arbeitsvorgang sollte zügig und präzise ausgeführt werden. Umso weniger Zeit bis zur ersten Wägung verstreicht, umso genauer kann die Feuchte bestimmt werden.



**Abbildung 105: Gespaltener Probekörper mit Hammer und Meißel**

#### Feuchtebestimmung über Darmmethode

Das entnommene Probematerial, aus der jeweiligen Messtiefe, muss nach der Gewinnung sofort gewogen werden. Sobald dies mit allen Messbereichen geschehen ist, werden die Betonproben in Metallschälchen eingefüllt. Alle Metallschälchen werden nun für 24 h bei 105 °C in den Trockenschrank verfrachtet. Diese Zeit ist für 100g gebrochenen Beton ausreichend, um das komplette freie Wasser zu lösen. Nach den 24 Stunden werden die Proben aufs Neue gewogen. Die Differenz zwischen feuchter und trockener Probe stellt den

Wassergehalt dar. Um den Feuchtegehalt in Massen-% anzugeben, muss der Wasseranteil durch die Masse der trockenen Probe dividiert und mit 100 multipliziert werden:

$$\frac{\text{Differenz zwischen tr. und fe. Betonprobe}}{\text{Masse der trockenen Betonprobe}} * 100 = \text{Feuchteanteil in M. -\%}$$

### 5.13 Bauphysikalische Modellrechnungen

Bauphysikalische Modellrechnungen müssen an den erhaltenen Daten im Labor und Tunnel kalibriert werden und dienen dann dazu mit Klimaeingangswerten und Sorptionsisothermen der jeweiligen Innenschale die Feuchtesituation auch für andere Tunnels grob abschätzen zu können.

Gruber Oberhuber [2] geben Übersicht über Programme zur Feuchtesimulation (Kap. 6) und erforderliche Prüfparameter (Kap. 7).

Eine Voruntersuchung von Malz [18] findet sich in Anhang 9.1

Die Simulationsrechnungen findet man in Kapitel 6.4 „Modellrechnungen“ [18, 96].

## 6 MESSERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 6.1 Laborbetone

Rezepturen nach Kapitel 5.9, Tabellen 15 bis 17, nachgefahrene Rezepturen und Vergleichsprüfungen (Tunnelkette Klaus, Mörtelrezepturen), wurden hergestellt und untersucht.

Feuchtemessungen im Labor an Probekörpern

Folgende Proben wurden bisher geprüft:

Vorversuche an 2 Balken nach [92] um die Funktion zu testen und die Fühler durchzufrieren. Anschließend wurde eine Spaltung an V1.3.2 (B6) durchgeführt. Vorlagerung 99 Tage in Wasser, 18 Tage trocken, dann 20/70.

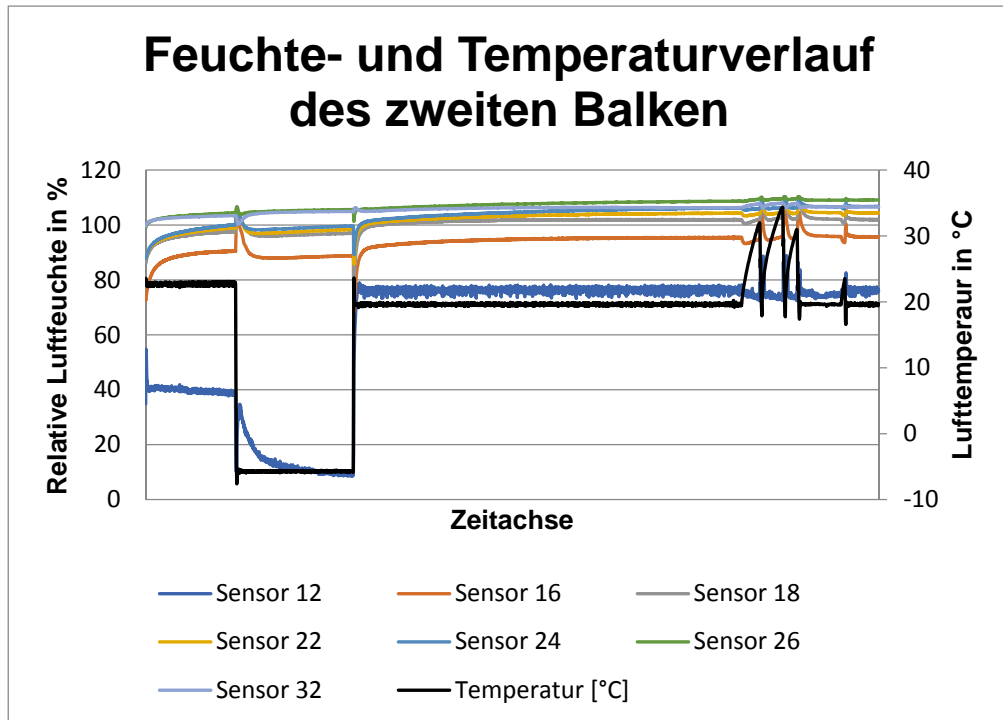
Balken V1.2.1 (B1), V1.1.2 (B2) und V1.2.1 (B3) wurden 99 Tage wassergelagert, dann 18 Tage trocken und dann einem Klima 30/15 ausgesetzt [98]. Gespalten wurde Balken V1.1.1 (B3).

Balken V5.1.1 wurde nach Wasserlagerung bei 105°C vorgetrocknet und dann ansteigend bei hoher Umgebungsfeuchte ausgelagert [95].

In Arbeit:

Weiter Balken wie V 5.1.1 im Juli 2018 gespalten und in Arbeit

Balken V2.3.1 und 2 mit 210 l, V3.1.1. und 2 mit 165l, V4.2.1 und 2 mit 205 l, V6 1/1 und 1/2 mit 140 l, V7 1/1 und 1/2 mit 160 l, V8 mit Ringelektrode, V8 mit Fühler, V8 ohne Fühler, V9 mit und ohne Fühler sind nass eingelagert, und werden im Sommer 2018 im Klimaschrank bei 23°C/30r.F. gelagert.



**Abbildung 106: Feuchte- und Temperaturverlauf des 2. Balkens B2 beim ersten Probeversuch in der Klimakammer [92]; unkalibrierte Ablesungen!**

Die Mischungen aus der Vorserie V1 (B1 und B2) wurden ausschließlich mit Zuschlagstoffen der OTH Regensburg betoniert. Die Balken waren vor Beginn der Versuche 99 Tage wassergelagert. Der hier ausgewertete Versuch wurde über einen Zeitraum von 130 Tagen mit konstanten Klimarandbedingungen in der Klimakammer von 30 °C und 15 % RH durchgeführt. Balken B1 und B2 sind mit je 6 Sensoren der 1. Sensorgeneration bestückt. Balken B3 dient als Referenzbalken und ist zusätzlich mit 3 Sensoren der 2. Sensorgeneration ausgestattet. Die Kurven sind im Anhang 9.7 wiedergegeben. [98]

**Tabelle 35: Differenz der relativen Luftfeuchten in % zwischen Versuchsbeginn und -ende der Balken B1 und B2**

	Probe	0-3 cm	2-5 cm	4-7 cm	6-9 cm	8-11 cm
Rel. Luftfeuchte zu Beginn der Messung [%]		86,03	96,20	107,46	106,56	111,57
Rel. Luftfeuchte zum Ende der Messung [%]	B1	41,74	73,19	97,04	95,82	109,92
Differenz [%]	B1	44,29	23,01	10,42	10,74	1,65
Rel. Luftfeuchte zu Beginn der Messung [%]		91,62	101,45	103,72	108,75	110,84
Rel. Luftfeuchte zum Ende der Messung [%]	B2	46,67	81,64	88,75	102,92	108,49
Differenz [%]	B2	44,95	19,81	14,97	5,83	2,35

In Tabelle 35 ist zu sehen, dass sich die absoluten Werte zwischen Balken 1 und Balken 2 zu Versuchsbeginn durchaus unterscheiden, jedoch zeigt die direkte Gegenüberstellung in Tabelle 36, dass die absoluten Änderungen der rel. Luftfeuchte in den Messtiefen mit maximalen Abweichungen von ca. 5 % RH übereinstimmen.

**Tabelle 36: Abweichung zwischen Balken B1 und B2 bei der Differenz der gemessenen relativen Luftfeuchten in %**

	Probe	0-3 cm	2-5 cm	4-7 cm	6-9 cm	8-11 cm
Diff. Beginn/Ende [%]	B1	44,29	23,01	10,42	10,74	1,65
Diff. Beginn/Ende [%]	B2	44,95	19,81	14,97	5,83	2,35
Abweichung zwischen Balken 1 und 2 in [%]	B1/B2	0,66	3,20	4,55	4,91	0,70

Die Abweichungen können aus herstellungsbedingten Materialunterschieden von dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Einfluss der Inhomogenität des Betongefüges sowie den Sensortoleranzen herrühren. Außerdem kann die Position in der Klimakammer einen Einfluss auf die Messungen haben (siehe hierzu [92]).

Man sieht aber deutlich, dass im Versuchszeitraum die Schichten in der Randzone am stärksten auf die Klimarandbedingungen reagieren und mit zunehmender Messtiefe die Feuchte beinahe konstant bleibt. Die Annahme, dass Beton bei trockenem Klima in der Randzone austrocknet und die Kernfeuchte dabei relativ konstant bleibt, kann aufgrund der Auswertung als bestätigt angenommen werden. Jedoch können bei längerer Versuchsdurchführung auch im Kernbereich Veränderungen der Feuchte gemessen werden [2] [92].

Versuchsbalken B3 wurde erst am 21.04.2016 mit Sensoren der 2. Sensorgeneration bestückt. Es liegt daher ein kleinerer Zeitraum an Messergebnissen vor. Der Balken selbst wurde jedoch zur gleichen Zeit in die Klimakammer eingebracht wie Balken B1 und B2. Er sollte daher bis auf die bereits erwähnten herstellungsbedingten Abweichungen des Betongefüges dieselbe Ausgangsfeuchte aufweisen wie die übrigen Balken. Tabelle 37 zeigt die aufgezeichneten Messwerte zu Beginn und Ende der Versuchsauswertung für die Sensoren 14-16.

**Tabelle 37: Differenz der relativen Luftfeuchten in % zwischen Versuchsbeginn und -ende des Balkens B3**

Datum	Gemessene Rel. Luftfeuchte [%]	0-2 cm	2-4 cm	8-10 cm
21.04.2016	Unmittelbar nach Installation	65,49	65,50	65,37
21.04.2016	Maximalwerte	90,14	94,36	103,69
29.08.2016	Zeitpunkt der letzten Auslesung	48,34	69,33	110,91



Differenz	Differenz			
21.04.2016-	Maximum/letzte	41,11	25,24	7,22
29.08.2016	Auslesung			

Wie Tabelle 37 zeigt, erreichten die Sensoren in 0-2 cm und 2-4 cm innerhalb des ersten Tages ihre Maximalwerte der gemessenen rel. Luftfeuchte. Ab diesem Zeitpunkt zeigen die Messkurven konstant fallende Werte für die rel. Luftfeuchte. Sensor 16 in 8-10 cm Tiefe hingegen zeigte über ca. 2 Monate steigende Werte. Eine signifikante Abnahme der Feuchte kann erst innerhalb der letzten 2 Wochen der Versuchsdurchführung beobachtet werden. Dies war zu erwarten, da im Kernbereich Veränderungen erst nach längeren Phasen des Feuchteaustausches mit der Umgebungsfeuchte auftreten [36] [52].

Die in dieser Arbeit [ 98] und weitere durchgeführte gravimetrische Referenzmessung zeigt eindeutig verwertbare Ergebnisse. Zum einen zeigt sich eine Zunahme des massebezogenen Wassergehaltes über Querschnittstiefe. Beton als poröser Baustoff schafft über Sorptionsvorgänge stets ein thermodynamisches Gleichgewicht mit der wasserdampfgesättigten Umgebungsluft. Der Grund hierfür sind Konzentrationsunterschiede in der Wasserdampfsättigung innerhalb und außerhalb des Bauteils [2]. Somit sollte sich bei den eingestellten Randbedingungen im Labor von 30° C und rel. Luftfeuchte von 15 % eine Abgabe der Feuchte im Beton hin zur trockenen Außenluft einstellen. Der Feuchtetransport ist in der Randzone der Betondeckung wesentlich stärker ausgeprägt als im Kernbereich des Betonquerschnittes. Somit sollten die Wassergehalte in größeren Messtiefen zunehmen, da mit zunehmendem Abstand zur Betonoberfläche die Transportmechanismen wesentlich länger brauchen und die Feuchte somit langsamer abgegeben wird [2].

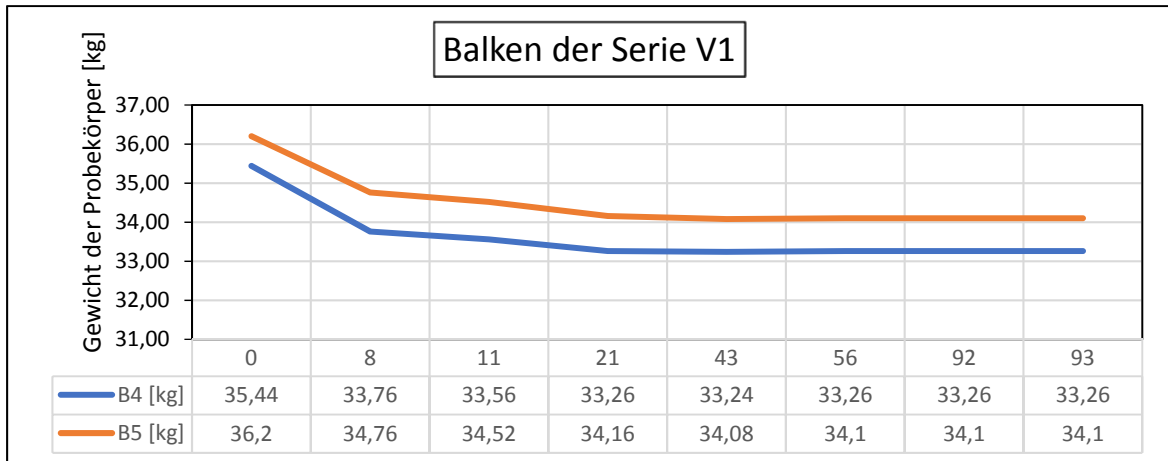
Trocknung der Versuchsbalken [98]

Für die Versuchsdurchführungen wurden Probekörper der Serien V1, V2 und V5 im Trockenofen bis zur Massenkonstanz getrocknet. Diese Balken sollten anschließend in ein feuchtes Klima eingelagert werden.

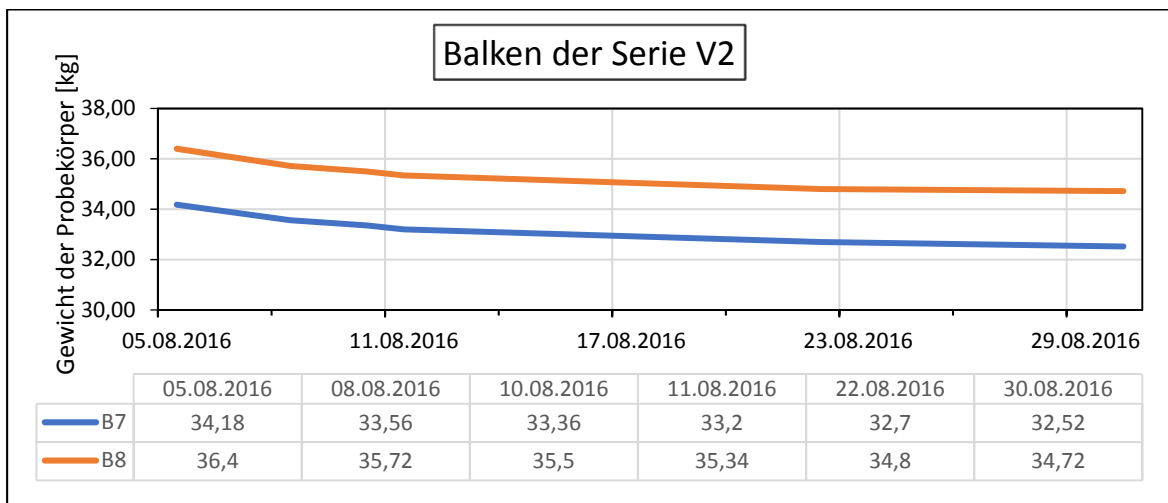
**Tabelle38: Versuchsbalken im Trockenschrank (Probekörper nach Tabelle 17) [98]**

Versuch	Probekörper
V1 Vorserie	V1.2.2 B4
	V1.3.1 B5
V2 Tunnelkette Klaus Originalrezept	V2.1.1 B7
	V2.1.2 B8
V5 Mörtelmischung	V5.1.1 B9
	V5.1.2 B10

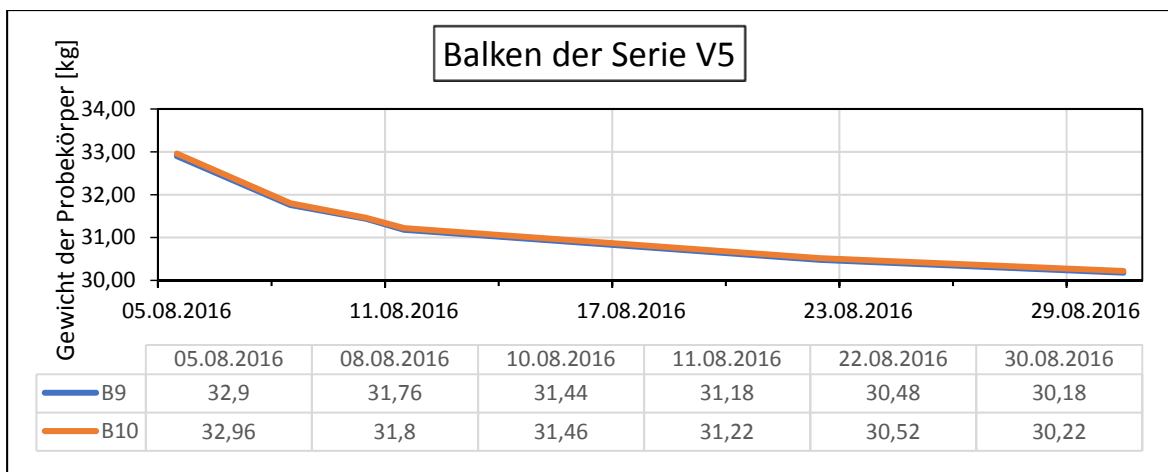
Der Verlauf der Trocknung ist in Abbildung 107-109 dargestellt. Die Rezepte der Betone befinden sich in Kapitel 5.9.



**Abbildung 107: Trocknung Balken der Serie V1 (B4 und B5)**



**Abbildung 108: Trocknung der Serie V2 (B7 und B8)**



**Abbildung 109: Trocknung der Serie V5 (B9 und B10) mit Mörtelrezeptur, die gegenüber den Betonproben gleichmäßigere Ergebnisse liefert.**

## Gravimetrische Referenzprüfungen V1 und V5

Von [92] wurde eine erste Balkenprüfung am Balken V1.3.2 (B6) in der Klimakammer durchgeführt. Der Balken war 99 Tage unter Wasser, dann 18 Tage trocken, kam dann in ein konstantes Klima 20/70.

**Tabelle 9: Zusammenhang der kalibrierten Ablesung der r. L. mit der m. F., Offset berücksichtigt [92]**

Schichttiefe [cm]	0 - 3	2 - 5	4 - 7	6 - 9	8 - 11	10 - 13
Umgerechnete Tiefe [cm]	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5	11,5
Wassergehalt [M.-%]	5,21	4,71	6,36	4,98	5,49	5,51
Relative Luftfeuchte [%]	85,67	92,05	94,51	96,79	99,16	96,66

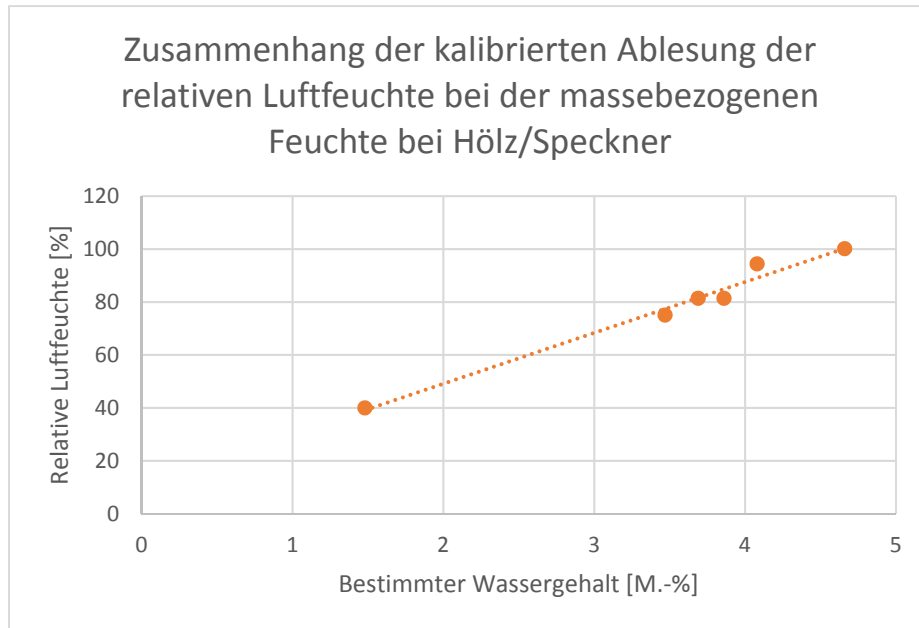
Es ist leider kein Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Messwert der relativen Luftfeuchte feststellbar.

In [98] werden die Kalibrierungen am Balken V1.2.1 (B3) beschrieben. Der Balken war ebenfalls vorher 99 Tage unter Wasser und dann 18 Tage trocken gelagert worden. Anschließend wurde auch er in der Klimakammer gelagert. Die relative Luftfeuchte wurde auf 10% und später dann auf 15 % gestellt um dem Balken Wasser zu entziehen. Die Lufttemperatur wurde auf 30°C eingestellt. In Tabelle 80 sind die Ergebnisse zusammengefasst:

**Tabelle 40: Wassergehalte und relative Luftfeuchten Bachelorarbeit Hölz/Speckner [98] korrigiert mit Offset=9,92 %**

Schichttiefe [cm]	0 - 3	2 - 5	4 - 7	6 - 9	8 - 11	10 - 13
Umgerechnete Tiefe [cm]	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5	11,5
Wassergehalt [M.-%]	1,48	3,47	3,69	4,08	4,66	3,86
Relative Luftfeuchte [%]	40,74	75,08	81,39	94,40	100,15	81,40

Stellt man hier einen Zusammenhang zwischen den Wassergehalten und den relativen Luftfeuchten her, erhält man folgende Grafik (Abb. 110):



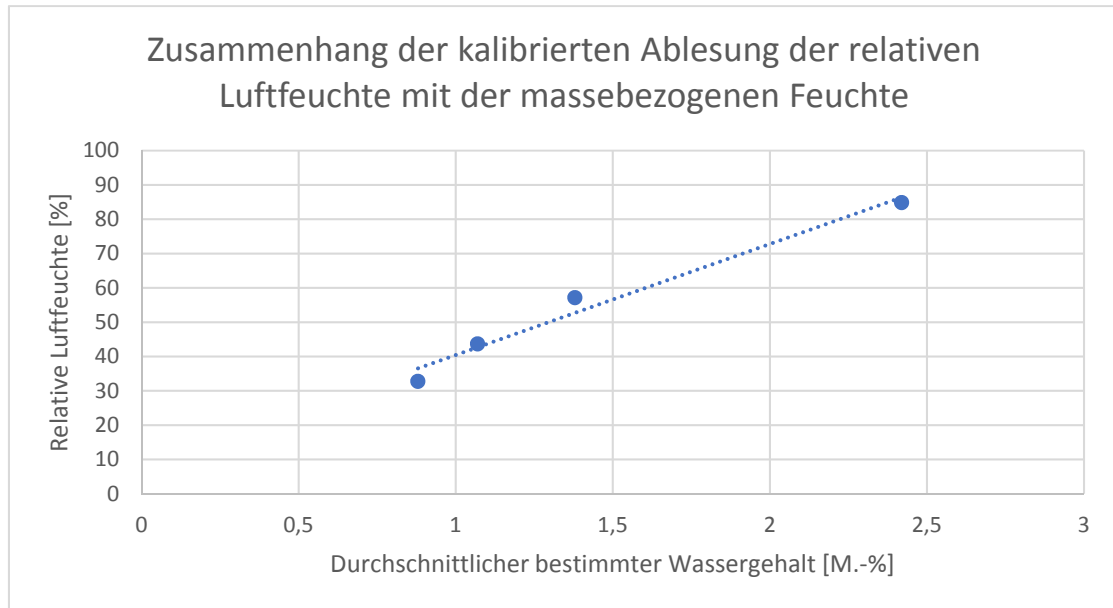
**Abbildung 110: Zusammenhang der kalibrierten Ablesung der r. L. mit der m. F. bei Hölz/Speckner [92]**

Ergebnisse gravimetrische Referenzprüfungen nach [95]

Die Probe V5.1.1 (Mörtelrezept Klaus, 253l/m<sup>3</sup> Wasser) wurde nach Wasserlagerung vor der Prüfung bei 105° getrocknet. Dann erfolgte eine Lagerung bei ansteigender Feuchte im Klimaschrank bei 25,3°C und 94% r.F.

**Tabelle 41: Massen der gravimetrischen Kalibrierung bei Entnahmestelle 2 [95]**

Schichttiefe [cm]	Entnahmestelle 2				
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-15
Masse vor Trocknung [g]	444,60	529,91	504,00	227,91	1808,26
Masse nach Trocknung [g]	434,36	523,09	498,74	225,88	1792,89
Masse nach Wässerung [g]	466,97	563,41	534,92	242,79	1814,92
Wassergehalt 1 [g]	10,24	6,82	5,26	2,03	15,37
Wassergehalt 2 [g]	32,61	40,32	36,18	16,91	22,03
Wassergehalt [M.-%]	2,36	1,30	1,05	0,90	0,86
Sättigungsfeuchte [M.-%]	7,51	7,71	7,25	7,49	1,23



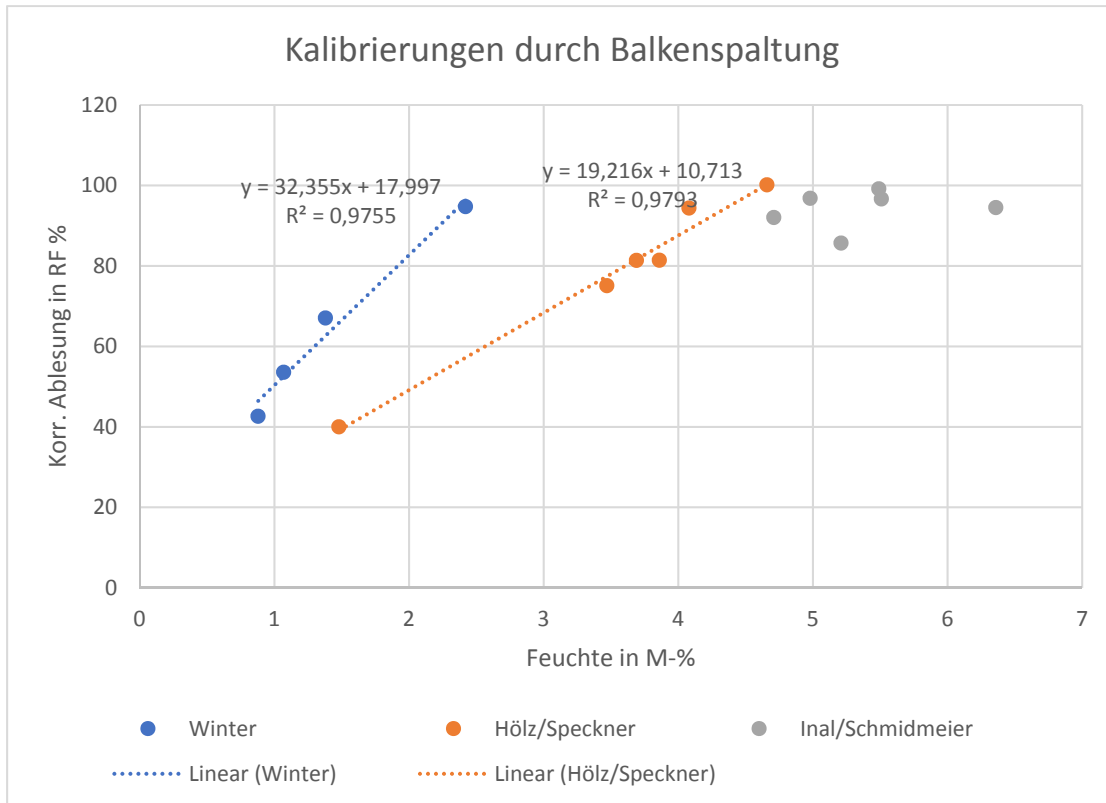
**Abbildung 111: Zusammenhang der kalibrierten Ablesung der r. L. mit der m. Feuchte [95]**

#### Ergebnisse Ringelektrode

In einem Balken V8 wurde die Ringelektrode eingebaut um einen Vergleich mit diesem Messverfahren zu bekommen. Die Versuche laufen zurzeit noch.

#### Zusammenfassung Kalibrierungen Laborversuche mit Stand 5/2018

Es ist zu beachten, dass die Lagerbedingungen unterschiedlich waren, was aber in dem Fall keinen großen Einfluss haben sollte. Der Einfluss der Rezepturen ist aber erkennbar.



**Abbildung 112: Kalibrierkurven erstellt durch Balkenspaltung (Winter: Klaus Mörtel, Hölz/Speckner und Inal/Schmidmeier: Vorserie Beton Klaus)**

Da kommt noch etwas Kommentar dazu!

## 6.2 Kalibrierungen mit Sorptionsisothermen und Lollipop-Versuchen [18]

Der verwendete Sensorchip der Firma Sensirion wurde für Messungen in „gewöhnlichen“ Außenklimabedingungen hergestellt. Das Messprinzip basiert auf der Veränderung der elektrischen Kapazität eines Kondensators. Das daraus gemessene Spannungssignal kann über folgende Gleichung in einen Feuchtwert umgewandelt werden.

$$RH = 100 \times \frac{S_{RH}}{2^{16}}$$

mit

$RH$  Relative Feuchte [%]

$S_{RH}$  Spannungssignal des Sensors [V]

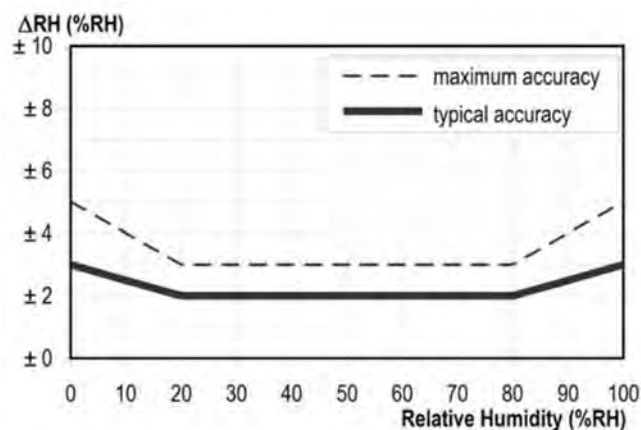
Die Applikation in der Tunnelinnenschale führt, aufgrund des chemisch abweichenden Milieus zur Notwendigkeit der Kalibrierung bzw. Eichung der Sensoren. Ursachen sowie Vorgehensweisen werden in den anderen Kapiteln ausführlich erläutert.

Die in den Tunneln installierten Sensoren zeigen über einen längeren Zeitraum relative Feuchten von mehr als 100 %. Dies ist ein Indiz, dass die Betonumgebung einen Einfluss auf die im Werk kalibrierten Sensoren nimmt und diese erneut kalibriert werden müssen. Um

diesen Fehler korrigieren zu können und zuverlässige Datensätze zu erzeugen, wurden die Sensoren einem Kalibrierungsversuch unterzogen.

Im Beton (pH-Wert von etwa 12) liegt eine höhere Konzentration an Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ) vor, welche die kapazitive Messung (Auslesung eines Spannungssignals) der Sensoren beeinflusst und das Messergebnis verändert. Teile dieser Ionen wandern durch Diffusion bzw. „Huckepack“ mit Wassermolekülen in die Kavität. [19]

[20] erläutert eine Methode die Anzahl der Ionen in Beton, durch Leitfähigkeitsmessungen bestätigt, zu berechnen. Diese Kalkulation benötigt eine sehr präzise Eingabe von Ausgangsparametern, wie etwa die exakte Zusammensetzung der Betonrezeptur. Die benötigte Präzision ist in der Praxis meist nicht gegeben und daher wird die Berechnungsvariante als nicht anwendbar gesehen. Eine Sensorkalibrierung muss daher über Messungen durchgeführt werden. Die Anzahl der vorhandenen Ionen sollte durch die gleichbleibende Zusammensetzung des Betons (mit Ausnahme der Karbonatisierung sowie Versalzung) und gleichbleibender Größe der Kavität unverändert bleiben. Es wird vermutet, dass die Sensoren aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit einem Off-Set unterliegen. Ist die Anzahl der Ionen vom Wassergehalt der Kavität abhängig, so könnten die Sensoren ein Driftverhalten aufweisen. Diese Möglichkeit muss noch separat überprüft werden.

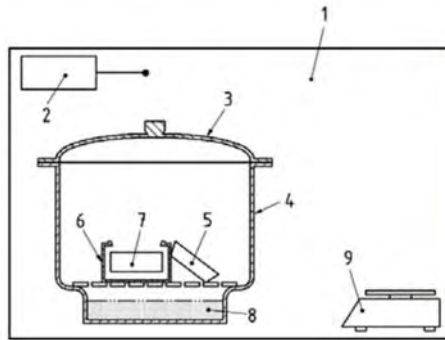


**Abbildung 113 Genauigkeit des Sensors ab Werk für Anwendung in Außenluft [107]**

Die Abbildung 113 zeigt die vom Hersteller zur Verfügung gestellte, ermittelte Genauigkeit des Sensors. Daraus ist ersichtlich, dass ab einer anliegenden r.F. von 80 % die Abweichung  $\Delta\text{RH}(\% \text{RH})$  des Messwerts zum erwarteten Wert des Sensors abnimmt und typischerweise zwischen 2 % und 3 %, maximal jedoch bei 5 % (bei 100 % r.F.) liegt. Diese Validierung gilt für Sensoren in Luftumgebung. [107]

Um die Sensoren für die Anwendung in Betonkavitäten kalibrieren zu können wurden Versuche in Anlehnung an die DIN EN ISO 12571:2013-12 [108] mittels des Exsikkator-Verfahrens durchgeführt.

Die Abbildungen 114 und 115 zeigen den verwendeten Versuchsaufbau.



**Abbildung 114 Versuchsaufbau nach [92]**



**Abbildung 115 Exsikkatorversuch zur Sensorkalibrierung**

mit:

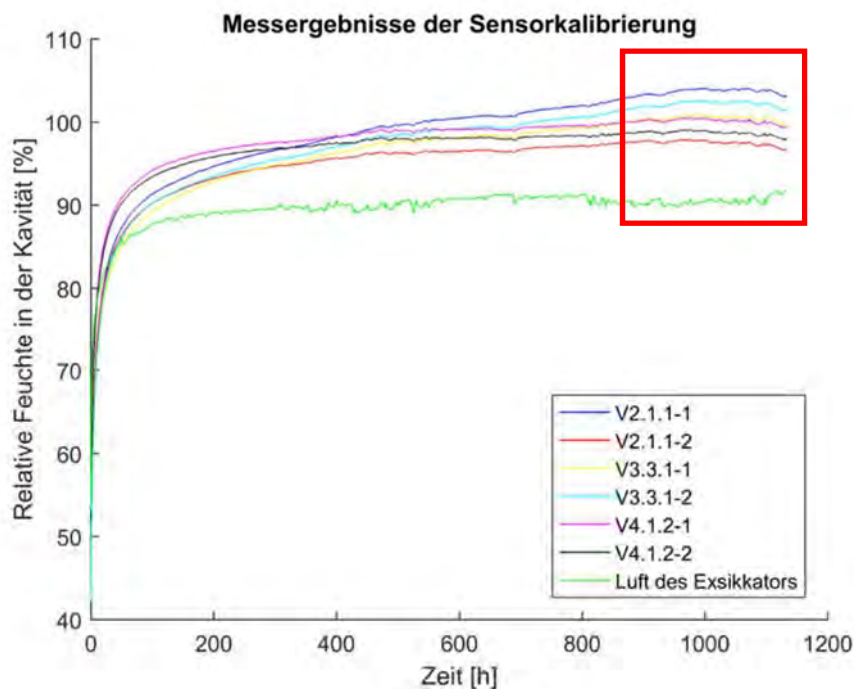
- 1 Raum mit konstanter Temperatur
- 2 Temperaturfühler
- 3 Exsikkatordeckel mit luftdichtem Verschluss
- 4 Exsikkatorkörper
- 5+6 Wägebehälter mit Abdeckung
- 7 Prüfkörper
- 8 Gesättigte Salzlösung
- 9 Waage mit einer Auflösung von 0,01 g

Die Salzlösung im Versuchsaufbau generiert einen bestimmten Partialdruck über der Flüssigkeit und erzeugt somit eine relative Feuchte im Exsikkator. Die erzeugte relative Feuchte ist von der Umgebungstemperatur abhängig. Um präzise Messungen zu ermöglichen, sollte die relative Feuchte nicht mehr als  $\pm 2 \%$  und die Temperatur nicht mehr als  $\pm 0,5 \text{ K}$  schwanken. Die Waage sollte über eine maximale Messungenauigkeit von 0,01 % des Probekörpergewichts verfügen.

In den Exsikkator wurden kubische Probekörper gelegt (vgl. Abbildung 115), deren Maße etwa  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  betragen. In diese Würfel wurden, wie im In-Situ-Zustand in den Tunneln, Löcher gebohrt und diese vertikal gegen Luftaustausch abgedichtet. Im Versuch sollte sich der gemessene r.F.-Wert der Sensoren (in der Kavität) im stationären Zustand an den r.F.-Wert des Sensors in der Exsikkatorluft annähern.

