



**Nürnberg,  
Zeppelintribüne:**  
Entwicklung eines  
minimalinvasiven  
Messsystems  
zur kontinuierlichen  
Überwachung  
anthropogen  
induzierter  
Feuchteschäden  
im Mauerwerk

Abschlussbericht gefördert unter dem Az: 33432/01  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Nürnberg, September 2020

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Bilder .....	5
Verzeichnis der Tabellen .....	9
Verzeichnis der Begriffe und Abkürzungen.....	10
1 Zusammenfassung.....	11
2 Anlass und Zielsetzung .....	14
3 Arbeitsschritte und Ergebnisse.....	23
3.1 Bestandsaufnahme und labortechnische Untersuchungen der TDR-Sonden und des Probenmaterials .....	23
3.1.1 Bestandsaufnahme zur Analyse und Bewertung der feuchtebedingten Substanzschädigung durch Umwelteinwirkungen .....	23
3.2 Entwicklung problemangepasster TDR-Sonden; Hardwareerweiterung für TDR-Vielstellenmesssystem und Softwarealgorithmen zur Erfassung, Auswertung und Bewertung der Messdaten .....	28
3.2.1 Sondenentwicklung.....	29
3.2.2 Sondeninstallation.....	32
3.2.3 Entwicklung einer PC-Software für Kalibrierversuche.....	35
3.2.4 Weiterentwicklung der Sonde für kleinere Bohrlochdurchmesser .....	36
3.2.5 Entwicklung des Labormesssystems.....	40
3.2.6 Fazit.....	40
3.3 Bewertung der TDR-Sondensignale - Kalibrierung und Abgleich.....	41
3.3.1 Labortechnische Untersuchungen zur Bewertung der TDR-Signale.....	41
3.3.2 Gegenüberstellung und Bewertung der Messdaten am Bauwerk .....	50
3.3.3 Fazit.....	54
3.4 Entwicklung von Simulationsmodellen zur Bewertung anthropogen induzierter Einflüsse .....	55
3.5 Entwicklung, Erprobung und Optimierung der Regelstrategie für minimalinvasive Lüftungssysteme.....	61
3.5.1 Entwicklung und Umsetzung einer denkmalgerechten an die Problemstellung der Zeppelintribüne angepassten Regelstrategie unter Berücksichtigung aller klimatischen und materialtechnischen Randbedingungen .....	64
3.5.2 Erprobungen des Anlagenbetriebs unter kontinuierlicher Datenerfassung .....	64
3.5.3 Messergebnisse.....	66
4 Fazit.....	73
5 Literaturverzeichnis .....	75
6 Anhänge .....	76

## Verzeichnis der Bilder

Bild 1: Reichsparteitagsgelände 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie).....	16
Bild 2: Zeppelintribüne 1937 („Moderne Bauformen“ Heft 4/1938).....	17
Bild 3: Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg) .....	18
Bild 4: Zeppelfeld und -tribüne 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie) - die Tribüne gliedert sich in den Mittelbau a und die beiden Seitenflügel b.....	19
Bild 5: Blick in einen Teil Toilettenanlage der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg) .....	20
Bild 6: Materialverlust im Außenbereich der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg) .....	20
Bild 7: Außenansicht der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg).....	20
Bild 8: Zeppelintribüne und -türme - Musterflächen 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie).....	21
Bild 9: Entnahmestellen der Bohrkerne im konditionierten Bereich - Aufbau der Bohrkerne.....	25
Bild 10: Entnahmestelle des Bohrkerns im nicht konditionierten Bereich .....	26
Bild 11: Numerische Feldsimulation von Sondenelektroden (elektrisches Feld) .....	29
Bild 12: Nahaufnahme der Kupferelektroden .....	30
Bild 13: Segmentierte Sonde mit 8 Elektrodengruppen.....	30
Bild 14: Sonde mit Isolierung .....	30
Bild 15: Fräsvorrichtung zum Schlitzten der Rohrkörper .....	31
Bild 16: Ausputzen der Bohrlöcher .....	32
Bild 17: Ausblasen mit Druckluft .....	32
Bild 18: Eingeführter Druckluftschlauch .....	33
Bild 19: Einführung der Sonde in das Bohrloch .....	33
Bild 20: Einschlagen des Spannprofils.....	33
Bild 21: Auftragen von Gleitmittel auf das Spannprofil .....	33
Bild 22: Einbauzustand nach der Verklemmung .....	33
Bild 23: Prinzip der Verklemmungstechnik.....	33
Bild 24: Verkabelung des Multiplexers .....	34
Bild 25: Ansicht Messsystem am Mauerwerk.....	34
Bild 26: Aufbau des Gesamtsystems (Blockbild).....	35
Bild 27: Blockschaltbild der Elektronik .....	35

Bild 28: PC-Software für Kalibrierversuche.....	36
Bild 29: Längs geschlitztes Kunststoffrohr.....	36
Bild 30: Skizze der dünnen Rohrsonde vor und nach der Verklebung.....	37
Bild 31: Fräse zum Schlitzten und Nuten der dünnen Rohrsonde.....	37
Bild 32: TDR Messelektronik nach dem analogen Rampenverfahren.....	37
Bild 33: TDR Reflexionsmuster einer am Ende offenen Leitung.....	38
Bild 34: Optimierte TDR Messelektronik.....	38
Bild 35: TDR Kurve bei inhomogener Feuchteverteilung: der Peak nach unten zeigt eine feuchte Stelle an.....	39
Bild 36: Elektronik für das Labormesssystem.....	40
Bild 37: Einzelelektroden und Messelektronik.....	40
Bild 38: Fixierung der Elektroden um einen Zylinder.....	40
Bild 39: TDR-Messwerte bei max. Wassergehalt aus Bestimmung der Eigenfeuchte.....	43
Bild 40: TDR-Signal ohne Probenmaterial in Luft und in Wasser.....	44
Bild 41: Schwankungsbreite der Einzelmessungen der TDR-Signalwerte in Luft und im Wasser.....	44
Bild 42: Minimale und maximale Messwerte an getrockneten Bohrkernen aus Beton.....	45
Bild 43: Minimale und maximale Messwerte an wassergesättigten Bohrkernen aus Beton...	46
Bild 44: Messbereiche Betonprobenmaterial - ofentrocken bis wassergesättigt.....	47
Bild 45: Versuchsaufbau im Labor (Lagerung von Proben in Boxen mit unterschiedlichen relativen Feuchten bei 75, 93 und 99 % r. F.).....	48
Bild 46: Blick in eine Lagerbox mit TDR-Sonde: Probe über einer gesättigten NaCl-Lösung (75 % r. F.).....	48
Bild 47: Erste Ergebnisse zum TDR-Signalverlauf einer sich an den Feuchteausgleichszustand anpassenden Betonprobe.....	48
Bild 48: Messbereiche Ziegelprobenmaterial - ofentrocken bis wassergesättigt.....	49
Bild 49: TDR-Sonde in Position #2 (Bohrkern I im Ziegelmauerwerk des OGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne.....	51
Bild 50: TDR-Sonde in Position #3 (Bohrkern II im Ziegelmauerwerk des OGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne.....	52
Bild 51: TDR-Sonde in Position #1 (Bohrkern III in der Betonwand des EGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne.....	53

Bild 52: TDR-Sonde in Position #4 (Bohrkern IV in der Betonwand des EGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im nichtkonditionierten Bereich der Zeppelintribüne .....	54
Bild 53: Simulationsmodelle - Bohrkerne (zwei Materialien) .....	56
Bild 54: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 0–12 cm (Sonde Nr. 1) - Beton .....	58
Bild 55: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 49–61 cm (Sonde Nr. 5) - Beton .....	58
Bild 56: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 0–12 cm (Sonde Nr. 1) - Ziegel .....	59
Bild 57: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 49–61 cm (Sonde Nr. 5) - Ziegel .....	60
Bild 58: Zeppelintribüne - Messpositionen Raumklima und Oberflächentemperaturen ab März 2014 .....	61
Bild 59: Prinzipskizze der Feuchtequellen und Feuchtesenken vor der Instandsetzung .....	62
Bild 60: Prinzipskizze Feuchtequellen und Feuchtesenken nach der Instandsetzung .....	63
Bild 61: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchten, der Außenlufttemperatur und der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage .....	65
Bild 62: M-Bus-Sensor für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte .....	66
Bild 63: Schnitt durch den Mustersanierungsbereich und den unsanierten Referenzbereich mit der Lage der Sensoren .....	66
Bild 64: Horizontalschnitt durch den Mustersanierungsbereich und dem unsanierten Referenzbereich mit der Lage der Sensoren bei den Vorab-Messungen .....	67
Bild 65: Messungen 2014 - Raumlufttemperaturen .....	68
Bild 66: Messungen 2014 - relative Raumluftfeuchten .....	68
Bild 67: Messungen 2014 - relative Raumluftfeuchten .....	69
Bild 68: Messungen 2014 - Oberflächentemperaturen am Messpunkt Endpylon Untergeschoss - grüne Kurve .....	69
Bild 69: Messungen 2014 - Oberflächentemperaturen am Messpunkt Ostflügel Erdgeschoss - grüne Kurve .....	70
Bild 70: Messungen 2014 - absolute Raumluftfeuchten .....	71
Bild 71: Messungen 2014/2015 - absolute Raumluftfeuchten vor Umsetzung der baulichen Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungsmaßnahmen .....	72
Bild 72: Messungen 2014 bis 2020 - absolute Raumluftfeuchten nach Umsetzung der baulichen Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungsmaßnahmen .....	72
Bild 73: Bohrkern I - gesamt .....	76

Bild 74: Bohrkern I - Teilbereich 1 .....	76
Bild 75: Bohrkern I - Teilbereich 2 .....	77
Bild 76: Bohrkern I - Teilbereich 3 .....	77
Bild 77: Bohrkern I - Teilbereich 4 .....	78
Bild 78: Bohrkern III - gesamt .....	78
Bild 79: Bohrkern III - Teilbereich 1.....	79
Bild 80: Bohrkern III - Teilbereich 2.....	79
Bild 81: Bohrkern III - Teilbereich 3.....	80
Bild 82: Bohrkern IV - gesamt.....	80
Bild 83: Bohrkern IV - Teilbereich 1 .....	81
Bild 84: Bohrkern IV - Teilbereich 2 .....	81
Bild 85: Porenverteilung Bohrkern I - Ziegel .....	82
Bild 86: Porenverteilung Bohrkern I - Muschelkalk.....	83
Bild 87: Porenverteilung Bohrkern III - Beton.....	84
Bild 88: Porenverteilung Bohrkern IV - Putz.....	85
Bild 89: Porenverteilung Bohrkern IV - Beton .....	86
Bild 90: Materialeigenschaften für die Simulationsberechnung - Beton.....	88
Bild 91: Materialeigenschaften für die Simulationsberechnung - Ziegel .....	88

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Feuchtegehalte der Bohrkern im konditionierten Bereich der Tribüne .....	27
Tabelle 2: Feuchtegehalte des Bohrkerns im nicht konditionierten Bereich der Tribüne .....	28
Tabelle 3: Mittelwert der bauphysikalischen Kennwerte aus Laborversuchen.....	28
Tabelle 4: Sondenvergleich .....	39
Tabelle 5: Zuordnung der TDR-Sondenabschnitte zum Wassergehalt - TDR-Messwerte am 16.09.2017 .....	42
Tabelle 6: TDR-Signalhöhe in Abhängigkeit des Wassergehaltes $u$ (M.-%).....	46
Tabelle 7: Exemplarische Darstellung für Bohrkern III im konditionierten Bereich - mit realen Klimadaten .....	57
Tabelle 8: Exemplarische Darstellung für Bohrkern III im konditionierten Bereich - bei konstanter Temperatur .....	57
Tabelle 9: Exemplarische Darstellung für Bohrkern II im konditionierten Bereich - mit realen Klimadaten .....	59
Tabelle 10: Exemplarische Darstellung für Bohrkern II im konditionierten Bereich - bei konstanter Temperatur .....	60
Tabelle 11: Bauphysikalische Kennwerte der Bohrkernabschnitte .....	87

## **Verzeichnis der Begriffe und Abkürzungen**

TDR:	Time Domain Reflektometrie (Zeitbereichsreflektometrie)
RS-485:	Verfahren zur Datenkommunikation mit differentiellen Signalen
MOD-Bus:	Datenübertragungsprotokoll



## 1 Zusammenfassung

Die Zeppelintribüne in Nürnberg ist Bestandteil des Reichsparteitagsgeländes, auf dem zwischen 1933 und 1938 jährlich einmal die Reichsparteitage der NSDAP stattfanden. Die baulichen Reste des Reichsparteitagsgeländes dominieren bis heute große Teile des Stadtbildes im Südosten Nürnbergs. Die Einrichtung einer ersten einfach gehaltenen Ausstellung "Faszination und Gewalt" in der Zeppelintribüne 1985 war ein entscheidender Schritt für mehr historische Information auf dem Gelände. Die Zeppelintribüne ist das einzig fertiggestellte und genutzte Gebäude während der Zeit des Nationalsozialismus und damit in bedeutendes nationales Kulturgut für Erinnerung, Mahnung und Bildung.