Abbildung 116 illustriert die Abweichung der Sensoren deutlich. In der Theorie sollten sich die gemessenen Feuchten in den Probekörper langsam an die relative Luftfeuchte annähern. In der Messung übersteigen die r.F.-Werte in den Probekörpern die Luftfeuchte bereits vor dem Erreichen des stationären Zustands. Im Exsikkator wurde ein Zustand von  $20^\circ\text{C}$  und  $85 \%$  r.F. angestrebt. Die Feuchte stellte sich im stationären Zustand bei etwa  $91 \%$  r.F. ein. Diese erkannte Abweichung zwischen Ziel und Endfeuchtwert konnte durch unbekannte Störfaktoren nicht eliminiert werden. Die Geschwindigkeit des Feuchteaufnahmeprozesses folgt dabei den Angaben der Theorie und nimmt mit steigender Sättigung ab. Geringfügige Sprünge bzw. Änderungen bei der Datenaufzeichnung wurden vernachlässigt.





**Abbildung 116 Messergebnisse der Sensorkalibrierung**

Der im roten Rechteck der Abbildung 116 markierte Abschnitt definiert den stationären Zustand. Für diesen Zeitabschnitt ist ersichtlich, dass die aufgezeichneten relativen Feuchtwerte nicht von der Betonrezeptur abhängig sind. Abweichungen werden jedoch durch die unterschiedlichen Probekörper hervorgerufen.

Die durchgeführte Fehlerrechnung führt zu einem mittleren relativen Feuchtwert in den Kavitäten von 100,48 % relative Feuchte. Im Mittel weisen die Sensoren deshalb einen systematischen Fehler zum Sensor in Exsikkatorluft von 9,92 %-Punkte r.F. auf. Der wahre Wert ist dabei geringer als der erwartete Wert. Die Standardabweichung ( $1 \sigma$ ) der systematischen Abweichung beträgt 3,99 % r.F.. Der Standardfehler berechnet sich zu 0,20 % r.F.. Resultierend lässt sich für den **Off-Set eine Abweichung von  $+ 9,92 \pm 0,20$  %-Punkte r.F.** ermitteln. Alle nachfolgenden Daten, die aus den Messdaten der Tunnel herangezogen werden, wurden um diesen systematischen Fehler korrigiert. Weitere Kalibrierungen über Sorptionsisothermen und Spaltungen der Probekörper sind in Kapitel 6.1 beschrieben.

#### Bestimmung der Sorptionsisothermen [18]

Aus der Vorsimulationsstudie geht die Sorptionsisotherme als maßgeblicher Parameter, der den Wassergehalt definiert, hervor. Für die Bestimmung der Sorptionsisothermen, wurden deshalb Messungen durchgeführt, damit die Sorptionsisothermen für verschiedene Betonrezepturen identifiziert werden können. Die Betonrezepturen sind den Originalrezepturen der betrachteten Tunnel nachempfunden. Gleichzeitig wurden aus Kernbohrungen aus den Tunneln Prüfscheiben extrahiert, um die tatsächlichen Sorptionsisothermen der Tunnelinnenschalen zu bestimmen. Für die Messungen wurde vorerst ein Exsikkatorversuch durchgeführt, später das Messgerät Vsop eingesetzt. Die Sorptionsisothermen-Messungen werden mit dem theoretischen Modell von [59], das auf dem BET-Modell basiert, verglichen. Es soll gezeigt werden, inwiefern Messungen der Sorptionsisothermen nötig sind oder das Modell zur Approximation verwendet werden kann.

## Aufbau und Durchführung [18]

Für die Bestimmung der Sorptionsisothermen wurde der Exsikkator-Versuch aus der Sensorkalibrierung verwendet. Anstelle der kubischen Probekörper wurden Scheibenprüflinge eingesetzt. Die geringere Dicke sollte zum schnelleren Erreichen der Massenkonzanz führen.

Da die Sorptionsisothermen von Beton einer Hysterese unterliegen, wurden sowohl Adsorptions- als auch Desorptionsmessungen durchgeführt. Die erzeugten Probekörper wurden daher in getrennten Messreihen auf deren Adsorptions- bzw. Desorptionswassergehalte untersucht. Die untersuchten Probekörper verfügen über verschiedene Betonrezepturen. Die Rezepturen der Probekörper können dem Kapitel 5.9 entnommen werden. Dabei unterscheiden sich die Proben in den eingesetzten Bindemitteln und Bindemittelanteilen und im beigefügten Wasser. Die jeweiligen Feuchtestufen, die während den Messungen im Exsikkator eingestellt wurden, können der nachfolgenden Tabelle 42 entnommen werden.

**Tabelle 42: Feuchtestufen im Exsikkator**

Salzlösung für 23 °C	Relative Feuchte über der Lösung [%]
Natriumbromid NaBr	57,75
Kaliumbromid KCl	84,65
Kaliumnitrat KNO <sub>3</sub>	94,00
Kaliumsulfat K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,42

Ein Prüfling ist im Gleichgewicht, wenn keine weitere Feuchte aufgenommen wird. Dies gilt dann als erfüllt, wenn die Massenkonzanz erreicht ist. Die Massenkonzanz ist wiederum erreicht, wenn in drei konsekutiven Messungen mit mindestens 24 h verstrichener Zeit die Änderung des Gewichts der Probekörper weniger als 0,1 % beträgt. Der Wassergehalt wird dabei nach folgender Gleichung bestimmt.

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

mit

$u$	Wassergehalt	[kg]
$m$	Gewicht des feuchten Probekörpers	[kg]
$m_0$	Gewicht des trockenen Probekörpers	[kg]

Das trockene Probengewicht wird durch Trocknung der Proben bei 105 °C bis zur Massenkonzanz ermittelt. Das physikalisch eingeschlossene Wasser im Beton, aufgrund von Flaschenhalsporen sowie geschlossenen Poren, wird dabei ebenfalls abgeführt. Bei den Adsorptionsisothermen fand die Trocknung vor Versuchsbeginn statt. Bei den Desorptionsisothermen wurde entsprechend die Probentrocknung nach dem Versuch durchgeführt.

Für die graphische Darstellung sowie bei der Angabe nur eines Messergebnisses für die Sorptionsisothermen wurden die Ergebnisse mehrerer Proben eines Probekörpers bzw. Bohrkerns zusammengefasst.

Die nachfolgende Bezeichnung (V1, V2, V3, V4) der Proben bezieht sich auf verschiedene Rezepturen, die für die Untersuchung zum Einsatz kamen. Die Rezepturen basieren auf der Rezeptur der Tunnelkette Klaus. Die Rezepturen sind im Detail in Kapitel 5.9, Tabellen 15ff aufgeführt.

### Auswertung der Adsorptionsisothermen [18]

**Tabelle 43: Messergebnisse der Adsorptionsisothermen**

Probekörperbezeichnung / Probennummer	Probe	Feuchtestufe	Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]				
			0,00 %	61,30 %	84,00 %	93,00 %	96,80 %
	V1B1 Vorserie	1	0,00	22,49	27,69	34,24	42,23
	V1B1	2	0,00	15,82	17,46	19,35	25,36
	V.2.1.1 Klaus 195 I	1	0,00	37,66	41,78	48,15	55,93
	V.2.1.1	2	0,00	32,51	37,98	45,03	52,64
	V.2.1.1	3	0,00	20,48	25,54	32,67	42,13
	V.2.1.1	4	0,00	22,16	27,09	34,14	41,98
	V.2.1.1	5	0,00	26,34	34,03	42,92	54,90
	V.3.1.1 Klaus 165I	1	0,00	36,81	41,37	46,74	52,27
	V.3.1.1	2	0,00	35,91	40,52	46,99	53,93
	V.3.1.1	3	0,00	12,97	17,58	22,90	28,85
	V.3.1.1	4	0,00	14,82	19,86	25,92	32,44
	V.4.1.2 Klaus 205I	1	0,00	32,79	37,63	43,41	52,08
	V.4.1.2	2	0,00	40,96	47,76	58,04	72,28
	V.4.1.2	3	0,00	25,65	32,39	41,33	54,45
	V.4.1.2	4	0,00	23,99	31,86	42,46	56,29
	Selzthal Kern	3	0,00	47,00	48,87	51,89	57,99
	Inntal	1	0,00	14,83	18,86	22,66	27,02
	Strengen	2	0,00	0,88	2,64	5,02	8,90
	Strengen	3	0,00	11,15	12,95	15,60	18,59

Die Tabelle 43 beschreibt die Messergebnisse, die bei der Bestimmung der Sorptionsisothermen ermittelt wurden. Die für die jeweiligen Probenreihen gemittelte graphische Korrespondenz zu Tabelle 43 kann den Abbildungen 117 und 118 entnommen werden.

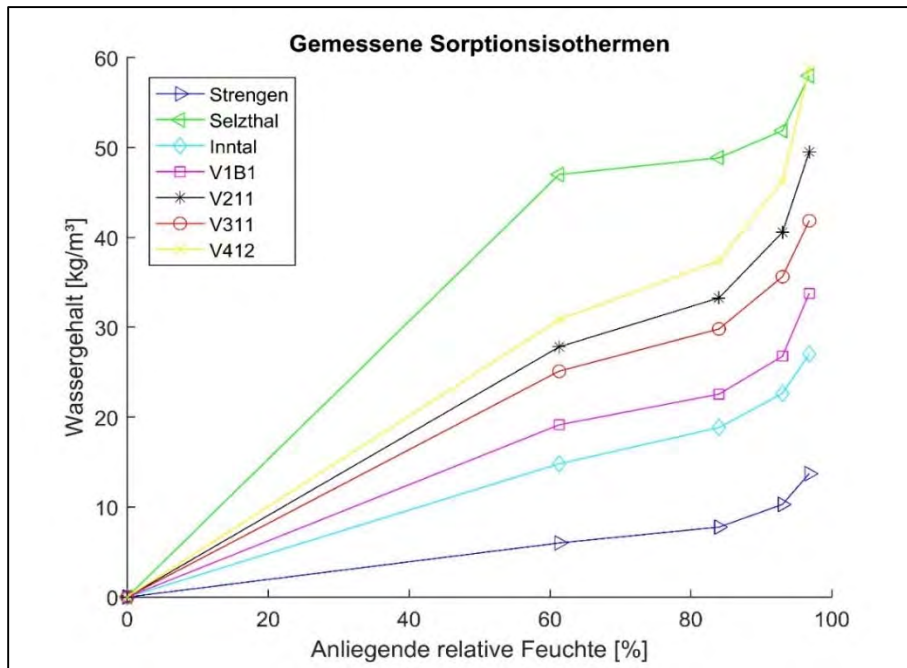


Abbildung 117: Mittlere gemessene Adsorptionsisothermen [18] Darstellung mit Wassergehalt

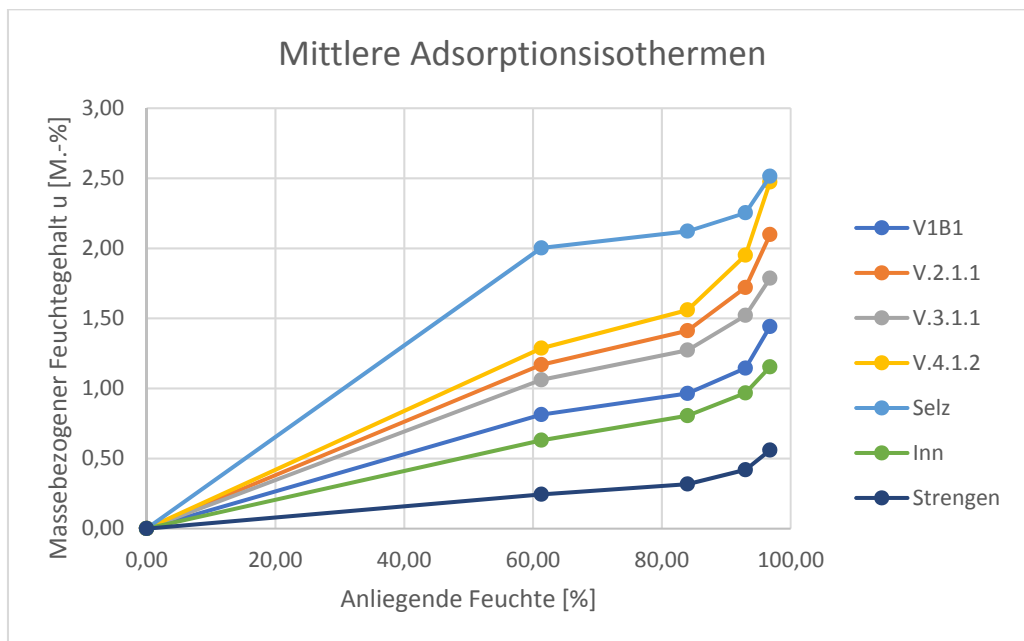


Abbildung 118: Mittlere gemessene Adsorptionsisothermen [18] Darstellung mit M-%

Bei der Auswertung der Sorptionsisothermen ist ersichtlich, dass insbesondere zwischen den aus den Tunneln entnommenen Proben, die aus den Bohrkernen extrahiert wurden, einschlägige Abweichungen auftreten. Hingegen ist bei den rekonstruierten Probekörpern ersichtlich, dass diese insgesamt eine geringere Abweichung zueinander zeigen, als die Bohrkernproben zueinander. Aus der Literaturrecherche kann extrahiert werden, dass der

Wasser-Bindemittelwert der Betonscheiben dafür verantwortlich sein kann. Es wurden daher in Tabelle 44 die Wasser-Bindemittelwerte der Betonproben verglichen.

**Tabelle 44: Vergleich der Versuchskörper**

Versuchskörper- Bezeichnung	Anmerkung	Wasser- Bindemittelwert (für $k=0,8$ )	Betonalter (Tage)
V1B1	Vorserie	0,57	714
V2.1.1	Klaus 200l	0,57	721
V3.1.1	Klaus 165l	0,51	728
V4.1.2	Klaus 205l	0,63	742
Selzthal		unbekannt	6205
Inntal		0,47	8395
Strengen		0,54	2452

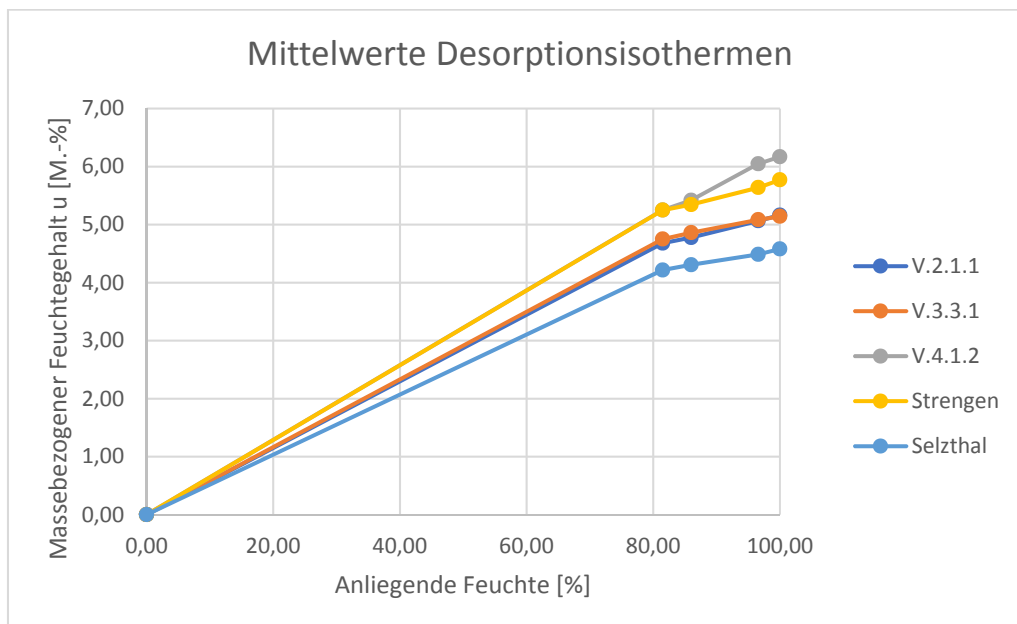
Der Rückschluss über den Wasser-Bindemittelwert ist nur bedingt möglich, allerdings kann eine Tendenz zwischen den beiden Werten ermittelt werden. Weiterhin ist die Bohrkernprobe des Tunnel Selzthal karbonatisiert. Bei den Daten für den Tunnel Strengen ist der Durchschnitt in Abbildung 118 aus einer karbonatisierten Schicht und einer nicht-karbonatisierten Schicht gebildet worden. **Die Daten werden noch in weiteren Ausarbeitungen getrennt.**

#### Auswertung der Desorptionsisothermen [19]

Die Messung der Desorptionsisothermen wurde an Proben durchgeführt, die dem selben Balken entnommen wurden wie die Proben der Adsorptionsisothermen-Versuche. Die Proben wurden aus der Wasserlagerung nach vollständiger Hydratation entnommen und beginnend bei 100 % r.F. in den Exsikkator gegeben. Die Bestimmung der Feuchte wurde wie bei den Adsorptionsisothermen mittels Wägung durchgeführt. Bei Betrachtung des Wassergehalts in Tabelle 45 ist ersichtlich, dass entgegen den Erkenntnissen von [58], die Unterschiede bei den offen porösen mineralischen Baustoffen zwischen Adsorptionsisotherme und Desorptionsisotherme unter diesen Messbedingungen einen Unterschied auf das Simulationsergebnis ausüben. Die nachfolgende Abbildung 120 illustriert die Differenzen zwischen Adsorptions- und Desorptionsisothermen. Die Desorptionsisothermen liegen, den Vergleichsdaten entsprechend, näher bei der wahren Sorptionsisotherme der Tunnelinnenschale. Bei der Tunnelinnenschale kommt es während der Konstruktion nicht zur Austrocknung und so kann physikalisch gebundenes Wasser, das bspw. in geschlossenen Poren gespeichert ist, nicht entweichen. Der Gesamtwassergehalt des Bauteils wird dadurch erhöht. Für den Brandschutz im Tunnel ist dies dann relevant, wenn man den zusätzlich in der Pore entstehenden Druck durch Wassersättigung einbezieht, der letztlich zum Versagen des Bauteils führt.

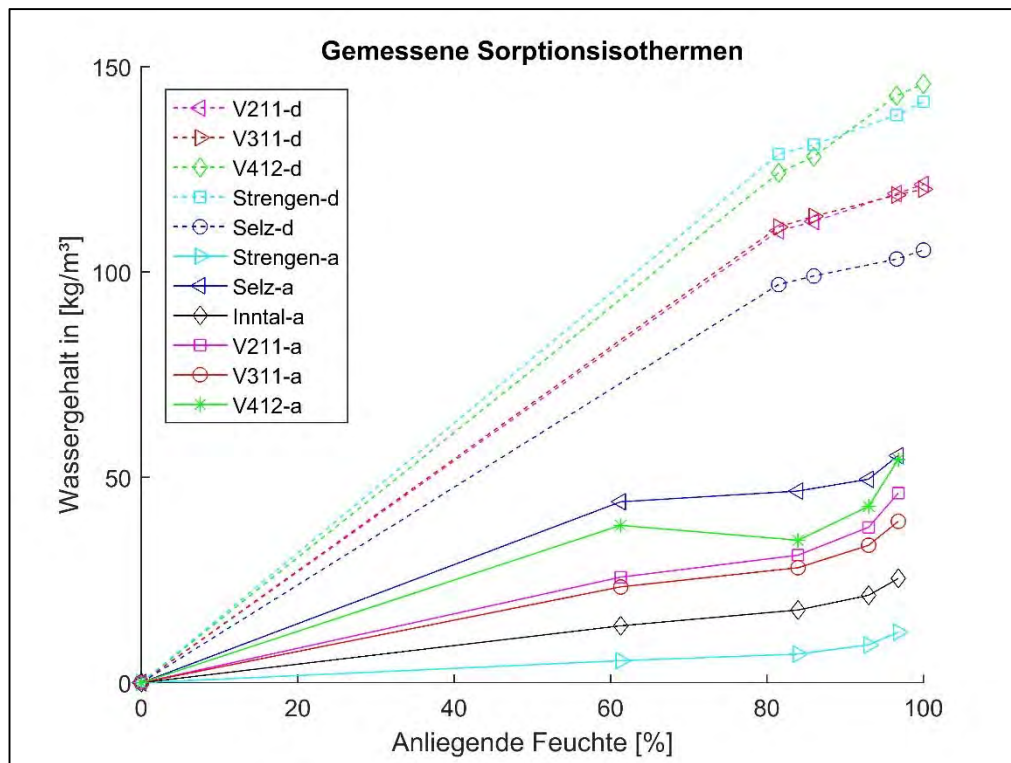
**Tabelle 45 Messergebnisse der Desorptionsisothermen**

		Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]				
		Feuchtestufe	81,50 %	86,00 %	96,60 %	100,00 %
Probekörperbezeichnung/Probennummerierung	V2.1.1 Klaus 195 I	1	116,06	117,51	124,54	126,61
	V2.1.1	2	95,86	100,55	106,10	108,10
	V2.1.1	3	118,16	118,85	126,59	129,31
	V3.1.1 Klaus 165 I	1	104,79	107,41	111,89	112,82
	V3.1.1	2	112,73	115,70	121,14	122,45
	V3.1.1	3	108,24	111,02	115,27	116,73
	V3.1.1	4	118,23	120,15	126,87	128,62
	V4.1.2 Klaus 205 I	1	149,67	153,85	170,44	173,76
	V4.1.2	2	129,50	133,68	148,62	151,91
	V4.1.2	3	112,65	116,57	130,82	133,23
	V4.1.2	4	104,70	108,30	121,98	124,29
	Strengen Kern	1	128,71	131,03	138,23	141,48
	Selzthal Kern	1	96,98	99,05	103,17	105,34



**Abbildung 119: Mittlere Desorptionsisothermen ([18] von [95] auf M-%)**

Eine Messung bei tieferen RF wurde von [18] aus Zeitgründen nicht durchgeführt.



**Abbildung 120 Gemessene Desorptionsisothermen (d, gestrichelte Linie) im Vergleich zu den Adsorptionsisothermen (a, durchgezogene Linie)**

Die Hysterese, die zwischen Ad- und Desorptionsisotherme im Baustoff vorliegt, kann aufgrund von zwei Phänomenen auftreten. Zum einen führen Flaschenhalssporen zu einer Differenz des Wassergehalts bei gleicher relativer Feuchte und zum anderen übt das physikalische Wasser in geschlossenen Poren einen großen Einfluss auf den Wassergehalt aus. Vergleicht man den typischen s-förmigen Verlauf der Sorptionsisothermen (vgl. Abbildung 22), so ist ersichtlich, dass die Messpunkte bei 95 % r.F. sich bereits deutlich stärker annähern müssten, denn bei Flaschenhalssporen kommt es bei niedrigen bzw. hohen Feuchten zum Verschluss bzw. zur Öffnungen dieser und deren Einfluss nimmt dementsprechend ab, wenn die Proben bei sehr hohen bzw. niedrigen Feuchten gelagert werden. Für die Erklärung der hohen Abweichung zwischen den Sorptionsisothermen-Durchläufen kann demnach das physikalische Wasser in geschlossenen Poren verantwortlich gemacht werden. Dieser Fakt kann unter anderem dem Ablauf des Messvorgangs geschuldet sein. Es ist zu empfehlen für diesen Zweck die Probekörper auf Adsorption bzw. Desorption zu testen und erst im Anschluss die Trocknung bei 105 °C durchzuführen.

Aus den Daten kann allgemein abgeleitet werden, dass der Anteil an Wasser in geschlossenen Poren im Tunnel Selzthal besonders niedrig und im Tunnel Strengen besonders hoch ist.

Laut [18] führt eine theoretische Bestimmung der Sorptionsisothermen, z.B. nach [59], zu deutlich zu hohen Abweichungen. Eine Messung ist daher unverzichtbar.

### Ergebnisse Exsikkator nach [95]

Von [95] wurden feuchte Proben von feucht auf trocken geprüft und abschließend bei 105°C getrocknet (Referenzwert)

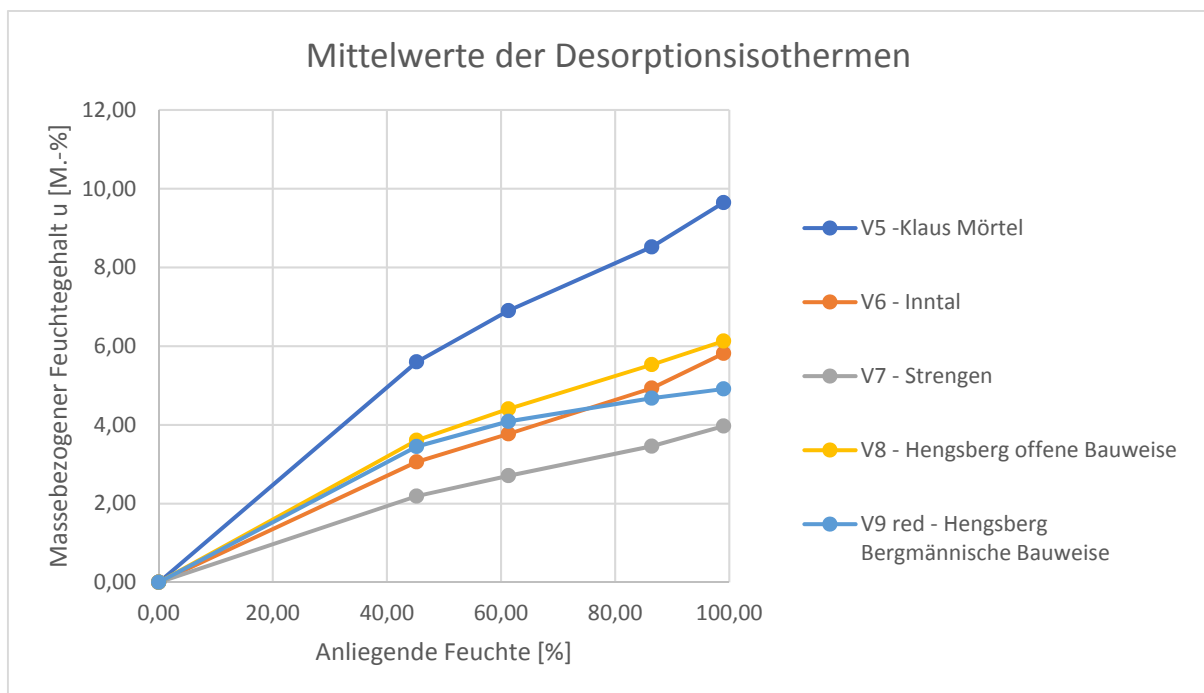
**Tabelle 46: Probengewichte in g – alle untersuchten Tunnel mittels Exsikkator [95]**

Datum	23.01.18	27.02.18	15.03.18	04.04.18	09.04.18
Feuchtestufe	1	2	3	4	Trockenofen
Salz	KNO <sub>3</sub>	KCl	NaBr	MgCl <sub>2</sub>	
Relative Luftfeuchte nach [25]	94±0,60	84,65±0,27	57,57±0,40	32,9±0,17	
Gemessene relative Luftfeuchte [%]	99,00	86,40	61,30	45,20	
Gemessene Lufttemperatur [°C]	23,00	20,44	22,32	20,98	105°C
Probenbezeichnung	Masse [g]	Masse [g]	Masse [g]	Masse [g]	Masse [g]
V5.1 -Klaus Mörtel	37,34	36,96	36,67	36,18	34,24
V5.2 -Klaus Mörtel	42,22	41,78	41,00	40,50	38,37
V5.3 -Klaus Mörtel	43,95	43,50	42,71	42,24	40,01
V6.1 - Inntal	60,75	60,18	59,38	58,94	57,09
V6.2 - Inntal	51,25	50,90	50,36	50,06	48,71
V6.3 - Inntal	51,15	50,70	50,23	49,87	48,34
V7.3 - Strengen	58,11	57,83	57,38	57,07	55,75
V7.2 - Strengen	51,92	51,65	51,27	51,05	50,11
V7.3 - Strengen	69,39	69,06	68,60	68,23	66,68
V8.1 - Hengsberg offene Bauweise	51,42	51,17	50,60	50,18	48,35
V8.2 - Hengsberg offene Bauweise	68,29	67,92	67,21	66,63	64,10
V8.3 - Hengsberg offene Bauweise	35,88	35,64	35,27	35,06	34,01
V9.1 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	63,25	63,14	62,81	62,44	60,43
V9.2 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	54,95	54,81	54,49	54,15	52,35
V9.3 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	58,10	57,96	57,62	57,26	55,28



**Tabelle 47: Massebezogene Feuchtegehalte u – alle untersuchten Tunnel mittels Exsikkator [95]**

Massebezogener Feuchtegehalt u [M.-%]					
Anliegende Feuchte [%]	0,00 (105°C)	45,20	61,30	86,40	99,00
V5.1 -Klaus Mörtel	0,00	5,67	7,10	7,94	9,05
V5.2 -Klaus Mörtel	0,00	5,55	6,85	8,89	10,03
V5.3 -Klaus Mörtel	0,00	5,57	6,75	8,72	9,85
V6.1 - Inntal	0,00	3,24	4,01	5,41	6,41
V6.2 - Inntal	0,00	2,77	3,39	4,50	5,21
V6.3 - Inntal	0,00	3,17	3,91	4,88	5,81
V7.3 - Strengen	0,00	2,37	2,92	3,73	4,23
V7.2 - Strengen	0,00	1,88	2,31	3,07	3,61
V7.3 - Strengen	0,00	2,32	2,88	3,57	4,06
V8.1 - Hengsberg offene Bauweise	0,00	3,78	4,65	5,83	6,35
V8.2 - Hengsberg offene Bauweise	0,00	3,95	4,85	5,96	6,54
V8.3 - Hengsberg offene Bauweise	0,00	3,09	3,70	4,79	5,50
V9.1 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	0,00	3,33	3,94	4,48	4,67
V9.2 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	0,00	3,44	4,09	4,70	4,97
V9.3 - Hengsberg Bergm. Bauw. red	0,00	3,58	4,23	4,85	5,10



**Abbildung 121: Mittelwerte Desorptionsisothermen (Versuche Winter, Details siehe [95]) für alle untersuchten Tunnelrezepturen mittels Exsikkator (Keine Prüfungen für Tunnel Selzthal)**

### Ergebnisse Vsorp [95]

Zusätzlich zum Exsikkatorverfahren wurden Sorptionsisothermen automatisiert mit dem Messgerät Vsorp generiert. Vsorp ist ein automatisiertes Sorptionsmesssystem der Firma ProUmid [35a]. Die erste Serie (Tabelle 48) wurde bei 93°r.F, 85, 65, 35 und 0 % r.F durchgeführt. Die Temperatur war auf 23°C eingestellt. Die Zeit zwischen den Wägungen war 60 Minuten.

0 % wurde bei dieser Serie durch VSorp, nicht bei 105°C bestimmt. **Dies wird noch korrigiert.**

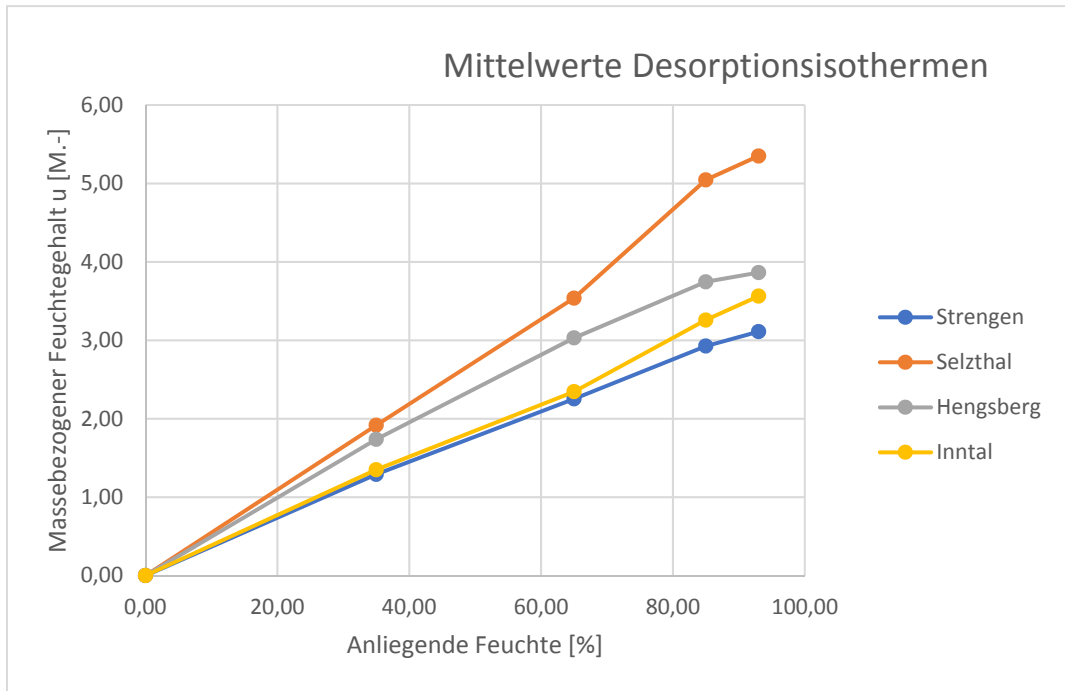
Die Proben (Tab. 48) kamen von Bohrkernen, die dann wassergelagert waren. Begonnen wurde mit Desorptionsisothermen.

**Tabelle48: Probengewichte in g – alle untersuchten Tunnels mittels Vsorp**

Massen in g						
Probennummer	Relative Luftfeuchte [%]	0,00	35,00	65,00	85,00	93,00
1	Strengen 1	67,51	68,39	69,06	69,52	69,60
2	Strengen 2	81,76	82,88	83,73	84,31	84,43
3	Strengen 3	68,67	69,49	70,08	70,51	70,71
4	Selzthal 1	63,95	65,14	66,10	66,94	67,09
5	Selzthal 2	30,93	31,52	32,03	32,51	32,61
6	Selzthal 3	25,38	25,89	26,32	26,74	26,83
7	Hengsberg 1	52,54	53,49	54,19	54,58	54,65
8	Hengsberg 2	53,09	54,10	54,84	55,25	55,31
9	Hengsberg 3	51,21	51,99	52,58	52,90	52,96
10	Inntal 1	35,12	35,63	35,99	36,31	36,41
11	Inntal 2	34,94	35,38	35,72	36,03	36,14

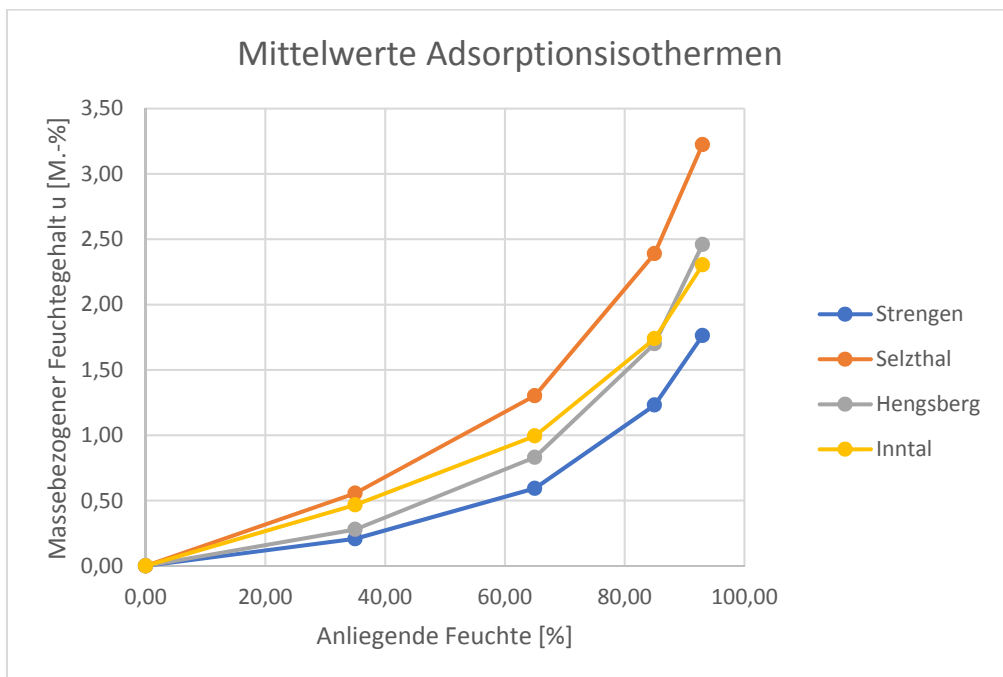
**Tabelle 3: Massebezogene Feuchtegehalte u aller untersuchten Bohrkerns mittels Vsorp**

Massebezogener Feuchtegehalt u [M.-]						
Probennummer	Relative Luftfeuchte [%]	0	35	65	85	93
1	Strengen 1	0,00	1,31	2,30	2,99	3,10
2	Strengen 2	0,00	1,36	2,41	3,11	3,25
3	Strengen 3	0,00	1,20	2,05	2,68	2,98
4	Selzthal 1	0,00	1,85	3,36	4,67	4,91
5	Selzthal 2	0,00	1,90	3,54	5,11	5,43
6	Selzthal 3	0,00	2,00	3,72	5,36	5,70
7	Hengsberg 1	0,00	1,79	3,13	3,88	4,01
8	Hengsberg 2	0,00	1,90	3,29	4,06	4,18
9	Hengsberg 3	0,00	1,52	2,67	3,30	3,40
10	Inntal 1	0,00	1,45	2,47	3,40	3,69
11	Inntal 2	0,00	1,25	2,22	3,12	3,44



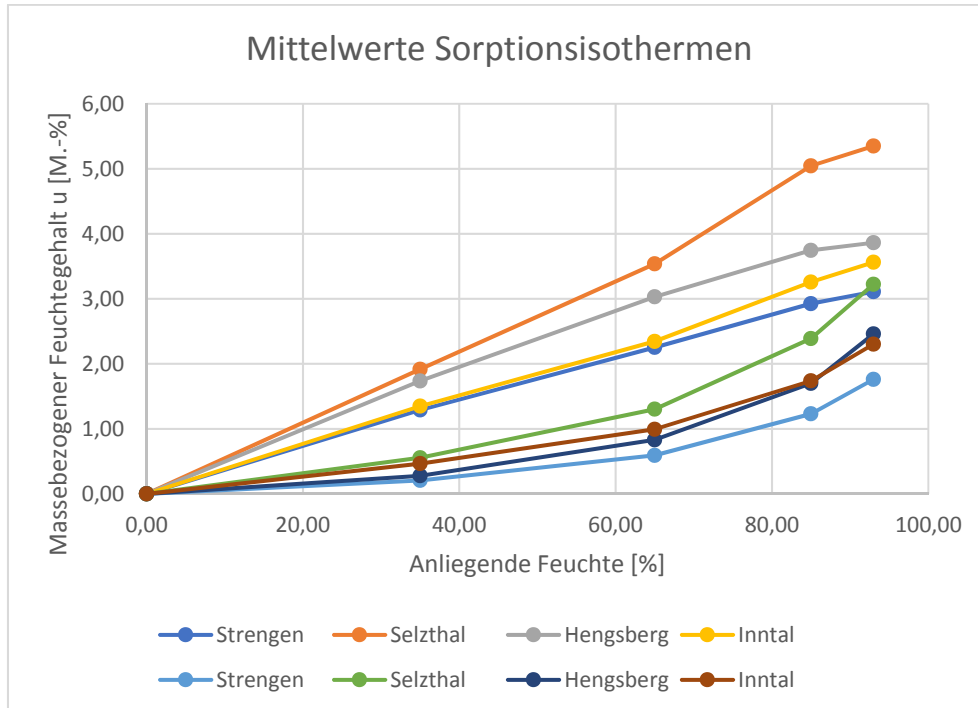
**Abbildung 122: Mittelwerte Desorptionsisothermen alle Tunnels (Kerne) mittels Vsorp Feuchte. 0 % nicht bei 105°C bestimmt! Beginn mit feuchten Proben**

Nachdem sich im Vsorp eine Luftfeuchte von 0,00 % eingestellt hatte, wurde die Feuchte nun wieder erhöht, und es wurden die gleichen Feuchtestufen angefahren. Dadurch wurden nun Adsorptionsisothermen ermittelt. Dabei wurden die 0,00% relative Luftfeuchte mit dem VSorp Gerät mittels Desorption angefahren, und nicht wie beim Exsikkatorversuch bei 105°C im Trockenofen bis zur Massenkonstanz getrocknet um die 0% relative Luftfeuchte zu erreichen.