Besonders Zeppelintribüne und Zeppelfeld weisen über siebenzig Jahre nach ihrer Fertigstellung gravierende bauliche Mängel auf, die auf schädigende Witterungseinflüsse zurückzuführen sind. Ohne eine baldige fachgerechte Instandsetzung droht innerhalb der nächsten Jahre ein Totalverlust dieses historisch-politische Lernorts.

In den Jahren 2013/2014 erfolgten umfangreiche Materialuntersuchungen an der Bausubstanz. Die Untersuchungen ergaben, dass die Mehrzahl der Natursteinfassaden und -treppen, bedingt durch starke Witterungseinflüsse und den ungehinderten Zutritt von Feuchte in die Bausubstanz, erheblich beschädigt bzw. teilweise zerstört sind. Die Bausubstanz im Inneren der Tribüne weist sehr hohe Durchfeuchtungsgrade auf.

Ziel der Planungen ist die sichere Begehbarkeit aller Bereiche des Zeppelfelds, ohne Schutzmaßnahmen wie Zäune, Gittergewebe oder provisorische Stützkonstruktionen. Es gilt einen Zustand herzustellen, der ein jederzeit ungefährdetes Betreten in allen Bereichen ermöglicht. Die Stadt Nürnberg hat eine Schadenskartierung und die darauf aufbauende Instandsetzungsplanung mit einer Teilinstandsetzung ausgewählter Musterflächen verbunden. Ein wesentlicher Teil der Maßnahmenplanung für die Instandsetzung der Musterflächen und -bereiche war die Entwicklung eines bauklimatischen Konzepts.

Ziel war das Entfeuchten der Baumasse und die Realisierung von relativen und absoluten Feuchtegehalten in der Raumluft, die eine Tauwasserbildung vermeiden, um eine weitere Schädigung der Bausubstanz zu stoppen. Die dafür zu entwickelnden und zu testenden Maßnahmen sollen denkmalverträglich, wirtschaftlich und nachhaltig sein. Mit möglichst minimalem Aufwand und minimierten Eingriffen in die Bausubstanz soll eine mittel- und langfristige Trocknung der Bausubstanz bis in die Nähe des praktischen Ausgleichsfeuchtegehaltes der einzelnen Baumaterialien, ohne weitere Schädigungen der historisch wertvollen Substanz, erreicht werden. Vor allem sollte auch das Verhalten der Bausubstanz über die mächtige Bauteiltiefe von fast 200 cm beobachtet werden. Diese Vorgehensweise erfordert u. a. den Einsatz innovativer Methoden zur kontinuierlichen Feuchtebestimmung in den Bestandsbaustoffen, da die derzeit auf dem Markt erhältlichen Feuchtemessmethoden i. d. R. einen erheblichen Verlust an Originalsubstanz zur Folge haben.

Neben der Bestandsanalyse zu verbauten Materialien und deren Feuchtesituation wurden die Ursachen der Durchfeuchtungen ermittelt und langfristige Raumklimamessungen durchgeführt. Zur gezielten Entfeuchtung der Raumluft und damit sukzessive auch der Baumasse wurde ein sehr einfaches und minimalinvasives Belüftungssystem eingebaut. Die Entfeuchtung erfolgt über den Transportweg Luft. Durch ein geeignetes Regelkonzept, welches im Laufe des Projekts immer wieder überprüft und angepasst wurde, konnte bereits in den ersten

Jahren in den Raumbereichen des Mustersanierungsabschnittes gezeigt werden, dass das Entfeuchtungskonzept die erwarteten Effekte zeigt.

Bauliche Voraussetzungen, wie das Abdichten der Dachflächen und eines funktionierenden Entwässerungssystems, wurden vorab umgesetzt. Mit den Untersuchungen wurde ein kontinuierliches Raumklimamonitoring realisiert, mit dem die Raumluftverhältnisse in den Mustersanierungsabschnitten bereits vor Beginn der Maßnahmen erfasst und aufgezeichnet werden konnte. Nach Abschluss der baulichen Sanierungsmaßnahmen und mit dem erfolgten Einbau der Lüftungskomponenten können seither durch das Raumklimamonitoring die sich infolge der Entfeuchtung einstellenden Raumluftverhältnisse beobachtet werden. Dabei verdeutlichen die Auswertungen der Messergebnisse die Richtigkeit des Entfeuchtungskonzepts und damit des Sanierungsansatzes.

Ein wichtiger Bewertungsfaktor zur Überprüfung der Trocknung der Mauerwerke bzw. Betonwände ist die Materialfeuchte. Mit den sich auf dem Markt befindlichen System ist eine kontinuierliche Messung nicht möglich. Daher wurde im Rahmen des Projekts ein minimalinvasives Messsystem entwickelt, das eine kontinuierliche Bewertung der Materialfeuchte erlaubt. Dieses Verfahren beruht auf einer hochfrequenten Messmethode, bei der Sensorelektroden in ein Bohrloch eingesetzt und segmentiert oder kontinuierlich die Materialfeuchte erfasst werden kann. Mit Hilfe einer Multiplexerelektronik können mehrere Sensorelektroden abgefragt und über eine Kommunikationsleitung die Daten an einen PC vor Ort übertragen werden. Die Problematik der eingesetzten Messmethode liegt in der sog. Kalibrierung der Sensorelektroden in Bezug auf die Materialfeuchte. Hierzu wurden im Vorfeld im Labor an den Bohrkernen der Bohrlöcher die Materialfeuchte bestimmt und auch die feuchte- und wärmetechnischen Kennwerte der einzelnen Materialien. Diese sollten bei thermisch-hygrischen Berechnungen eingesetzt werden, die es ermöglichen sollten auch an Stellen die Materialfeuchte zu ermitteln, an denen nicht gemessen wird. Die in diesem Kontext durchgeführten Berechnungen zeigten, dass diese Vorgehensweise prinzipiell möglich ist, jedoch aufgrund von plötzlich ansteigenden Materialfeuchten aufgrund unbekannter Ursachen, keinen Einsatz im Bereich der Tribüne finden kann. Eine Abbildung solcher Ereignisse in einer thermisch-hygrischen Simulation ist nicht möglich, da es sich hierbei um nicht vorhersehbare Ereignisse handelt. Sollten diese unterbunden werden können, stehen die entsprechenden Rechenmodelle und die zugehörigen Materialdaten zur Verfügung. Die Bestimmung der Eigenfeuchte an den entnommenen Bohrkernen wurde für einen ersten Abgleich Materialfeuchte und Messwerte TDR-Sonden genutzt. Im Labor sollten dann eine TDR-Sonden in einen Dummy eingebaut werden und die Materialfeuchte von trocken nach nass langsam gesteigert werden. Gleichzeitig sollten die TDR-Messwerte erfasst werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass der Messbereich zu gering für eine tatsächliche Aussage bzgl. der Materialfeuchte ist, daher musste ein neues labortechnisches Konzept erarbeitet werden. Dieses basiert auf dem Feuchtespeichervermögen von porösen Materialien, d. h. es ist angelehnt an die normative Bestimmung der Sorptionsisotherme. Hierbei wird die Probe zuerst getrocknet, die TDR-Messwerte werden erfasst und dann wird die Probe in eine definierte Umgebungsfeuchte verbracht, bis sie Gewichtskonstanz erreicht hat. Während der Lagerung in der gewählten Umgebungsfeuchte wird periodisch auch das TDR-Signal aufgezeichnet. Nach Ende der Lagerung wird die Probe in die nächst höhere Umgebungsfeuchte verbracht. Sobald die Probe in der höchsten Umgebungsfeuchte Gewichtskonstanz erreicht hat, wird der Prozess umgekehrt und die Probe in verschiedenen Umgebungsfeuchten bis zur Trocknung gelagert. Diese Art der Bestimmung fordert pro Stufe der

Umgebungsfeuchte eine Lagerdauer, je nach Porenstruktur, von mindestens 3–6 Monaten. Im Rahmen des Projektes standen für die labortechnischen Messungen nur drei TDR-Einzelsensoren zur Verfügung, daher konnten die Messungen während der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden. Nach Ende des Projekts werden die Messungen weitergeführt und auf eigene Kosten wurde weiteres Messequipment angeschafft, so dass davon auszugehen ist, dass bis Ende 2021 die Messungen abgeschlossen sind. Die Ergebnisse der Messungen könnten dann ggf. im Rahmen einer Masterthesis veröffentlicht werden.

In der Zeitschrift „Schützen & Erhalten“, Ausgabe 11/2017 erfolgte die erste Vorstellung des Projekts.

Bedingt durch die Einschränkungen bei der Durchführung von Fachveranstaltungen wegen der Covid-19-Pandemie konnte eine gesonderte Vorstellung des Projekts bisher nicht erfolgen. Diese ist für 2021 geplant.

Die Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse erfolgt zudem in der Fachzeitschrift „Schützen & Erhalten“ des Bundesverbandes für Feuchte und Altbausanierung 2021 und im Rahmen der „Hanseatische Sanierungstage“ in Lübeck im November 2021.

## 2 Anlass und Zielsetzung

Die Zeppelintribüne weist über sieben Jahre nach ihrer Fertigstellung erhebliche bauliche Mängel auf. Ohne eine rasche fachgerechte Instandsetzung droht innerhalb der nächsten Jahre ein Totalverlust dieses historisch-politischen Lernortes.

Ziel der bisherigen Planungen der Stadt Nürnberg ist die sichere Begehbarkeit der Zeppelintribüne und des Zeppelfeldes. Bereits seit dem Jahr 2014 wird seitens der Stadt Nürnberg ein Klimamonitoring durchgeführt. Die erfassten Klimadaten zeigen, dass sich in den bisher untersuchten Raumbereichen sehr hohe relative Raumlufffeuchten einstellen, die einen schädigenden Einfluss auf die historische Bausubstanz haben. Basierend auf diesen Daten wurde ein minimalinvasives bauklimatisches Konzept der Instandsetzung und des Substanzerhalts entwickelt. Kernziel des Konzeptes ist eine kontrolliert gesteuerte Lüftung, um so Trocknungsprozesse in den massiven Konstruktionen aus Beton und Mauerwerk zu induzieren und diese langfristig auf ein geringeres und die der Bausubstanz nicht weiter schädigendes Feuchteniveau zu führen.

Im Kontext der hohen Feuchtelasten der Mauerwerks- und Betonkonstruktionen stellt sich die Frage, wie der Erfolg der umgesetzten Maßnahmen festgestellt und bewertet werden kann. Und besteht in einem weiteren Schritt die Möglichkeit, basierend auf aktuellen Mauerwerksfeuchten, die Steuerung des Lüftungssystems zu optimieren? Der Einsatz üblicher Methoden der Feuchtebestimmung, wie z. B. Probenentnahme und anschließende Feuchtebestimmung im Labor, ist aufgrund des substanzschädigenden Eingriffes in die historische Bausubstanz nicht wünschenswert. Hierbei würde es zum einen, aufgrund der erforderlichen Probenahme, im Laufe der Zeit zu erheblichem Verlust der Originalsubstanz kommen. Zum anderen ist eine Steuerung auf Grundlage der so gewonnenen Werte nicht möglich, da sie einen Feuchtezustand in der Vergangenheit repräsentieren und nicht den für eine Steuerung notwendigen aktuellen Stand der Feuchtebelastung aufzeigen. Daher besteht die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung neuer minimalinvasiver Messmethoden, die es ermöglichen, die Materialfeuchte bzw. die Trocknungs- oder auch Befeuchtungsprozesse kontinuierlich zu erfassen, um so immer dann Trocknungsprozesse durch eine kontrollierte Raumbelüftung einzuleiten, wenn ein zielführender Beitrag zum Schutz und Erhalt der Mauerwerks- und Betonkonstruktionen des historisch bedeutsamen Objektes der Zeppelintribüne geleistet werden kann.