**Abbildung 123: Mittelwerte der Adsorptionsisothermen mittels Vsorp für alle untersuchten Tunnels (Kerne) Feuchte. 0% nicht bei 105°C bestimmt!**

### Mittelwerte Sorptionsisothermen mittels Vsorp



**Abbildung 124: Mittelwerte Sorptionsisothermen mittels Vsorp (Kern). 0% angefahren, nicht 105°C getrocknet**

Diese Proben wurden zur Kontrolle anschließend nach Innsbruck gebracht um dort nochmals die Sorptionsisothermen mit dem noch genaueren Messgerät SPS zu prüfen.

#### Porositäten der Proben

Für die Überprüfung inwieweit die Porenstruktur durch den Wasser-Bindemittelwert bestimmt wird, wurde die offene Porosität in Anlehnung an DIN EN 1936-07 [109] der Probekörper gemessen. Die offene Porosität wurde in Anlehnung an [47] gemessen. Dafür wurden die Probekörper zunächst in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet und deren Trockenmasse bestimmt. Die Probekörper wurden in eine Vakuumkammer (Exsikkator) gestellt, deren Druck auf  $2,0 \pm 0,7$  kPa gesenkt wurde. Nach 4 h soll die Luft aus dem Porensystem entzogen worden sein und es kann entionisiertes Wasser in den Exsikkator gegeben werden, bis alle Proben vollständig mit Wasser bedeckt sind. Das Vakuum wird mittels der Vakuumpumpe für weitere 2 h aufrechterhalten. Anschließend lagern die Probekörper weitere 24 h unter Wasser und unter Normaldruck, sodass die Poren vollständig gesättigt sind. Darauffolgend wird das Probengewicht unter Wasser bestimmt und die offene Porosität kann nach folgender Gleichung errechnet werden.

$$p_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100$$

mit

$m_s$	Masse des gesättigten Probekörpers	[kg]
$m_d$	Masse des vollständig getrockneten Probekörpers	[kg]
$m_h$	Masse des Probekörpers unter Wasser	[kg]
$p_0$	Offene Porosität	[Vol.-%]

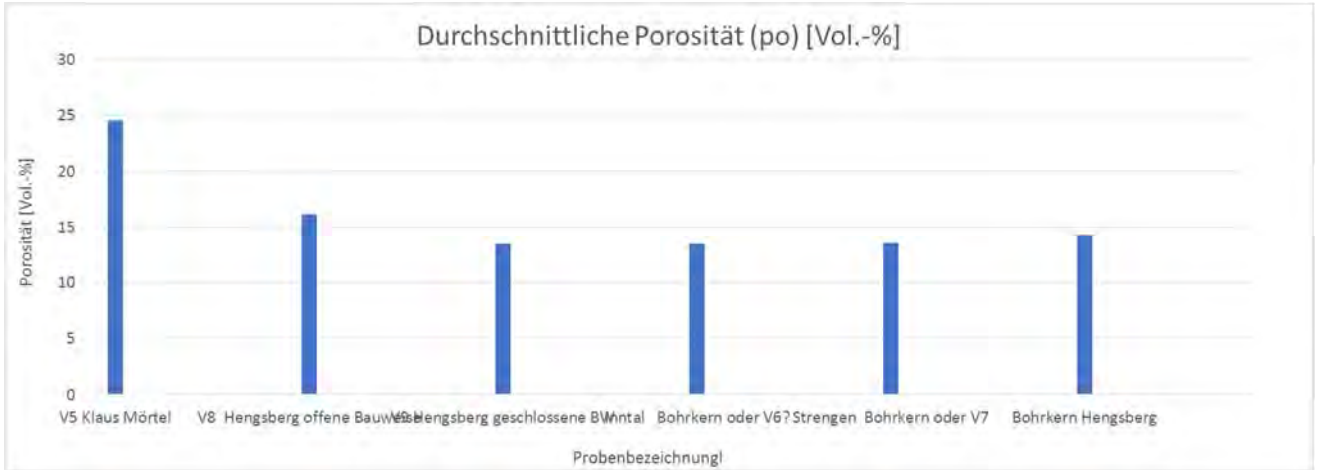
**Tabelle 50: Ergebnisse der offenen Porositätsmessung [18] mit späteren Korrekturen durch den Autor**

	Offene Porosität [Vol.-%]	spätere Korrektur [Vol.-%]	W/B-Wert	Alter [d]	Art	Bemerkung
Strengen	5.34	13,11	0,54	6022	Kern	
V211	6.15	14,92	0,57	542	Labor	Klaus 195 l
Inntal	6.25	15,43	0,47	8395	Kern	
V311	6.29	12,45	0,51	535	Labor	Klaus 165 l
V412	6.59	16,62	0,63	521	Labor	Klaus 250 l
Selzthal	7.49	17,43	-	6205	Kern	
V1B1	10.18	17,90	0,57	549	Labor	Vorversuch Klaus Ausreißer

Die Ergebnisse von [95] sind in Tabelle 51 wiedergegeben. Die Bestimmung erfolgte auf die gleiche Weise.

**Tabelle 51: Durchschnittliche offene Porosität [Winter]**

Tunnel	Durchschnittliche offene Porosität ( $p_o$ ) [Vol.-%]
V5 - Klaus Mörtel	24,54
V6 - Inntal	13,41
V7 - Strengen	13,54
V8 - Hengsberg offene Bauweise, FaB	16,13
V9red - Hengsberg Bergmännische Bauweise, FaB reduzierter Wassergehalt	13,41
BK - Bohrkern Hengsberg	14,30



**Abb. 124 Offene Porosität [95]**

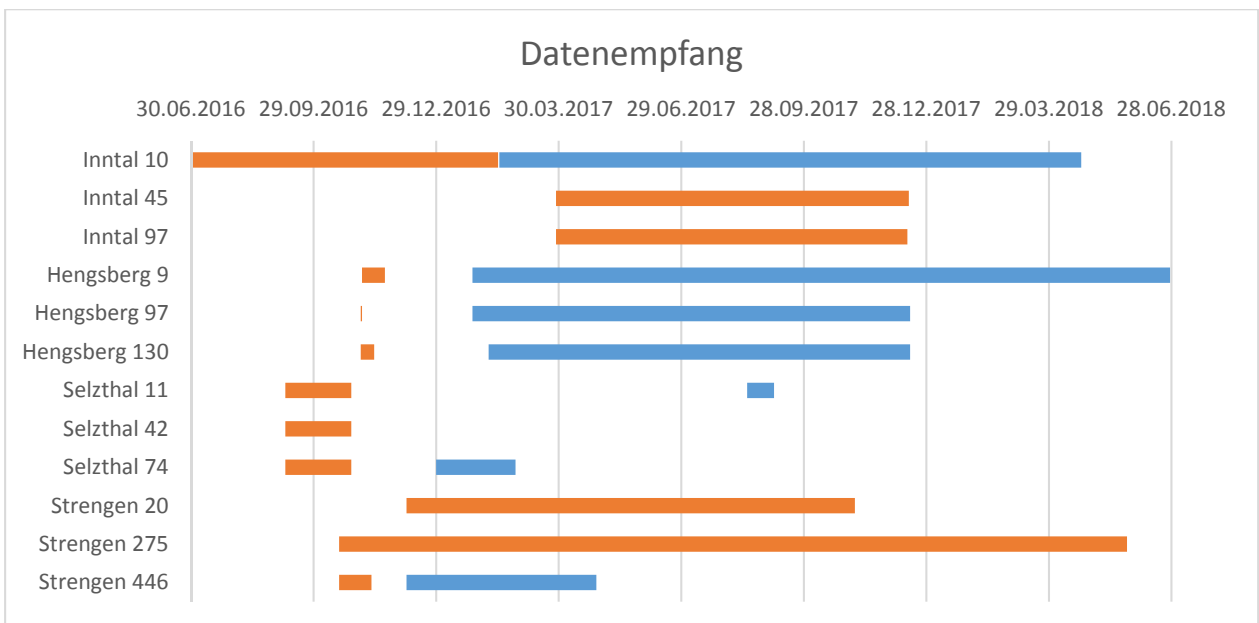
Die deutlich höhere Porosität der Mörtelmischung ist auf den höheren Leimgehalt zurückzuführen.

Vergleiche zur Literatur finden sich in [95].

Die Ergebnisse könnten man noch zusammenführen und Korrelationen suchen.

### 6.3 Messdaten aus den Tunnels

In Abb. 125 sind die derzeit gespeicherten Daten der verschiedenen Tunnels ersichtlich.

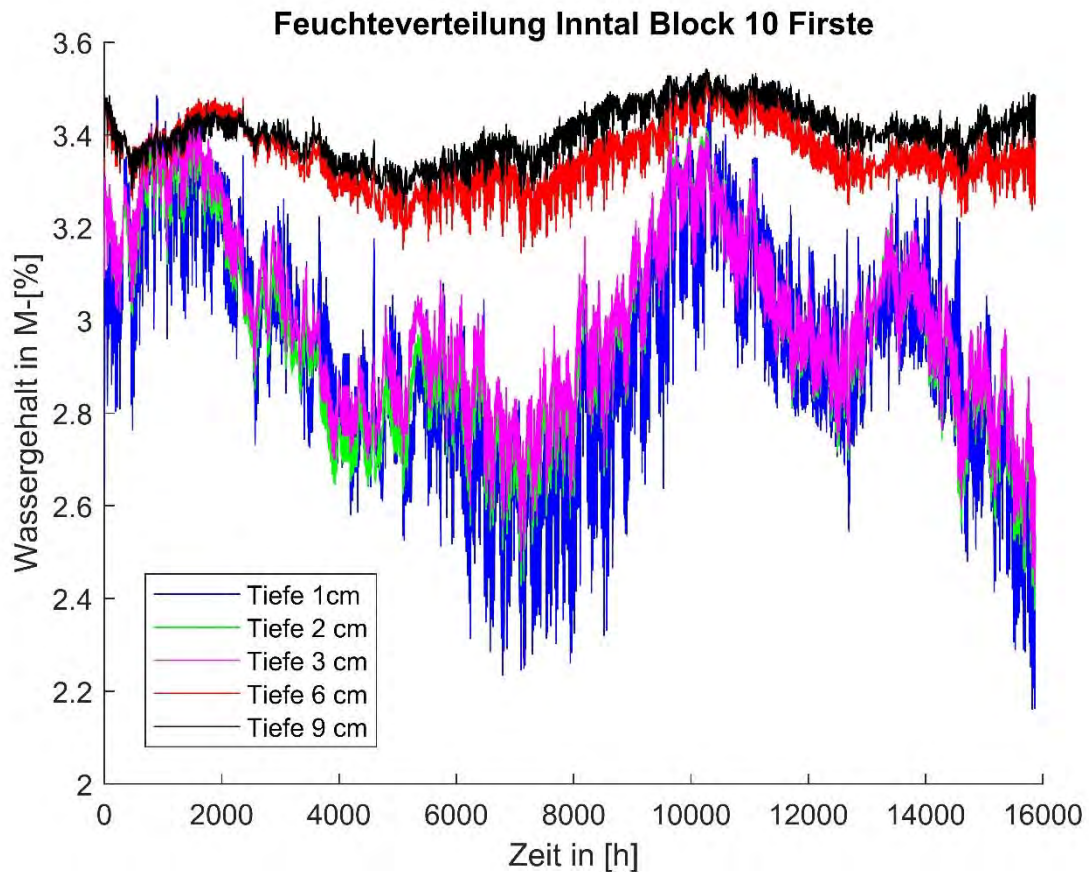


**Abb. 125: Datenempfang aus den verschiedenen Tunnels und Messquerschnitten (Stand 5/2018)**

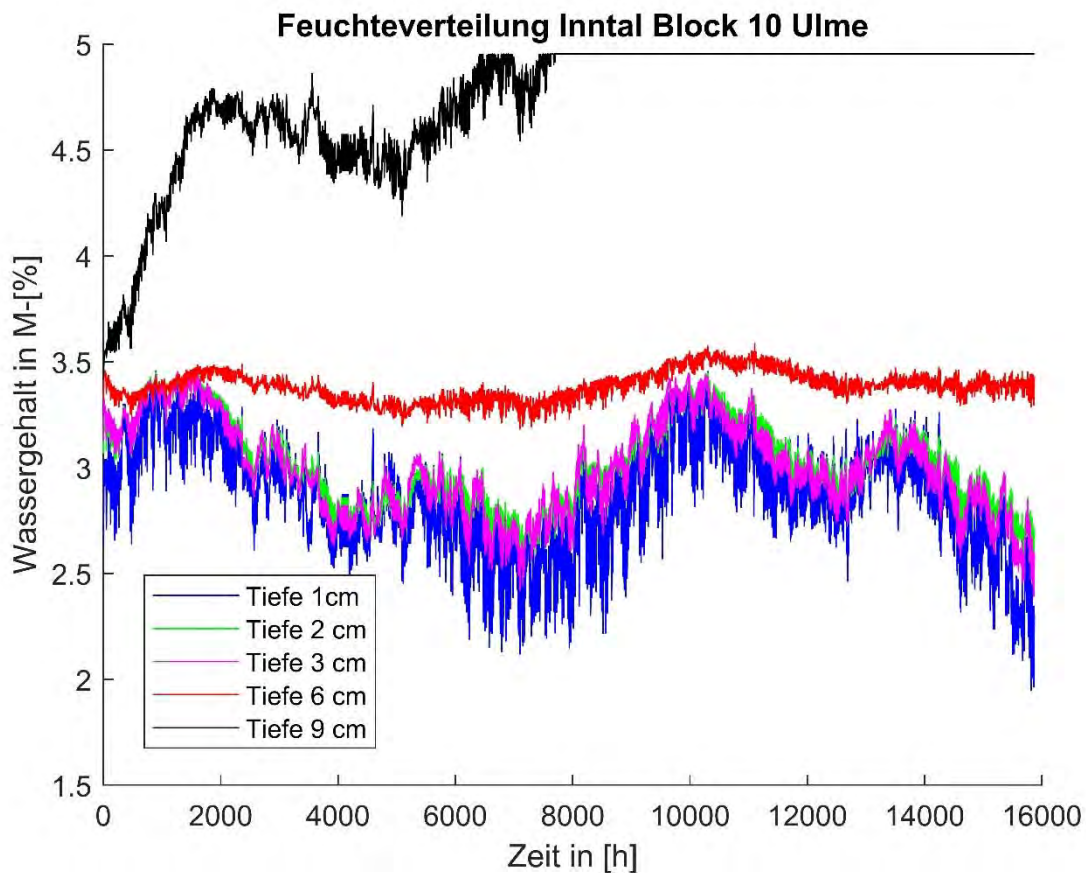
### Inntaltunnel Nordseite

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 10 Portal" arbeitete vom 29.6.2016 bis zum 22.4.2018.

Die Messstationen "Block 45 Übergangsbereich" und „Block 97 Mittelbereich“ übermittelten vom 28.3.2017 bis zum 15.12.2017.



**Abb. 126 Feuchteverläufe Inntaltunnel Nordseite Block10 Firste**



**Abb. 127 Feuchteverläufe Inntaltunnel Nordseite Block10 Ulme**

Die dazugehörigen Klimadaten der nächsten Wetterstation finden sich jeweils im Anhang 9.6.

Anemometer-Messungen werden hier noch eingefügt

Zusammengefasste Daten werden hier noch dokumentiert.

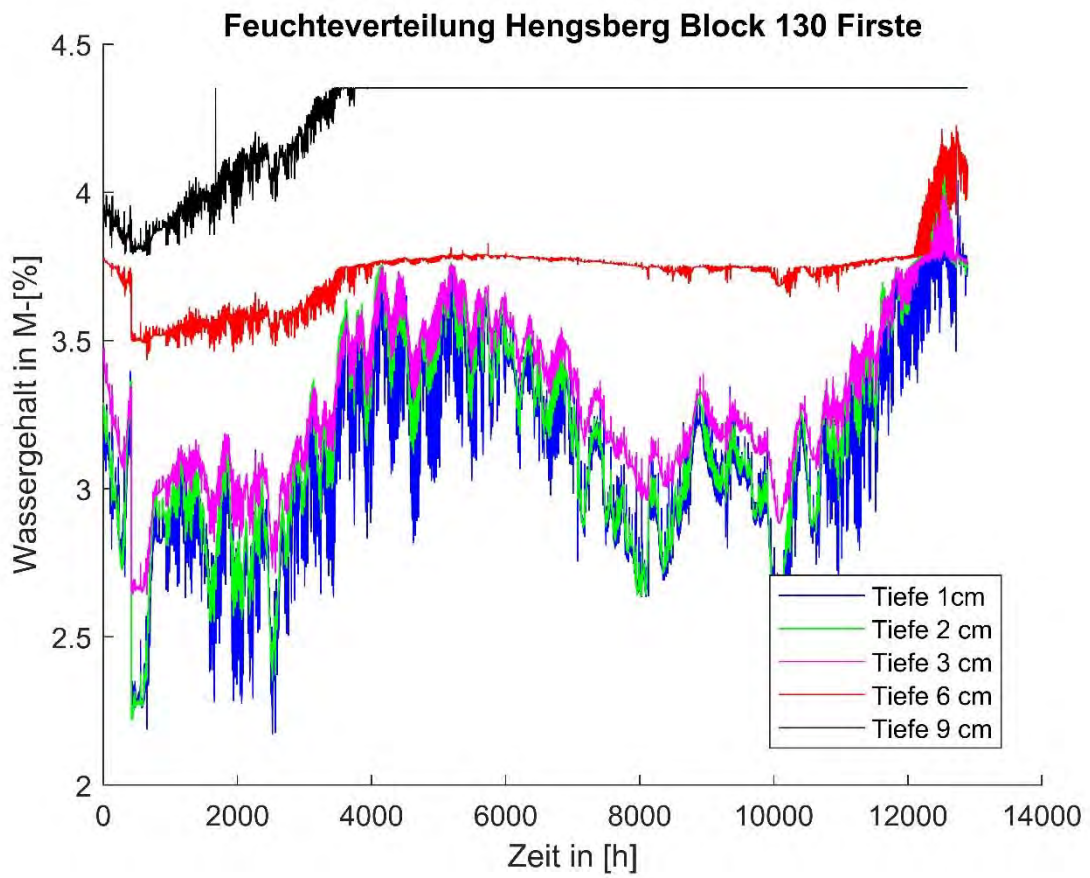
#### Hengsbergtunnel

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 9" arbeitete vom 4.11.2016 bis zum 21.11.2016 und vom 25.1.2017 bis zum 27.6.2018.

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 97" arbeitete vom 3.11.2016 bis zum 4.11.2016 und vom 25.1.2017 bis zum 16.12.2017.

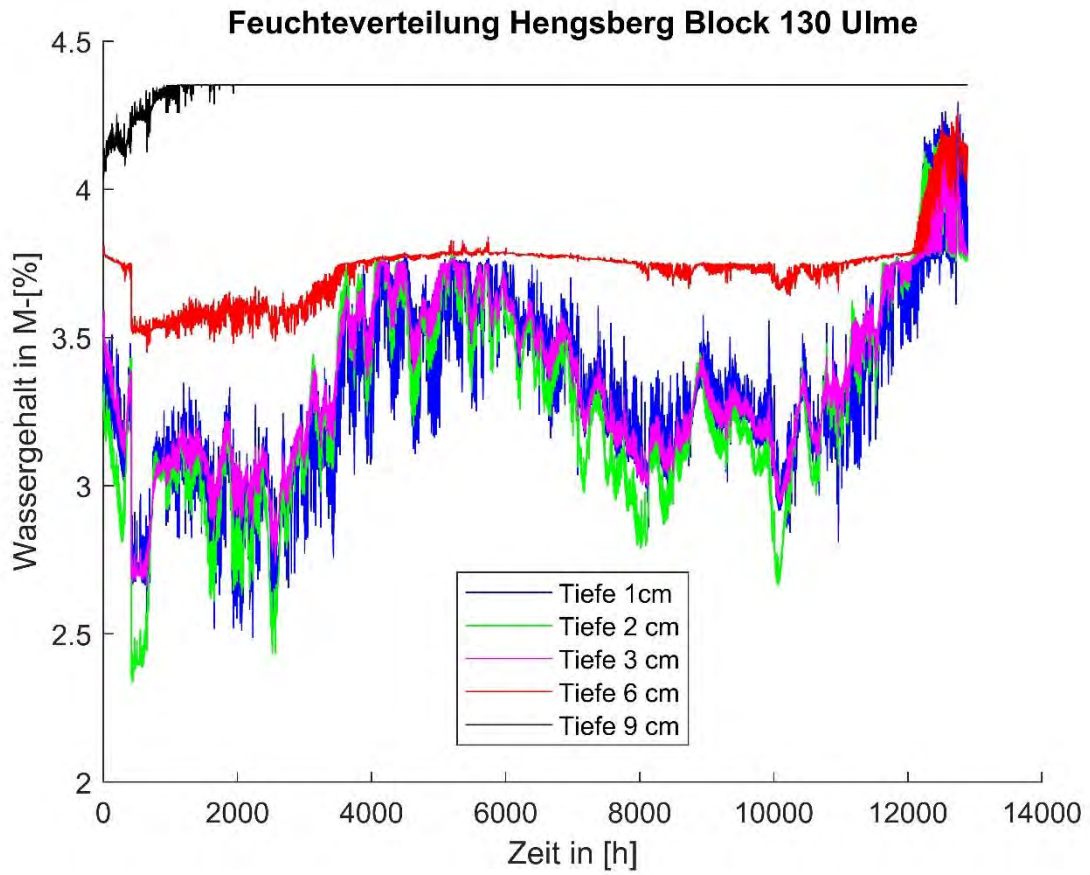
Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 130" arbeitete vom 3.11.2016 bis zum 13.11.2016 und vom 6.2.2017 bis zum 16.12.2017.





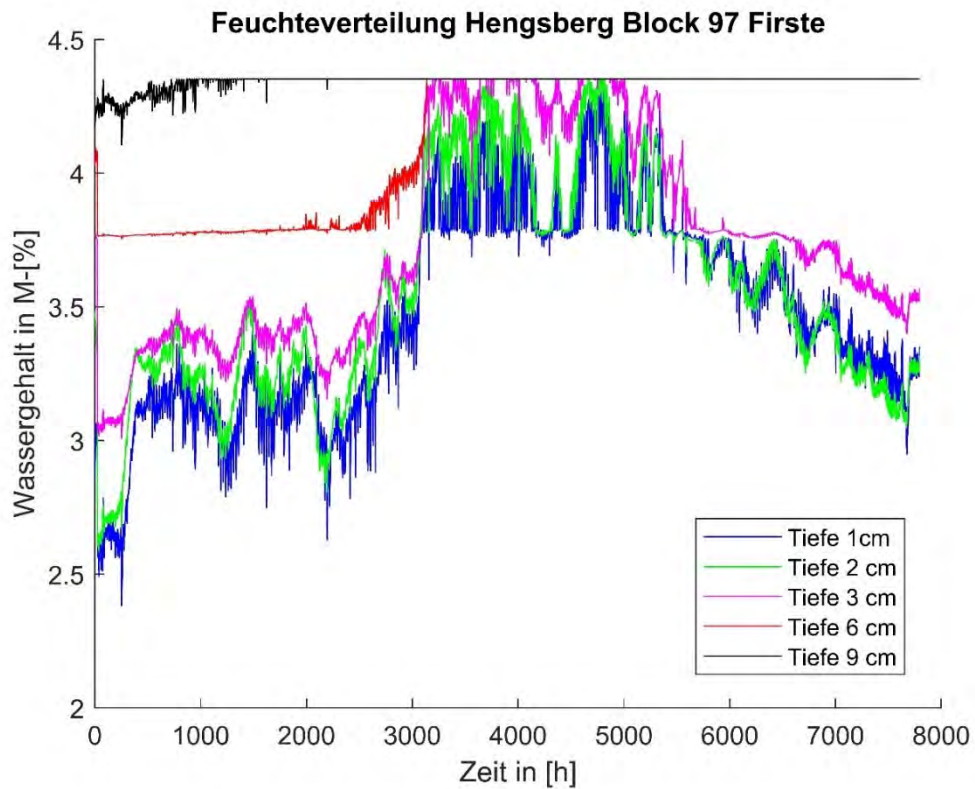
**Abb. 128 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block9 Firste**

*FALSCH BESCHRIFTUNG; TATSÄCHLICH BLOCK 9*

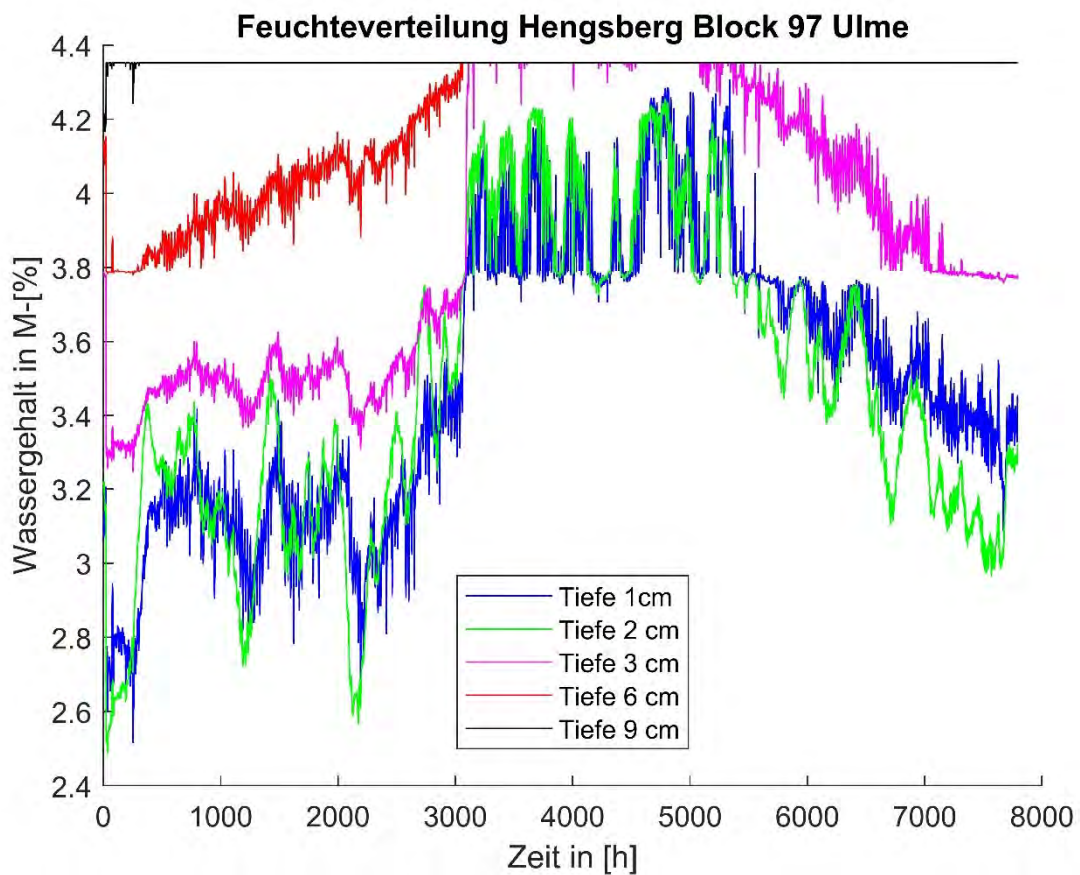


**Abb. 129 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block9 Ulme**

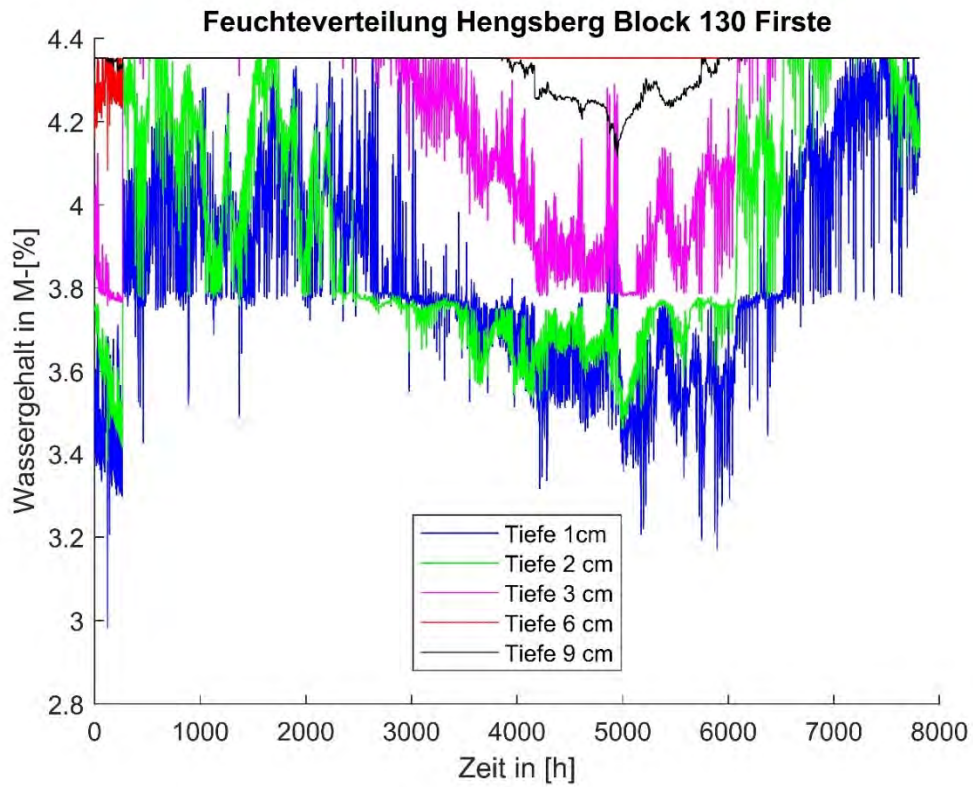
*FALSCH BESCHRIFTUNG; TATSÄCHLICH BLOCK 9*



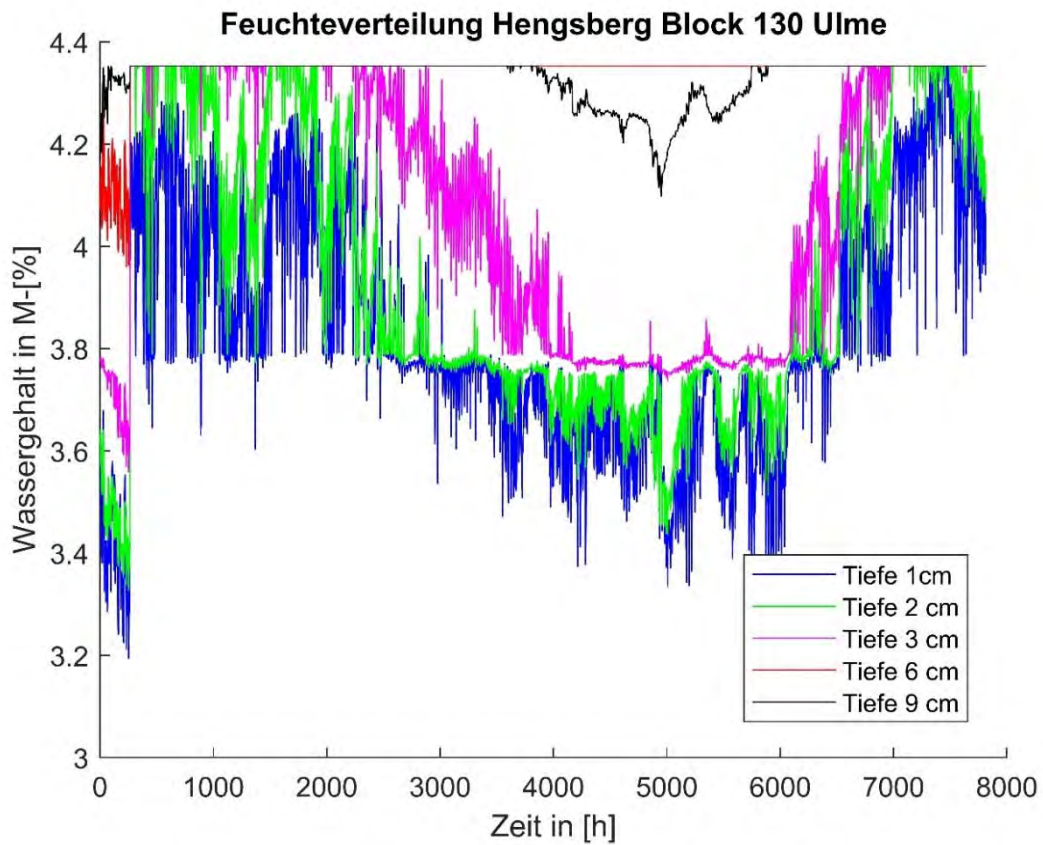
**Abb. 130 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block97 Firste**



**Abb. 131 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block97 Ulme**



**Abb. 132 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block130 Firste**



**Abb. 133 Feuchteverläufe Hengsbergtunnel Block130 Ulme**

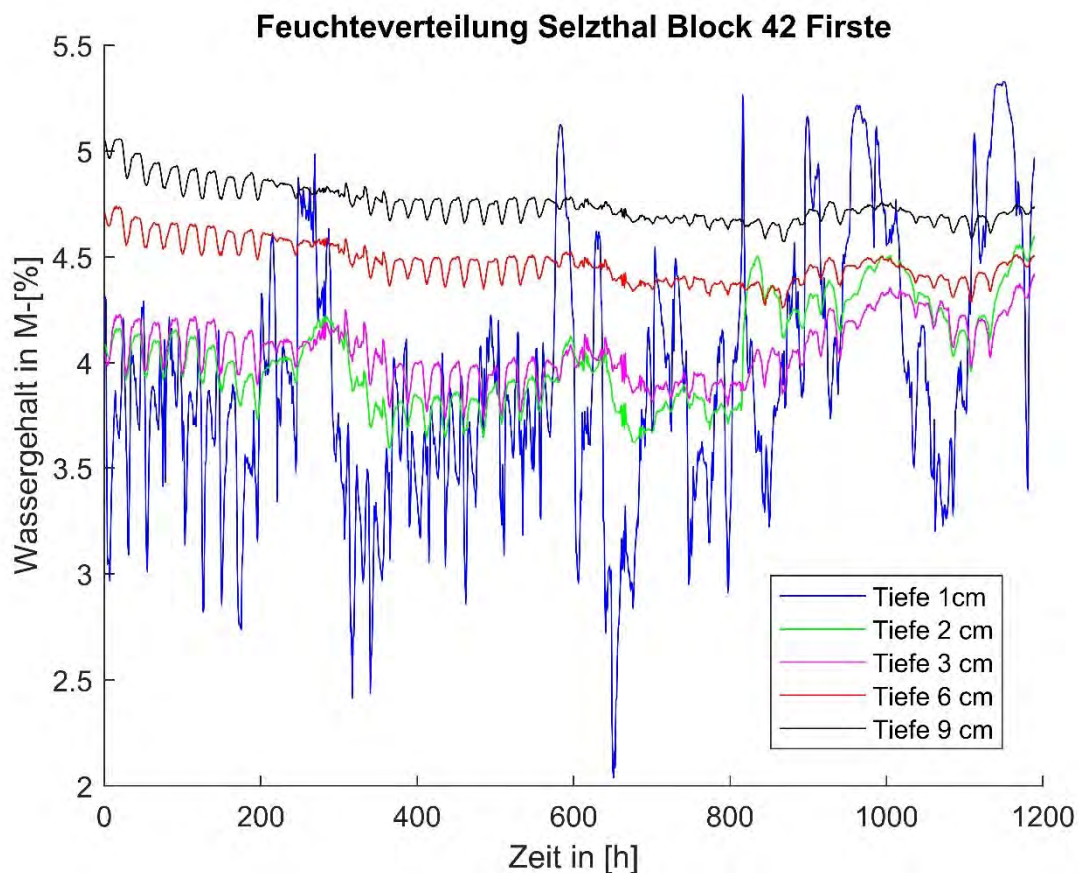
### Tunnel Selzthal Ost

Die Übertragung aus dem Tunnel Selzthal funktionierte leider nur über kürzere Zeiträume. Durch Umbaumaßnahmen wurden die Fühler dann auch entfernt.