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte daher eine bislang in einem solchen Kontext noch nicht eingesetzte Feuchtemesstechnik, die sog. Time-Domain-Reflektometrie (TDR), eingesetzt werden. Diese Art der Feuchtemessung wird bereits erfolgreich im Bereich des Deponiebaus erprobt und eingesetzt. Für den Bereich historischer Bausubstanz sind die auf dem Markt erhältlichen Hard- und Softwaresysteme für eine Applikation an einem Baudenkmal aber nicht geeignet, um mit entsprechend leistungsfähigen Feuchtemesssonden die für eine kontrollierte und bedarfsgerechte Raumbelüftung erforderliche Feuchteerfassung in kontinuierlicher Weise vornehmen zu können. Daher sollten während der Projektlaufzeit zum einen praktisch nutzbare zerstörungsarme Feuchtesonden auf Basis der TDR-Messtechnik entwickelt und für die Bewertung des im Konstruktionsinneren zeitaktuell vorherrschenden Mauerwerksfeuchtezustands geeignete Bewertungsalgorithmen für eine ortsabhängige Feuchtemessung ausgearbeitet und im Feldeinsatz erprobt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsprojektes sollte daraufgelegt werden, mit möglichst wenigen minimal in die historische Bausubstanz eingreifenden Feuchtesonden die gewünschten Informationen zur Feuchtesituation im Mauerwerk mit der erforderlichen Zuverlässigkeit erhalten zu können. Hierzu sollte erstmals die Feuchtemessung wie auch das erforderliche Klimamonitoring unmittelbar mit einer parallel stattfindenden thermisch-hygrischen 2D-Bauteilsimulation gekoppelt werden. Ziel war es, durch den in Echtzeit vorzunehmenden Abgleichung der Simulationsergebnisse mit den real gemessenen Feuchtzustandsbeschreibungen eine hinreichend genaue Beschreibung der sich im Bauteilinnern einstellenden Feuchte- und Temperaturzustände zu erhalten. Mit einer solchen Kombination von messtechnischer und numerischer Zustandsbeschreibung lassen sich folglich die von den äußeren Einwirkungen durch Witterung, Nutzung und Raumkonditionierung im Bauteil einstellenden Veränderungen der Feuchte- und Temperaturverteilung infolge von Befeuchtungs- bzw. Trocknungsprozessen über den betrachteten Bauteilquerschnitt beobachten, bewerten und visualisieren. Eine Übertragung der aus den durch Messungen validierten Simulationsparametern in weitere Simulationsberechnungen sollte erstmals auch erlauben, eine möglichst genaue Zustandsbeschreibung an nicht zugänglichen Bauteilbereichen zu geben, wie sie insbesondere in den komplexen und mächtigen Mauerwerksstrukturen der Zeppelintribüne in vielfältiger Form zu finden sind.

Sollte es im Vorhaben gelingen, zu belegen, dass sich mit dieser Methodenkombination Feuchtezustandsänderungen zuverlässig mit vergleichsweise zerstörungssarmen Eingriffen durch den Einbau von TDR-Sonden in Verbindung mit der Durchführung von numerischen Berechnungen bestimmen lassen, kann mit der angedachten Mess- und Bewertungsmethodik nicht nur die Feuchtzustandssituation im Bauteil in der gewünschten Qualität beurteilt werden, sondern es lassen sich auch anlagentechnische Systeme zur Verbesserung der Trocknungsmöglichkeiten in Form der Raumluftkonditionierung derart optimieren, dass eine weitere feuchtebedingte Schädigung der historischen Konstruktionen aus Mauerwerk und Beton gezielt vermieden werden kann, wie dies im Vorhaben am Beispiel der Zeppelintribüne mit einer bedarfsgerecht kontrollierten Konditionierung der Innenräume mittels Lüftungsanlagen erstmalig demonstriert werden sollte.

### **Die Zeppelintribüne – ein bedeutendes nationales Kulturgut für Erinnerung, Mahnung und Bildung**

Die Nationalsozialisten veranstalteten bereits 1927 und 1929 die ersten Reichsparteitage in Nürnberg. Vor 1933 war das Gelände Teil eines Naherholungsgebietes im Nürnberger Süden. Zu diesem Gelände gehörten u. a. der Dutzendteich mit Badeanstalt, der Luitpoldhain. Dieses Gelände wurde während der Reichsparteitage als Aufmarschfläche für SA und SS genutzt. Hierfür wurde der Tiergarten Nürnberg zugunsten der Reichsparteitagsbauten in den Osten Nürnbergs umgesiedelt und eine Veranstaltungswiese geschaffen, die seit der Landung eines Luftschiffs 1909 Zeppelinfeld genannt wird. Von 1933 bis 1939 bauten die Nationalsozialisten das Gelände um den Dutzendteich für die Inszenierung ihrer jährlichen Parteitage aus. Das Gesamtareal umfasste eine Fläche von etwa elf Quadratkilometern. Als zentrale Schauplätze waren unter anderem die Luitpoldarena, das Zeppelinfeld, das Märzfeld, der Kongressbau und das Deutsche Stadion vorgesehen.

Ab 1933 nutzten die Nationalsozialisten das Zeppelfeld für deren Reichsparteitage. Zwischen 1935 und 1937 entstand die gesamte Anlage mit der Haupttribüne (1) und den Zuschauerwällen (2) (siehe Bild 1). Auf dem Feld konnten sich bis zu 200.000 Menschen versammeln.

Das Feld für die Teilnehmer des Reichsparteitags ist an drei Seiten umrahmt von Zuschauerwällen, in die 34 Türme mit jeweils sechs hohen Fahnenmasten integriert sind. Von den Zuschauerwällen, getrennt durch eine breite Aufmarschstraße, schließt die 370 m lange Zeppelhaupttribüne die vierseitige Anlage ab (vgl. Bild 1). Als Vorbild diente der antike Pergamonaltar. Die Tribüne ist gegenüber den anderen Zuschauerwällen erhöht und wurde durch eine abschließende doppelte Pfeilerreihe sowie zwei wuchtige Flügelbauten besonders betont; die Gesamthöhe betrug mit den Pfeilerkolonnaden etwa 20 m. Nochmals erhöht in der Mitte befand sich ein Bereich für die Ehrengäste und in der Mitte die Rednerkanzel Hitlers (Bild 2).



**Bild 1: Reichsparteitagsgelände 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie)**

Wie alle Türme der Wallanlage ist auch die Zeppelintribüne komplett mit Kalkstein, so genanntem Juramarmor, verkleidet und besteht in ihrem Inneren aus Ziegelmauerwerk. Der hervorgehobene Mittelbau und zwei lange Seitenflügel, die durch zwei Endpylonen abgeschlossen werden, gliedern die Tribüne. Da sich Verblendungen lösten und Steinbrocken herabfielen, wurden 1967 die Pfeilerkolonnaden gesprengt. Über sie führten ursprünglich acht Treppenhäuser auf die rückwärtige Seite. Die äußeren Zugänge der acht Treppenhäuser wurden ebenfalls 1967 zubetoniert bzw. zugemauert. Der Mittelbau der Zeppelintribüne jedoch ist gänzlich begehbar. Darunter liegt der so genannte Goldene Saal, eine Halle, über die vom Inneren Treppenaufgänge zur obersten Tribünenebene führen. Nicht nur die Fassaden, sondern auch alle Sitzstufen bestehen aus Kalkstein. Sie liegen auf einer abgetreppten Stahlbetondecke, die auf Stahlbetonstützen gegründet ist. Der gesamte Bereich unterhalb der Stahlbetondecke ist mit Erdreich verfüllt. Neben den offenen Treppenanlagen waren in den Flügelbauten Toilettenanlagen untergebracht.

Die Räume innerhalb der Tribüne wurden nie beheizt und die Toilettenanlagen lediglich über Lüftungsschächte natürlich belüftet. Die bis 1967 vorhandenen Pfeilerkolonnaden schützten die offenen Treppenhäuser vor Regen und Witterungseinflüssen.



**Bild 2: Zeppelintribüne 1937 („Moderne Bauformen“ Heft 4/1938)**

Die baulichen Reste des Reichsparteitagsgeländes dominieren bis heute große Teile des Stadtbildes im Südosten Nürnbergs (Bild 3). Der inzwischen über 70 Jahre dauernde Umgang der Stadt Nürnberg mit dem Gelände war von verschiedenen Phasen geprägt.

Bewahren und Erhalten der Bauwerke sowie das Informieren über NS-Geschichte ersetzte nach und nach das vorherige Schweigen. Die Einrichtung einer ersten einfach gehaltenen Ausstellung „Faszination und Gewalt“ in der Zeppelintribüne 1985 war ein entscheidender Schritt für mehr historische Information auf dem Gelände. Aufgrund der auf die Sommermonate beschränkten Öffnungszeiten, des damals schon problematischen Bauzustandes der Tribüne, sowie des ansteigenden Besucherinteresses aus aller Welt, wurde dieser Ausstellungsort 2001 durch die Eröffnung einer zeitgemäßen Dauerausstellung im Dokumentationszentrum in der ehemaligen Kongresshalle ersetzt. Die aktuelle Ausstellung „Faszination und Gewalt“ beinhaltet die Entwicklung des Nationalsozialismus ab Ende des 1. Weltkriegs 1918 bis zu den Nürnberger Kriegsverbrecherprozessen 1945/46. In den im Jahr 2004 vom Stadtrat einstimmig beschlossenen Leitlinien zum künftigen Umgang der Stadt Nürnberg mit dem ehemaligen Reichsparteitagsgelände wurde der Erhalt der Gebäude mit einer aufklärerischen Bildungsarbeit verknüpft.

## Ausgangssituation

Bereits seit den sechziger Jahren ist die Zeppelintribüne Thema der überregionalen Medienberichterstattung und zählt damit zu den bekanntesten Gebäuden Nürnbergs. Das Bild der Sprengung des vergoldeten Hakenkreuzes auf der Haupttribüne durch die U. S. Army 1945 gehört als Symbol für den Sieg über den Nationalsozialismus zum kollektiven Bildgedächtnis. Aktuell stellt sich erneut die Frage nach einem adäquaten Umgang mit dem ehemaligen Reichsparteitagsgelände.



**Bild 3: Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg)**

Besonders die Zeppelintribüne und das Zeppelfeld weisen über siebzig Jahre nach ihrer Fertigstellung gravierende bauliche Mängel auf, die seit der Sprengung der Pfeilerkolonnaden zu zunehmenden Schädigungen durch stetig einwirkende Witterungsverhältnisse führen. Ohne eine baldige fachgerechte Instandsetzung droht innerhalb der nächsten Jahre ein Totalverlust dieses historisch-politischen Lernorts. Um Tribüne und Zuschauerwälle zu sichern, ist eine aufwändige Sanierung notwendig. Bei Sanierungsmaßnahmen, wie sie in diesem Kontext erforderlich sind, ist die Entwicklung und Anwendung neuer Konzepte und Messmethoden unumgänglich. Nur so kann der Bestand bei minimalen Verlusten der originalen Substanz erhalten bleiben. Die unmittelbaren Folgen einer Nicht-Sanierung wären erheblich: Zeppelintribüne und Wallanlage würden nach und nach in sich zusammenfallen. Die Schutzmaßnahmen müssten ausgebaut werden, um zu vermeiden, dass jemand das marode Gemäuer betritt und sich dabei möglicherweise gefährdet. Die Nutzung des öffentlichen Raums würde beschränkt, öffentliche Flächen würden den Menschen dauerhaft entzogen. Im Zuge des Verfalls könnte sich um die NS-Hinterlassenschaft eine Aura des Geheimnisvollen entwickeln, weil das originale und profane Anschauungsmaterial nicht mehr zugänglich ist. Eine Mystifizierung wäre die Folge. In der Konsequenz würde dies heißen, dass die Stadt, die Bürger und die Gesellschaft einen Teil ihrer Geschichte tilgen, auslöschen und damit eliminieren würden.

Ein im Jahr 2011 von der *Arbeitsgruppe ehemaliges Reichsparteitagsgelände* der Stadt Nürnberg erstelltes Konzeptpapier zum künftigen Umgang mit dem Lernort Zeppelfeld wurde im



Oktober des gleichen Jahres vom Kulturausschuss des Stadtrates mit großer Mehrheit verabschiedet. Darin sind folgende Leitlinien für das weitere Vorgehen verankert:

- Zeppelfeld und -tribüne sind in ihrer baulichen Substanz zu erhalten,
- Anschaulichkeit, Information und eigenständige Erfahrbarkeit wirken am historischen Ort Zeppelintribüne gleichermaßen gegen Mystifizierung und Verharmlosung,
- temporäre künstlerische Auseinandersetzungen mit den baulichen Relikten eröffnen neue Zugänge und Verarbeitungsprozesse; zur künstlerischen Nutzung wird ein Konzept für das gesamte ehemalige Reichsparteitagsgelände entwickelt, wobei Zeppelintribüne wie Zeppelfeld zentrale Bestandteile und Spielorte sein werden,
- Alltagsnutzungen und Freizeitveranstaltungen sind Teil eines zeitgemäßen Umgangs mit der NS-Propagandaarchitektur, der individuelle Entfaltungsmöglichkeiten bewusst gegen die beabsichtigte Konformität der NS-Veranstaltungen setzt.

### Bestandsituation der Zeppelintribüne

Im Jahr 2007 wurden Bereiche geöffnet, die 1967 nach der Sprengung geschlossen worden waren und bzgl. Standsicherheit untersucht. Es zeigte sich, dass der Sprengschutt die Decken und Wände der Seitenflügel stark belastete. Daher musste der Sprengschutt dringend entfernt werden. Schäden an der Stahlkonstruktion und Betonabplatzungen, verursacht durch eindringendes Regenwasser und Salze, waren sichtbar. Dies gefährdete zusätzlich die Standsicherheit einzelner Decken. Durch die dauerhaft einwirkende Feuchte hatten sich zudem Schimmelpilze (und Schwammarten), vor allem an den Holzelementen der ehemaligen Toiletten-trennwände, gebildet. Zusätzlich gibt es einen (wesentlich geringeren Anteil) Eintrag von Feuchtigkeit über das Erdreich (Stufenanlage, erdberührte Bereiche der Fundamente und Sockel).



**Bild 4: Zeppelfeld und -tribüne 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie) - die Tribüne gliedert sich in den Mittelbau a und die beiden Seitenflügel b**

Aufgrund der hohen Luftfeuchte in den inneren Raumbereichen des Tribünenbaus und den niedrigen Oberflächentemperaturen an den Wänden, Decken und Böden der massiven Konstruktionen aus Ziegelmauerwerk und Beton bildet sich außerdem häufig Tauwasser, dass zu

einer weiteren Aufweichung der raumseitigen Wandoberflächen und damit zu sich verschlechternden Trocknungsmöglichkeiten führt.



**Bild 5: Blick in einen Teil Toilettenanlage der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg)**



**Bild 6: Materialverlust im Außenbereich der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg)**

Zur Sicherung wurde daher im Jahr 2008 der Schutt entfernt. Zudem wurden zur Unterstützung der Decken provisorische Holzkonstruktionen eingebaut. Die nachträgliche Sicherungskonstruktion ist aber aufgrund der potenziellen Gefahr des Schwammbefalls selbst stark in ihrer Standsicherheit gefährdet. Nach wie vor dringt Regenwasser ungehindert von oben in das Bauwerk ein. Schließlich fehlt seit der Sprengung der Kolonnaden dem Bauwerk schlicht das Dach und außerdem ist die bauzeitliche Abdichtungsebene unterhalb der Kalksteinplatten nicht mehr funktionstüchtig. Hinzu kommen undichte Entwässerungsleitungen. Die Folge ist eine sich stetig erhöhende Feuchtelast im Mauerwerk bzw. Beton.

Des Weiteren wurden in den Jahren 2008/2009 erste Voruntersuchungen hinsichtlich des Zustandes der Bestandssubstanz durchgeführt. Um die Ergebnisse möglichst effektiv auszuwerten und deren Qualität und Quantität objektiv zu beurteilen, erfolgt die Gründung eines Technischen Beirates. Dieser Beirat ist mit Mitgliedern des Hochbauamts und der Unteren Denkmalschutzbehörde besetzt, zudem konnten Experten verschiedener Fachbüros und Hochschulen gewonnen werden. 2013/2014 erfolgten dann umfangreiche Materialuntersuchungen an der Bausubstanz.



**Bild 7: Außenansicht der Zeppelintribüne 2013 (Presse- und Informationsamt Stadt Nürnberg)**

Die Untersuchungen im Außenbereich ergaben, dass die Mehrzahl der Natursteinfassaden und -treppen, bedingt durch starke Witterungseinflüsse und den ungehinderten Zutritt von Feuchte in die Bausubstanz, erheblich beschädigt bzw. teilweise zerstört sind. Die feuchte-technischen Untersuchungen der raumseitigen Bausubstanz zeigen, dass die Durchfeuchtungsgrade der Ziegel zwischen 62 und 91 % liegen. Die Feuchtegehalte der Ziegel liegen zwischen 14 und 18 M.-%; beim Kalksandstein zwischen 10 und 12 M.-% und beim Mörtel zwischen 5 und 12 M.-%. Die Ziegel und Putze weisen zudem hohe Belastungen verschiedener bauschädlicher Salze auf. Vor allem beim Stampfbeton wurden größere Sulfatbelastungen festgestellt. Dies bedeutet, dass die raumseitige Schadenssituation durch sehr hohe Feuchtegehalte gekennzeichnet ist.

### Ziele der Instandsetzungsmaßnahmen und Vorgehensweise

Ziel der Planungen ist die Wiederherstellung einer sicheren Begehbarkeit aller Bereiche des Zeppelfelds, die eine Nutzung ohne Schutzmaßnahmen wie Zäune, Gittergewebe oder provisorische Stützkonstruktionen ermöglicht. Es gilt einen Zustand herzustellen, der ein jederzeit ungefährdetes Betreten in allen Bereichen ermöglicht. Doch ist dabei keine Rekonstruktion aber auch kein zerstörender Abbruch von intakten Bauteilen geplant. Entsprechend bedarf es zunächst eines detaillierten Instandsetzungskonzepts für das Zeppelfeld, die Wallanlagen und die Haupttribüne, welches die Gesamtanlage erhält, dem historischen Ort gerecht wird und den Charakter als historisches Denkmal und Lernort bewahrt.

Die Stadt Nürnberg hat eine Schadenskartierung und die darauf aufbauende Instandsetzungsplanung mit einer Teilinstandsetzung ausgewählter Musterflächen verbunden.



**Bild 8: Zeppelintribüne und -türme - Musterflächen 2013 (Nürnberg Luftbild, Hajo Dietz Fotografie)**

Die Musterflächen umfassen am östlichen Ende der Haupttribüne einen Teil der Stufenanlage und der Fassade sowie eines der innenliegenden Treppenhäuser. Zusätzlich ist einer der Türme des Zeppelfelds mit angrenzenden Wallanlagen enthalten (Bild 8).

Nach der fachlichen Untersuchung und Schadenskartierung in den Jahren 2013/2014 ist die exemplarische Instandsetzung an den Musterflächen im Jahr 2015 erfolgt. Die Gesamtkosten

für die Instandsetzung der Musterflächen inkl. Ermittlung der Kosten für eine Generalinstandsetzung betragen rund drei Millionen Euro. Für die anschließende Instandsetzung der gesamten Anlage wird mit einer Bauzeit von mindestens zehn Jahren gerechnet, da die meisten Arbeiten stark witterungsabhängig sind und zudem Rücksicht auf bestehende Nutzungen zu nehmen ist.

Ein wesentlicher Teil der Maßnahmenplanung für die Instandsetzung der Musterflächen und -bereiche war die Entwicklung eines bauklimatischen Konzepts. Ziel ist hierbei das Entfeuchten der Baumasse und das Realisieren von relativen und absoluten Feuchtegehalten in der Raumluft, die künftig zuverlässig eine Tauwasserbildung an den raumseitigen Oberflächen der Wände, Decken und Böden vermeidet, um einer weiteren Schädigung der Bausubstanz wirksam entgegenzutreten. Hier ist u. a. ein vorsichtiges Steuern notwendig, um die ungewollte Kristallisation von Salzen (bisher im feuchten Mauerwerk in Lösung) zu vermeiden. Außerdem ist die Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen im Innenbereich geplant, insbesondere an den Stahlbetondecken und im Außenbereich an den Kalksteinfassadenplatten.

Neben der hohen Bauteilfeuchte im Innern der Wände und Decken ist auch die Kenntnis der Feuchtigkeit im Bereich der Naturstufen für den langfristigen Erhalt der Tribüne wichtig. Entsprechend wurden geeignete Feuchtemesssysteme gesucht, mit denen eine kontinuierliche Feuchtebestimmung der verborgenen Wand- und Stufenkonstruktionen zuverlässig möglich ist, um eine zielgerichtete Konditionierung der Raumbelüftung vornehmen zu können.

Die dafür im Rahmen des DBU-Verbundforschungsvorhaben zu entwickelnden, zu erproben und zu validierenden Maßnahmen müssen aber grundsätzlich denkmalverträglich, wirtschaftlich und nachhaltig sein. Ziel ist, mit einem möglichst minimalen Aufwand und mit minimierten Eingriffen eine mittel- und langfristige Trocknung der Bausubstanz bis in die Nähe des praktischen Ausgleichsfeuchtegehaltes der einzelnen Baumaterialien zu erreichen. Damit wäre ein Zustand erreicht, der zu keinen weiteren Schädigungen der historisch wertvollen Substanz führen würde. Um dies sicherzustellen, bedarf es vor allem der Möglichkeit, das feuchte-technische Verhalten der Bausubstanz über die mächtige Bauteiltiefe von fast 200 cm fortwährend zu beobachten und den hier vorherrschenden Feuchtezustand hinreichend genau zu bewerten. Diese Vorgehensweise erfordert u. a. den Einsatz innovativer Methoden zur kontinuierlichen Feuchtebestimmung in den Bestandsbaustoffen, da sich die derzeit auf dem Markt erhältlichen Feuchtemessmethoden i. d. R. nicht für eine kontinuierliche und tiefenaufgelöste Feuchtebestimmung eignen und zudem meist auch mit einem erheblichen Verlust an Originalsubstanz einhergehen.

### **3 Arbeitsschritte und Ergebnisse**

#### **3.1 Bestandsaufnahme und labortechnische Untersuchungen der TDR-Sonden und des Probenmaterials**

##### **3.1.1 Bestandsaufnahme zur Analyse und Bewertung der feuchtebedingten Substanzschädigung durch Umwelteinwirkungen**

Zu Projektbeginn wurde im Rahmen eines Ortstermins von den beteiligten Partnern nach eingehender Projektanalyse abgestimmt, in welchen Bereichen des Tribünengebäudes TDR-Sonden eingebaut werden. Es wurde dabei auch festgelegt, dass die für den Einbau der TDR-Sonden vorzunehmenden Bohrungen genutzt werden sollen, um aus den Bohrkernen die erforderlichen Informationen zum Aufbau und zur materialtechnologischen Zusammensetzung der untersuchten Konstruktionen zu gewinnen [4]. Schließlich müssen die tiefenabhängig erfassten SONDENSIGNALE hinsichtlich der jeweiligen Feuchtezustände bewertet werden, um möglichst realitätsnahe Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die Feuchteverteilung im Mauerwerksinnern zu erhalten [2, 3]. Entsprechend wurden alle Bohrkern, die mit einem Durchmesser von 50 mm entnommen wurden, auch für die Gewinnung von Probenmaterial genutzt, anhand dessen die für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Materialcharakterisierungen vorgenommen werden konnten. Vor allem aber wurden die mit den Bohrungen gewonnenen Materialien auch genutzt, um die für die Feuchtebewertungen der TDR-Sonden erforderlichen Materialabgleiche vornehmen zu können.

Die Bohrungen und die Entnahme der Bohrkern konnte im Juni 2017 erfolgen, da zu diesem Zeitpunkt die Entwicklung der TDR-Sonden und der erforderlichen Messtechnik soweit abgeschlossen waren (vgl. Abschnitt 3.2.), dass unmittelbar nach dem Abschluss der Bohrungen, der Entnahme der Bohrkern und der Reinigung des Bohrlochs die TDR-Messsonden eingebaut werden konnten und diese mit der zugehörigen Messtechnik mit der Messtechnik der raumluftechnischen Anlage der Stadt Nürnberg verbunden werden konnte.

Insgesamt wurden vier Bohrkern für die Erfassung des Feuchtezustandes des Mauerwerks entnommen. Die Bohrkernentnahme erfolgte dabei zunächst bis in eine Tiefe von 70 cm im Trockenbohrverfahren, um an den Bohrmaterialien Feuchtebestimmungen vornehmen zu können. In einem zweiten Schritt wurde bis in eine Bohrlochtiefe von 1,0 m bis 1,2 m nass gebohrt, um die TDR-Sonde über die gesamte Sondenlänge einbauen zu können.

Unmittelbar vor Ort erfolgte die Dokumentation der Bohrkern entsprechend der tiefenabhängigen Materialsituation und sonstigen optisch wahrnehmbaren Besonderheiten. Zudem wurde das gewonnene Bohrmaterial tiefenabhängig segmentiert, um ein Tiefenprofil der Feuchteverteilung in den gebohrten Wandkonstruktionen zum Zeitpunkt der Probenahme zu erhalten. Hierzu wurden die Bohrkern bzw. Bohrkernstückchen vor Ort gravimetrisch erfasst und anschließend zur Trocknung und für weitere physikalische und feuchtetechnische Analysen ins Labor verbracht. Drei der entnommenen Bohrkern entstammen dem konditionierten, d. h. zwangsbelüfteten Teil der Tribüne (Bild 9) und ein Bohrkern wurde als Referenz in einem ungestörten Raumbereich der Tribüne entnommen (Bild 10). Detaillierte Fotoaufnahmen der Bohrkern können dem Anhang entnommen werden.