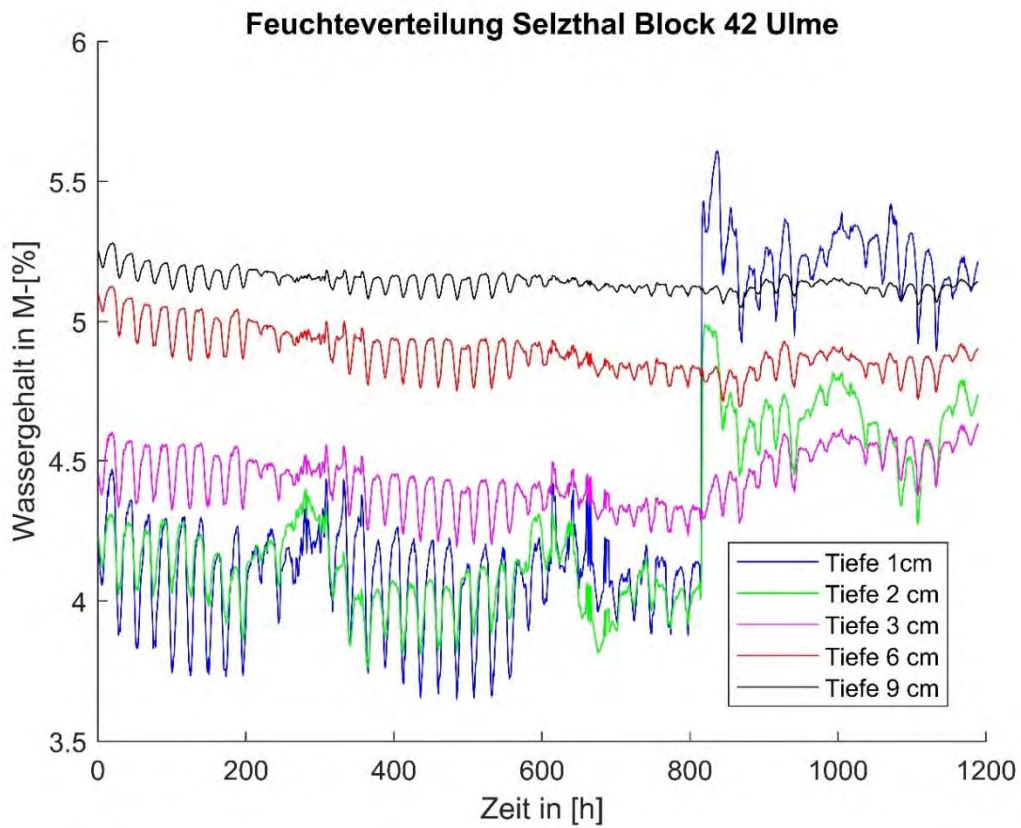
Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 11" arbeitete vom 8.9.2016 bis zum 27.10.2016 und vom 17.8.2017 bis zum 6.9.2017.

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 42" arbeitete vom 8.9.2016 bis zum 27.10.2016.

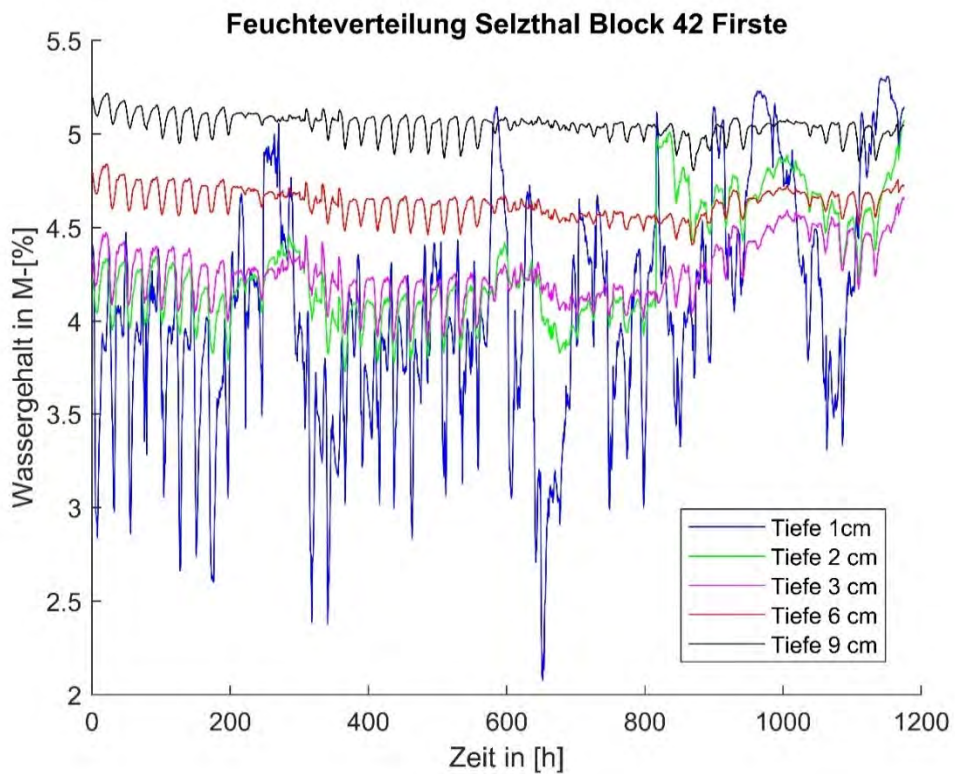
Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 74" arbeitete vom 8.9.2016 bis zum 27.10.2016 und vom 29.12.2016 bis zum 26.2.2017.



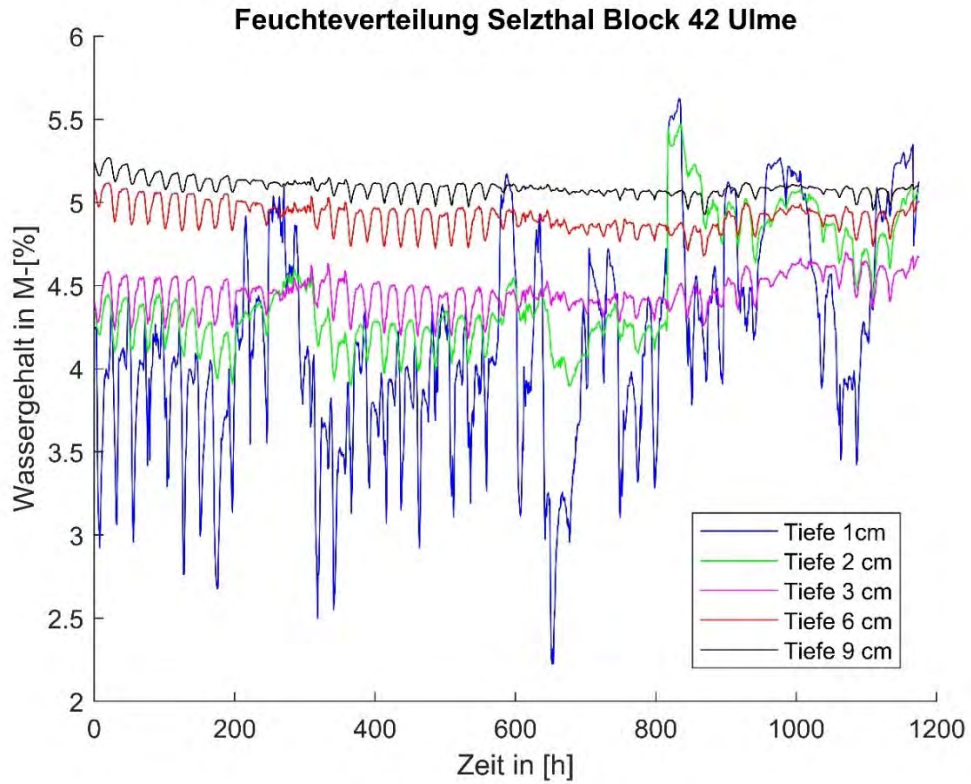
**Abb. 134 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block130 Firste**



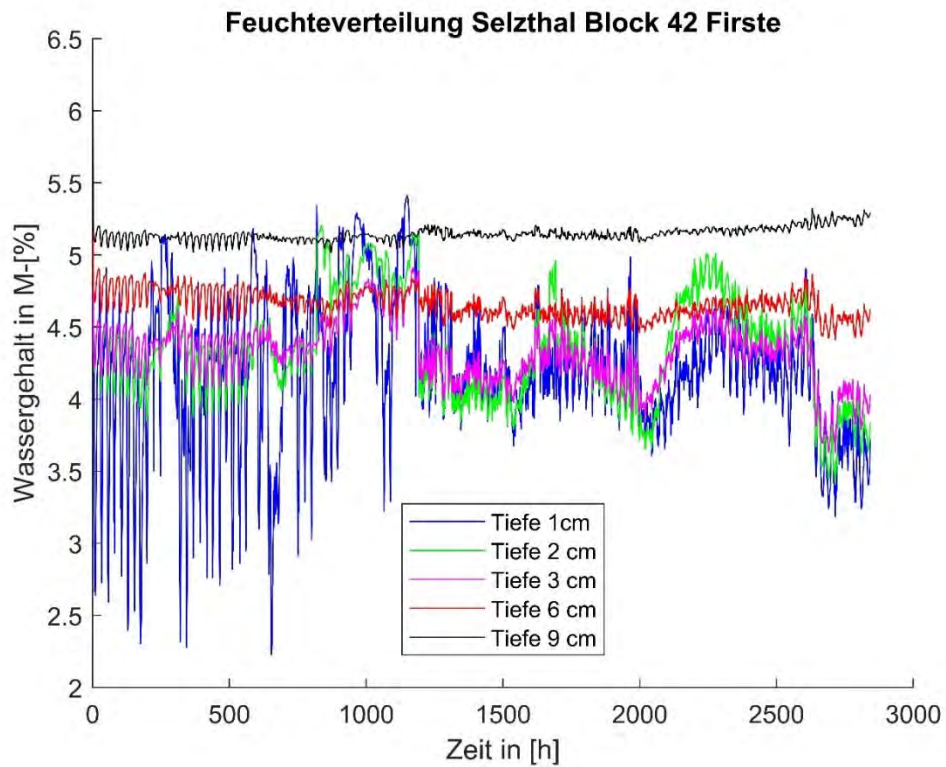
**Abb. 135 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block 42 Ulme**



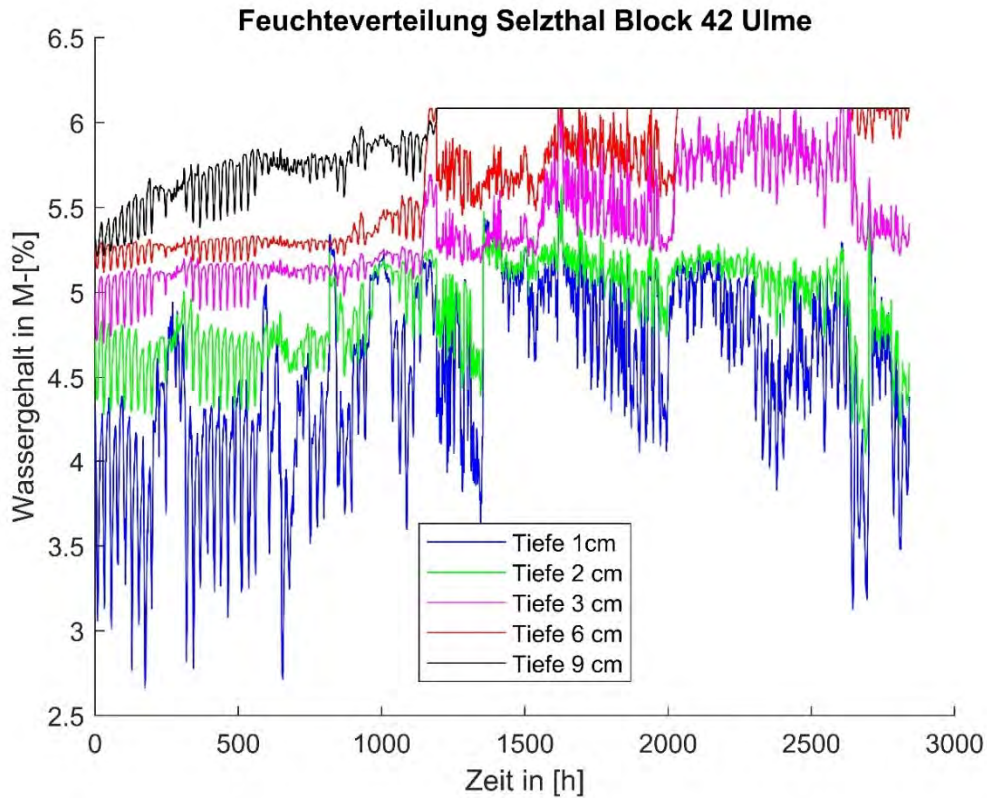
**Abb. 136 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block 42 Firste**



**Abb. 137 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block42 Ulme**



**Abb. 138 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block42 Firste**



**Abb. 139 Feuchteverläufe Tunnel Selzthal Block 42 Ulme**

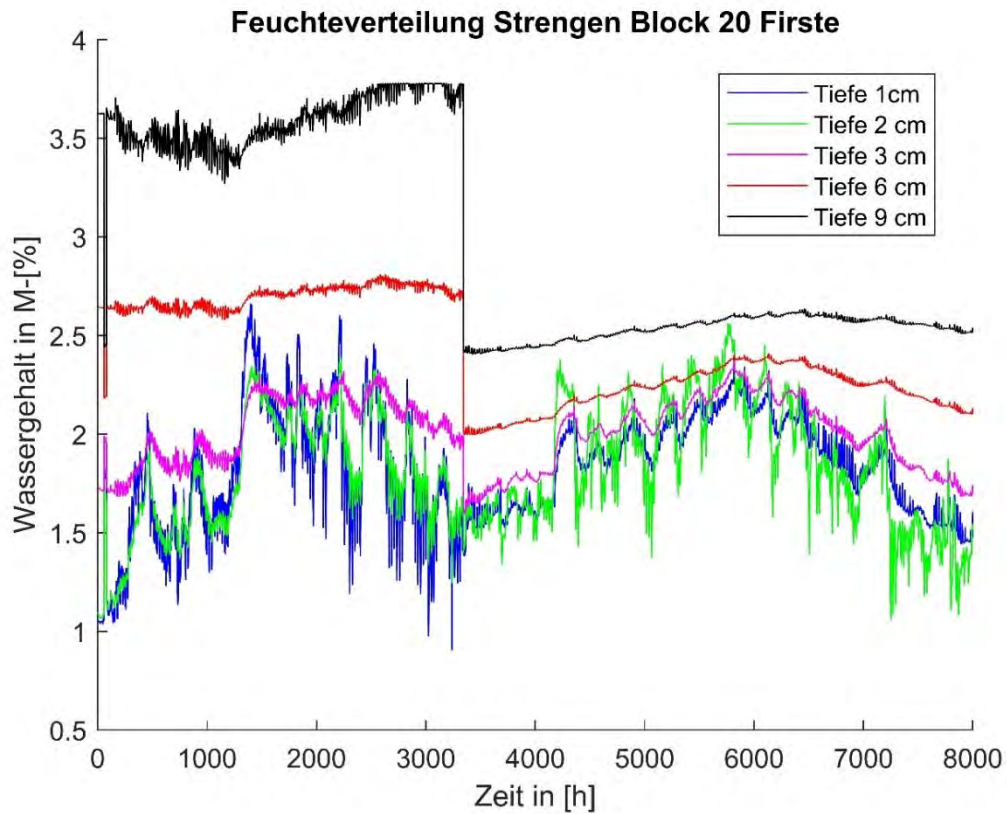
#### Tunnel Strengen Süd

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 20" arbeitete vom 7.12.2016 bis zum 5.11.2017 und einzelne Tage.

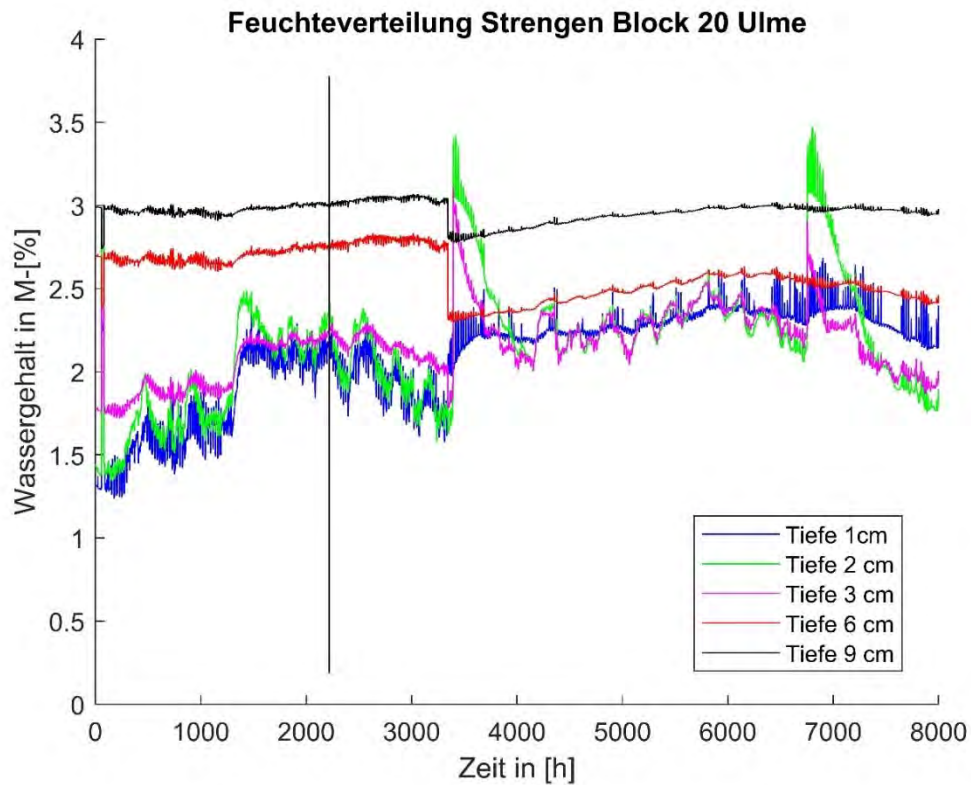
Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 275" arbeitete vom 18.10.2016 bis zum 26.5.2018.

Die Übertragung der Daten der Messstationen am "Block 9" arbeitete vom 18.10.2016 bis zum 11.11.2016 und vom 7.12.2016 bis zum 27.4.2017.

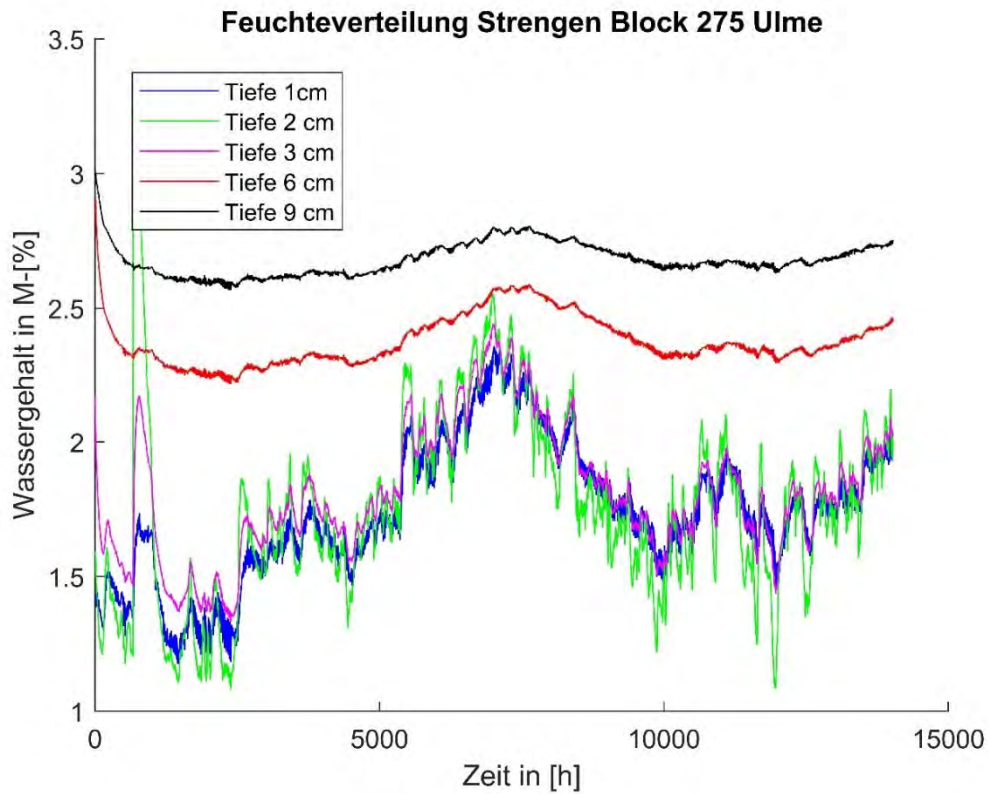




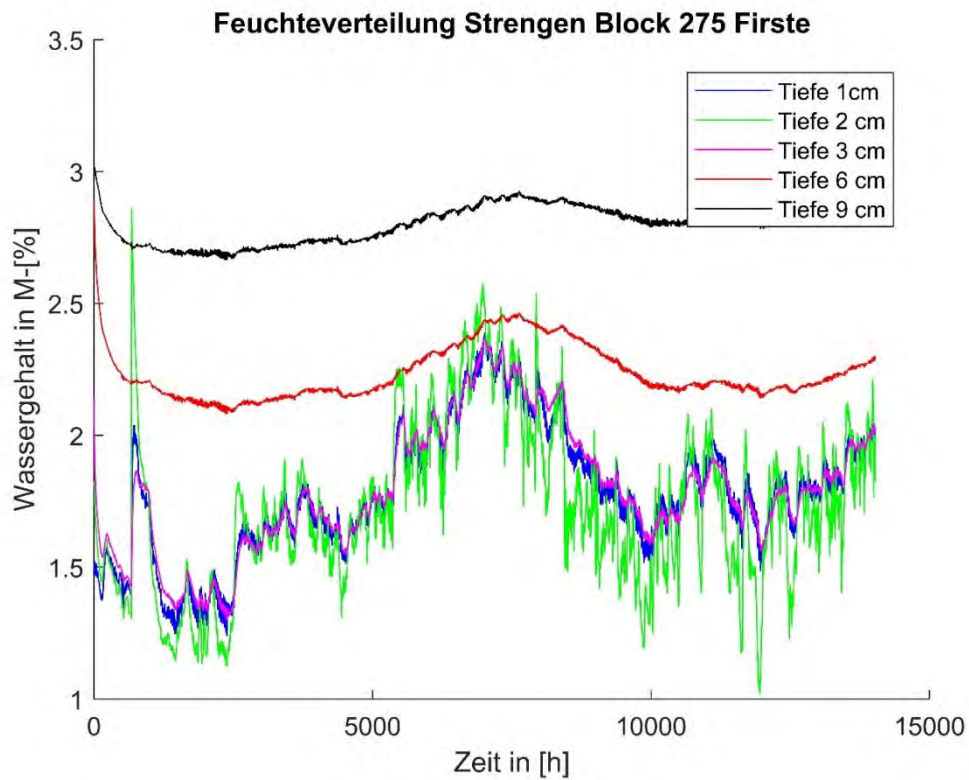
**Abb. 140 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 20 Firste**



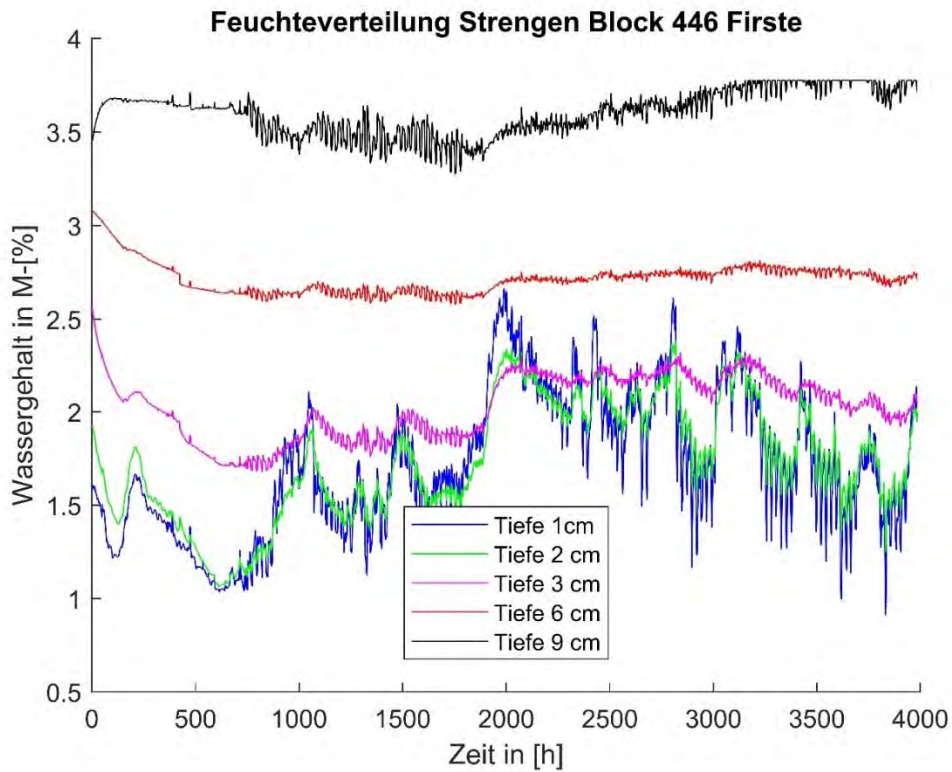
**Abb. 141 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 20 Ulme**



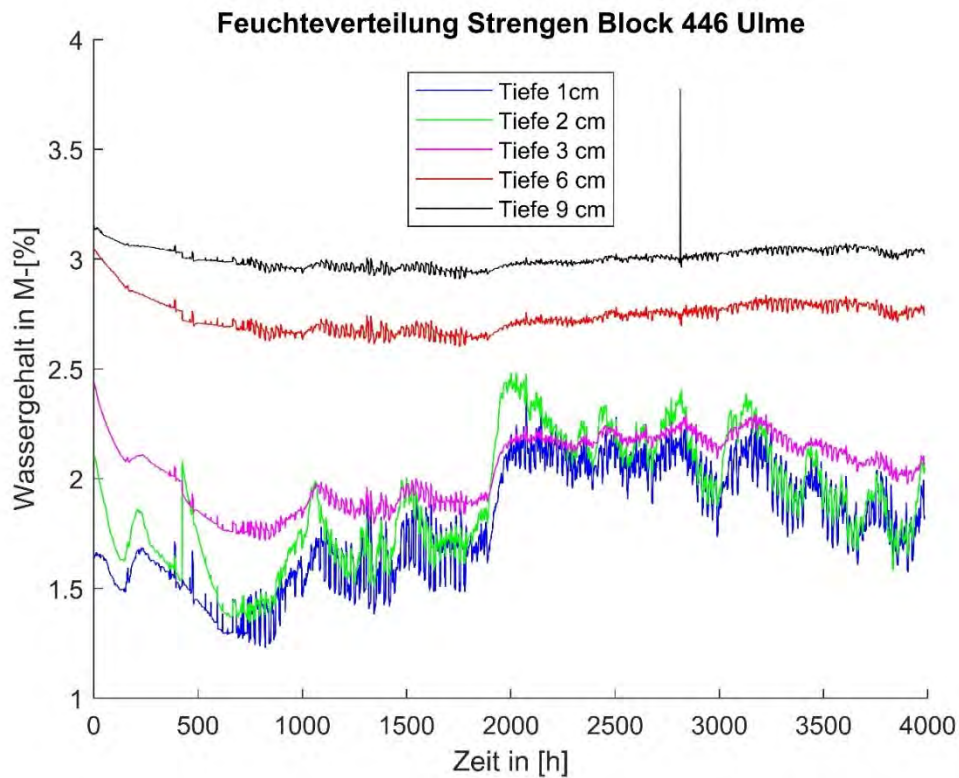
**Abb. 142 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 275 Ulme**



**Abb. 143 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 275 Firste**



**Abb. 144 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 446 Firste**



**Abb. 145 Feuchteverläufe Tunnel Strengen Block 446 Ulme**

Gegenüberstellungen

Die aufgenommenen Daten werden nach folgenden Kriterien nach der endgültigen Kalibrierung gegenübergestellt:

Portal/ Mittenbereich

Ulme/Firste

Verschiedene Betone

Nach Jahreszeiten

Tagesschwankungen

Straße/Eisenbahn

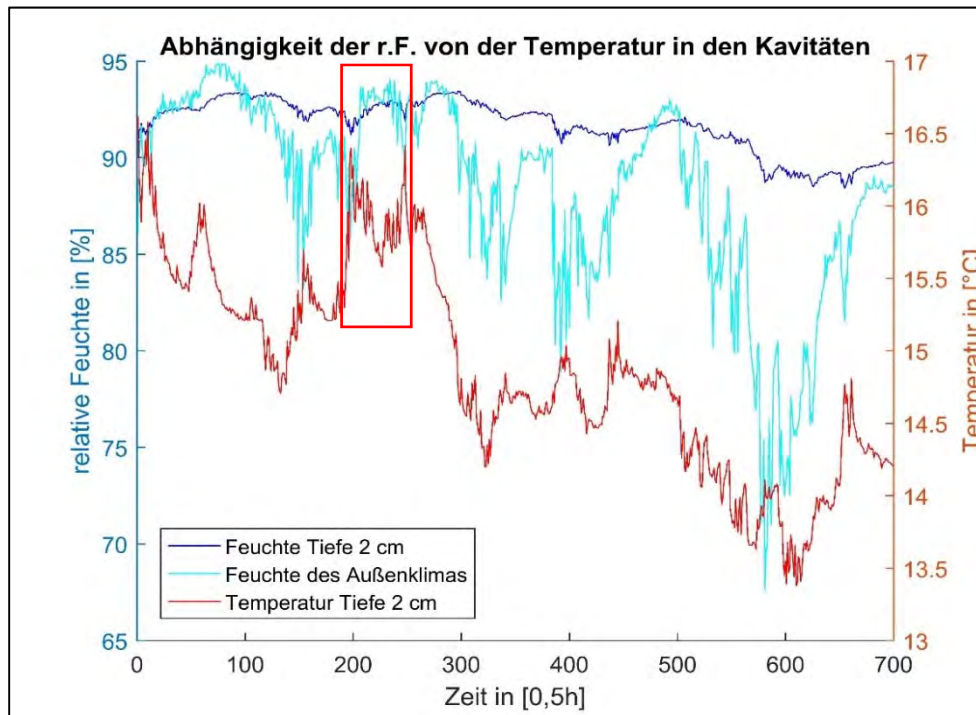
Rohdaten/Kalibrierte Daten

Analyse der Messdaten in den Tunneln [18, Kap. 8]

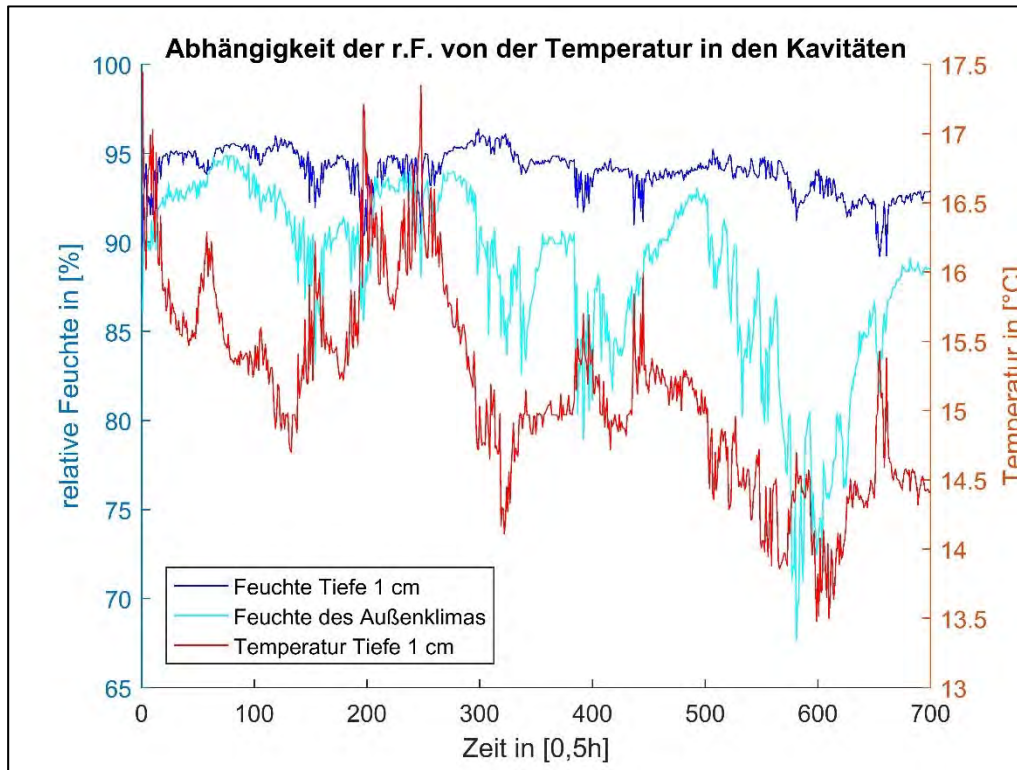
Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Plausibilität der Messdaten aus den Tunneln überprüft, wie sie sich im Sommer 2017 darstellten. Anschließend werden aus den bisher gemessenen Daten die Grundfeuchte-Niveaus der Tunnelinnenschalen ermittelt und die Baustofffeuchte mit den Feuchtegrenzwerten aus DIN EN 1992-1-2 [12, 13] und ÖNORM EN 1992-1-2 [110] (3 M.-%, 2 M.-%) verglichen. Die nachfolgend abgebildeten Graphen zu den Baustofffeuchten sind vollständig im Anhang zu [18] aufgeführt. Die ermittelten Wassergehalte sind als *vorläufige Ergebnisse* zu betrachten. Eine Zusammenstellung der korrigierten Daten findet sich bereits in Kapitel 6.3. Hier wird mit Stand Sommer 2017 der Datensatz nochmals diskutiert.

Überprüfung der Datenqualität [18, Kap.8.1]

Für die Durchführung einer Analyse der gemessenen Daten muss zunächst geklärt werden, inwiefern die in den Kavitäten vorherrschende gemessene relative Feuchte von der Temperatur abhängig ist. Aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche ist der Feuchtehaushalt, der sich im offen porösen Baustoff einstellt nur geringfügig von der Temperatur abhängig. Weiterhin kann Abbildung 146 (Klima des der Messstation im Inntaltunnel-Block 10-Ulme) entnommen werden, dass der Wassergehalt in der Kavität vom Feuchtegehalt des Baustoffs bestimmt wird. Dies lässt sich daran erkennen, dass bei einem starken Temperaturanstieg in der Kavität die r.F. nur eine minimale Reduktion aufweist. Ein solcher Fall ist im roten Rechteck in Abbildung 146 zu sehen. Im Gegensatz dazu folgt die Kavitätsfeuchte dem Feuchteverlauf des anliegenden Außenklimas mit entsprechender Verzögerung und reduzierter Amplitude. Ähnliche Ergebnisse lassen sich der Kavitätstiefe 1 cm (vgl. Abbildung 147) entnehmen.



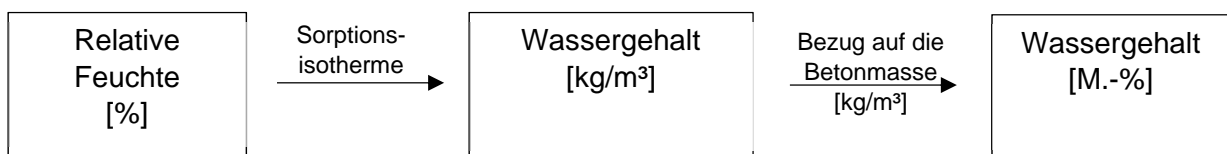
**Abbildung 14610** Abhängigkeit der r.F. von der Temperatur in den Kavitäten (2 cm); Ausschnitt aus der Messaufzeichnung im Inntaltunnel-Block 10-Ulme



**Abbildung 147** Abhängigkeit der r.F. von der Temperatur in den Kavitäten (1 cm); Ausschnitt aus der Messaufzeichnung im Intaltunnel-Block 10-Ulme

Ermittlung des Wassergehalts in der Tunnelinnenschale [18, Kap.8.2]

Das von den Sensoren gemessene Spannungssignal wird in einen relativen Feuchtwert umgerechnet. Aus den vorhergehenden Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Sensoren zum einen einem Off-Set unterliegen und die gemessenen Rohdaten um diesen korrigiert werden müssen. Über die Sorptionsisotherme (vgl. Kapitel 5.11) wird der Bezug zwischen der anliegenden relativen Feuchte und dem im Beton gespeicherten Wassergehalt hergestellt. Die Messergebnisse der Desorptionsisothermen sind dem Kapitel 5.11 zu entnehmen. Die Messungen haben gezeigt, dass jede Tunnelinnenschale (jeder Beton) eine spezifische Sorptionsisotherme besitzt. Daher können sich in den Tunneln unterschiedliche Wassergehalte bei gleicher anliegender relativer Feuchte einstellen. Weiterhin ist eine Angabe des Wassergehalts in M.-% üblich. Der ermittelte Wassergehalt pro Kubikmeter wird auf die Masse des Betons pro Kubikmeter bezogen. Das nachfolgende Schema (Abbildung 148) verdeutlicht die Vorgehensweise.