Für eine erste Bewertung des Feuchtezustandes der zu untersuchenden Wandabschnitte wurden im Labor der sog. Wassergehalt  $u$ , die Wasseraufnahme  $u_f$  und der Durchfeuchtungsgrad

ermittelt. Die Ergebnisse dieser physikalischen Laboranalysen sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgezeigt. In beiden Tabellen findet sich in der letzten Spalte eine vereinfachte Bewertung des von den jeweiligen Bohrkernbereichen eingenommenen Feuchteniveaus. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass alle entnommenen Bohrkernkerne in größeren Tiefen eine hohe Feuchtelast aufweisen.

Die Feuchtesituation der im raumluftechnisch konditionierten Raumbereich entnommenen Proben zeigt, dass das Ziegelmauerwerk im OG in den oberflächennahen Mauerwerkstiefen weniger feuchtebelastet ist als in den tiefergelegenen Mauerwerksabschnitten (Bohrkern I und II). Demgegenüber dokumentiert die Feuchteanalyse des aus der Betonwand des EGs entnommenen Bohrkerns, dass der Beton durchgängig einer hohen Feuchtelast unterworfen ist (Bohrkern III). Gleiches gilt auch für den aus dem nicht konditionierten Bereich entnommenen Bohrkerns IV.

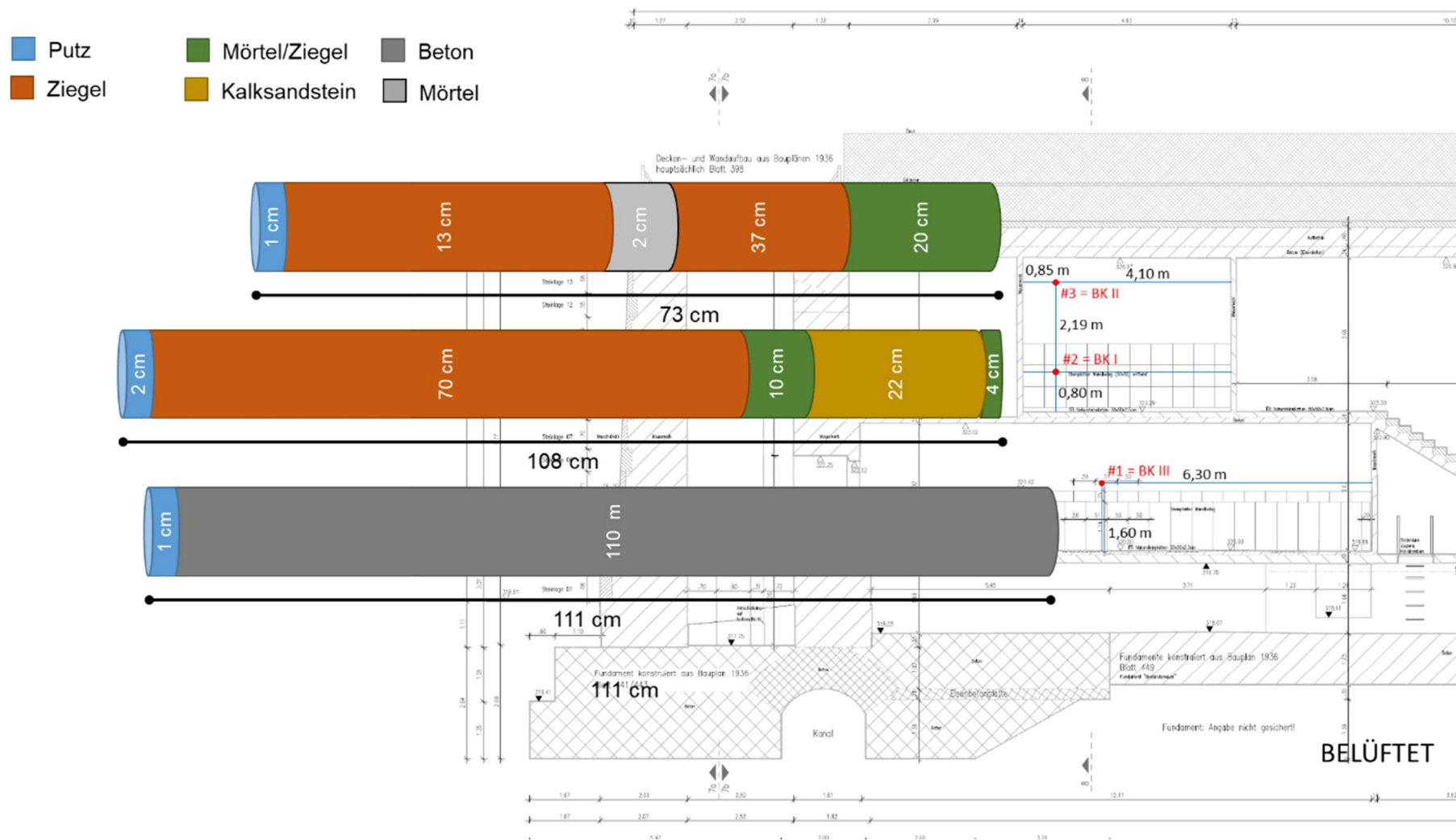


Bild 9: Entnahmestellen der Bohrkern im konditionierten Bereich - Aufbau der Bohrkern

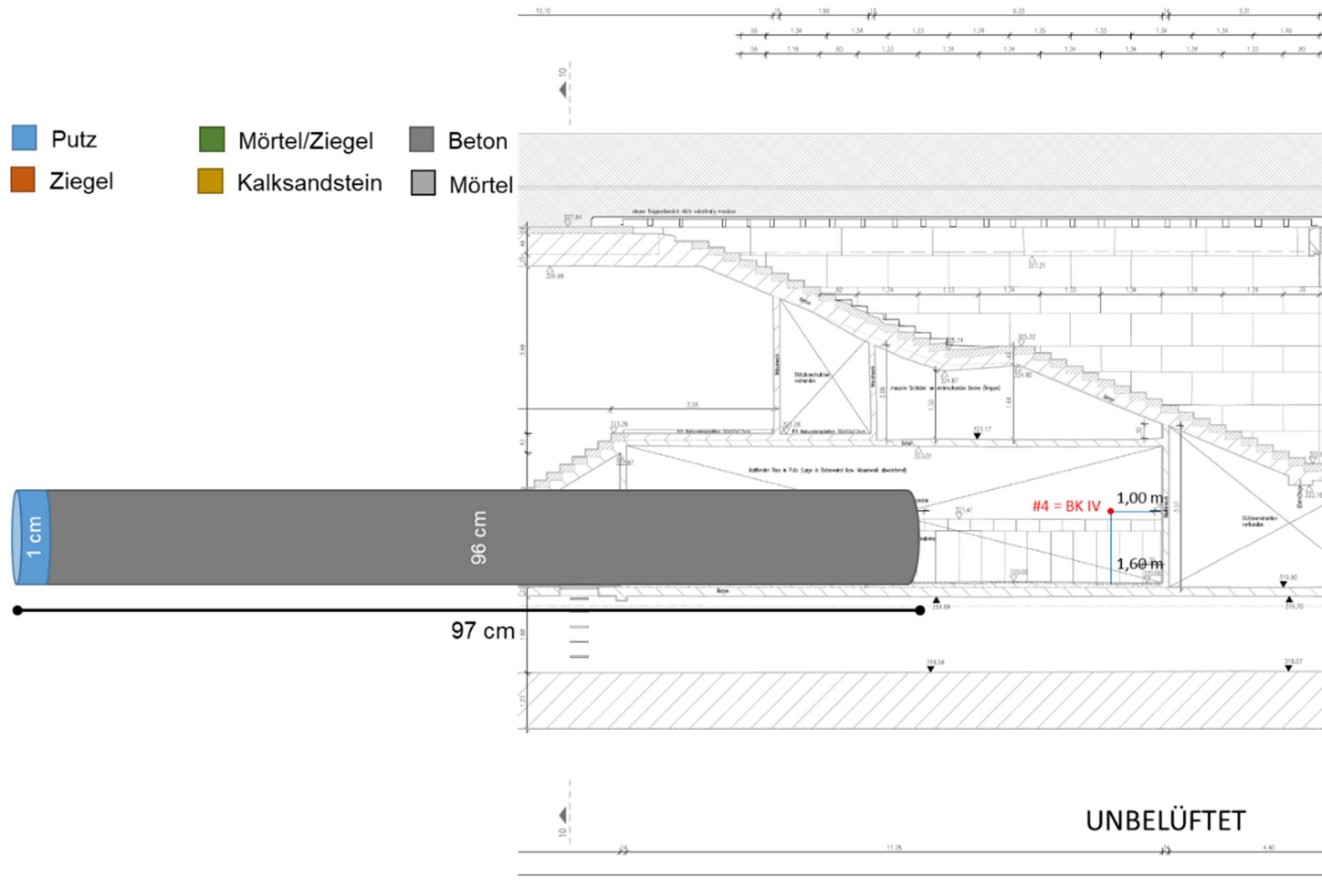


Bild 10: Entnahmestelle des Bohrkerns im nicht konditionierten Bereich



Tabelle 1: Feuchtegehalte der Bohrkern im konditionierten Bereich der Tribüne

	Entnahme-tiefe (cm)	Material-art	Wasser-gehalt u (M.-%)	Wasserauf-nahme u <sub>f</sub> (M.-%)	Durchfeuch-tungsgrad (%)	Bewertung	
Bohrkern I	0-1	Putz	14,57	14,57	<b>99,98</b>	<b>nass</b>	
	2-8	Ziegel	1,17	11,75	9,97	trocken	
	8-15	Ziegel	1,39	12,48	11,12		
	15-21	Ziegel	Fehlmessung				
	21-29	Ziegel	1,38	10,93	12,64	<b>sehr feucht bis nass</b>	
	29-35	Ziegel	10,85	10,85	<b>99,69</b>		
	35-42	Ziegel	9,59	9,91	<b>96,75</b>		
	42-50	Ziegel	10,36	11,68	<b>88,70</b>		
	50-57	Ziegel	7,43	12,10	61,44		
	57-61	Ziegel	12,77	12,77	<b>99,98</b>		
	61-67	Ziegel	9,38	12,12	<b>77,38</b>		
67-72	Ziegel	9,43	12,36	<b>76,27</b>			
Bohrkern II	0-1	Putz	6,63	9,27	<b>71,52</b>	<b>sehr feucht</b>	
	1-4	Ziegel	5,15	7,83	<b>65,71</b>	trocken	
	4-9	Ziegel	2,06	8,50	24,23		
	9-14	Ziegel	1,94	7,45	26,01		
	14-16	Mörtel	11,29	12,20	<b>92,52</b>	<b>nass</b>	
	16-17	Ziegel	5,19	10,33	50,24	trocken bis feucht	
	17-21	Ziegel	1,20	11,17	10,76		
	21-27	Ziegel	1,83	11,46	15,98		
	27-29	Ziegel	1,35	11,45	11,75		
	29-34	Ziegel	1,82	11,72	15,52		
	34-40	Ziegel	1,18	11,27	10,47		
	40-46	Ziegel	4,60	10,18	45,23		
	46-53	Ziegel	4,82	9,85	48,98	<b>nass</b>	
	53-56	Mörtel	11,31	11,31	<b>100,00</b>		
	56-67	Ziegel	5,83	13,15	44,33		
	67-68	Mörtel	7,75	10,98	<b>70,54</b>		
68-71	Ziegel	6,96	7,80	<b>89,18</b>			
71-73	Mörtel	10,70	11,79	<b>90,76</b>			
Bohrkern III	0-1	Putz	3,88	15,29	25,40	trocken	
	1-9	Beton	3,15	5,67	<b>80,14</b>	<b>nass</b>	
	9-16	Beton	3,85	5,62	<b>82,99</b>		
	16-21	Beton	3,25	5,57	<b>79,82</b>		
	21-30	Beton	3,44	5,15	<b>77,11</b>		
	30-34	Beton	3,01	5,84	<b>82,93</b>		
	34-46	Beton	5,30	6,22	<b>81,82</b>		
	46-53	Beton	5,71	6,83	<b>78,00</b>		
53-61	Beton	5,90	6,65	<b>99,97</b>			

**Tabelle 2: Feuchtegehalte des Bohrkerns im nicht konditionierten Bereich der Tribüne**

	Entnahme-tiefe (cm)	Material-art	Wasser-gehalt u (M.-%)	Wasserauf-nahme $u_f$ (M.-%)	Durchfeuch-tungsgrad (%)	Bewertung
Bohrkern IV	0–1	Putz	4,23	7,38	57,33	sehr feucht
	1–7	Beton	5,57	6,95	<b>80,14</b>	<b>sehr feucht bis nass</b>
	7–14	Beton	5,72	6,90	<b>82,99</b>	
	14–17	Beton	4,69	5,87	<b>79,82</b>	
	17–19	Beton	5,22	6,77	<b>77,11</b>	
	19–28	Beton	4,94	5,95	<b>82,93</b>	
	28–32	Beton	5,26	6,43	<b>81,82</b>	
	32–37	Beton	4,25	5,45	<b>78,00</b>	
	37–42	Beton	4,58	4,37	<b>99,97</b>	
	42–52	Beton	5,67	6,99	<b>81,18</b>	
	52–59	Beton	6,18	7,56	<b>81,67</b>	
	59–67	Beton	5,04	6,17	<b>81,70</b>	
67–72	Beton	5,01	9,69	51,76		

Im Rahmen des DBU-Verbundvorhabens sollte zudem ein Abgleich der tiefenabhängigen Feuchtebestimmung mit den TDR-Sonden anhand von thermisch-hygrischen Bauteilsimulationen vorgenommen werden. Für die Analysen mit hygrothermischen Simulationsmodellen bedarf es jedoch weiterer bauphysikalischer Kenngrößen und Materialfunktionen, weshalb weitere Laboruntersuchungen (Anhang - Tabelle 11) an den entnommenen Bohrkernen durchgeführt wurden:

- Bestimmung der Wasseraufnahme, der Porosität, der Rein- und Rohdichte,
- Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten,
- Bestimmung der Porengrößenverteilung.