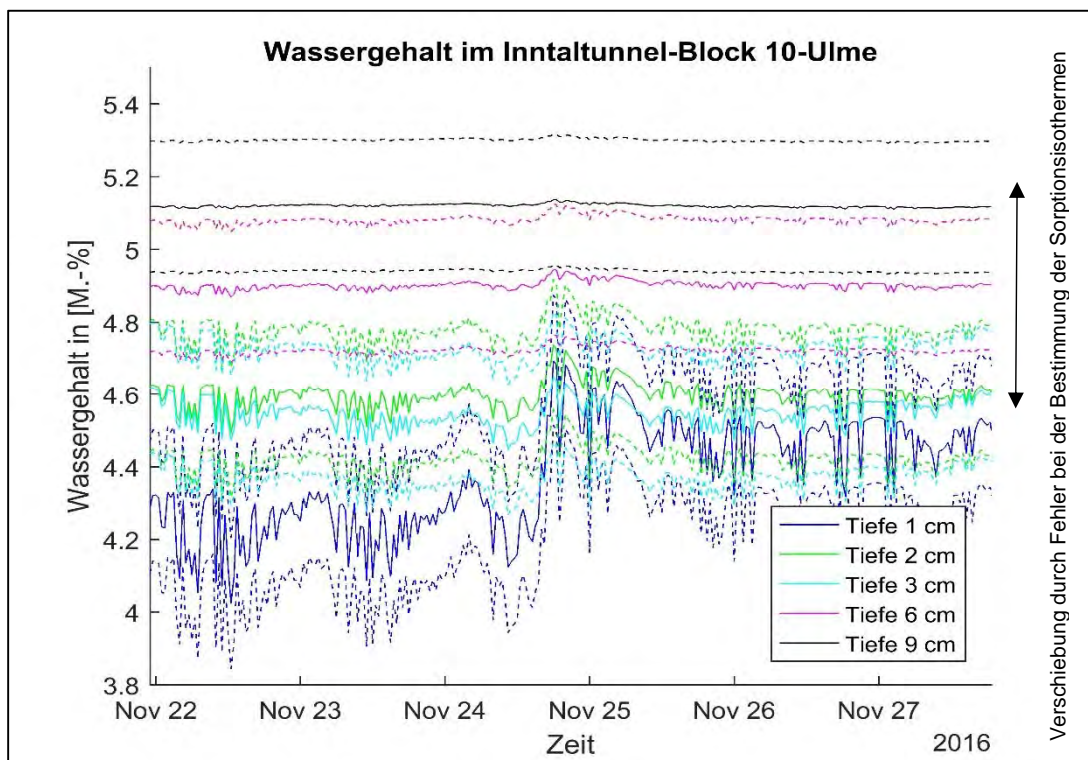


**Abbildung 148** Schema zur Bestimmung des Wassergehalts in M.-%

Zudem wurde für den Wassergehalt in M.-% der Fehler bestimmt. Auf die Sensoren wirken sich für die Beschreibung deren Lage zueinander zwei Hauptfehlerquellen aus. Eine der Hauptfehlerquellen ist die Abweichung, der der Sensor bei hohen Feuchten unterliegt. Der

Hersteller gibt für relative Feuchten zwischen 80 % r.F. und 100 % r.F. eine Abweichung von 3 % an. Die Kalibrierversuche aus Kapitel 7 zeigen weiterhin, dass die Standardabweichung der Sensoren zueinander im In-Situ-Fall bei  $\pm 3,99$  %-Punkten r.F. und der Standardfehler bei 0,20 %-Punkten r.F. liegt. Insgesamt unterliegen die Sensoren daher einem Fehler von 3,20 %-Punkte r.F.. Da die Sorptionsisothermen nicht fehlerfrei bestimmt werden konnten, kann sich die Lage der Sensoren insgesamt betrachtet weiter verschieben. Die Feuchteschwankungen des Klimas im Exsikkator betrug im maximalen Wert 2,50 % r.F. und somit kann der ermittelte Wassergehalt in allen Schichten abweichen. Da aus den ermittelten Kavitätsfeuchtwerten der Wassergehalt in M.-% errechnet wird, so ergibt sich mit unterschiedlicher Rohdichte der Tunnelinnenschale sowie mit unterschiedlicher Sorptionsisotherme eine abweichende Genauigkeit bei der Bestimmung des Wassergehalts von Tunnel zu Tunnel. Die ermittelten Abweichungen des Wassergehalts (bei Betrachtung der Sensoren zueinander, folglich 3,2 %-Punkte r.F.) liegen beim Hengsbergtunnel maximal bei  $\pm 0,19$  M.-%, beim Tunnel Selzthal maximal bei  $\pm 0,22$  M.-%, beim Tunnel Strengen maximal bei  $\pm 0,16$  M.-% sowie maximal bei  $\pm 0,18$  M.-%. beim Inntaltunnel.

Die Abbildung 149 stellt einen Auszug aus dem gemessenen Klimadatensatz aus dem Inntaltunnel-Block 10-Ulme dar. In dieser Abbildung sind die Fehlerbalken für die Sensoren zu sehen. Der Fehler, der bei der Messung der Sorptionsisothermen generiert wird, verschiebt den an der rechten Seite in Abbildung 149 umfassten Bereich entsprechend zu höheren oder niedrigeren Wassergehalten.

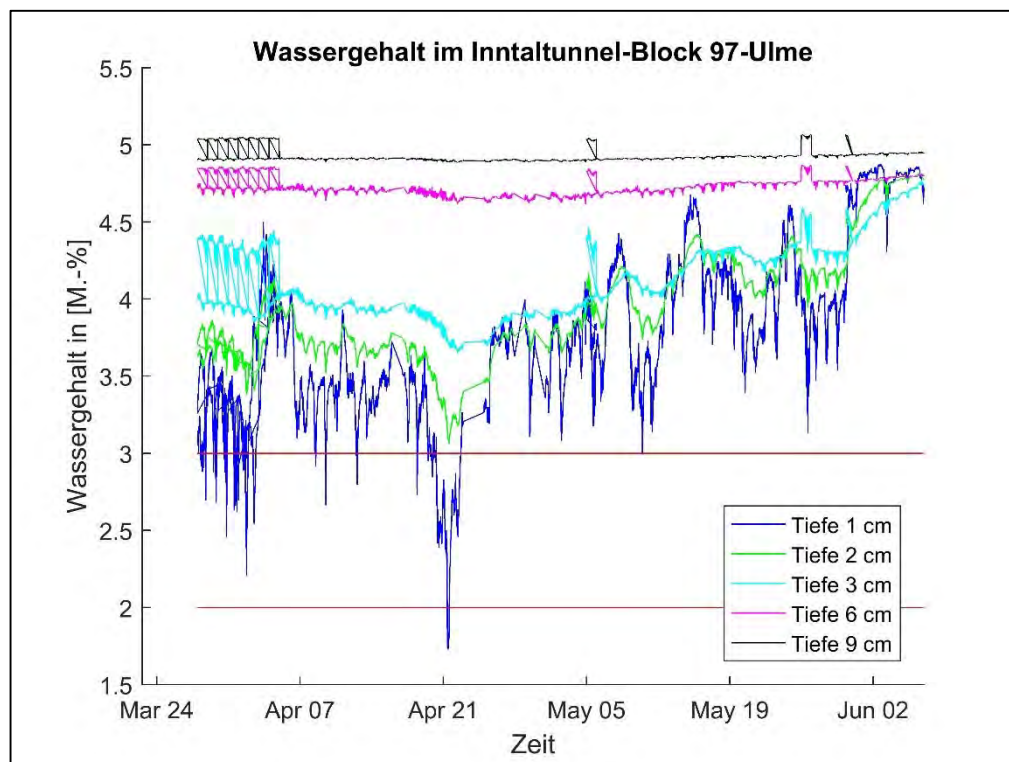


**Abbildung 149 Auszug auf dem Feuchteprofil des Inntaltunnels (durchgezogene Linie) mit den Fehlerbalken (gestrichelte Linie)**

### Vorläufiger Wassergehalt Inntaltunnel [18, Kap.8.3ff]

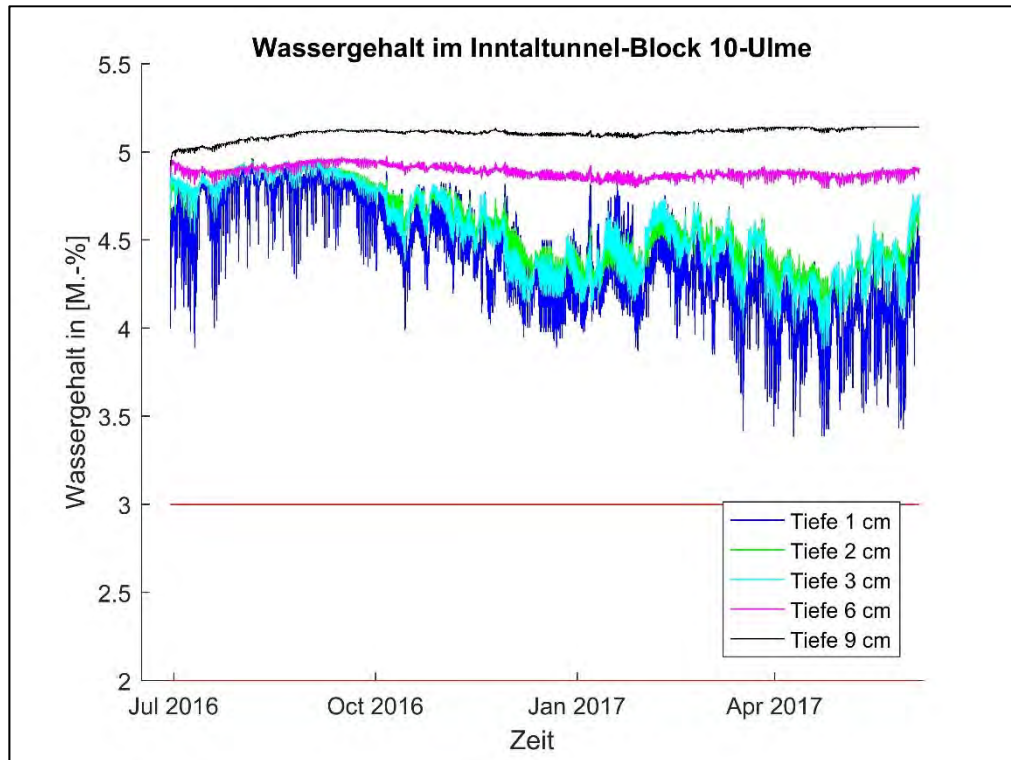
Der Inntaltunnel, bei dem zuerst die meisten Messdaten vorlagen, dient als Referenz und in diesem Kapitel werden die Wassergehalte an anderen Messstationen im Tunnel untereinander verglichen. Dieses Kapitel soll einen Eindruck über den Feuchtehaushalt in der Tunnelinnenschale des Inntaltunnels ermöglichen.

Bei den Messpositionen in den Blöcken 10, 45 und 97 werden die Feuchtegrenzwerte der Normen zu keiner Zeit eingehalten. Weiterhin lässt sich für den Tunnel festhalten, dass mit zunehmender Tiefe der Wassergehalt im Beton zunimmt. Bei der Messstation in Block 45 zeigen sich enorme Abweichungen zu den Messstationen in den Blöcken 10 und 97 sowie ein deutlich konstanter Feuchteverlauf, weshalb ein Messfehler vermutet wird. Es ist zudem zwischen den unterschiedlichen Messstationen in den Blöcken 10 und 97 ein unterschiedliches Feuchteniveau ersichtlich. Der Inntaltunnel erfordert daher eine individuelle Betrachtung für die Baustofffeuchten an verschiedenen Orten.

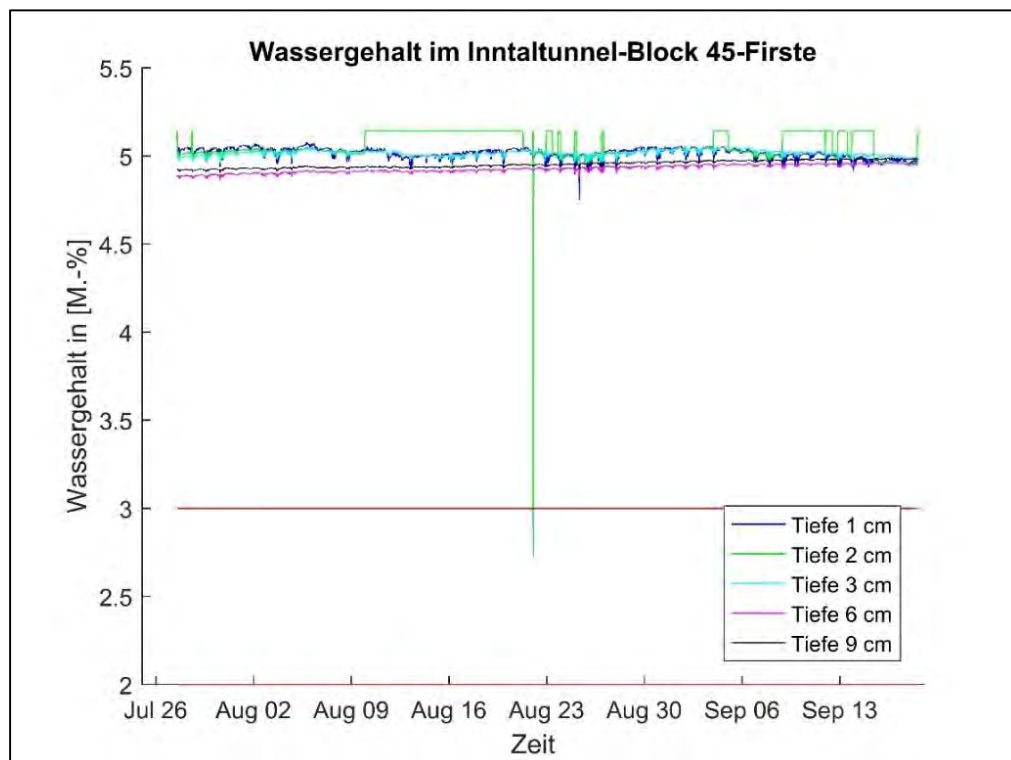


**Abbildung 150 Wassergehalt im Inntaltunnel-Block 97 Ulme, 2017**





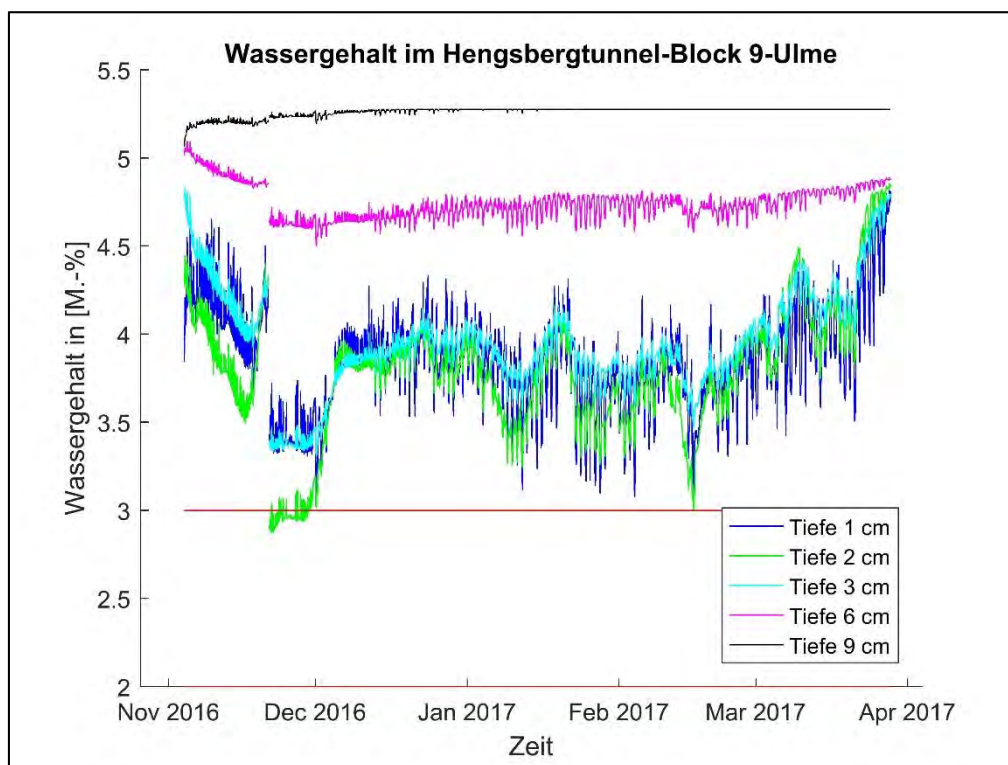
**Abbildung 151 Wassergehalt im Inntaltunnel-Block 10 Ulme**



**Abbildung 152 Wassergehalt im Inntaltunnel-Block 45-Firste Messfehler 2017**

### Vorläufiger Wassergehalt im Hengsbergtunnel

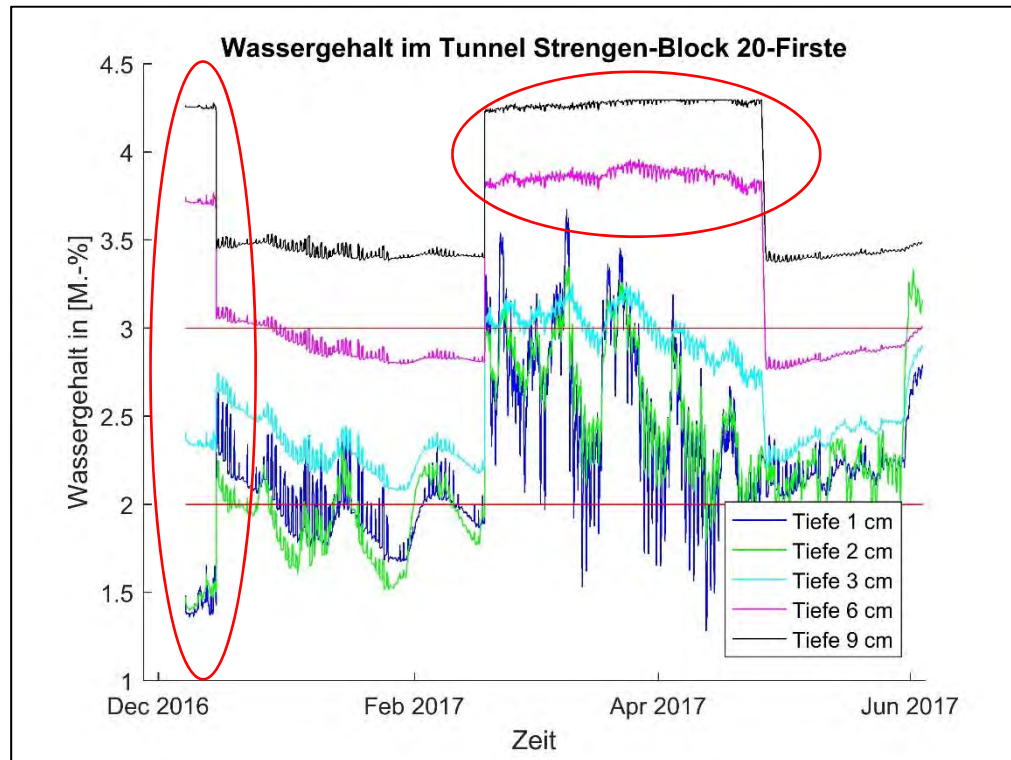
Der Hengsbergtunnel in Block 9 (bergmännische Bauweise) in der Position Ulme (vgl. Abbildung 153) weist einen ähnlichen Wassergehalt in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  auf, wie der Inntaltunnel an den Messstationen in Block 10. Die Schwankungen sowie das Schema der ansteigenden Betonfeuchte verhalten sich ähnlich. Die gemessenen relativen Feuchten in den Tiefen 2 und 3 cm folgen sehr stark dem Außenklima. Nach der Messungsunterbrechung am Aufzeichnungsbeginn (November-Dezember) weist die Feuchte in den Tiefen 6 und 9 cm kaum Änderungen auf und verläuft annähernd konstant. Die Kavitätsfeuchten in den Tiefen 1, 2 und 3 cm liegen dabei sehr nah beieinander und folgen dem jeweiligen vorhergehenden Feuchteprofil.



**Abbildung 153 Wassergehalt im Hengsbergtunnel-Block 9-Ulme**

Die offene Bauweise wird hier nicht diskutiert.

## Vorläufiger Wassergehalt im Tunnel Strengen

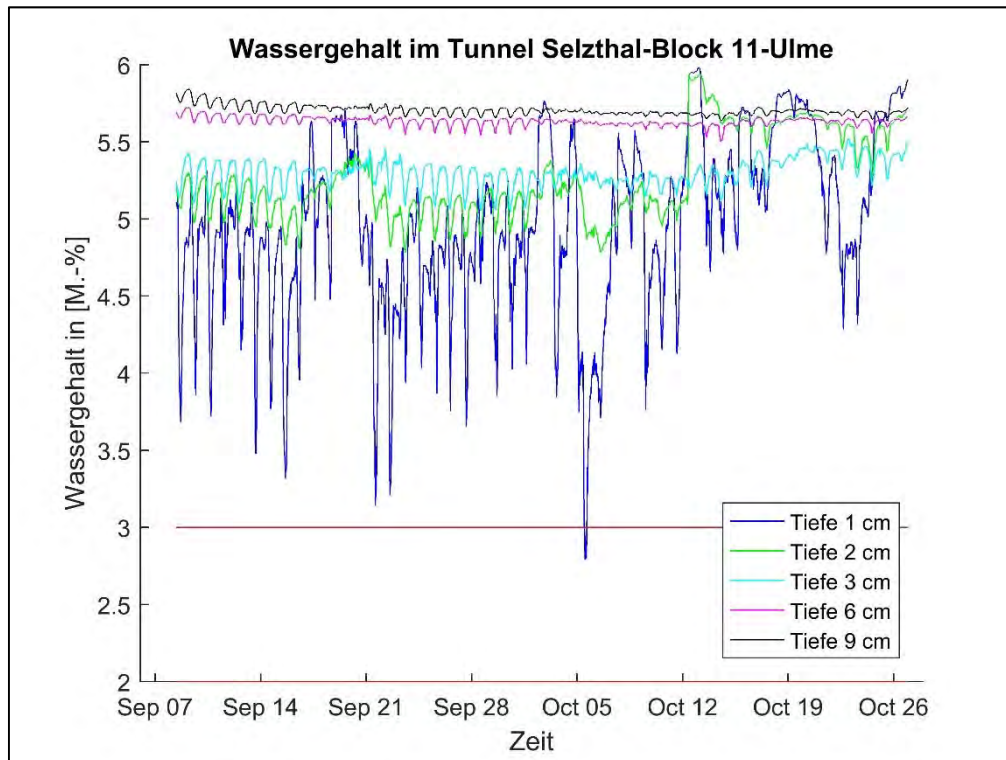


**Abbildung 154 Wassergehalt im Tunnel Strengen-Block 20-Firste**

Der Tunnel Strengen zeigt, neben den Messausfällen (rot markiert), eine deutlichere Nähe zu den Grenzwerten. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Tunneln erfolgt eine deutlich schwächere Anbindung der Kavitätsfeuchte in 3 cm Tiefe an das Außenklima bzw. zu oberflächennäheren Schichten.

### Vorläufiger Wassergehalt im Tunnel Selzthal

Der Tunnel Selzthal nähert sich den Beschreibungen des Inntaltunnels und des Hengsberg隧nells an. Eine Einhaltung der Grenzwerte wird beim Tunnel Selzthal ebenfalls nicht erreicht. Weiterhin unterscheidet sich die Anbindung der Tiefen 2 und 3 cm ans Außenklima zur Feuchteänderung in der Tiefe von 1 cm und an das Außenklima.



**Abbildung 155 Wassergehalt im Tunnel Selzthal-Block 11-Ulme 2016**

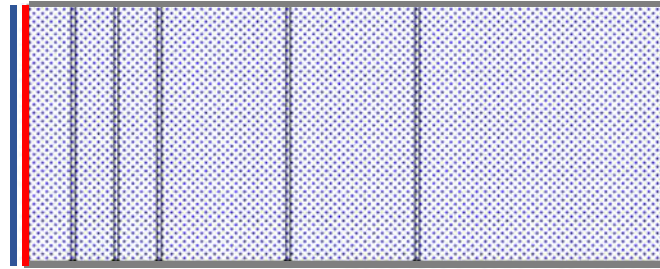
Ein Unterschied zu den vorhergehenden Feuchteprofilen in den Tunneln ist, dass die Feuchteprofile in den Tiefen 1, 2 und 3 cm deutlich weniger Abhängigkeit zueinander zeigen und sich daher die vorhergehenden Feuchteprofile weniger stark in der tieferliegenden Kavität abbilden. Die mittleren Wassergehalte, die in der jeweiligen Tiefe vorliegen, weichen dabei deutlich stärker voneinander ab. Daraus ist ersichtlich, dass im Tunnel Selzthal die Materialeigenschaften zur Feuchtespeicherung und zum Feuchtetransport andere Größenordnungen aufweisen. Da beim Tunnel Selzthal keine Betonrezeptur ausgehoben werden konnte, kann kein Abgleich der Materialeigenschaften anhand der Ausgangsstoffe erfolgen.

**Es ist aber zu beachten dass im Tunnel Selzthal ein starker Tausalzeintrag erfolgte!**

## 6.4 Modellrechnungen

WUFI Simulation Hinweis auf [18, Kap. 4, 9.6, 9.7. 9.8].

Bevor Messergebnisse auf Plausibilität geprüft werden konnten, sollten durch Simulationen mittels WUFI das hygrische Verhalten einer Tunnelinnenschale betrachtet werden. Dabei ist besonders interessant, die unterschiedlichen Feuchteverteilungen in Abhängigkeit der Tiefe zu betrachten.

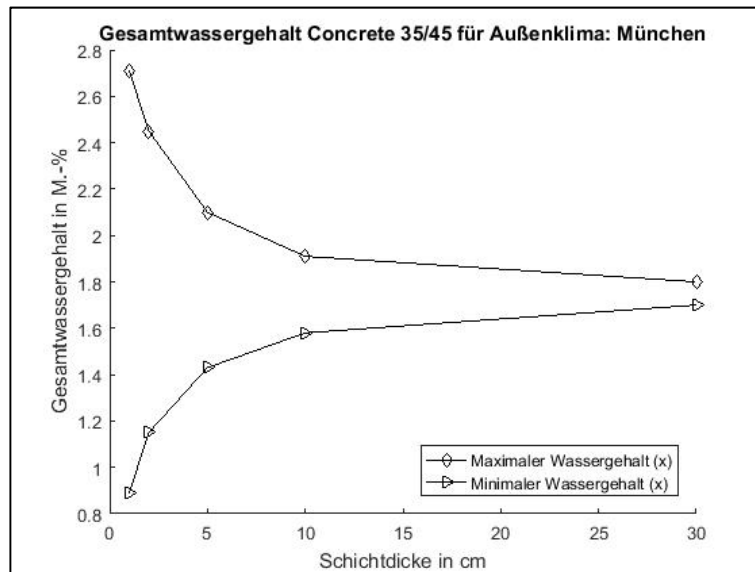


**Abbildung 156 Grundmodell für die Simulation mittels WUFI**

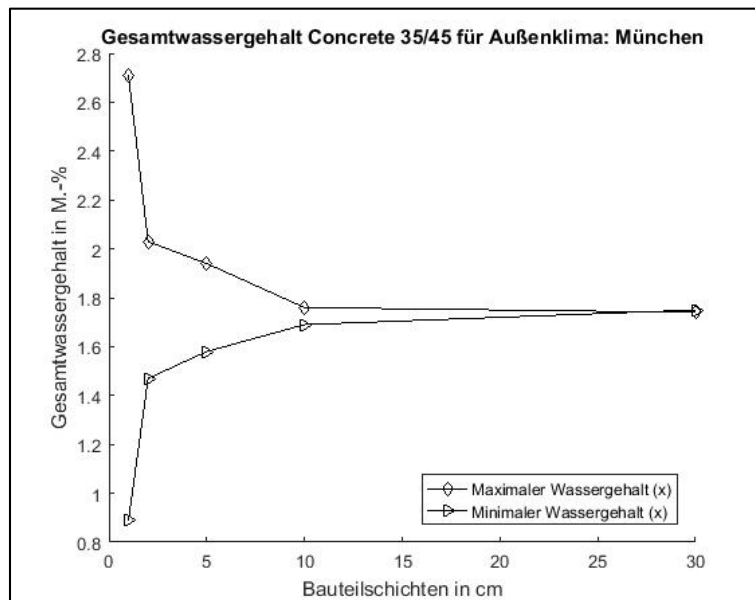
Für diese Untersuchung ist ein Simulationsmodell nach oben abgebildetem Schema (vgl. Abbildung 156) verwendet worden. Für die Untersuchung wurde ein Betonkörper mit 30 cm Tiefe erzeugt. Dabei sind die einzelnen Schichttiefen durch 1 mm dicke Monitoring-Layer unterbrochen. Die Unterbrechungen finden nach 1, 2, 5, 10, 30 cm statt. Die dreiseitigen Begrenzungen nach oben, unten und rechts werden adiabatisch ausgebildet. Unter der Verwendung eines Probekörpers mit diesen Abmessungen ist es möglich die Wechselwirkung von Feuchtespeicher- und Transportmechanismen für die Tunnelinnenschale in den jeweiligen Betontiefen, abzubilden. Das Außenklima, wie es in der Stadt München vorliegt, wurde linksseitig an den Betonkörper angelegt. Durch das instationäre Klima soll gezeigt werden, wie sich die zyklischen Schwankungen auf den Wassergehalt auswirken. Bezogen auf die eigentliche Betrachtung eines Tunnels, könnte dieser Aufbau mit den Einwirkungen auf den Beton am Tunnelportal assoziiert werden. Untersucht wurde zum einen die sich einstellende Betonfeuchte in den Schichten, ausgehend von der Tunnelwand bis zur Untersuchungstiefe (Variante 1), sowie die Betonfeuchte in den jeweiligen Schichten selbst (Variante 2). Die korrespondierenden Tiefen können der untenstehenden Tabelle 52 entnommen werden.

**Tabelle 52: Untersuchungsvarianten**

Variante 1	Variante 2
0 – 1 cm	0 – 1 cm
0 – 2 cm	1 – 2 cm
0 – 5 cm	2 – 5 cm
0 – 10 cm	5 – 10 cm
0 – 30 cm	10 – 30 cm



**Abbildung 1157 Auswertung der Simulationsvariante 1**



**Abbildung 1258 Auswertung der Simulationsvariante 2**

Abbildung 157 beschreibt den Feuchteverlauf von der Außenoberfläche bis zur Untersuchungstiefe. Es ist ersichtlich, dass die erzielten Amplituden im Wassergehalt bis zu 1 cm Tiefe um mehr als 1,7 M.-% schwanken. Sowohl der minimale als auch der maximale Wassergehalt nähern sich mit fallender Geschwindigkeit einem Mittelwert (stationärer Zustand). In 2 cm Tiefe ist die Feuchtedifferenz zwischen maximalem und minimalem Wert auf 1,2 M.-% reduziert.

Deutlicher wird die Trägheit des Feuchteausstauschs in tieferliegenden Schichten, dies ist in der unteren Abbildung 158 illustriert. Ab 10 cm Tiefe erfolgt, gerade im Vergleich zu oberflächennahen Schichten, kaum eine Schwankung des Wassergehalts. Es ist ersichtlich, dass der minimale und maximale Wassergehalt in einer Tiefe zwischen 10 und 30 cm vernachlässigt werden kann. Die stärkste Amplitudenreduktion erfolgt bis zu 1 cm Tiefe.

Ausgehend aus den Untersuchungen ist erkennbar, dass Feuchteschwankungen in Bezug auf einen Feuchte-Grenzwert vor allem bis zu einer Tiefe von 5 cm betrachtet werden

müssen. Bei tieferliegenden Schichten schwankt der zyklische Feuchtehaushalt etwa um 0,2 M.-%. Liegt der jährliche Mittelwert des Wassergehalts in den tieferen Schichten nicht nahe der Grenzwerte, können die Schwankungen als vernachlässigbar angenommen werden.

Eine Vorsimulationsstudie zu den Parametereinflüssen auf die Feuchtigkeit findet sich im Anhang 9.1.

Resümierend betrachtet ist WUFI in der Lage den mittleren jährlichen Wassergehalt bzw. die mittlere jährliche relative Kavitätsfeuchte bei einer kontinuierlichen Messaufzeichnung im Baustoff zu berechnen. Die Abbildung des ansteigenden Wassergehalts mit zunehmender Innenschalentiefe kann durch die manuelle Modifikation der Feuchtespeicherfunktion erzielt werden. Die Abweichung zwischen Simulation und Messung im Hinblick auf die starken Unterschiede bei den Amplituden über den jährlichen als auch über die täglichen Zyklen kann WUFI für die gemessenen Daten nicht abbilden.

#### Mathematisches Modell [18 ab Kap. 10]

In der Arbeit wurde auch die Anwendung eines mathematischen Modells betrachtet. Das Modell soll basierend auf der Gültigkeit eines LTI-Systems die Feuchte in den Tunnelinnenschalen vorhersagen können. Hierfür wurden die Übertragungsfunktionen durch die Division des Ausgangssignals (relative Feuchte in der Kavität) und dem Eingangssignal (relative Feuchte des Außenklimas) im Frequenzraum bestimmt. Um den Einfluss unterschiedlicher Wassergehalte in unterschiedlichen Tiefen ausschließen zu können, wurden die Wassergehalte so modifiziert, dass sie im jährlichen Mittel um den Wert 0 schwanken. Bei der Applikation der ermittelten Übertragungsfunktionen zu anderen Messstationen wurde eine hohe Abweichung dieser festgestellt. Dies wurde in wenigen Fällen zwischen den Orten Tunnelulme und Tunnelfirste im selben Tunnel und durchweg zwischen unterschiedlichen Tunneln festgestellt. Die Übertragungsfunktionen aus den gewonnenen Messdaten sind sehr spezifisch und daher nur in einem schmalen Radius um die eigentliche Messstelle anwendbar. Eine höhere Spezifikation der Übertragungsfunktionen kann dann erreicht werden, wenn Störeinflüsse auf die Messdaten reduziert werden. Mithilfe von Klimakammerversuchen, kann die Übertragung von Feuchtwerten in den Baustoff deutlich genauer bestimmt und so gegebenenfalls die Anwendung des mathematischen Modells in Betracht gezogen werden.

#### Parameterstudien und Kalibrierungen [18, Kap. 11]

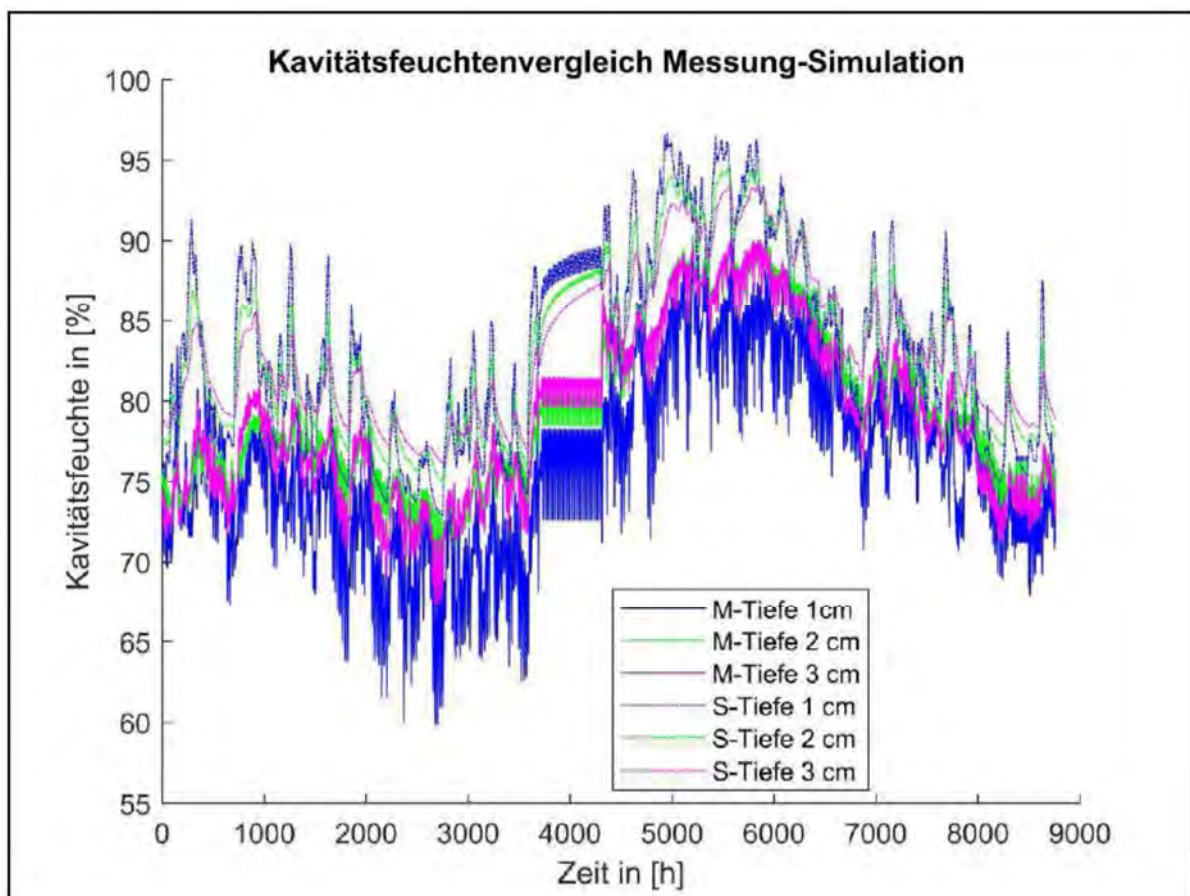
Weiterhin wurde überprüft ob WUFI bei den eingesetzten Betonrezepturen verlässliche Ergebnisse erbringen kann. Dazu wurden innerhalb einer Testsimulation mit verschiedenen Werten aus der Software-Datenbank Berechnungen durchgeführt. Als Vergleich zur Simulation diente ein Klimakammerversuch, bei welchem Betonbalken mit Sensoren ausgestattet und einem stationären Klima ausgesetzt wurden. Verglichen wurde dabei, ob der Verlust des Wassergehalts bei Simulation und Messung übereinstimmen. Dies konnte im Rahmen der Untersuchung bestätigt werden.

Die Materialparameter, die in der Literaturrecherche als bedeutend gewertet wurden, konnten in einer weiteren Vorsimulationsstudie auf ihre quantitative Beeinflussung des Wassergehalts betrachtet werden. Dabei wurde wiederum ein Probekörper in der Simulation einem konstanten Klima ausgesetzt und dessen Wasseraufnahme bei unterschiedlichen Materialeigenschaften über einen Zeitraum von 5 Jahren gewertet. Aus der Vorsimulationsstudie ging hervor, dass die Feuchtespeicherfunktion als Hauptcharakteristik den sich

einstellenden Wassergehalt im Baustoff vorgibt und die Wirkung anderer Parameter, auch in Kombination, deutlich geringer ausfallen.

Weiterhin wurde durch [96] festgestellt, dass eine Vernachlässigung der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten an der Bauteiloberfläche zu einem erheblichen Fehler bei der Berechnung führen kann. Eine Approximation der Übergangskoeffizienten mithilfe der mittleren Windgeschwindigkeit wurde zudem als ausreichend genau befunden.

Als großer Unterschied zwischen Messergebnissen und Simulationsergebnissen wurde die Amplitude der Feuchteschwingung ausgemacht. Die Durchlässigkeit des Betons bestimmt weitestgehend wie stark die relative Feuchte schwankt. Daher wurde der Einfluss der Feuchtetransportkoeffizienten und der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die zur Festlegung der Durchlässigkeit in WUFI dienen, untersucht. Durch eine Variation dieser Materialeigenschaften innerhalb eines durch eine Literaturrecherche gegebenen Rahmens konnte gezeigt werden, dass das Feuchteverhalten des Betons stark von der Eingabe dieser Materialparameter beeinflusst wird.



**Abb 59.: Vergleich von Messdaten (M) mit Simulationsdaten (S). Für die oberflächennahen Schichten konnte die Amplitude der simulierten Feuchteschwingung der Messung angenähert werden. Der Unterschied im Mittelwert bleibt bestehen [96]**



## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 7.1 Zusammenfassung

Im Forschungsprogramm konnten

- geeignete Sensoren (für Feuchte und Temperatur) zur Messung in unterschiedlichen Tiefen im Beton
- Kleine Erfassungs- und Speichereinheiten samt Stromversorgung, Datensicherung und Datenübertragung (lokal und Internet)
- Feuchtejahresverläufe in ausgewählten Österreichischen Tunnelinnenschalen
- Erkenntnisse zum Einfluss der Betonmischung auf das Feuchteniveau
- Modelle (Simulationen) zur Abschätzung der Feuchte in anderen Tunnels

erarbeitet werden.

Diskussion der Ergebnisse [z.B. 98, Kap. 5.1 ff]

Laut derzeitigem Stand und Vergleich mit der Literatur stellen sich in den untersuchten Tunnels folgende Feuchten in M-% ein

**Tab. 53. Feuchten in Masse-% in den untersuchten Tunnels in Bearbeitung**

	Inntal	Hengsberg	Selzthal	Strengen
<b>Abweichungen</b>	$\pm 0,18$ M.-%.	$\pm 0,19$ M.-%,	$\pm 0,22$ M.-%,	$\pm 0,16$ M.-%
Maximal 0 bis 2 cm				
Minimal 0 bis 2 cm				
Maximal 2-4 cm				
Minimal 2-4 cm				
Portal				
Inneren				
Winter				
Sommer				
Ulme				
Firste				

Auswertung nach:

Portal/ Mittenbereich des Tunnels

Ulme/Firste des Tunnelquerschnittes

Verschiedene Betone

Nach Jahreszeiten

Tagesschwankungen

Straße/Eisenbahn

Rohdaten/Kalibrierte Daten

Diskussion der verschiedenen Kalibrierversuche und Empfehlungen

## 7.2 Schlussfolgerungen, Bewertung, Vorschläge und Ausblick

Derzeit nur Stichworte, Wird ergänzt!

Schlussfolgerungen aus versuchstechnischer Sicht

große Fortschritte

Technisch gelöst

Kalibrierung schwierig

Verbundstoff Beton wegen Zuschlag Korngröße immer nur Mittelwerte und es geht nicht in mm Schichten

Viele Einflussfaktoren

Salzuntersuchungen aus Zeitgründen nicht durchgeführt

Karbonatisierung aus Zeitgründen nicht durchgeführt

Organisation Tunnelzugang sehr aufwendig wegen hoher Verkehrsbelastung

Schlussfolgerungen aus brandschutztechnischer Sicht

hohe Feuchtegehalte

jetzt genauer bestimmt als bei vielen Brandversuchen, auch dort muss in Schichten geprüft werden

Grenzwerte in Regelwerken sind daher derzeit teilweise Annahmen

Grenzwert der Feuchte wird natürlich auch durch andere Parameter (unterschiedlich je nach Beton, Belastungssituation...) beeinflusst

Schlussfolgerungen aus baupraktischer Sicht

hohe Feuchtegehalte verstärken Abplatzproblematik

an Stellen, wo baulicher Brandschutz notwendig, werden Schutzschichten oder andere Maßnahmen notwendig

Salz deutlich sichtbar in Ulme Straßentunnel? Gute Tunnelbeschichtung vorteilhaft

### In Arbeit Vorschlag [18, Kap. 11]:

.....Die Erstellung eines Betonfeuchte-modells unter dem Einsatz des Projekt-Messsystems erfordert zwei Voraussetzungen. Zum einen müssen die Sensoren aufgrund der zusätzlichen Ionen in der Betonumgebung kalibriert und zum anderen müssen die Sorptionsisothermen der Betone messtechnisch bestimmt werden. Die Sensorkalibrierung wurde durch einen Exsikkator-Messaufbau realisiert. Dabei wurden würfelförmige Probekörper, in deren Mitte Sensoren entsprechend der In-Situ-Situation in der Tunnelinnenschale eingebaut sind, in einem Exsikkator einer durch eine Salzlösung bestimmten festgesetzten relativen Feuchte ausgesetzt. Die in den Betonproben gemessenen relativen Feuchten wiesen eine Differenz zur relativen Feuchte im Exsikkator um mehr als 9 % auf. Für das Auswerten des im Tunnel gemessenen Klimas müssen die gemessenen relativen Feuchte-Werte um diesen Off-Set korrigiert werden.

Im nächsten Schritt erfolgte die Messungen der Ad- und Desorptionsisothermen. Für die Messung wurden scheibenförmige Prüflinge mit einer Dicke von 1 cm ebenfalls in einem Exsikkator (später in dem Messgerät Vsorp) einem vorgegebenen Klima ausgesetzt. Die Messung der Adsorptionsisothermen zeigte, dass im Vergleich zur Literatur die Sorptionsisothermen der aus den Tunnel entnommenen Proben, als auch der nachgestellten Rezepturen besonders gering ausfallen. Die Desorptionsisothermen zeigten jedoch einen deutlich höheren Wassergehalt im Baustoff und entsprechen in ihrer Größenordnung Vergleichswerten aus der Literatur. Der Unterschied wurde überwiegend den geschlossenen Poren und Sackporen, deren Wassergehalt nicht am reaktiven Feuchtehaushalt teilnimmt, im Baustoff zugewiesen. Bei den Adsorptionsisothermen fand eine Trocknung bei 105 °C vor dem Versuchsstart statt. Im Gegensatz dazu wurden die Desorptionsisothermen erst nach den Versuchen getrocknet. Der Einfluss von Flaschenhalsporen auf die hohe Differenz der Ad- und Desorptionsisothermen besteht nicht, da sich die Sorptionsisothermen an den jeweiligen Extrempunkten der relativen Feuchte (0 %/100 %) stärker annähern müssten, da die Flaschenhalsporen in beiden Versuchsdurchgängen bei niedriger Feuchte geleert als auch bei hoher Feuchte gefüllt sind. Die große Hysterese ist zudem dem Messablauf geschuldet. Werden die jeweiligen Sorptionsisothermen so bestimmt, dass in beiden Versuchsreihen die Trocknung zum gleichen Zeitpunkt durchgeführt wird, so liegt in beiden Fällen der gleiche „Basis-Wassergehalt“ vor. Schlussendlich kann festgehalten werden, dass die Desorptionsisothermen für das Betonfeuchte-modell verwendet werden müssen, da in der Praxis in den Tunnelinnenschalen das physikalisch gebundene Wasser in geschlossenen Poren bestehen bleibt.

Der direkte Vergleich von Feuchtespeicherpotential zum Wasser-Bindemittelwert und der offenen Porosität des Baustoffs hat gezeigt, dass keiner der beiden Faktoren einen direkten Rückschluss auf die Sorptionsisothermen der Betone ermöglicht. Eine Tendenz ist bei beiden Vergleichsfaktoren zwar ablesbar, kann aber für eine präzise Aussage nicht herangezogen werden.

Es stellte sich heraus, dass die Messung der Sorptionsisothermen notwendig ist, da die Anwendung des modifizierten BSB-Modell nach [63] eine Abweichung von knapp über 0,5 M.-% aufweist. Diese Abweichung führt aufgrund der Grenzen des Wassergehalts durch die DIN/ÖNORM von 3 M.-% und 2 M.-% zu einer zu großen Toleranz. Die Abweichungen zwischen Modell und Messung wurden erzielt, obwohl das vorliegende Modell durch Korrekturfaktoren verbessert wurde.

Aus den gewonnen Daten konnten die Betonfeuchte-Profile in den jeweiligen Tunneln bestimmt werden. Der Wassergehalt in den Tunneln steigt an den meisten Messstellen mit zunehmender Tiefe an. Zudem konnten die starken Unterschiede der Feuchteprofile auch

innerhalb der Tunnels herausgearbeitet werden. Besonders beim Vergleich zwischen den Tunneln wurde ersichtlich, dass die Kavitätsfeuchten dem Außenklima sehr unterschiedlich folgen. Eine Überschreitung der Grenzwerte der in Normen festgelegten Werte wurde dabei an **allen** Messstellen beobachtet.

Die nachfolgenden Simulationen zeigten, dass die Simulationsdaten um den gemessenen mittleren jährlichen Feuchtwert des Außenklimas schwanken und stimmen daher mit den Erkenntnissen der Literatur überein. Die Simulation zeigt dennoch Differenzen zu den Messdaten auf. Die Amplituden und die starken kurzfristigen Schwankungen der Feuchte in den Kavitäten können in WUFI nicht abgebildet werden.

**WIRD FORTGESETZT**

## 8 LITERATUR

### Studentische Arbeiten an der OTH Regensburg

[2]	Gruber, R. Oberhofer, M.	Feuchte in Tunnelinnenschalen Eine Literaturstudie	23.1.2015
[92]	Schmidmeier, C. Inal, A.	Laboruntersuchungen zur Feuchtemessung an Tunnelinnenschalenbetonen	18.4.2016
[98]	Speckner, S. Hölz, D.	Laboruntersuchungen zur Feuchtemessung an Tunnelinnenschalenbeton	15.9.2016
[100]	Hoffmann, B.	Messsystementwicklung zur Bestimmung von Feuchtigkeit in Beton	2017
[18]	Malz, S.	Betonfeuchte-Simulationsmodell für instationäre Klimarandbedingungen	28.9.2017
[95]	Winter, F.	Feuchteuntersuchungen an 4 Innenschalenbetonen von Verkehrstunneln	30.4.2018
[96]	Gensler, M.	Simulationsrechnung zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Beton-Tunnelinnenschalen unter Verwendung vorgegebener Klimadaten	18.4.2018

Zitierte Literatur:

- [1] ÖBV-Richtlinie: „Erhöhter baulicher Brandschutz mit Bauen für unterirdische Verkehrsbauwerke“, Wien, August 2015.
- [2] R. Gruber, M. Oberhofer, „Feuchte in Tunnelinnenschalen - Eine Literaturstudie“, Bachelorarbeit, Fak. Bauingenieurwesen, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2016.
- [3] Borgogno, W.; Ganz, H. R.; Fontana, M.: Verhalten von Betonbauteilen unter Brandeinwirkung. Zürich 2014.
- [4] Huismann, S.: Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. Dissertation Technische Universität Wien. Wien 2010.
- [5] Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Berlin 1972.
- [6] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 2008.
- [7] Schmidt, J.; Bergerhausen, U.; Dehn, F.: Großbrände in Stahlbeton-Straßentunneln. Temperaturbeanspruchung, Durchwärmungs- und Abplatzverhalten. Beton- und Stahlbetonbau 108, Heft 10 (2013), S. 723–733.
- [8] Bergmeister, K.: Beton unter hohen Temperaturen – eine Frage der Tunnelsicherheit. Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 2 (2006), S. 74–80.
- [9] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.: Beton Brandschutz Handbuch. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 1999.
- [10] Kusterle, W.; et al.: Fire Resistance of Fibre-Reinforced, Reinforced and Prestressed Concrete (Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton). Austrian Federal Ministry of Transportation, Infrastructure and Technology (Ed.), (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie) Road Research Report 544 (Strassenforschung Heft 544) (2004), Wien.
- [11] Jansson, R.: Fire Spalling of Concrete. PhD Thesis. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 2013.
- [12] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall. Berlin: Beuth Verlag (Dezember 2010).
- [13] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 1992-1-2/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall. Berlin: Beuth Verlag (Dezember 2010).
- [14] Consolazio, G. R.; McVay, M. C.; Rish III, J. W.: Measurement and Prediction of Pore Pressure in Cement Mortar Subjected to Elevated Temperature. In: National Institute of Standards and Technology (Hrsg.): International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete. Gaithersburg: Nist Special Publication, S. 125–148.
- [15] Schneider, U., Diederichs, U. (1981), Physical properties of concrete from 20°C up to melting. BFT, Betonwerk + Fertigteil-Technik, issue 3 and 4.

- [16] fib Bulletin 38 (2007), Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling. Fédération internationale du béton (fib), State-of-art-report prepared by Working Party 4.3-1, Lusanne, Switzerland.
- [17] Van Straalen, I.J.J.: et al (2013), Simplified stochastic modelling of concrete spalling due to fire. In: Pimienta, P., Meftah, F.: Proc. of the 3rd International Workshop: Concrete Spalling due to Fire Exposure. MATEC Web of Conferences 6, 01001.
- [18] Malz, S.: Betonfeuchte-Simulationsmodell für instationäre Klimarandbedingungen, Masterarbeit, OTH Regensburg, September 2017.
- [19] Rucker-Gramm P., "Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen", Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde, Technische Universität München, München, 2008.
- [20] M. Thiery et al., „Effect of Carbonation on the Microstructure and Moisture Properties of Cement-Based Materials“, International Conference on Durability of Building Materials and Components Porto, Konferenzbeitrag, April 2011, Portugal.
- [21] V.T. Ngala, C.L. Page, Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol. 27, Nr. 7, S. 995-1007, 1997.
- [22] Momber, A. W.; Schulz, R.-R.: Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton. Bearbeitung - Eigenschaften - Prüfung. Basel - Boston - Berlin: Birkhäuser Verlag 2006.
- [23] Kupfer, K.: Materialfeuchtemessung. Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen. Renningen: Expert Verlag 1997.
- [24] Schürger, U.: Feuchtemessung zur Beurteilung eines Schimmelpilzrisikos. Bewertung erhöhter Feuchtegehalte. In: Oswald, R. (Hrsg.): Aachener Bausachverständigentage 2013. Bauen und Beurteilen im Bestand. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 64–72.
- [25] Weber, S.: Betoninstandsetzung. Baustoff - Schadensfeststellung - Instandsetzung. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013.
- [26] Hering, E.; Schönfelder, G. (Hrsg.): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012.
- [27] Lamprecht, H. O. (Hrsg.): Beton-Lexikon. Düsseldorf: Beton-Verlag 1990.
- [28] Nilsson, L-O.: Fuktproblem vid Betonggolv. (Moisture Problems at concrete floors) Rapport TVBM-3002, University of Lund, 1977.
- [29] Scholz, G.: Metrologische Aspekte der Feuchtemessung in festen Stoffen. In: Kupfer, K. (Hrsg.): 9. Feuchtetag 1997 in Weimar. Moderne Verfahren und Geräte zur Materialfeuchtemessung. Weimar: MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar, S. 1–7.
- [30] Trotec GmbH & Co. KG: T2000 Praxishandbuch.  
<https://at.trotec.com/fileadmin/downloads/Multifunktion/TRO-TR-HBT2000-06-D.pdf>, 08.10.2015.
- [31] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Stuttgart 1995.

- [32] Sodeikat, C.: Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung - Praxisbeispiele. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Informationstag Moderne Bauwerksprüfung. Bergisch Gladbach: DGZfP, Vortrag 07.
- [33] GANN Mess- und Regeltechnik GmbH: Elektronische Feuchtigkeitsmessgeräte. [http://www.gann.de/Portals/0/Attachments/Katalog\\_11.2014\\_V3.06\\_DE\\_s.pdf](http://www.gann.de/Portals/0/Attachments/Katalog_11.2014_V3.06_DE_s.pdf), 06.11.2015.
- [33a] *Österreichische Bautechnik Vereinigung*: Richtlinie Erhaltung und Instandsetzung von Bauten aus Beton und Stahlbeton, April 2014.
- [34] Souchon, T.; Breit, W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren. Abschlussbericht Bauforschung T2790. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 1997.
- [35] Sensortec GmbH: Feuchtesensor "Multiringelektrode". [http://www.sensortec.de/images/pdf/Datenblatt\\_Multiringelektrode\\_de.pdf](http://www.sensortec.de/images/pdf/Datenblatt_Multiringelektrode_de.pdf), 06.11.2015.
- [35a] *Internet*: <https://proumid.com/moisture-sorption-analyser> 10.4.2018.
- [36] Brameshuber, W.; Raupach, M.; Spörel, F.; Schröder, P.; Rahimi, A.; Dauberschmidt, C.; Warkus, J.; Reichling, K.: Beanspruchung von Bauwerksbeton in der Expositionsklasse XF2. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 2013.
- [37] Appel, B.; Bertels, M.; et al.: Praxis-Handbuch Bautenschutz. Beurteilen, Vorbereiten, Ausführen. Köln: Rudolf Müller Verlag 2012.
- [38] Weiss, S.; Ungerer, K.: Feuchtemessverfahren. Waiblingen: Lauth & Partner 1995.
- [39] Geburtig, G.; Gänßmantel, J. (Hrsg.): Messtechnik - Der Weisheit letzter Schluss? Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2012.
- [40] Göller, A.: Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgerät der MOIST-Serie. Anwendungen und Einsatzfälle im Bausektor. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Feuchtetag 99 - Umwelt-Meßverfahren-Anwendung. Berlin: DGZfP, Poster 11.
- [41] Göller, A.; Handro, A.; Heinrich, D.; Landgraf, J.; Schnieber, M.; Wagner, J.: Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgerät der MOIST-Serie. Ein neues Konzept der Materialfeuchtemessung. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose. Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen. Berlin: DGZfP, S. 213–223.
- [42] Göller, A.: Mikrowellen-Rasterfeuchtemessungen - morphologische Beschreibung typischer Feuchteschäden in Bauwerken. Mauerwerk 11, Heft 2 (2007), S. 111–115.
- [43] hf sensor: MOIST 350 B. <http://www.hf-sensor.de/deutsch/moist350b.html>, 04.11.2015.
- [44] Gernot, H.: Zerstörungsfreie Mess- und Prüfverfahren im Bauwesen. Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen. Der Bausachverständige 4, Heft 2 (2008), S. 19–23.
- [45] Heinrich, G.: Feuchteschäden zerstörungsfrei analysiert mit der Neutronensonde. Bautenschutz + Bausanierung 12, Nr. 1 (1989), S. 24–27.

- [45a] Florin, C.: Feuchtedetektion mit Hilfe der Infrarot-Technik. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Feuchtetag 99 - Umwelt-Meßverfahren-Anwendung. Berlin: DGZfP, Poster 9.
- [46] Hoffmann, K.: Feuchtemessung durch Infrarotreflexion. Chemie Ingenieur Technik 35, Nr. 1 (1963), S. 55–62.
- [47] Bakhrarov, O.; Kaps, C.; Samigov, N.: Optische Messungen zur salz- und temperaturunabhängigen Bestimmung der Feuchte in Bauwerkstoffen. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose. Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zunkunftsaufgaben. Berlin: DGZfP, Poster 18.
- [48] Leschnik, W.: Feuchtemessung an Baustoffen - Zwischen Klassik und Moderne. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Feuchtetag 99 - Umwelt-Meßverfahren-Anwendung. Berlin: DGZfP, Vortrag H2.
- [49] Internet. <http://www.te-ka.de/index.php/de/waermeleitfaehigkeit/sonden-und-proben>, 07.11.2015.
- [50] Adam, T.: Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Dissertation. Darmstadt 2006.
- [51] Rucker-Gramm, P.: Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen. Dissertation. München 2008.
- [52] Bakker, R. F. M.; Roessink, G.: Zum Einfluß der Karbonatisierung und der Feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Beton-Informationen 3/4-91 (1991), S. 32–35.
- [53] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Stuttgart 1994.
- [54] Bogusch, N.; Duzia, T.: Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2014.
- [55] Reiners, J., Müller, Ch.: Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Zementstein auf das Trocknungsverhalten von Zementestrich und das Abplatzverhalten von Beton im Brandfall, Teil 1+2. Betontechnische Berichte des vdz, beton 11+12/2017.
- [56] Willems, W. (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013.
- [57] Moschig, G. F.: Bausanierung. Grundlagen - Planung - Durchführung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2010.
- [58] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten“, Dissertation, Fak. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1994.
- [59] Y. Xi, Z. P. Bazant, H. M. Jennings, “Moisture Diffusion in Cementitious Materials, Adsorption Isotherms”, Advanced Cement Based Materials, Nr. 1, S. 248-257, 1994.
- [60] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung. Dissertation. Zürich 2004.



- [61] Krus, M: „Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken.“, Dissertation, Fak. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1995.
- [62] Spektrum, Suchbegriff Kapillarkondensation, einzusehen unter:  
<http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/kapillarkondensation/8067>, zuletzt besucht am 13.07.2016.
- [63] Holm, A.H.: „Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzepts“, Dissertation, Fak. Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001.
- [68] Y. Xi et al., “Moisture Diffusion in Cementitious Materials, Moisture Capacity and Diffusivity”, Advanced Cement Based Materials, Nr. 1, S. 258-266, 1994.
- [64] Bomberg, M: “Water flow through porous materials”, Division of Building Technology, Lund, Institute of Technology, Report 21, Schweden, 1972.
- [65] DIN EN ISO 12571-2013, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.
- [66] Brunauer, S., Emmett, P.H. und Teller, E.: „Adsorption of Gases in Multimolecular Layers“, J. Am. Chem. Soc., Bd. 60, Nr. 2, S. 309–319, Feb. 1938.
- [67] Braunauer, S., Skalny, J., Bodor, E.E.: „Adsorption of nonporous solids“, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 30, No. 4, 1969, S.546-552.
- [68] Xi, Y. et al., “Moisture Diffusion in Cementitious Materials, Moisture Capacity and Diffusivity“, Advanced Cement Based Materials, Nr. 1, S. 258-266, 1994.
- [69] Kiessl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung.“, Fachbereich Bauwesen, Hochschule Essen, S. 123ff., 1983.
- [70] Powers, T.C., Brownyard, T.G.: Proc. Am. Conc. Inst., p.43, 101, 149, 469, 549, 845, 933, 1946-1947.
- [71] Mikhail, R.S., Abo-El-Enein, S.A., Gabr, N.A.: J. Appl. Biotechnol., Vol. 25, S. 835-847, 1975.
- [72] Hagymassy Jr. J., Odler, I., Yudenfreund, M., Skalny, J., Brunauer, S.J.: Colloid Interface Sci, Vol. 38, S.20-34, 265-276, 1972.
- [73] Lutz P. et al., „Lehrbuch der Bauphysik: Schall Wärme Feuchte Licht Brand Klima“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Karlsruhe, 1994.
- [74] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung. Dissertation. Essen 1983.
- [75] Rose, D. A.: Water movement in unsaturated porous materials. Rilem Bulletin No. 29 (1965), S. 119–123.
- [76] Willems, W. M.; Schild, K.; Dinter, S.: Vieweg Handbuch Bauphysik. Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag 2006.
- [77] Rheinwald, D.: Blasenbildung durch Feuchtigkeit (Osmose). In: Seidler, P. (Hrsg.): Industriefußböden '95. Technische Akademie Esslingen, S. 399–405.

- [78] Ungricht, H.: Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung“, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2004.
- [79] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 2008.
- [80] Chen X. und Wu, S.: „Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar“, Construction and Building Materials, Bd. 38, S. 804–812, Jan. 2013.
- [81] Nielsen, C.B.: “Salts in Porous Building Materials”, Technical Report 243/91, Building Materials Laboratory, The Technical University of Denmark, 1991.
- [82] Holm, A.H.: “Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes“, Dissertation, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001.
- [83] Achleitner, B. et al.: Erfolgskriterien für Tunnelanstrichsysteme, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, ÖBB- Infrastruktur AG, ASFINAG, Dezember 2016.
- [84] Garrecht H, „Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992.
- [85] Lunk, P.: „Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton“, Building Materials Reports, Nr. 8, Aedificatio Verlag, 1997.
- [86] Knoblauch, H.: „Bauchemie, Köln“, Werner Verlag, 2013, S.354.
- [87] Song, H., Kwon, S.: “Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure”, Cement and Concrete Research, Vol. 37, S. 909-915, Juni 2007.
- [88] Kropp, J.: Feuchtigkeitsgehalt und Karbonatisieren. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Feuchtigkeitstransport und Dauerhaftigkeit von Beton. Baierbrunn: WTA-Schriftenreihe, Heft 3, S. 31–50.
- [89] Fehlhaber, T.: „Zum Eindringverhalten von Flüssigkeiten und Gasen in ungerissenem Beton“, Beuth Verlag Berlin, Schriftenreihe des Deuchten Ausschuss für Stahlbeton, Heft 445, S.3-85, 1994.
- [90] Wiens, U.; Alfes, C.: Feuchtetransport in Bauteilen aus wasserundurchlässigem Beton. Grundlagen und Praxisbetrachtungen. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 6 (2007), S. 380–387.
- [91] Beddoe, R. E.; Schießl, P.: Wassertransport in WU-Beton - kein Problem! Untersuchungsergebnisse. In: Oswald, R. (Hrsg.): Aachener Bausachverständigentage 2004. Risse und Fugen in Wand und Boden. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, S. 94–99.
- [92] Schmidmeier, C., Inal, A.: Laboruntersuchungen zur Feuchtemessung an Tunnelinnenschalenbetonen. Bachelorarbeit, Fak. Bauingenieurwesen, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2016.
- [93] *Bakker, R. F. M.; Roessink, G.:* Zum Einfluß der Karbonatisierung und der Feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Beton-Informationen 3/4- 91 (1991), S. 32–35.

- [94] *Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR): Carbonatatie, corrosie en vocht. CUR Rapport 90-3, 1990.*
- [95] Winter, F.: Feuchteuntersuchungen an vier Innenschalenbetonen von Verkehrstunnels. Bachelorarbeit, Fak. Bauingenieurwesen, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2018.
- [96] Gensler, M.: Simulationsrechnung zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Beton-Tunnelinnenschalen unter Verwendung vorgegebener Klimadaten. Bachelorarbeit, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2018.
- [97] WUFI: Willkommen bei WUFI. [https://wufi.de/download/WUFI41\\_Hilfe\\_d.pdf](https://wufi.de/download/WUFI41_Hilfe_d.pdf), 04.11.2015.
- [98] Hölz, D.; Speckner, S.: Laboruntersuchungen zur Feuchtemessung an Tunnelinnenschalenbeton, Bachelorarbeit, OTH Regensburg, September 2016.
- [99] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen / 2014. Referat StB 17, November 2014, Berlin.
- [100] Hoffmann, B.: Messsystementwicklung zur Bestimmung von Feuchtigkeit im Beton. Bachelorarbeit, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg, 2017.
- [101] Kusterle, W.: Betonfeuchtemodell für Tunnelinnenschalen. Präsentation Zwischenbericht. OTH Regensburg; Mai 2016.
- [102] *Österreichische Bautechnik Vereinigung: ÖBV Richtlinie "Innenschalenbeton". Wien: Eigenverlag (2003).*
- [103] *Österreichische Bautechnik Vereinigung: ÖBV Richtlinie "Innenschalenbeton". Wien: Eigenverlag (2012).*
- [104] Deutscher Beton-Verein e. V.: Stahlbetoninnenschalen. DBV-Sachstandbericht Stahlbetoninnenschalen im U-Bahnbau. Wiesbaden: Eigenverlag 1994.
- [105] Neroth, G.; Vollenschaar, D. (Hrsg.): Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011.
- [106] Plagge, R.; Grunewald, J.; Häupl, P.: Simultane Bestimmung der hygri-schen Sorptionsisotherme und der Wasserdampfpermeabilität. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (Hrsg.): Feuchtetag 99 - Umwelt-Meßverfahren-Anwendung. Berlin: DGZfP, Poster 22.
- [107] Digital humidity sensors, Datenblatt der Firma Sensirion, einzusehen unter: <https://www.sensirion.com/de/produkte/feuchtesensor/>, zuletzt besucht am 18.09.2017.
- [108] DIN EN ISO 12571-2013, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.
- [109] DIN EN 1936-07, Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität, 2007.
- [110] ÖNORM EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Tragwerksbemessung für den Brandfall (konsolidierte Fassung); September 2010.
- [111] Hansen, K. K.: Sorption isotherms. A Catalogue. Technical report 162/86 (1986).

[112] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG); Homepage:  
[https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/tawes-verlaufsgraphiken/innsbruck\\_flugh/temperatur/?mode=geo&druckang=red](https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterwerte-analysen/tawes-verlaufsgraphiken/innsbruck_flugh/temperatur/?mode=geo&druckang=red)

Weitere Literatur zum Thema

#### Literatur Abplatzen

KORDINA, K.; Meyer-Ottens, C.: Beton Brandschutz Handbuch. 2. Auflage, beton-Verlag, Düsseldorf 1982 und Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1999.

KUSTERLE, Wolfgang et al: Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Straßenforschung Heft 544, Wien, 2004.

KARI, Hannes; KUSTERLE, Wolfgang; LINDLBAUER, Wolfgang; ZEIML, Matthias; HÖRHAN Rudolf: Fire Resistance Design of Concrete Structures – Conclusions from Large-Scale Tests. Proceedings fib Symposium „Keep Concrete Attractive“, Budapest, 23-25 May, 2005.

LEMMERER, Johann; KUSTERLE, Wolfgang; LINDLBAUER, Wolfgang; ZEIML Matthias; HÖRHAN, Rudolf; STEIGENBERGER, Johannes: Fire Loading of Highly Fire-Resistant Concrete Tunnel Linings. Proceedings IABSE Symposium „Structures and Extreme Events“, Lissabon, 2005.

KUSTERLE, Wolfgang; LINDLBAUER, Wolfgang; ZEIML, Matthias; MUCHSEL, Herbert: Fire Resistance of Concrete Tunnel Linings – Conclusions from Large-Scale Tests. Proceedings ConMat 05, Vancouver 22-24. August, 2005.

KUSTERLE, Wolfgang; RUZICKA, Michael; DONAUER, Peter-Frank; MUCHSEL, Herbert: Brandschutzschichten in Verkehrstunnels. In: Spritzbeton Technologie 06, BMI 1/2006.

Kusterle, W.: Sprayable fire-protective layers in traffic tunnels. In: Proc. of the third International Conference on Engineering Developments in Shotcrete, Queenstown, 15-17 March, 2010, Bernard, E.S. (ed.) Shotcrete: Elements of a System. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis, London 2010, ISBN: 978-0-415-47589-1, p.159-172.

ÖBV-Richtlinie: „Schutzschichten für den Erhöhten Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke, Wien 11/2006.

ÖNORM EN 1991-1-2: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkung auf Tragwerke (konsolidierte Fassung); 2013 01 15.

ÖNORM EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Tragwerksbemessung für den Brandfall (konsolidierte Fassung); 2010 09 01.

Kusterle, W., Lubloy E., Balazs, G., Dr Prisco, M.: FRC under fire conditions. Entwurf zu einem fib-Bulletin Fibre Reinforced Concrete, 2018.

Jansson, R.: Fire Spalling of Concrete. PhD Thesis. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2013.

Meyer-Ottens, C. (1972), Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. PhD thesis, University Braunschweig.

Schneider, U.; Diederichs, U.; Horvath, J. (2001), Zum Abplatzverhalten von Hochleistungsbetonen unter Brandangriff. Technical University Vienna, Schriftenreihe des Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, vol. 7; Vienna, Austria.

Waubke, N. V. (1966), Transportphänomene in Betonporen. PhD-thesis, Technical University Braunschweig, Germany, (in German).

Waubke, N. V., Schneider, U. (1973), Tensile stress in concrete due to fast vapour flow. Proceedings of the RILEM symposium Pore Structure and Properties of Materials, Prague.

Florian, A. (2002), Schädigung von Beton bei Tunnelbränden. Diploma-thesis, University Innsbruck, Austria.

Rossino, Ch. et al (2013), Concrete spalling sensitivity versus microstructure: Preliminary results on the effect of polypropylene fibers. In: Pimienta, P., Meftah, F.: Proc. of the 3rd International Workshop: Concrete Spalling due to Fire Exposure. MATEC Web of Conferences 6, 01001.

### Literatur Feuchtemessung

Barroca, N., Borges, L. et al: Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures. Construction and Building Materials 40, 2013.

Kupfer, K.: Materialfeuchtemessung: Grundlagen – Meßverfahren – Applikationen – Normen. Expert Verlag, 1997.

Bakker, R.F.N., Roessink, G: Zum Einfluss der Karbonatisierung und der feuchte auf die Korrosion der Bewehrung im Beton. Beton-Informationen 374 1991

Cziesielski, R., Fechner, O.: Wassertransport durch WU-Bauteile. Bauphysik-Kalender 2002, Verlag Ernst&Sohn, Berlin 2002.

Beddoe, R., Springenschmid, R.: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. Beton- und Stahlbetonbau 94 (1999) Heft 4.

Klopfer, H.: Wassertransport und Beschichtungen bei WU-Beton-Wannen. Aachener Bausachverständigentage 1999.

Holm, A., Krus, M., Künzel. H.M.: Grenzen der Feuchtetransportberechnung bei betonaußenbauteilen. 5th International Kolloquium „Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzung“. Aedificatio Publishers, Freiburg 1999.

Gertis, K., Kießl, K., Werner, H., Wolfseher, V.: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. In: Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 258, 1976. Berlin, Verlag Ernst & Sohn.

Rucker, P., Beddoe, R., Schießl, P.: Wasser- und Salzhaushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe – Modellierung der auftretenden Mechanismen, Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006), H. 6.

WTA: Das Wasserströmen in porösen Baumaterial. Mikrowellenstrahlungsanalyse der Feuchtigkeitsverbreitung zum Zweck der Beschreibung des Feuchtigkeitseinflusses in den Kapillarholräumen des inerten porösen Baumaterials mit der Feuchtigkeitsaufnahme an der Kontaktfläche mit dem Wasserspiegel. WTA-Allmanach 2008.

Raupach, M., Weydert, R.: Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonböden mit Einbaufeuchtesensoren. Industrieböden 99. Technische Akademie Esslingen, TAE-Ostfildern, 1999.

IRB: Baufeuchte und Austrocknungsdauer von Beton im Wohnbau, Konduktometrische Feuchtemessungen, Fraunhofer IRB Verlag, 1985.

Jurnik, A.: Übersicht der in Betracht kommenden destruktionsfreien Messmethoden, sowie der derzeitige Stand der Kenntnisse zur Ermittlung des Feuchtegehaltes in Beton. IRB Verlag, 1984.

Jurnik, A.: Laborbestimmung der Wassertransportgeschwindigkeit in Kapillaren von Beton mittels Kapazitätsmethode. IRB Verlag, 1984.

Volkwein, A.: Bestimmung der Feuchteverteilung in Baustoffproben mit Mikrowellen. TU München, Institut für Bauingenieurwesen II, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung (Hrsg.) Selbstverlag, 1990.

Brameshuber, W., Spörel, F., Warkus, J.: Messung der tiefenabhängigen Feuchtegehaltes an Betonbauwerken der Expositionsclassen XS (Meerwasser) und XF (Kläranlage), Az V420. Abschlussbericht Bauforschung T3181, IRB-Verlag, 2007.

Brameshuber, W., Spörel, F., Warkus, J.: Messung der tiefenabhängigen Feuchtegehaltes an Betonbauwerken der Expositionsclassen XS (Meerwasser) und XF (Kläranlage), Az V454. Abschlussbericht Bauforschung T3200, IRB-Verlag, 2008.

Souchon, T, Breit, W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren. Abschlussbericht Bauforschung T2790, IRB-Verlag 1997.

Breit, W.: Bauwerksüberwachung mit Hilfe von nachträglich installierten Feuchtesensoren (Multi-Ring-Elektroden). IBA Kurzbericht 49, 7/1994.

<http://publications.rwth-aachen.de/record/48366/files/4140.pdf>

Sodeikat, Ch.: Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung – Praxisbeispiele. Fachvortrag Bauwerksdiagnose der DGzFP und der BAM, 2010.

Sodeikat, Ch.: Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung. Beton- und Stahlbetonbau, heft 12, 2010.

Raupach, M., Dauberschmidt, C., Wolff, L., Harnisch, J.: Monitoring der Feuchteverteilung in Beton – Sensorik und Anwendungsmöglichkeiten. Beton 57 (2007), Nr.1.

<http://www.ndt.net/article/bau-zfp2010/papers/v09.pdf>

Schiessl, P., Souchon, T., Breit, W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtegehalten aus Widerstandsmesswerten der Multi-Ring-Elektrode, ermittelt in der Beton-

randzone mittels Einbausensoren. Kurzberichte aus der Bauforschung, Volume 39, Issue Number: 4, ISSN: 0177-3550, IRB-Verlag 1998.

Raupach, M.: Beurteilung von Feuchte- und Chloridprofilen verschiedener Bauteile. In: Müller, H. et al: Symposium Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. Universität Karlsruhe, 3/2009. [www.ubka.uni-karlsruhe.de/dbkit/uv/getUvkaDocument.php?vv\\_id...](http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/dbkit/uv/getUvkaDocument.php?vv_id...)

Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Dissertation Universität Stuttgart, 1995.

Kießl, K.; Gertis, K.: Feuchtetransport in Baustoffen. Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene. Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 13 (1980), Universität Gesamthochschule Essen.

Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Diss. Universität Gesamthochschule Essen, 1983.

Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart, 1994.

Grunewald, J.: Konvektiver und diffusiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Diss. Technische Universität Dresden, 1997.

Grunewald, J.; Häupl, Peter; Petzold, Hans; Ruisinger, Ulrich (2005): Bauklimatische Software zur Quantifizierung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Mauerwerk. In: H.-J. Irmischer (Hg.): Mauerwerk-Kalender Nr. 30, S. 447–473. Ernst & Sohn, Berlin, 2005.

Häupl, P.; Stopp, H.; Strangfeld, P.: Softwarepaket COND zur Feuchtefilmprofilbestimmung in Umfassungskonstruktionen. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (1989) H. 12, S. 53–56.

Parlange, M. B.; Cahill, A. T.; Nielsen, D. R.; Hopmans, J. W.; Wendroth, O.: Review of heat and water movement in field soils. In: Soil & Tillage Research 47 (1998), S. 5–10.