Die Ergebnisse sind als Mittelwerte in Tabelle 3 dargestellt und wurden in dieser Form in den thermisch-hygrischen Simulationsmodellen zum Einsatz gebracht.

**Tabelle 3: Mittelwert der bauphysikalischen Kennwerte aus Laborversuchen**

Materialart	Porosität $\phi$ (%)	$\rho_{roh}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{rein}$ (g/cm <sup>3</sup> )	Wasserauf-nahme (M.-%)	Wasserauf-nahmekoeffizient (kg/m <sup>2</sup> vs)
Putz	21,30	1,91	2,44	13,61	0,031
Ziegel	21,06	1,95	2,48	10,83	0,062
Stampfbeton	13,52	2,20	2,55	5,94	0,0055

### 3.2 Entwicklung problemangepasster TDR-Sonden; Hardwareerweiterung für TDR-Vielstellenmesssystem und Softwarealgorithmen zur Erfassung, Auswertung und Bewertung der Messdaten

Im Rahmen des Vorhabens sollte eine möglichst zerstörungsarme Messmethode zur Bestimmung der Materialfeuchte im Mauerwerk der Zeppelintribüne Nürnberg entwickelt werden. Die

Aufgabe der Firma TRUEBNER GmbH war dabei die Entwicklung einer mikrocontrollergesteuerten Hochfrequenzmesselektronik mit Datenschnittstelle zur Abfrage mehrerer Messstellen.

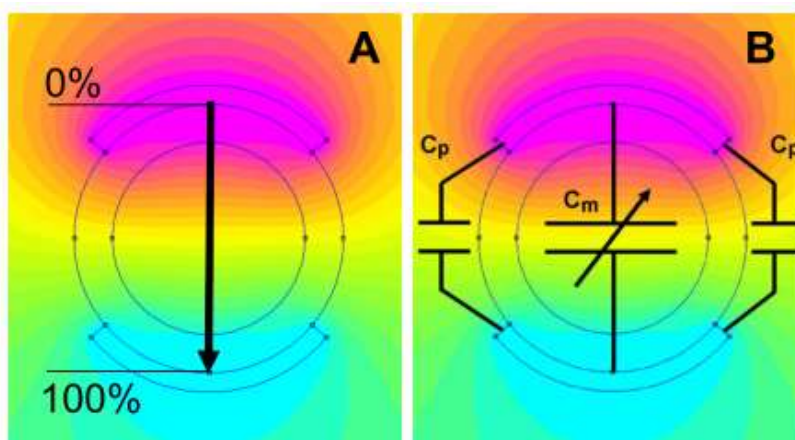
Bereits beim ersten Projekttreffen am 05.12.2016 wurden von den Projektpartnern eine beschleunigte Entwicklung der neuen Sonden und ein möglichst frühzeitiger Einbau in das Mauerwerk gewünscht. TRUEBNER kam diesem Wunsch nach und hat die Arbeiten vorgezogen. Wie vereinbart konnte dann im September 2017 die Installation und die datentechnische Einbindung des Messsystems zusammen mit Hr. Eidenschink von der Stadt Nürnberg erfolgreich vorgenommen werden. Bis zum Projektende wurden die Messungen weiter fachlich betreut. Des Weiteren wurde für die Laborversuche und den erforderlichen Abgleich der Messwerte hinsichtlich der tatsächlichen Materialfeuchtegehalte ein weiteres TDR-Messsystem aufgebaut und an MOCult ausgeliefert. Nachfolgend werden die durchgeführten Entwicklungsschritte sowie die Installation in Nürnberg beschrieben.

### 3.2.1 Sondenentwicklung

#### 3.2.1.1 Elektrodenentwurf

Das physikalische Messprinzip der neuen TDR-Sonde beruht auf der Wechselwirkung zwischen dem feuchten Material und dem einwirkenden hochfrequenten elektromagnetischen Feld [1]. Bei höherem Wassergehalt nimmt die Dielektrizitätszahl des Materials zu und damit die messbare elektrische Kapazität. Das Elektrodendesign muss dabei auf die geometrischen Randbedingungen (Durchmesser des Bohrlochs) der Einbausituation Rücksicht nehmen. Ziel des Sondendesigns ist, dass das elektrische Feld der Sondenelektroden soweit als möglich in das umgebende Material eindringt. Auf diese Weise lässt sich erreichen, dass ein eventueller Luftspalt am Übergang zwischen Elektrode und Mauerwerk nur einen geringen Einfluss auf das Messergebnis hat.

Zur Optimierung der Elektrodengeometrie wurden numerische Berechnungen nach dem Finite-Elemente Verfahren durchgeführt und verschiedene Elektrodengeometrien in zahlreichen Simulationen untersucht. Dabei wurden sowohl die Materialeigenschaften im Mauerwerk als auch die durch Metallschichten belegten Winkelbereiche variiert. Bild 11 zeigt ein Berechnungsergebnis zusammen mit einem elektrischen Ersatzschaltbild.



**Bild 11: Numerische Feldsimulation von Sondenelektroden (elektrisches Feld)**

Der Darstellung ist die Feldausdehnung innerhalb und außerhalb des Rohres zu entnehmen. Das innerhalb des Rohres befindliche Feld trägt nicht zum Messeffekt bei und stellt einen Störfaktor dar, der z. B. durch die im Rohr geführten Zuleitungen nicht unmittelbar vorhersagbar ist. Der gewünschte Messeffekt ergibt sich durch das in das Mauerwerk hineinreichende Feld der Parallelkapazitäten  $C_p$ . Mit einer Optimierung der Elektrodengeometrie konnte das Verhältnis  $C_p/C_m$  vergrößert und dadurch der Messeffekt optimiert werden.

### 3.2.1.2 Elektrodenherstellung

Die Elektroden wurden auf einen Rohrkörper aus Kunststoff aufgebracht. Sie bestehen aus hochleitfähiger Kupferfolie, die auf eine Schaumstoffunterlage geklebt wurde (Bild 12). Bei der Materialauswahl wurde auf eine dauerhafte Flexibilität und eine hohe Feuchtigkeitsbeständigkeit geachtet. Die Schaumstoffunterlage mit einer Dicke von ca. 1 mm ermöglicht das bündige Anpressen an die Rohrwandung und somit den Ausgleich von Unebenheiten. Der Abstand und die Breite der Elektroden wurden mit Hilfe der numerischen Feldberechnung optimiert, so dass ein bevorzugtes Eindringen des elektrischen Feldes in das Mauerwerk erfolgt.



**Bild 12: Nahaufnahme der Kupferelektroden**

Für die Sonde wurden 8 Elektrodengruppen auf einen Rohrkörper aufgebracht (siehe Bild 13). Die Abstände der Elektrodengruppen sind so gewählt, dass eine minimale gegenseitige Beeinflussung erfolgt. Die Ankopplung an die im Rohr liegende Hochfrequenzelektronik erfolgt über isolierte Kupferlitzen, die über Zugangsbohrungen auf die Kupferflächen geführt und angelötet wurden.



**Bild 13: Segmentierte Sonde mit 8 Elektrodengruppen**

Abschließend wurde eine Isolierbeschichtung ganzflächig auf die Elektroden aufgebracht, die sowohl als Schutz der Kupferfolie dient sowie die Störeffekte durch eine vorhandene elektrische Leitfähigkeit des feuchten Mauerwerks wirkungsvoll unterdrückt (Bild 14).

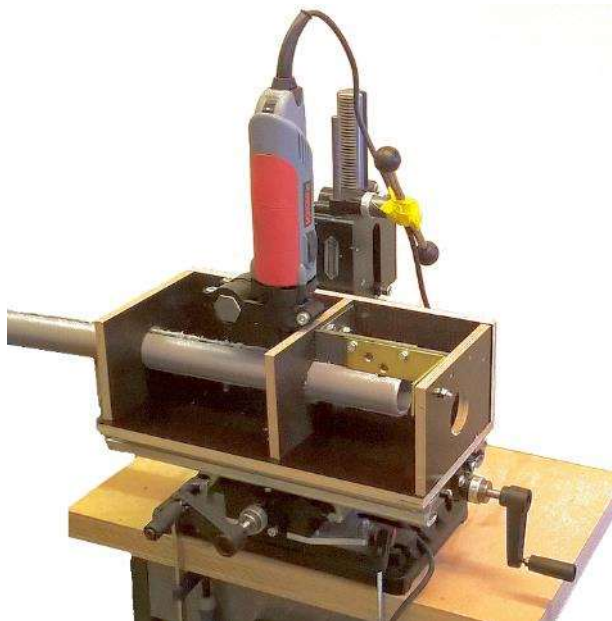


**Bild 14: Sonde mit Isolierung**

Die Zuleitungen zur Schalt- und Auswerteelektronik (Multiplexer) werden gebündelt über das Rohrende hinausgeführt. Da sich die hochfrequenten Messelektroniken innerhalb des Rohres befinden, werden über diese Leitungen nur niederfrequente Signale transportiert, so dass eine störungsarme Übertragung auch über längere Strecken ermöglicht wird.

### 3.2.1.3 Mechanische Konstruktion und Herstellung der Rohrkörper

Vordringliches Ziel der mechanischen Konstruktion ist das Erreichen einer engen Ankopplung der Elektroden an die Bohrlochwand. Hierbei sollte das Einführen der Sonde in das Bohrloch jedoch problemlos möglich sein. Verschiedene mechanische Lösungen wurden gegeneinander abgewogen und entsprechende Laborexperimente durchgeführt, um über Federmechanismen und Druckaufbau (z. B. mit Ausdehnungsschläuchen und Polyurethanschaum zur Druckerhöhung) den gewünschten Anpressdruck zu erreichen. Eine eingehende Literaturrecherche wurde durchgeführt und Beratung durch eine Firma aus der Geotechnikbranche in Anspruch genommen (Firma Solexperts, Schweiz). Diese verfügt über umfangreiche Erfahrungen in der Entwicklung und Herstellung von s. g. „Bohrlochpackern“. Bei einem Besuch der Firma Solexperts wurden verschiedene Herstellungsvarianten diskutiert. Letztendlich konnte eine elegante und vergleichsweise leicht herstellbare Lösung gefunden werden. Bei dem Rohrkörper handelt es sich um einen geschlitzten Aufbau. Durch die Eigenspannung des Kunststoffrohres rollt sich das Material infolge der Schlitzung ein, so dass sich der Rohrdurchmesser verringert, damit wird ein leichtes Einführen der Sonde in das Bohrloch ermöglicht. Doch ist es unerlässlich, dass der Rohrschlitz präzise gefertigt wird, damit sich beim Einbau ein Spanprofil einschlagen lässt, das bewirken soll, dass die Elektroden gleichmäßig an die Bohrlochwand angedrückt werden. Zur Herstellung der Schlitzte wurde eine spezielle Fräsvorrichtung konstruiert und hergestellt.



**Bild 15: Fräsvorrichtung zum Schlitzten der Rohrkörper**

Bild 15 zeigt die Vorrichtung mit einem eingespannten Rohr. Über drei Durchlässe wird das Rohr zentriert. Gleichzeitig verhindert ein Keil die Verdrehung. Der Fräskopf kann je nach gewünschter Schlitzbreite bestückt werden. Ein sauberer Schnitt wird über eine Drehzahlregelung erreicht.

#### 3.2.1.4 Softwareentwicklung für die Messdatenerfassung

Die Messsignale der in der Sonde befindlichen Hochfrequenzschaltung werden auf den entwickelten Multiplexer gegeben und dort erfasst. Im Multiplexer wurde eine s. g. RS-485 Schnittstelle verbaut, um das für die Software der raumluftechnischen Anlage der Stadt Nürnberg benötigte MOD-Bus Protokoll bereitstellen zu können. Dazu hat TRUEBNER eine umfassende Mikrocontrollersoftware entwickelt. Der Stadt Nürnberg wurde vor dem Installationstermin bereits ein Multiplexer zugesandt, damit die Interoperabilität mit der dortigen Messdatenerfassung erprobt werden konnte. Dank der erfolgreichen Vorversuche konnte die TDR-Messtechnik dann reibungslos in das Datenerfassungssystem der Stadt Nürnberg integriert werden.

#### 3.2.2 Sondeninstallation

Im Juni 2017 erfolgten vier Bohrungen im Mauerwerk der Zeppelintribüne mit Bohrlochtiefen von 1,0 m bis 1,2 m. Die Bohrungen wurden trocken bis zu einer Tiefe von 72 cm ausgeführt. Der Rest wurde nass gebohrt. Danach erfolgte die Sondenfertigung bei TRUEBNER. Der Einbau wurde im September 2017 vorgenommen. Die Installation erfolgte nach dem hier erläuterten Verfahren.

Im ersten Schritt werden die Bohrlöcher inspiziert und ausgeputzt (Bild 16).



**Bild 16: Ausputzen der Bohrlöcher**



**Bild 17: Ausblasen mit Druckluft**

Danach erfolgte ein Ausblasen mit Druckluft (Bild 167). Der Druckluftschlauch wird in das Bohrloch bis zum Ende eingeführt und dann langsam unter Druckaufbau nach außen gezogen.



**Bild 18: Eingeführter Druckluftschlauch**



**Bild 19: Einführung der Sonde in das Bohrloch**

Danach wird die Sonde vorsichtig in das Bohrloch eingeführt (Bild 19). Die Sonde liegt zu diesem Zeitpunkt locker im Bohrloch. Das Spannprofil wird im nächsten Schritt angesetzt und mit einem Gummihammer eingeschlagen (Bild 20). Zum leichteren Einschlagen wird das Profil mit Gleitmittel bestrichen (Bild 21). Das Spannprofil bewirkt ein Auseinanderpressen des geschlitzten Rohres, so dass die Elektroden an der Bohrlochwand eng anliegen.



**Bild 20: Einschlagen des Spannprofils**



**Bild 21: Auftragen von Gleitmittel auf das Spannprofil**

Bild 22 zeigt den Einbauzustand nach dem Einschlagen des Spannprofils. Der Rohrkörper ist bündig mit der Bohrlochwand verklemt.



**Bild 22: Einbauzustand nach der Verklebung**



**Bild 23: Prinzip der Verklebungstechnik**

Die Verklemmungstechnik ist in Bild 23 noch einmal schematisch zu erkennen. Nach dem Schlitzeln des Rohrs rollt es sich durch Eigenspannung ein. Damit verringert sich der Durchmesser und die Sonde kann leicht in das Bohrloch eingeführt werden. Über die Verklemmung mit dem Spannprofil wird der Durchmesser wieder vergrößert und der Anschluss zur Bohrwand hergestellt.

Im nächsten Schritt erfolgt die Verschaltung der Kabel am Multiplexer sowie die Anbindung an die Datenerfassung (Bild 24).



**Bild 24: Verkabelung des Multiplexers**

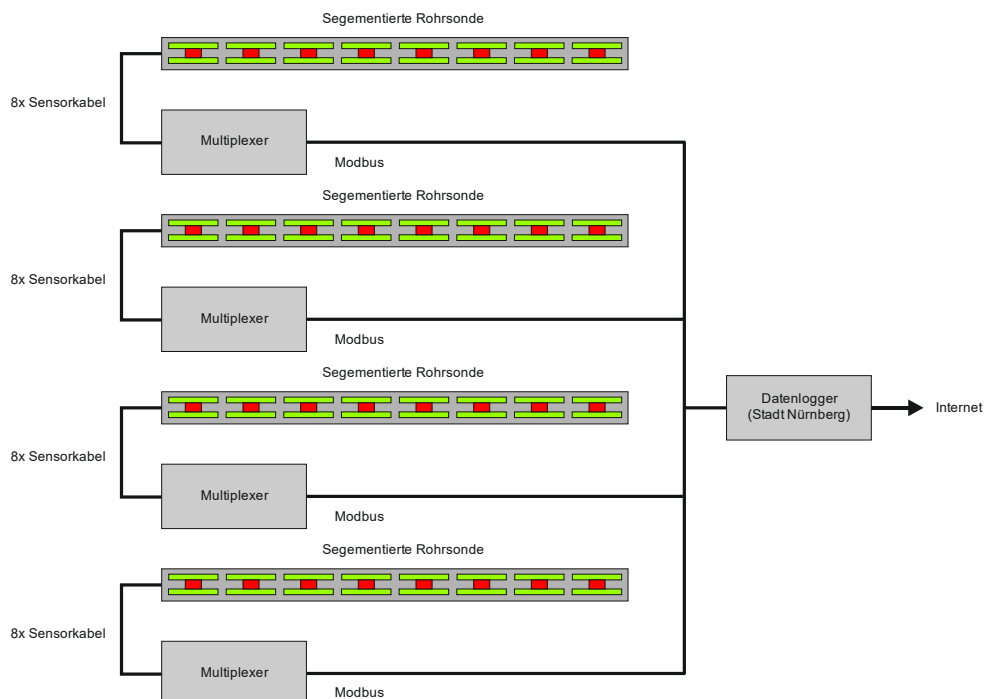
Bild 25 zeigt die Ansicht der Gesamtanordnung an zwei übereinanderliegenden Bohrlöchern.



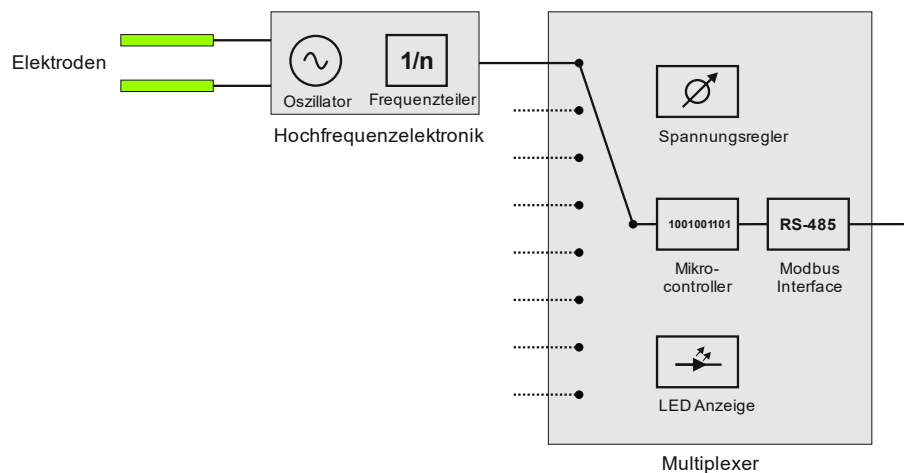
**Bild 25: Ansicht Messsystem am Mauerwerk**

Das Gesamtsystem ist wie in Bild 26 gezeigt verdrahtet.





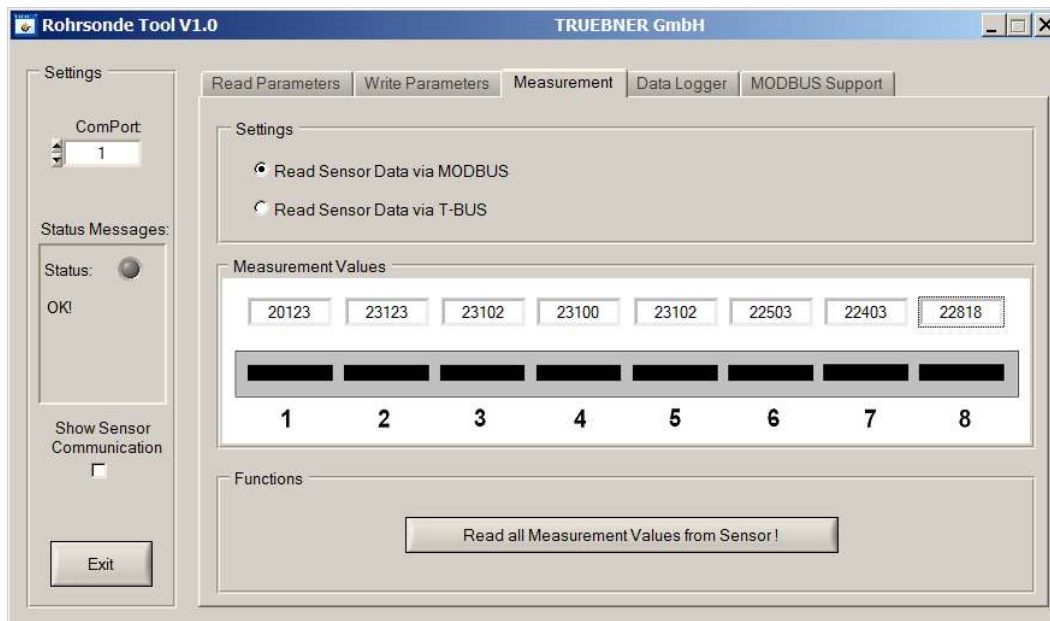
**Bild 26: Aufbau des Gesamtsystems (Blockbild)**



**Bild 27: Blockschaltbild der Elektronik**

### 3.2.3 Entwicklung einer PC-Software für Kalibrierversuche

Im Anschluss an die Sensorinstallation wurden zwei weitere Multiplexer gefertigt sowie eine Sensorschaltung. Hiermit sollte der Projektpartner MOCult die erforderlichen Kalibrierungsanalysen vornehmen. Hierzu wurde eine spezielle PC-Software entwickelt, mit der sich die Messdaten abfragen und abspeichern lassen (Bild 28).



**Bild 28: PC-Software für Kalibrierversuche**

Die Software ermöglicht zudem die Konfiguration des Multiplexers wie z. B. die Einstellung der MOD-Bus-Adresse. Ein eingebauter Datenlogger erlaubt darüber hinaus die automatisierte Aufzeichnung von Messdaten.

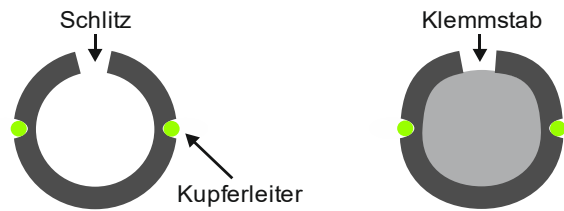
### **3.2.4 Weiterentwicklung der Sonde für kleinere Bohrl Lochdurchmesser**

Der an der Zeppelintribüne verwendete Bohrl Lochdurchmesser von 50 mm ist vergleichsweise groß. In anderen Einsatzfällen sind kleinere Bohrl Lochdurchmesser zu erwarten, so dass eine weitere Miniaturisierung der Messtechnik untersucht wurde. Die untere Grenze eines praktischen Rohrl Lochdurchmessers für die Variante mit Kupferflächen liegt bei etwa 2 cm. Danach wird das verfügbare Bauvolumen für eine im Rohr befindliche Elektronik zu klein, so dass die Elektronik außerhalb angebracht werden muss. Auf der Basis von Vorerfahrungen mit dünnen Kunststoffrohren als Sensorträger wurde deren Eignung als Bohrl Lochsonde zusammen mit einer neu entwickelten Elektronik untersucht. Die dünne Rohrsonde besteht aus einem hochfesten Kunststoffrohr, das längs geschlitzt und mit zwei Nuten versehen wird (Bild 29).



**Bild 29: Längs geschlitztes Kunststoffrohr**

Die Nuten werden durch einen Kupferleiter ausgefüllt. Danach erfolgt das Einbringen in ein Bohrl Loch. Anschließend wird ein Klemmstab eingeschlagen, der die Rohrl Wandung an die Bohrl Lochwand anpresst (Bild 30).