Berliner, M.A.: Feuchtemessung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1980.

Venzmer, H.: Feuchtegehalt in Skalenteilen? Marktübersicht Feuchtemessgeräte. In: Bauen im Bestand B+B (Bautenschutz und Bausanierung) (2010), H. 5, S. 38–39.

Hundt, J., Buschmann, J.: Moisture Measurement in Concrete. *Materiaux et Constructions* 4 (1971) H. 22, S. 253-259.

Lück, W.: Feuchtigkeit. Verlag R. Oldenbourg, München, 1964.

Krause, D. et. al.: Kapazitive Messung des Wassergehalts von Böden in Kulturgefäßen. GIT Fachz. Labor 29 (1985), H. 2, S 91-105.

Neue, J.: Anwendung des dielektrischen Messprinzips zur Bestimmung der Feuchteverteilung in Baumaterial. 2. Bauklimatisches Symposium der Sektion Architektur. Schriftenreihe der Sektion Architektur der TU Dresden (1972), H.4, S. 257-263.

Germesi, J.: Untersuchung der Kapillarerscheinung in Beton mit zerstörungsfreien Methoden. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen, Leipzig* (1969), H.3, S.175-177.

Hansen, K.K.: Sorption isotherms Catalogue. Technical report 162/86, Technical University of Denmark, 1986.

DIN 52620: Bestimmung des Bezugfeuchtegehaltes von Baustoffen. 4/1991.

Rechberger, P.: Baufeuchte und Austrocknungsdauer von Betonbauten – Apparative und messtechnische Grundlagen für ein Forschungsvorhaben. Verein der Österreichischen Zementfabrikanten, Selbstverlag, 1982.

Schäper, M, Kreye, J.: Feuchtemessung an Beton mit elektronischen Messgeräten. Bauingenieur, 86, 2011. <http://www.mpa-wiesbaden.de/data/Feuchtemessung.pdf>

Kruschwitz, S.: Feuchtemessung im Bauwesen – ein Überblick. DGZIP Fachtagung Bauwerksdiagnose 2014. <http://www.ndt.net/article/bau-zfp2014/papers/vortrag%205.pdf>

Kaschmierzeck, K-D.: Experimentelle Untersuchungen zur Feuchtebestimmung in Beton: unter besonderer Beachtung der elektrischen Leitfähigkeit und der spektralen Verteilung vom Material rückgestreuter Cs-137 Gammaquanten. 1979.

Mouhasseb, H.: Bestimmung des Wassergehalts bei Beton mittels eines neuen dielektrischen Messverfahrens. Dissertation Universität Karlsruhe, 2007. [digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/359243](http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/359243)



## 9 ANHANG

### 9.1 Vorsimulationsstudie Einflüsse auf WUFI [18]

Im Rahmen der Masterarbeit Malz [18] wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, die zeigen soll, welche Parameter beträchtlichen Einfluss auf den Wassergehalt nehmen. Die untersuchten Eigenschaften sind:

Feuchtespeicherfunktion  
Wasseraufnahme  
Wasserverteilung  
Wärmeleitfähigkeit  
Porosität (als Parametermix)

Für die nachfolgenden Simulationen wurde der Modellaufbau des Simulationskörpers ebenfalls in Anlehnung an Kapitel 6.4 durchgeführt. An die „aktive“ Seite des Betons wurde das stationäre Klima von 15 °C und 80 % relativer Feuchte angelegt. Als Ausgangswert wurde eine Referenzsimulation für einen in WUFI hinterlegten Beton durchgeführt. Jeweils nach den definierten Zeitabständen (2 Wochen, 1 Jahr und 5 Jahre) wurde der Wassergehalt des Bauteils bezogen auf [kg/m<sup>3</sup>] betrachtet. Um den Einfluss einzelner Materialeigenschaften zu bestimmen, wurden diese modifiziert. Dies bedeutet, dass der quantitative Betrag der Eigenschaft, um einen Prozentsatz erhöht wurde. Dieser Prozentsatz lag bei 1 %, 2 %, 5 % und 10 %.

Zunächst wurde der Wassergehalt in Abhängigkeit der Feuchtespeicherfunktion untersucht. In Abbildung A17 sind die Ergebnisse für den simulierten Wassergehalt zu sehen. Bei der Berechnung „Feuchtespeicherfunktion +10 %“ beträgt der Anstieg des Gesamtwassergehaltes mehr als 3 kg/m<sup>3</sup> über den Zeitraum von 5 Jahren im Vergleich zur Referenzsimulation. Gleichzeitig lässt sich aus der Abbildung entnehmen, dass die Anstiege des Wassergehalts in etwa linear zum prozentualen Anstieg der Feuchtespeicherfunktion verlaufen.

Im Folgenden wurde die Wärmeleitfähigkeit verändert. Da deren Einwirkung auf den Wassergehalt, nach den Erkenntnissen der Literaturanalyse, als gering eingeschätzt wurde, wurden die Kenngrößen um mehr als 25 % erhöht. Die Änderung des Wassergehaltes des Bauteils beträgt über den Zeitraum von 5 Jahren weniger als 0,5 kg (vgl. Abbildung A18). Im Vergleich zur vorhergehenden Untersuchung fällt der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit deutlich geringer aus und bestätigt somit die Ergebnisse der Literatur.

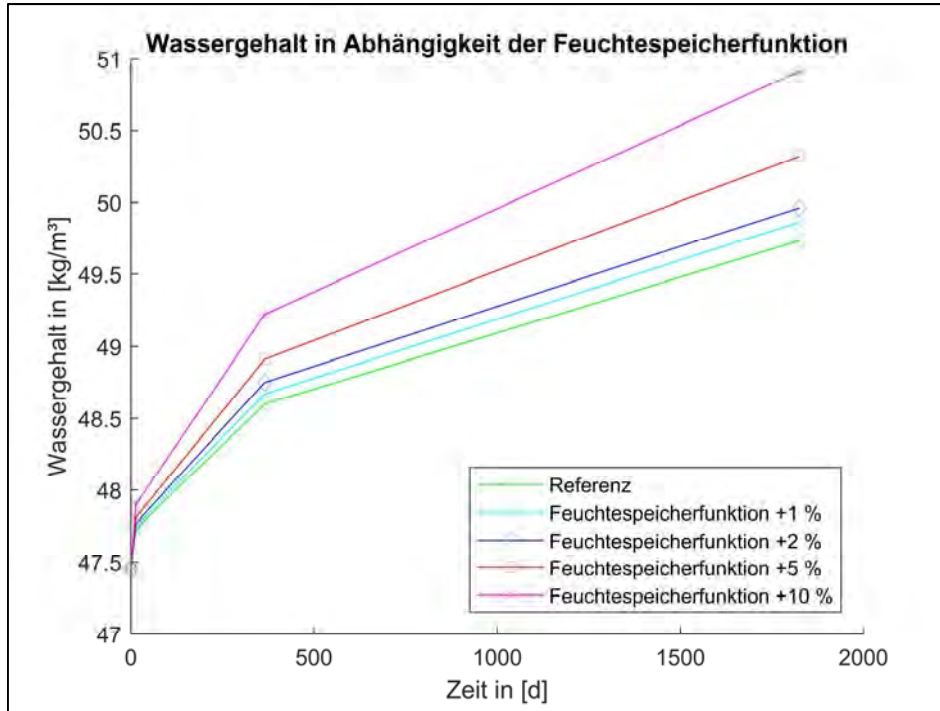


Abbildung A17 Wassergehalt in Abhängigkeit der Feuchtespeicherfunktion

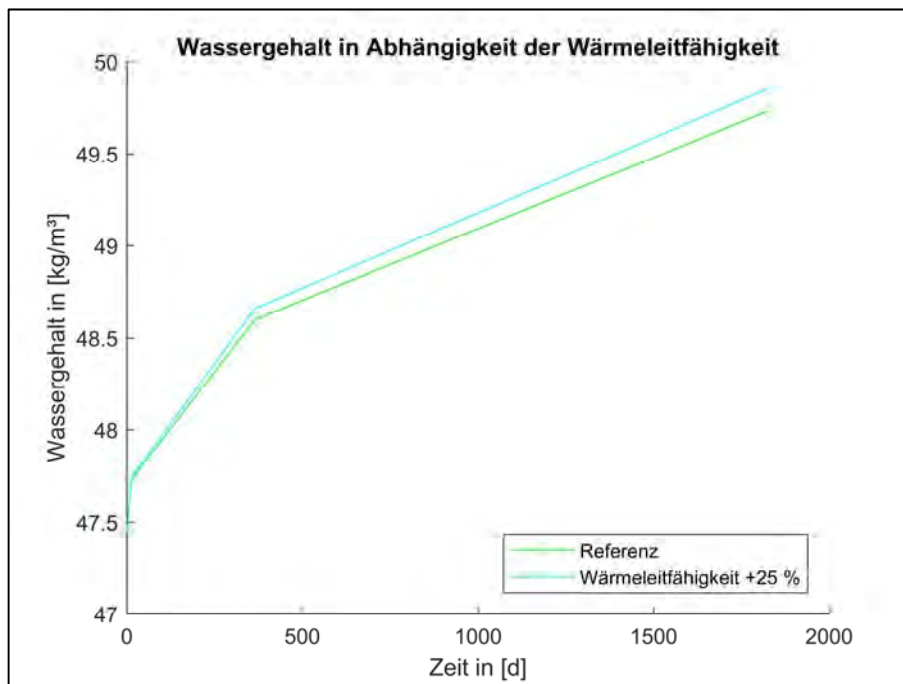
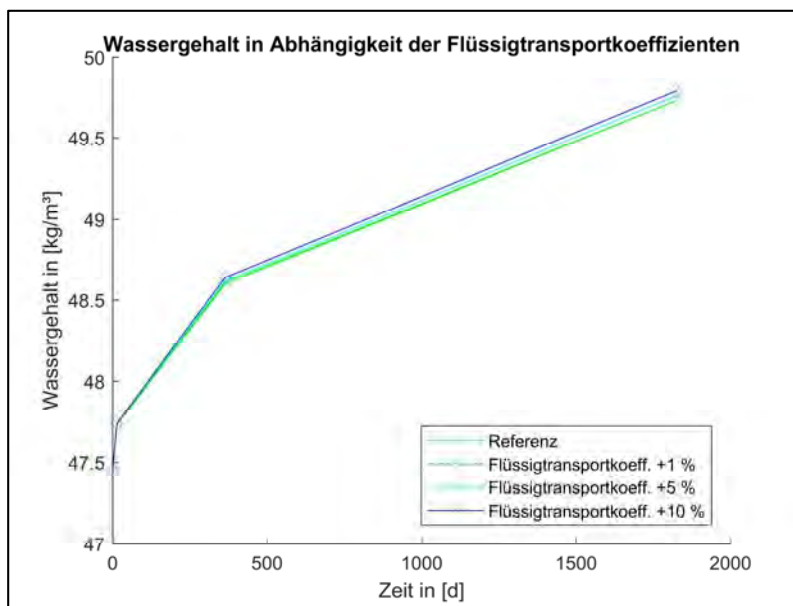


Abbildung A 18 Wassergehalt in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

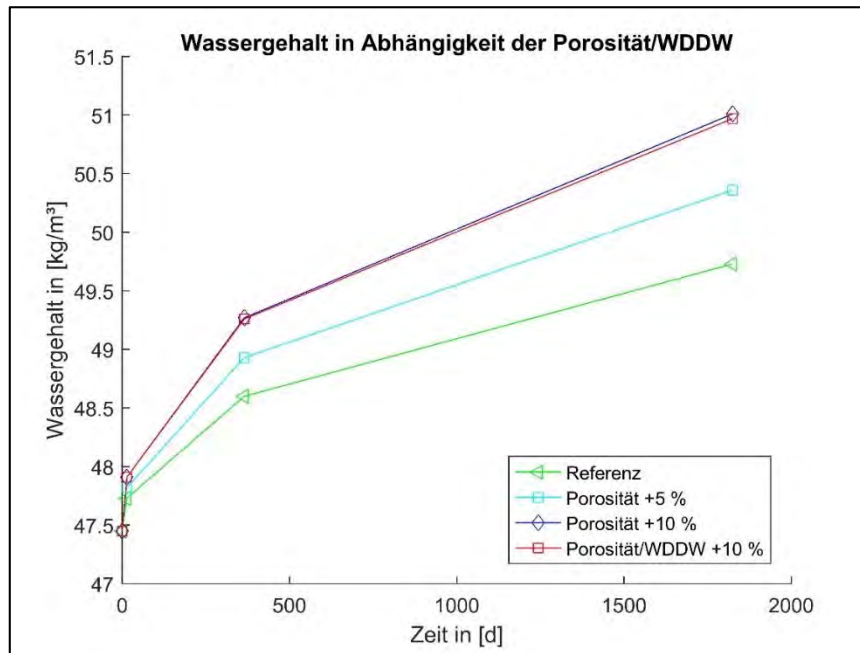
Die Aufnahme der von außen anliegenden Feuchte im Baustoff und wiederum deren Verteilung werden durch die Flüssigtransportkoeffizienten für Saugen und Weiterverteilung definiert. Wirken diese Eigenschaften, die überwiegend durch das Kapillarsystem des Baustoffs definiert werden, sich auf den Wassergehalt aus, so sollte der stationäre Zustand (Wassergehalt korrespondierend zu 80 % r.F.) schneller erreicht werden und nach dem Beobachtungszeitraum quantitative Auswirkungen erzeugen. In Abbildung A19 ist deutlich zu sehen, dass eine Veränderung der betrachteten Eigenschaften den Wassergehalt nach der vorgegebenen Zeit kaum verändert. Die Kennlinien für 1 %, 5 % und 10 % befinden sich nahe der Referenzsimulation. Eine alleinige Veränderung dieser beiden Materialcharakteristiken kann dadurch ebenfalls mit geringerer Priorität bemessen werden.



**Abbildung A19 Wassergehalt in Abhängigkeit der Flüssigtransportkoeffizienten**

Die Kenngröße der Porosität kann nicht direkt ins Simulationsprogramm übertragen werden. Die Simulation verwendet nur Kenngrößen, die aus der Anzahl an Poren und der Porengröße resultieren. Für eine Abbildung der Porosität in die numerische Berechnung wurden daher, unter der Annahme, dass alle „mehr“ Poren der gleichen Größenverteilung unterliegen sowie verteilter Lage entsprechen, die aus der Porosität resultierenden Parameter Flüssigtransportkoeffizienten, Wärmeleitfähigkeit und Feuchtespeicherfunktion zusammen entsprechend dem Prozentsatz erhöht. Der Parametermix Porosität bildet dabei realitätsnäher die Eigenschaftsänderungen in Tunneln ab.

Die Kennlinien in Abbildung A20 weisen Ähnlichkeiten mit den Kennlinien aus Abbildung A17 auf. Aus der Graphik kann ebenfalls eine Änderung des Wassergehaltes von mehr als 3 kg beobachtet werden. Aufgrund der Parallelen (vgl. lineare Anstieg zwischen den Prozentstufen) zwischen Parametermix und der Feuchtespeicherfunktion liegt nahe, dass überwiegend letztere für die resultierenden Ergebnisse verantwortlich ist.



**Abbildung A20 Wassergehalt in Abhängigkeit der Porosität/WDDW**

Der letzte Materialparameter, der Wasserdampfdiffusionswiderstand (WDDW), wurde in den Parameternmix eingefügt. Ebenfalls aus der Illustration A20 ist zu erkennen, dass der WDDW eine Änderung erwirkt, diese aber quantitativ etwa zur Feuchtespeicherfunktion gering ausfällt. Der höhere WDDW führt zu einer langsameren Feuchteaufnahme. Jedoch belaufen sich diese Änderung auf eine quantitative Reduktion des Wassergehaltes von weniger als 100 Gramm.

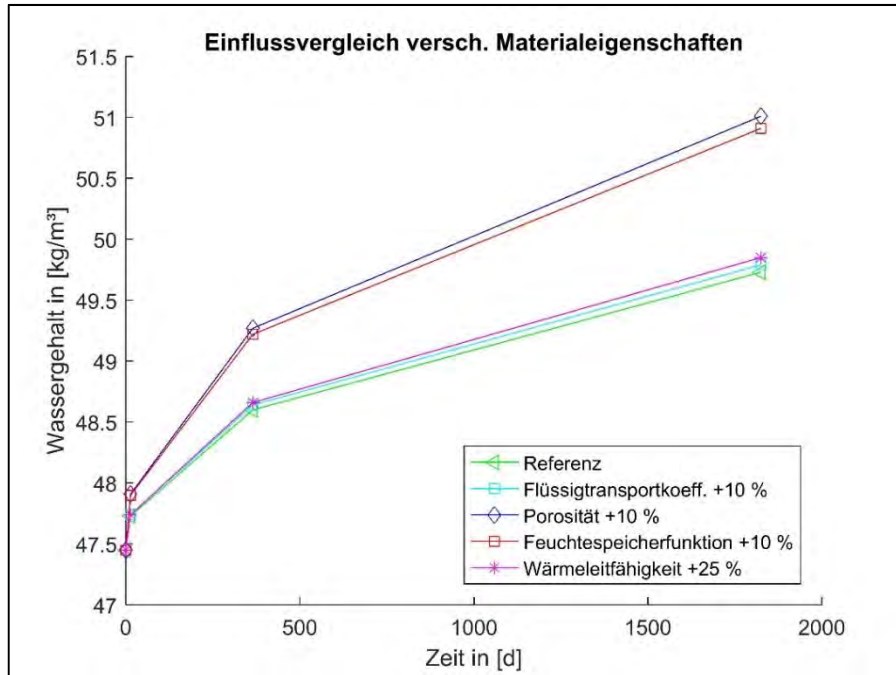
Im letzten Schritt werden die untersuchten Parameter gegenübergestellt. Der geringste Anstieg des Wassergehalts wird (nach Abbildung A21) von einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit erzielt. Auch die Veränderung der Flüssigtransportkoeffizienten führen zu keiner maßgeblichen Änderung des Wassergehalts. Vor allem bei der Feuchtespeicherfunktion lässt sich eine deutliche Erhöhung des Gesamtwassergehaltes erkennen. Die Kennlinie des Porositätmixes befindet sich nur leicht oberhalb der Feuchtespeicherung. Die Vermutung, dass die Feuchtespeicherfunktion daher als einflussreichste Eigenschaft gewertet werden kann, gilt somit als bestätigt.

Abseits der Feuchtespeicherfunktion nehmen alle weiteren Materialcharakteristiken ebenfalls Einfluss auf den Wassergehalt, jedoch führt die Summe aller anderen Parameter zu einem Wert der deutlich unter dem Effekt der Feuchtespeicherfunktion liegt. Für spätere Untersuchungen wird deshalb empfohlen ein besonderes Augenmerk auf die Feuchtespeicherfunktion zu legen, um den Messaufwand gering zu halten.

In einem weiteren Vorsimulationsdurchgang wurden die klimatischen Randbedingungen geändert. An die nicht-adiabate Oberfläche wurde nun ein zyklischer, realer Klimadatenatz angelegt. Der Klimadatenatz entspricht dem Außenklima der Stadt München. Auf den Probekörper wirkt sich dabei auch Schlagregen aus, der bei der Betrachtung von Tunneln nur in geringem Maße am Tunnelportal bzw. keine Auswirkungen in der Tunnelmitte hat. Die vorher untersuchten Parameter wurden unter den veränderten klimatischen Bedingungen erneut geprüft. Die Parameter der Porosität, der Porosität mit Wasserdampfdiffusionswiderstand und der Feuchtespeicherfunktion wirken sich in ähnlicher Weise und ähnlicher Stärke auf das Ergebnis aus, wie in der Simulation zuvor bestimmt wurde. Die

Berechnungsergebnisse zeigen eine deutliche Zurückhaltung von Wasser im Baustoff und hindern den Baustoff im Vergleich zu den Ausgangswerten an ca. 1,6 kg pro m<sup>3</sup> Wasserabgabe.

Aus der Voruntersuchung kann resümierend festgehalten werden, dass der größte Einfluss auf den Gesamtwassergehalt durch die Feuchtespeicherfunktion erwirkt wird. Eine doppelte prozentuale Änderung der Feuchtespeicherfunktion führt zu einer doppelten Änderung des mehr gespeicherten Wassers. Im Falle von instationären Randbedingungen wurden die Untersuchungsergebnisse bestätigt.



**Abbildung 13 Einflussvergleich verschiedener Materialeigenschaften**

## 9.2 Beispiele Sorptionsisothermen

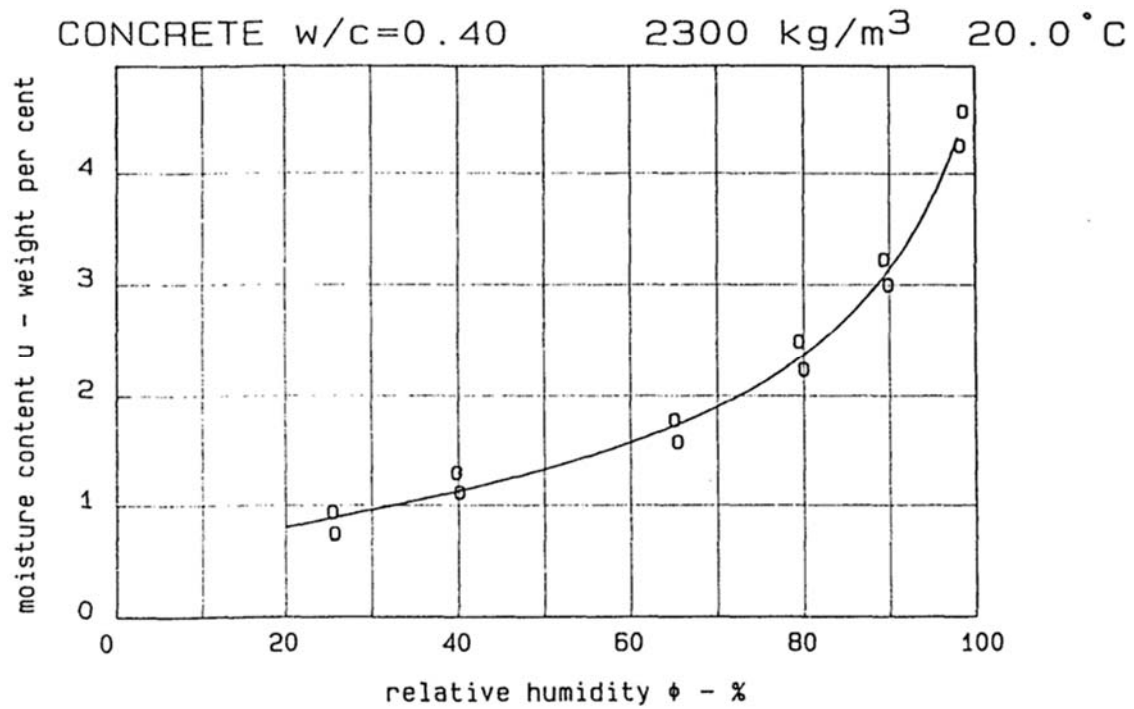
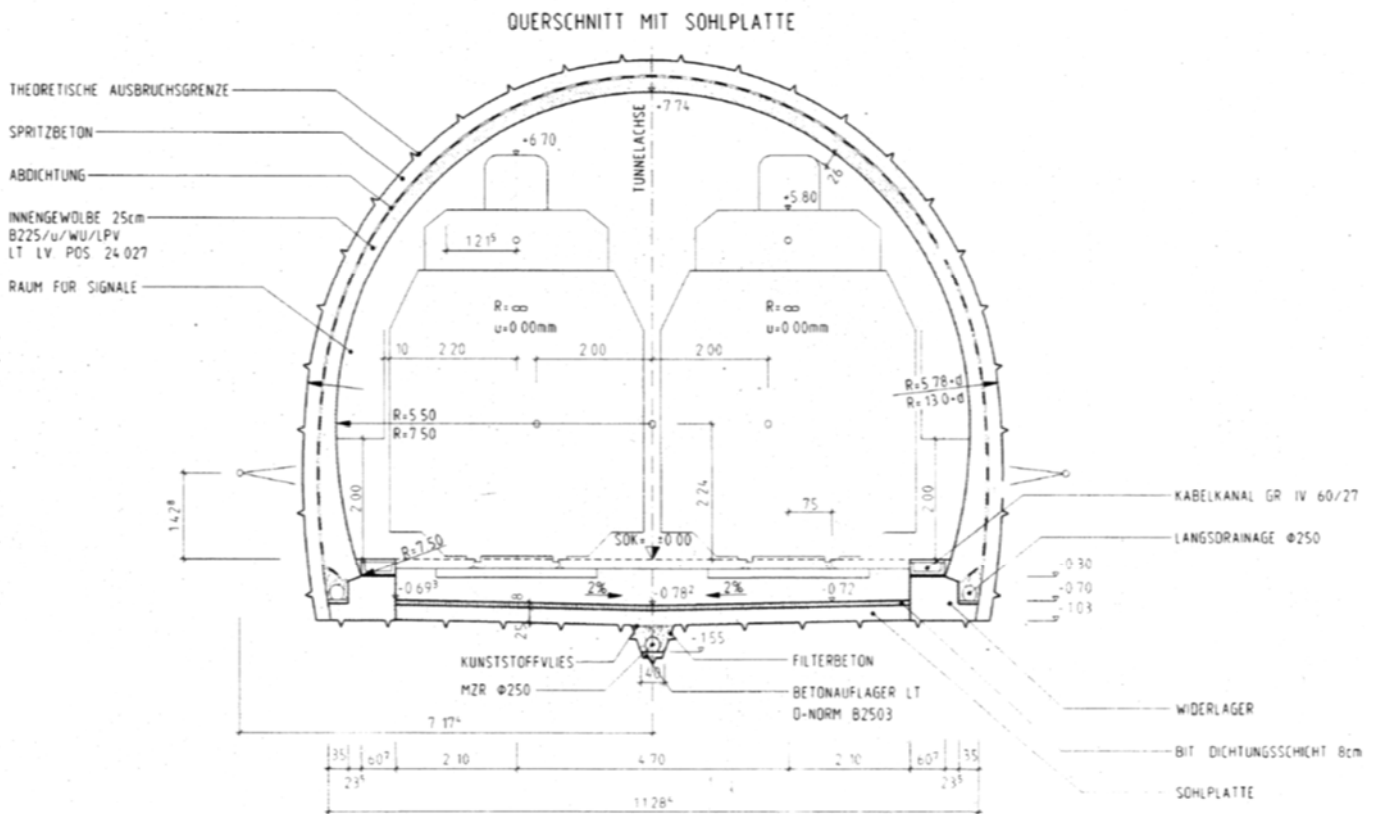


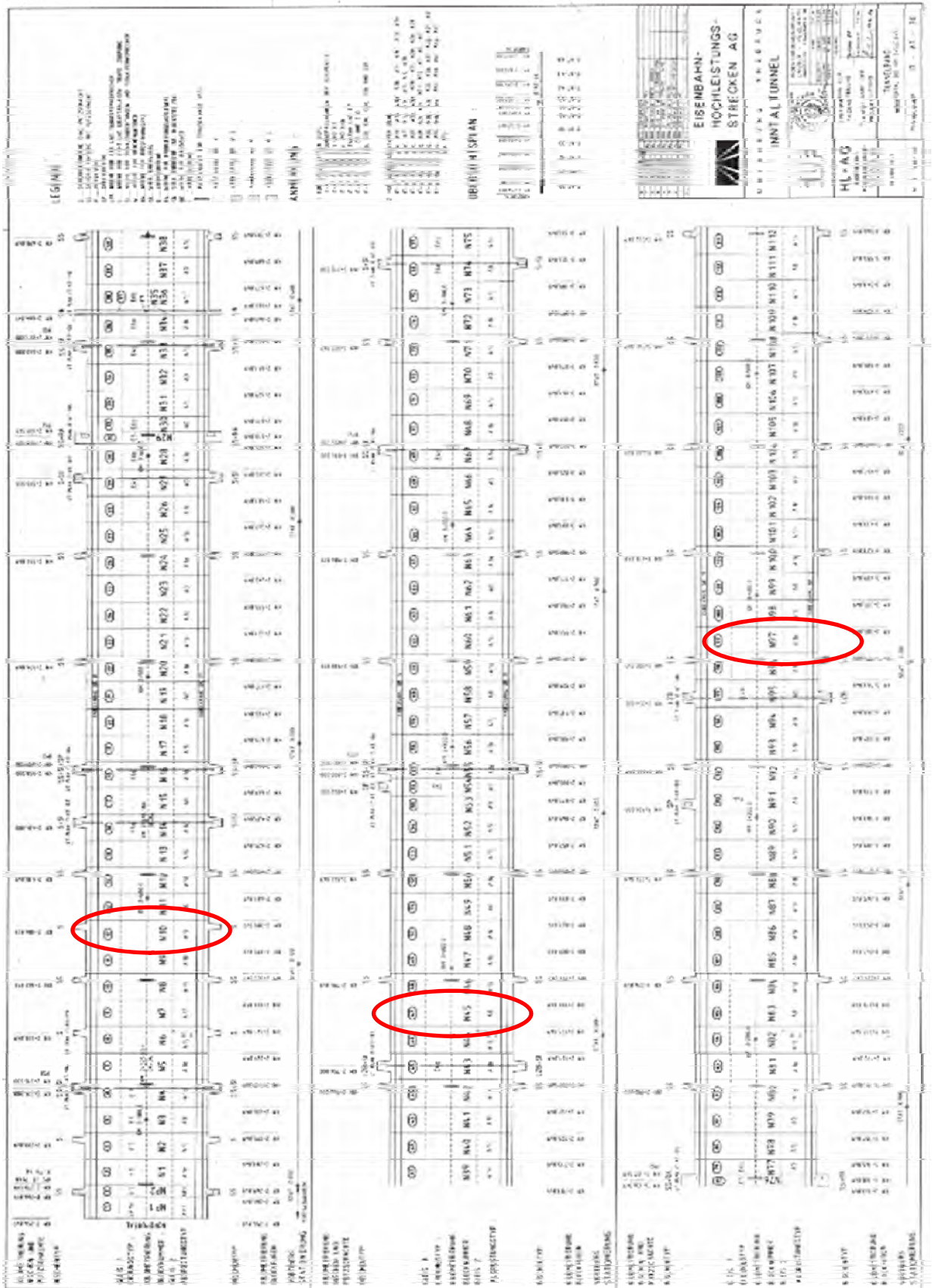
Abbildung A214:      Beton mit einem  $w/z$ -Wert von 0,40 und einer Dichte von  $2300 \text{ kg/m}^3$   
 [111]

Weitere Sorptionsisothermen aus [111] sind im Anhang von [2] wiedergegeben.

### 9.3 Tunnelquerschnitte und Lage der Sensoren [18]

#### Inntaltunnel Nordseite







Block 10



Block 45



11

Block 10



18

Block 45 - oben



Block 45 - unten



19

Block 97 - oben

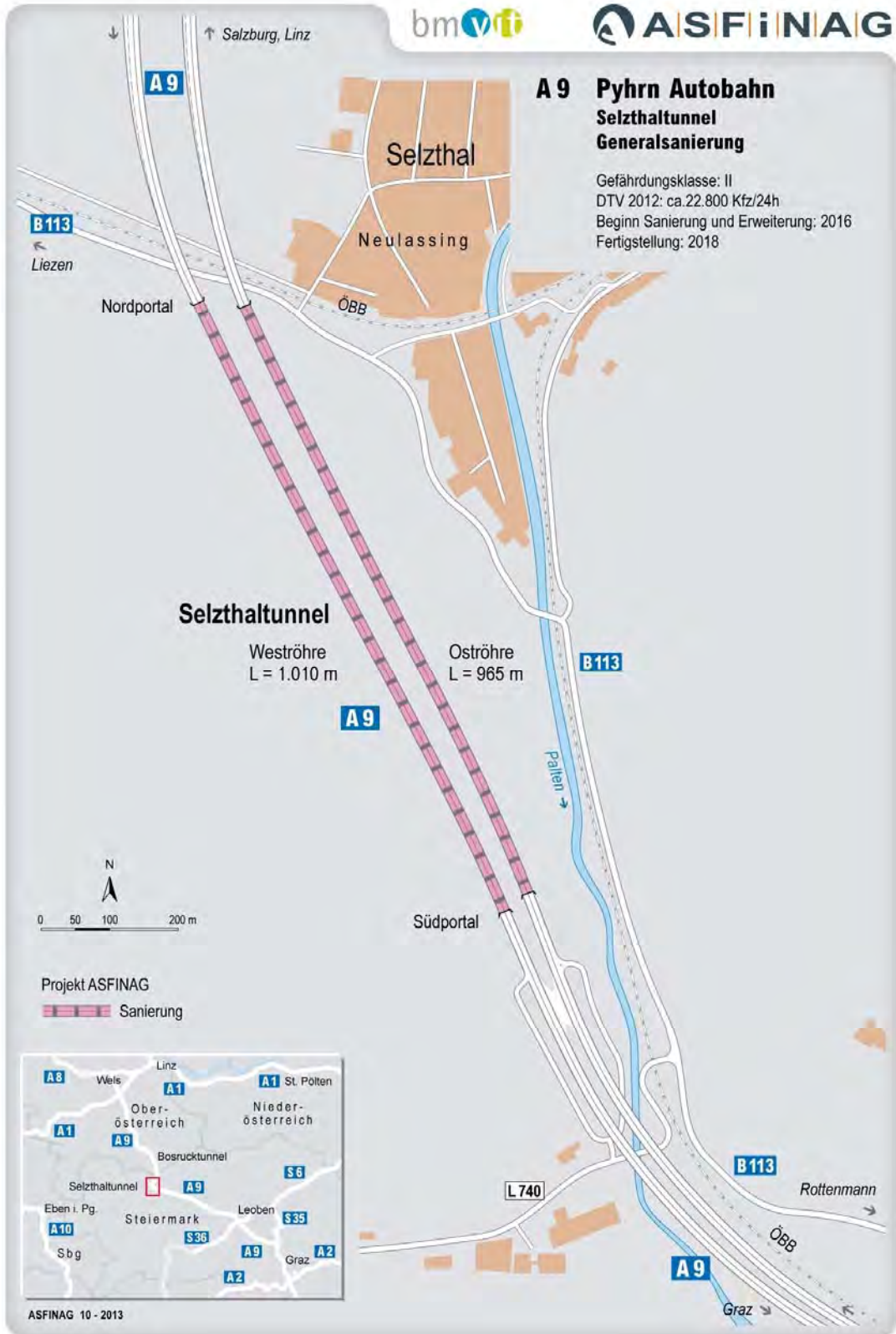


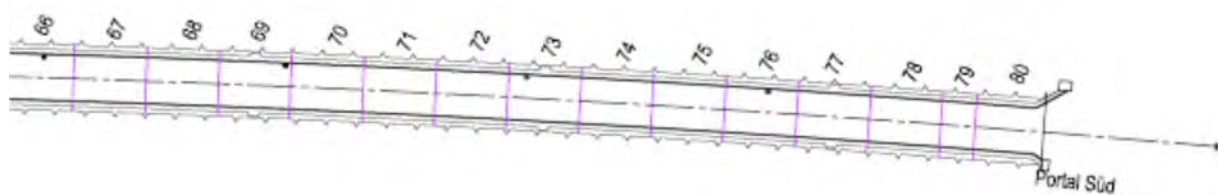
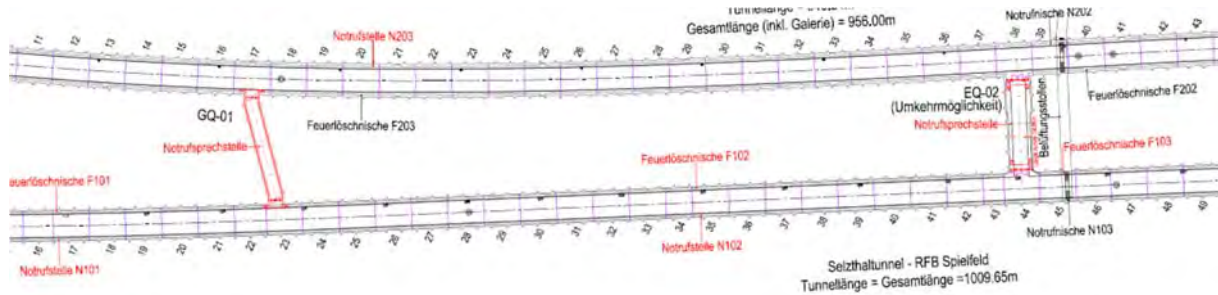
20

Block 97 - unten

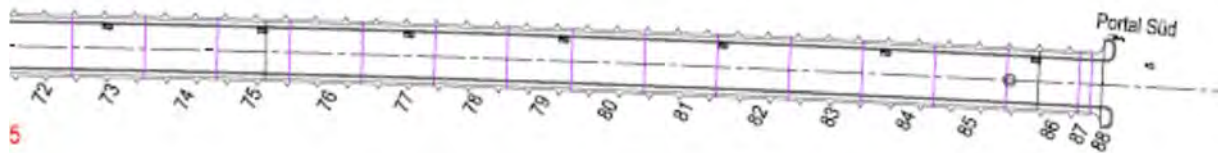








105



5

Zwischenbericht

Nord



Unten an Grenze zu Beschichtung, abgeschliffen 3,6,9 darüber

40 m 480 m



Unten an Grenze zu Beschichtung, abgeschliffen 3,6,9 darüber

125 m 330 m  
Über Horizontalriss

Süd



Unten beschädigte Tunnel Beschichtung

425 m 75 m



Block 74

28

Block 74



29

Block 42



31

Block 42



32

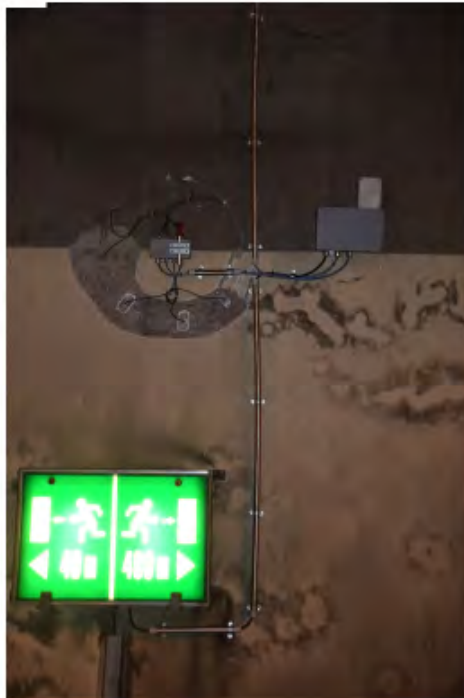


Block 11



33

Block 11



34

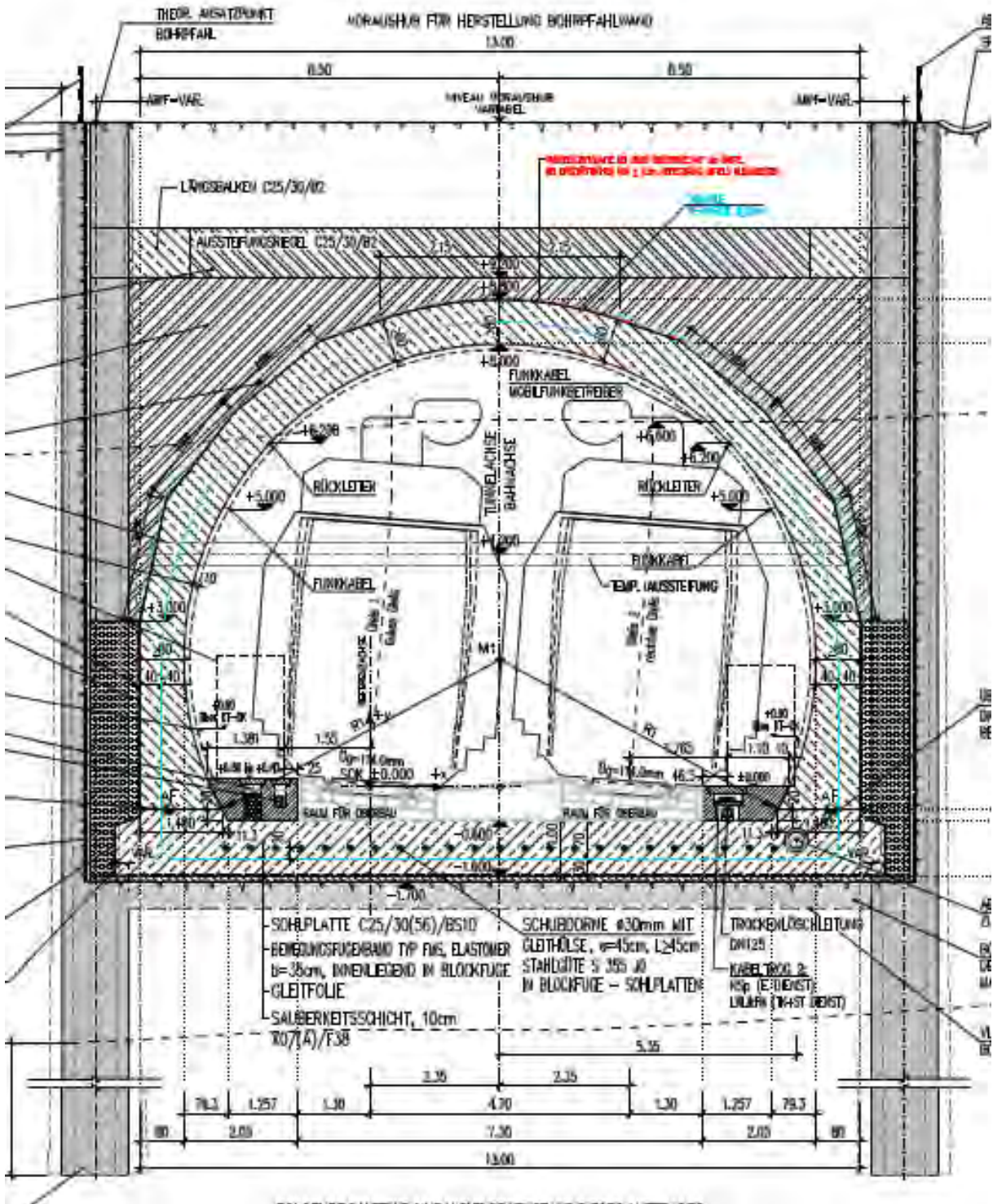
Salzgehalte Tunnel Selzthal Uni Ibk

**Tabelle A1 Chloridanalysen Tunnel Selzthal, Durchführung Uni Innsbruck  
 Bohrmehlentnahme 17.8. 2017**

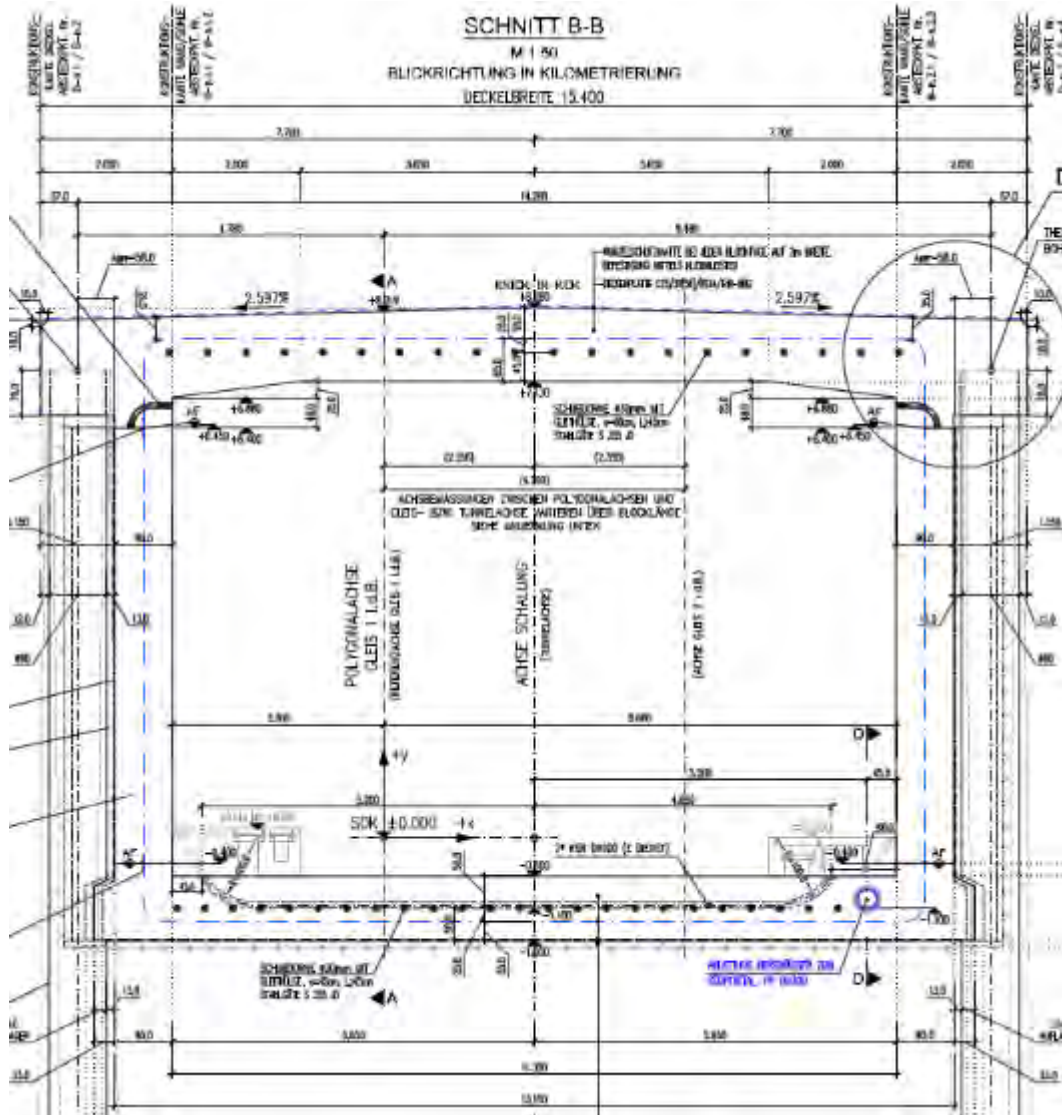
Nach einem Jahr freigelegte Tunnelbeschichtung, neben unteren Fühlern

Block	Zustand Beschichtung	NR	Tiefe cm	Chlorid auf Beton %	Chlorid auf Zement %
74	Zerstört, Ablösungen	1	0-2	0,57	>3,00
74	Zerstört, Ablösungen	2	2-4	0,45	>3,00
74	Zerstört, Ablösungen	3	4-6	0,11	1,06
42	intakt	4	0-2	0,21	2,38
42	intakt	5	2-4	<0,01	<0,15
42	intakt	6	4-6	<0,01	<0,15
11	intakt	7	0-2	0,31	>3,00
11	intakt	8	2-4	0,05	0,68
11	intakt	9	4-6	<0,01	<0,12
11 oberh.	Keine vorhanden	10	0-2	0,24	2,83

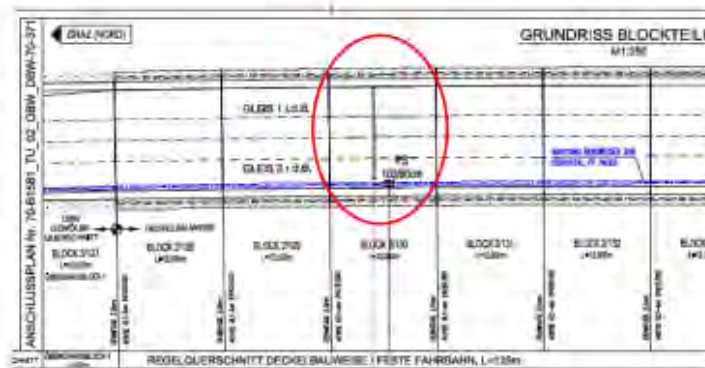
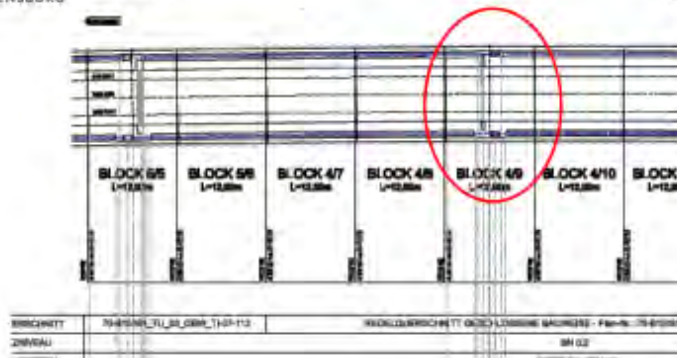
Hengsbergtunnel (offene Bauweise)



Hengsbergtunnel (offene Bauweise, Kastenquerschnitt)









Block 9 unten



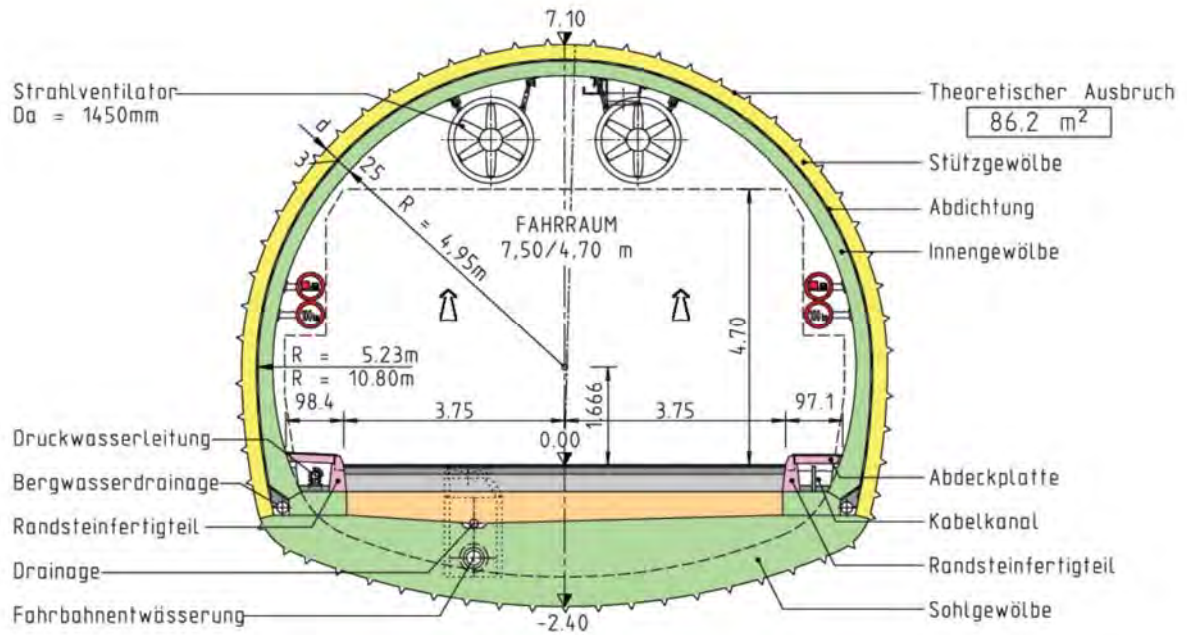
52



53



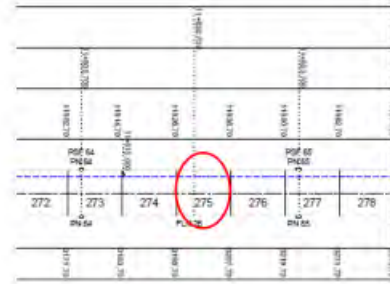
## Tunnel Strengen



## Querschnitt Tunnel Strengen



## Tunnelportal Strengen West Südröhre



57

**Tunnel Strengen**

Messquerschnitt Block 20, FLN 2. Untere Messstelle im Bereich intakter Tunnelbeschichtung



61



62

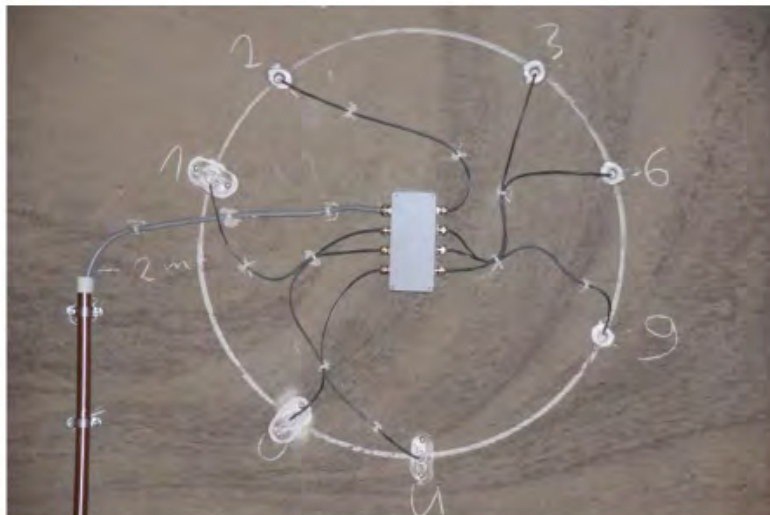


FLN 26

63



64



65

## 9.4 Bohrkerne

Inntal

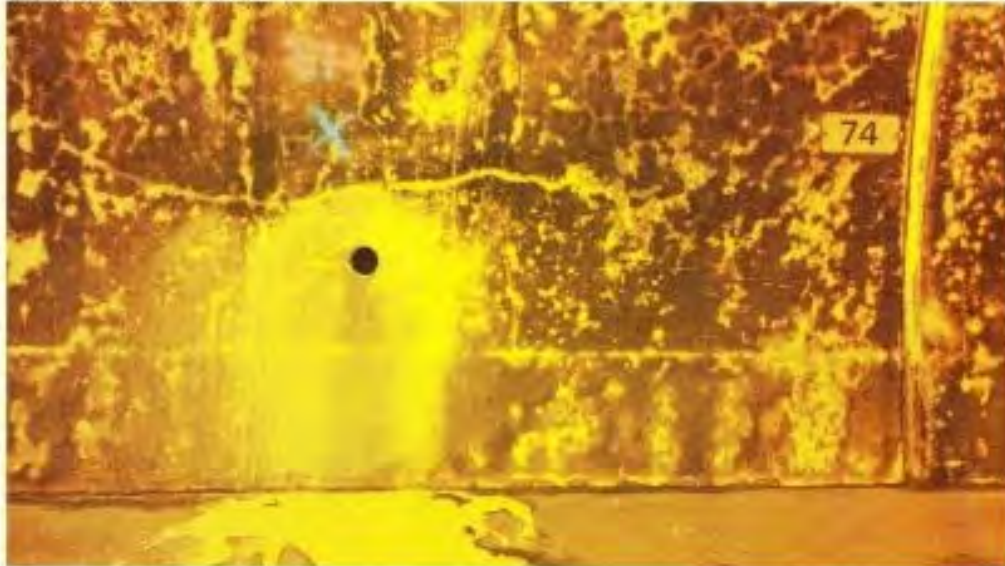




## Selzthal

Bohrkernentnahme SETU (Projekt Betonfeuchtemessung) vom 26.07.2016 durch Prüfbau

Bohrkern NR: 1 = Block Nr: 74



Bohrkern NR: 2 = Block Nr: 42







## 9.5 Hygrische und thermische Daten aller Tunnel

Inntal

Hengsberg

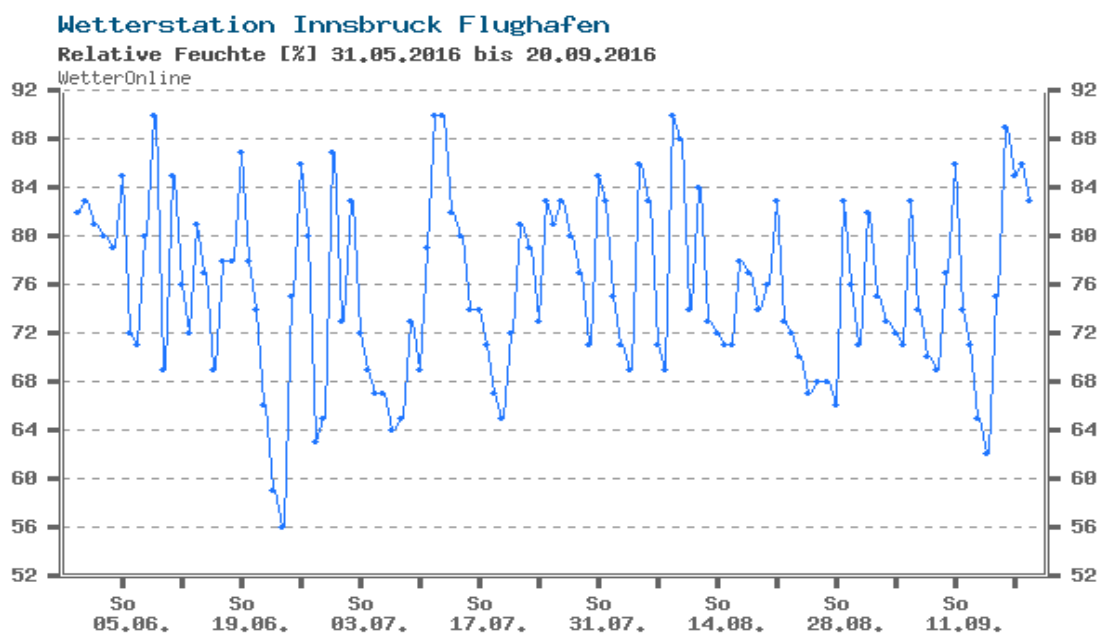
Selzthal

Strengen

## 9.6 Wetterdaten der nächsten Wetterstation zu den jeweiligen Tunnels

In den Abbildungen A64 bis A66 sind die Aufzeichnungen der Wetterstation am Flughafen Innsbruck im Messzeitraum vom 31.05.2016 bis 20.09.2016 aufgeführt. Angegeben sind die rel. Luftfeuchte und die Tageshöchst- und Tagestiefsttemperaturen.

**Die Daten werden für alle Tunnels aktualisiert**

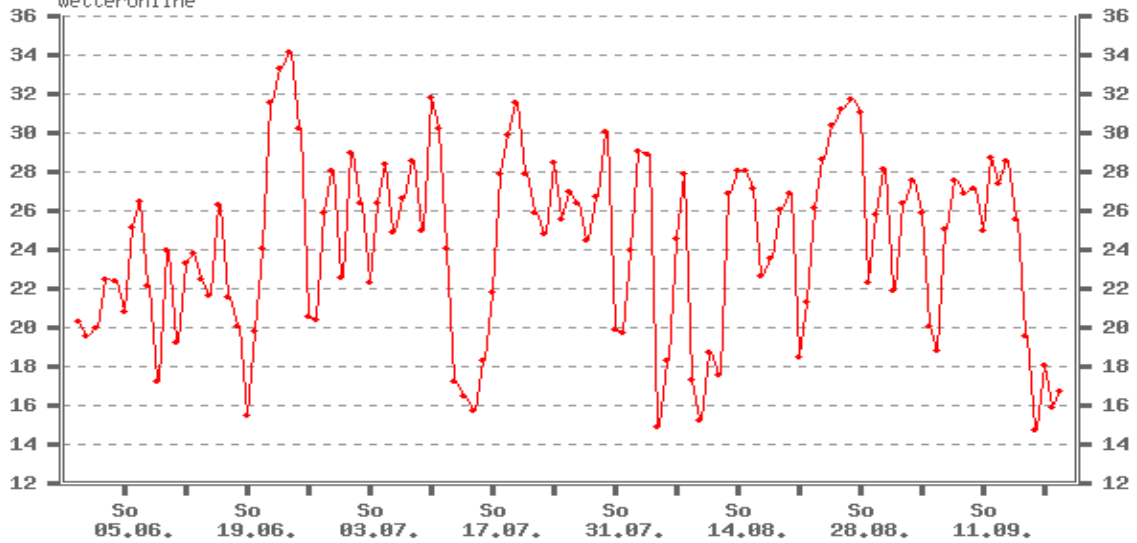


**Abbildung A15: Aufzeichnungen Wetterstation Innsbruck Flughafen rel. Luftfeuchte 31.05.2016-30.09.2016 aus [112]**

**Wetterstation Innsbruck Flughafen**

Höchsttemperatur [°C] 31.05.2016 bis 20.09.2016

WetterOnline

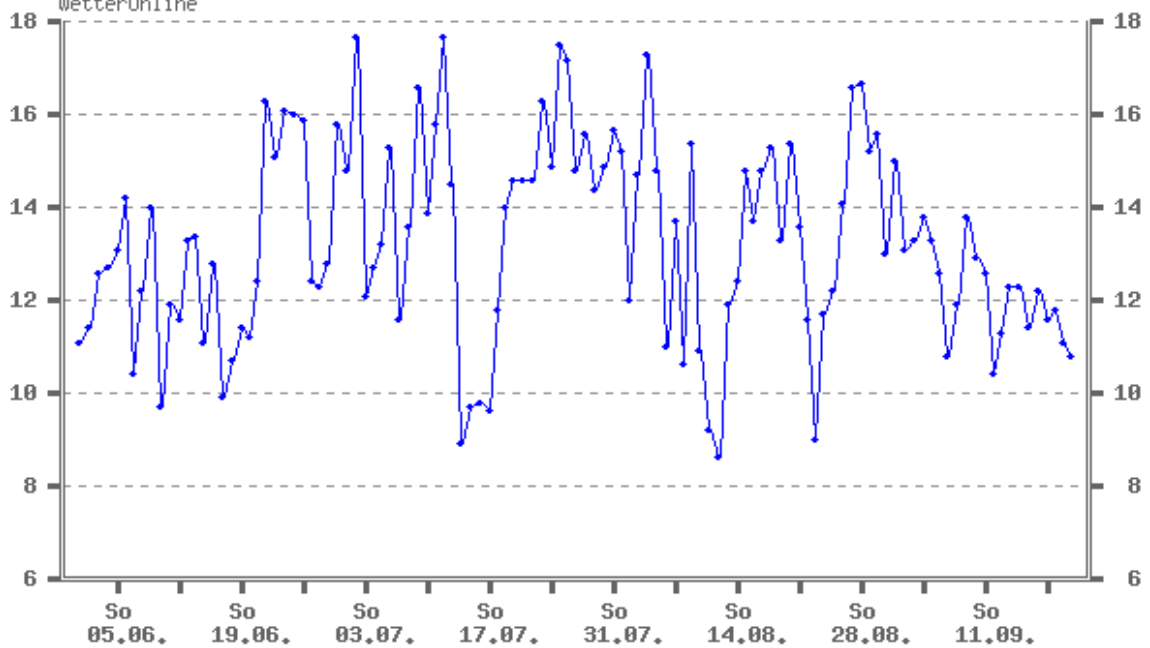


**Abbildung A16: Aufzeichnungen Wetterstation Innsbruck Flughafen Tageshöchsttemperaturen 31.05.2016-20.09.2016 aus [112]**

**Wetterstation Innsbruck Flughafen**

Nächtl. Tiefsttemperatur [°C] 01.06.2016 bis 21.09.2016

WetterOnline



**Abbildung A17: Aufzeichnungen Wetterstation Innsbruck Flughafen Tagestiefsttemperaturen 31.05.2016-20.09.2016 aus [112]**

## 9.7 Unkalibrierte Feuchteverläufe der Probekörper B1 bis B3 [98]

### Vorgeschichte der Probekörper

Die im Folgenden dargestellten Balken B1 bis B3 stammen alle aus der Serie V1 (Rezept vgl. Kapitel 5.9). Die Balken wurden am 11.11.2015 betoniert und am darauf folgenden Tag ausgeschalt. Danach wurden die Balken 99 Tage wassergelagert und dann in die Klimakammer eingebracht. Somit befanden sich die Balken ab der letzten Februarwoche 2016 in der Klimakammer. Die Klimarandbedingungen in der Klimakammer ab diesem Zeitpunkt betragen 70 % RH und 20 ° C [92]. In dieser Arbeit wurden am 21.04.2016 ein neuer Versuch mit veränderten Bedingungen in der Klimakammer gestartet, der im Folgenden ausgewertet wird.

### Versuchsdurchführung:

- bis 21.04.2016: Versuchweiterführung aus der Bachelorarbeit A. Inal und C. Schmidmeier [92]
- ab dem 21.04.2016: Einbau 2. Sensorgeneration und Änderung der Klimaparameter der Versuchskammer

Die Auswertung erfolgte über den gesamten Prüfzeitraum vom 08.04.2016 bis zum 29.08.2016 durch kontinuierlich ausgelesene Messungen. Die Kurven der einzelnen Sensoren sind farblich nach Tiefe getrennt (jeweilige kann zu jedem Diagramm anhand Abbildungen 24, 26 und 28 entnommen werden). Die Bezeichnungen der Balken sind 2.1.2 *Probenherstellung* zu entnehmen. Die Rezepte finden sich in [92]. Die IST-Temperatur und die IST-Feuchte in der Klimakammer wurde von Sensor 7 aufgezeichnet und in jedes Diagramm eingefügt. Die Diagramme sind in den Abbildungen A67, A68 und A69 dargestellt.

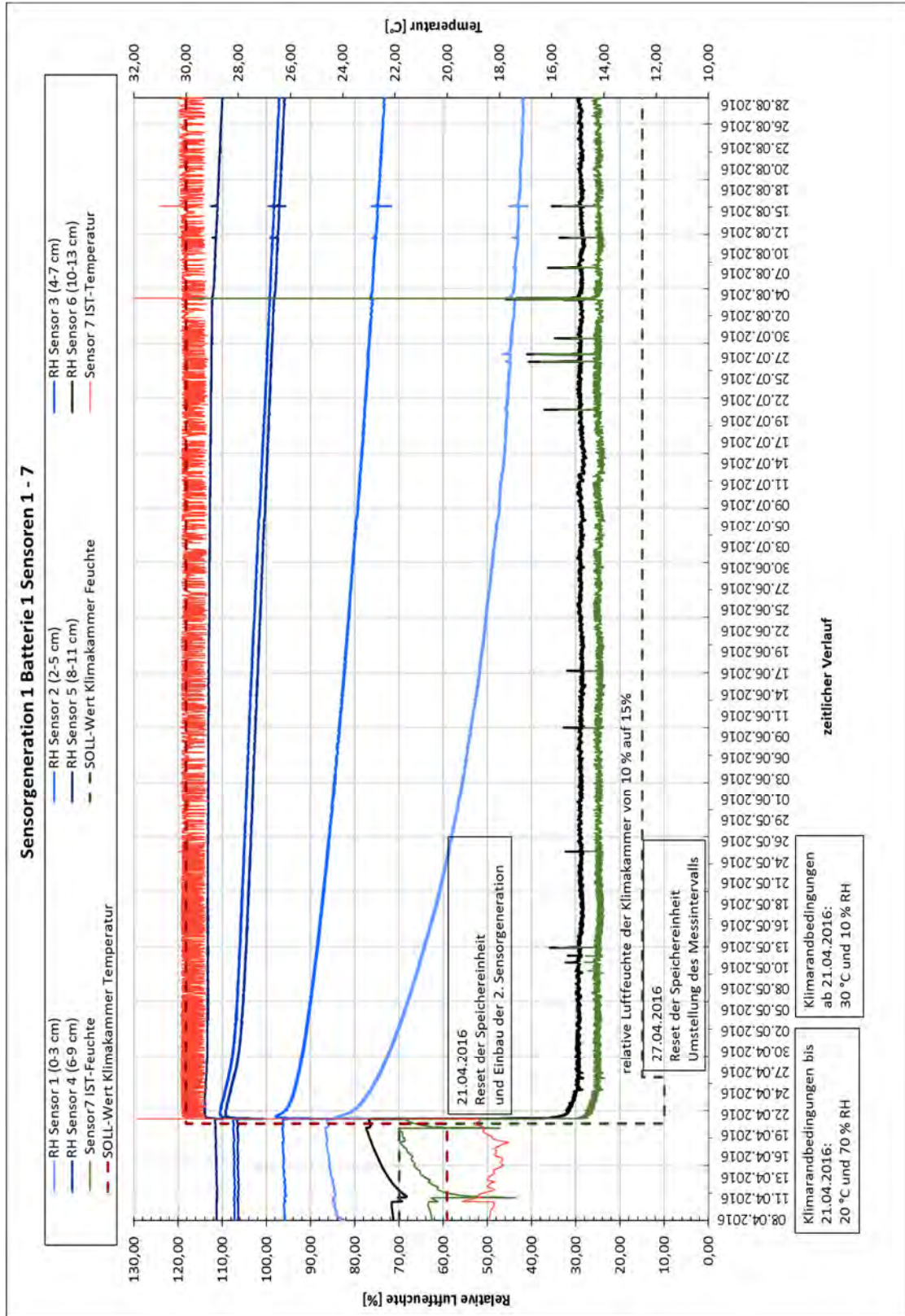


Abbildung A67: Versuchsbalken B1 Temperatur- und Feuchteverlauf

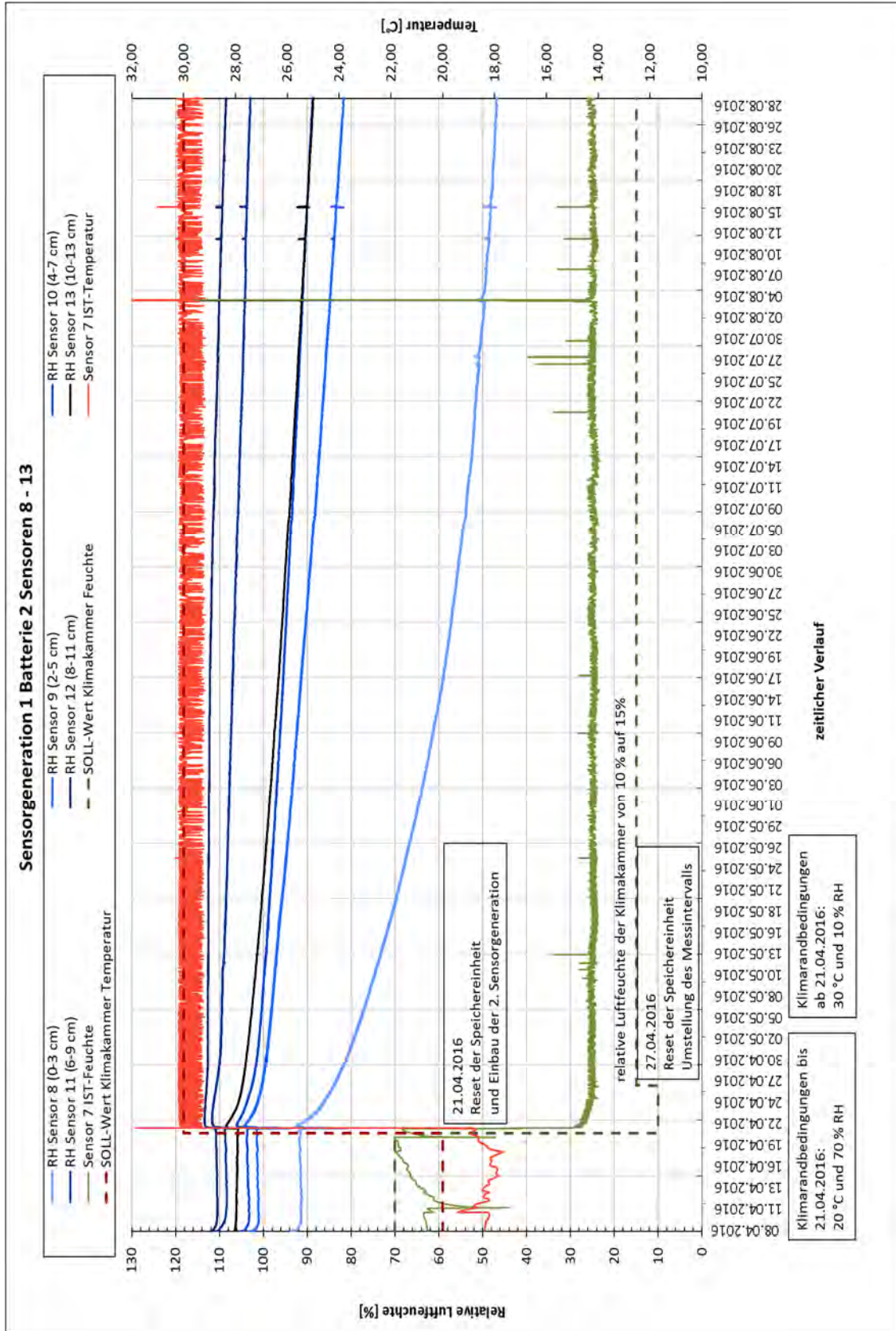


Abbildung A68: Versuchsbalken B2 Temperatur- und Feuchteverlauf

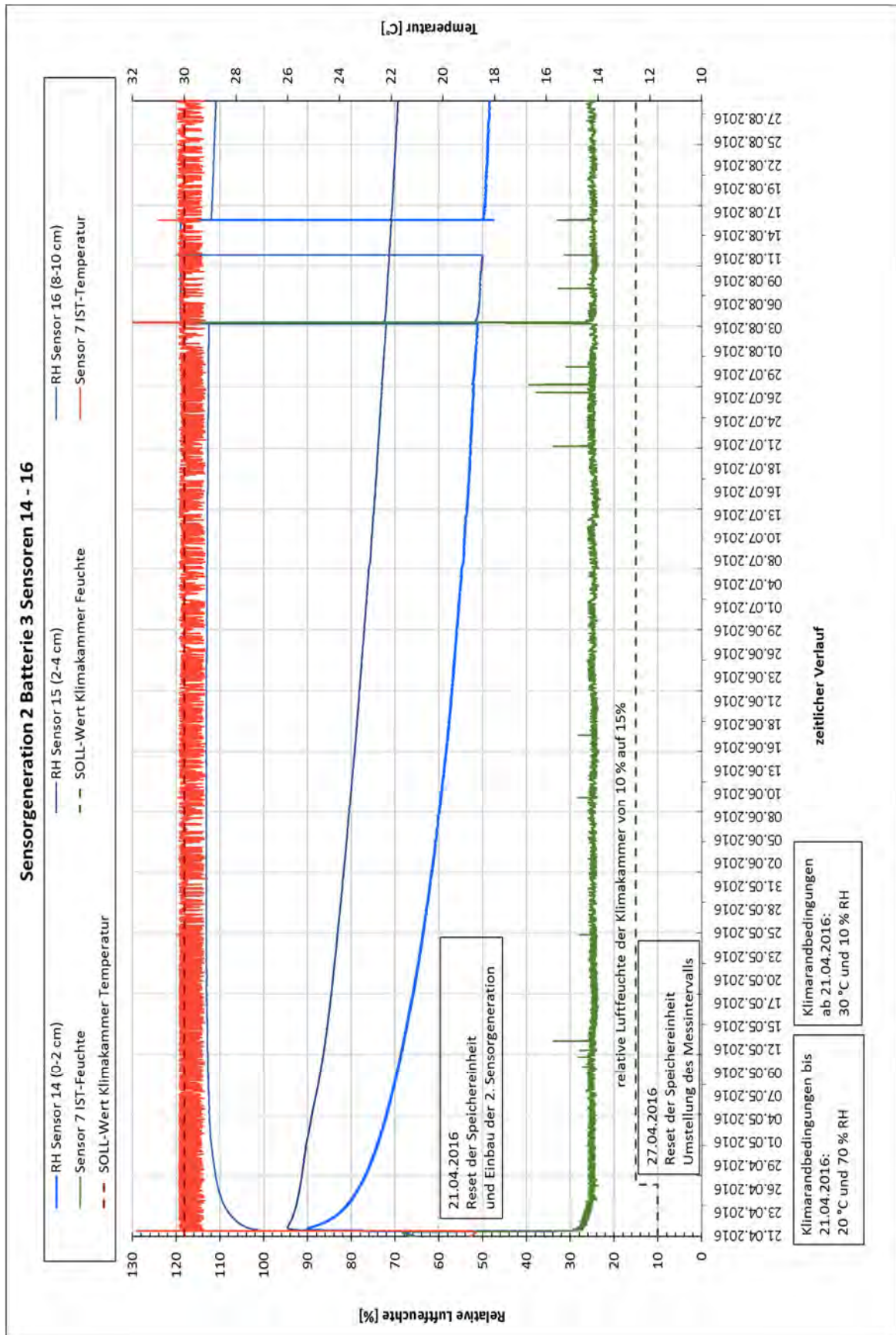


Abbildung A6B: Versuchsbalken B3 Temperatur- und Feuchteverlauf

Vorversuche an 2 Balken finden sich auch in [92]