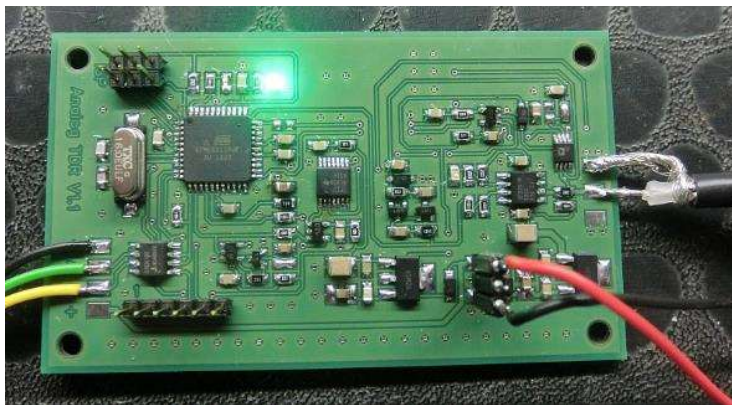
**Bild 30: Skizze der dünnen Rohrsonde vor und nach der Verklemmung**



**Bild 31: Fräse zum Schlitzten und Nuten der dünnen Rohrsonde**

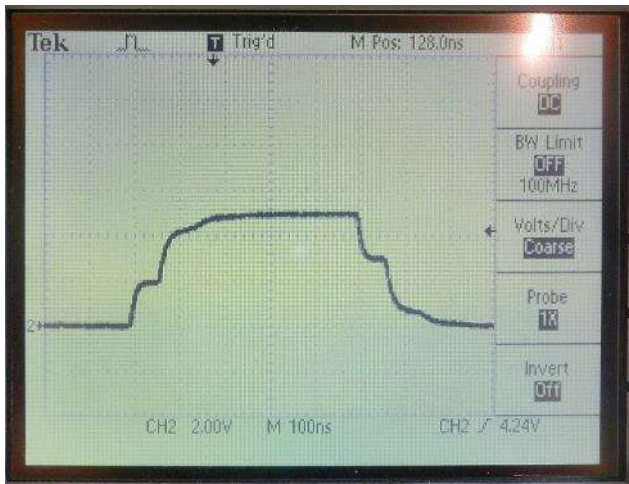
Die Herstellung des geschlitzten und genuteten Rohres erfordert eine spezielle Fräseinrichtung, die entwickelt wurde (Bild 31). Ein Sägeblatt schlitzt das Rohr, die beiden anderen fräsen eine genau definierte Nut ein, in die später dann der Kupferdraht als kontinuierliche Sonden­elektrode eingezogen werden kann.

Zur Bestimmung der Materialfeuchte mit der dünnen Bohrlochsonde wurden zwei Elektronikvarianten untersucht. Die erste Variante verwendet Elektrodensegmente, die über dünne Koaxialkabel an einen außenliegenden Netzwerkanalysator zur Erfassung der Resonanzfrequenz angeschlossen werden. Dieser Ansatz hat sich jedoch als zu aufwendig in der Herstellung herausgestellt. Deshalb wurde wieder das TDR-Messprinzip aufgegriffen und eine angepasste Messelektronik entworfen (Bild 32).



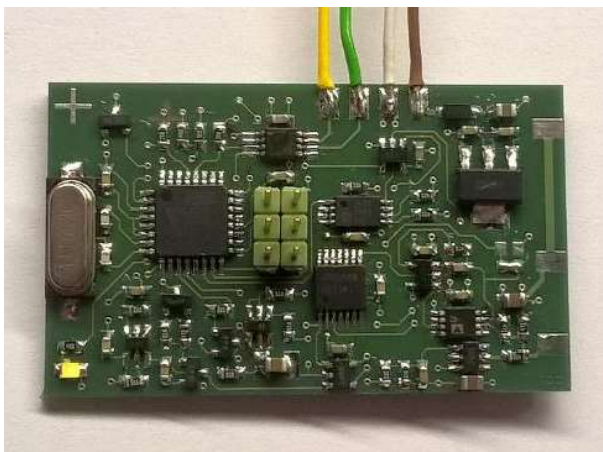
**Bild 32: TDR Messelektronik nach dem analogen Rampenverfahren**

Bild 33 zeigt einen oszillographischen Ausschnitt aus einem typischen Messsignal mit dem charakteristischen Reflexionsmuster einer am Ende offenen Messleitung. Damit wurde die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Schaltung bestätigt.



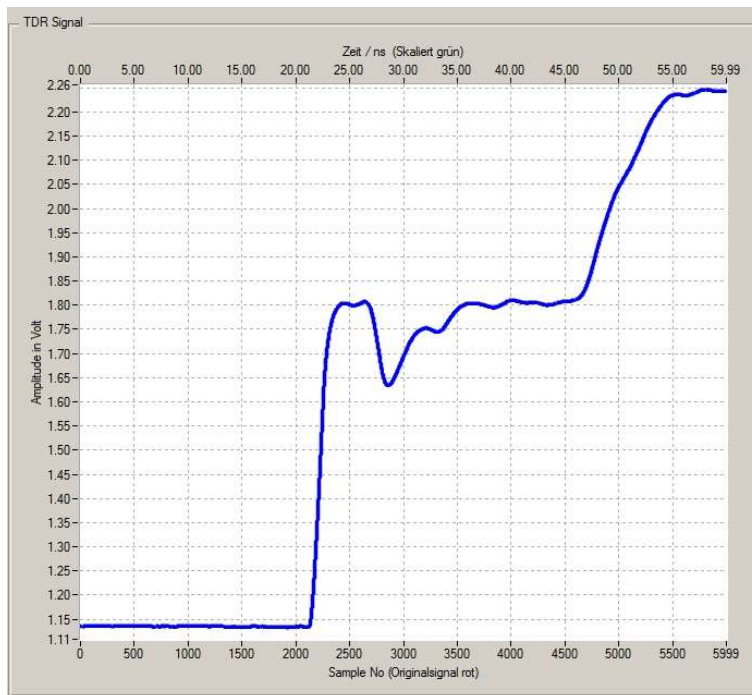
**Bild 33: TDR Reflexionsmuster einer am Ende offenen Leitung**

Die Elektronik wurde in einem weiteren Schritt optimiert und miniaturisiert (Bild 34) sowie eine digitale Datenübertragung inklusive PC-Visualisierung programmiert.



**Bild 34: Optimierte TDR Messelektronik**

In Bild 35 ist ein Messergebnis gezeigt, das an einer Messleitung mit inhomogener Feuchteverteilung bestimmt wurde. Im Zeitbereich um 30 ns ist ein Einbruch der Signalstärke zu erkennen, der von der größeren Materialfeuchte und dem damit verursachten Absinken des Wellenwiderstands verursacht wird.



**Bild 35: TDR Kurve bei inhomogener Feuchteverteilung: der Peak nach unten zeigt eine feuchte Stelle an**

Die Zeitspanne, vom Eindringen des TDR-Impulses in die Messleitung bis die Reflexion am offenen Leitungsende wieder am Einspeisepunkt erscheint, beträgt ca. 25 ns. In Luft als umgebendem Material entspricht dies einer Strecke von ca. 6 m. Die Erfahrungen zeigen, dass mit der TDR-Messelektronik ab etwa 2 m Sensorenlänge ausreichend orts aufgelöste Messdaten erzielt werden können. Die Amplitudenaufösung liegt bei 8 bit. Dies reicht zur Erfassung von Feuchteänderungen in der Größenordnung von ca. 3 % aus. Bei sehr geringen Feuchteänderungen ist die Auflösung zu gering. Dann ist die Sonde mit Einzelsegmenten erheblich besser. Je nach Messdauer (Integration zur Verringerung des Rauschens) ist eine Auflösung in der Größenordnung zwischen 10 und 14 bit möglich. Dies ist auch der Grund, warum bei der für das Mauerwerk der Zeppelintribüne ausgewählten Sensorik die segmentierte Sonde bevorzugt wurde. Als Fazit können folgende Vor- und Nachteile der beiden Sondentypen angeführt werden (Tabelle 4):

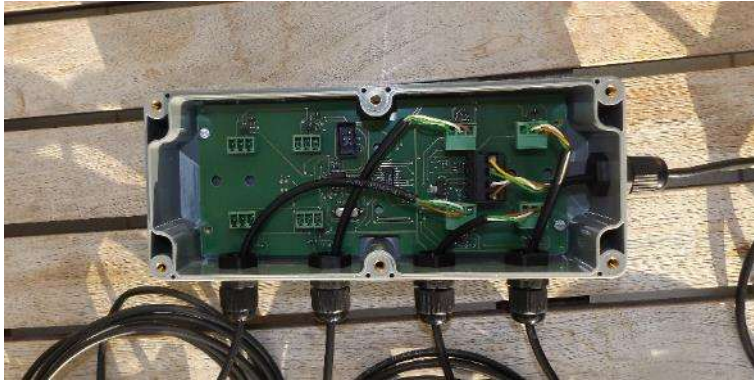
**Tabelle 4: Sondenvergleich**

Sondentyp	Feuchteauflösung	Ortsauflösung
Segmentierte Sonderelektroden	hoch	gering
Kontinuierliche Sonderelektroden	gering	hoch

In der praktischen Anwendung kommt es deshalb auf die konkrete messtechnische Aufgabenstellung an. Mit dem in diesem Vorhaben entwickelten Instrumentarium können anwendungsspezifische Lösungen vergleichsweise schnell nach einem Baukastenprinzip entwickelt werden.

### 3.2.5 Entwicklung des Labormesssystems

Für das Labormesssystem zur Kalibrierung wurde eine Messelektronik erstellt, die vier Einzelsensoren erfassen und über eine RS-485 (MOD-Bus) Schnittstelle weiterleiten kann (Bild 36).



**Bild 36: Elektronik für das Labormesssystem**

Als Sensoren wurden Elektrodenstrukturen erstellt, die denen der Bohrlochsonde entsprechen, jedoch um einen Bohrkern gelegt werden können. (Bild 37 und Bild 38).



**Bild 37: Einzelelektroden und Messelektronik**



**Bild 38: Fixierung der Elektroden um einen Zylinder**

### 3.2.6 Fazit

Die Entwicklung einer problemangepassten Materialfeuchtesensorik konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Herausforderung bestand sowohl in der mechanischen Ausgestaltung als auch in der elektronischen Realisierung der Messtechnik. Durch flexible Elektroden lassen sich in verschiedenen Tiefenbereichen die Feuchtezustände und deren zeitliche Veränderung orts aufgelöst bestimmen. Mit Hilfe einer speziell entwickelten Einbautechnik kann die Sensorik auch in nicht perfekten Bohrlöchern mit rauem Rand eingesetzt werden. Zur Anbindung an die

Datenerfassung der Stadt Nürnberg wurde das in der Automatisierungstechnik weit verbreitete MOD-Bus-Protokoll auf RS-485 Ebene implementiert. Dies ist ein großer Vorteil der neuen Messtechnik, da die Sensorik somit kompatibel zu einer Vielzahl marktgängiger Datenerfassungssysteme ist. Deshalb lässt sich die entwickelte Messtechnik sehr universell einsetzen. Allerdings ist die segmentierte Elektrodenanordnung für Anwendungen mit kleinem Durchmesser weniger geeignet. Für derartige Anwendungsfälle konnte eine weitere Sensoranordnung mit dazugehöriger Elektronik entwickelt werden. Um einen guten Andruck an die Bohrlochwand zu ermöglichen, kommt auch bei dieser Sonde eine Verklebung zum Einsatz. Die Segmentfassung wurde jedoch durch eine eigens entwickelte TDR-Elektronik ersetzt, die durch die Verwendung einer Linienleitersonde eine feinere Ortsauflösung ermöglicht. Jedoch erwies sich deren Einsatz im Vorhaben an der Zeppelintribüne als weniger geeignet als die größeren TDR-Sonden mit segmentierter Elektrodenanordnung. Für den Projektpartner MOCult wurden darüber hinaus Elektroden, Sensorelektronik und eine Software entwickelt, mit denen die für die Feuchtebewertung erforderlichen Kalibrierexperimente durchgeführt werden konnten.

### **3.3 Bewertung der TDR-Sondensignale - Kalibrierung und Abgleich**

#### **3.3.1 Labortechnische Untersuchungen zur Bewertung der TDR-Signale**

Im Folgenden werden die Arbeiten aufgezeigt, die zur Bewertung der TDR-Signale im Hinblick auf die Feuchteverteilung im Bauteilinnern vorgenommen werden mussten, um die über die gesamte Sondenlänge von einem Meter in 8 Messbereiche unterteilten Einzelsonden erfassten Signalwerte in zugehörige Materialfeuchtegehalte wandeln zu können. Die von der TDR-sonde über die 8 Segmente erfassten Einzelwerte geben folglich einen integralen Wert eines Tiefenbereichs von 12,5 cm wieder. Entsprechend sind über die gesamte Sondentiefe 8 Werte für den volumenbezogenen Wassergehalt für einen Abschnitt von 12,5 cm anzugeben.

Tabelle 5 zeigt die Wassergehalte in masse- bzw. volumenbezogener Form für den Tag der Probenentnahme sowie für den Tag des Einbaus der TDR-Sonden auf und gibt in einer weiteren Spalte die ersten Messwerte der Sonden wieder.

Ein erster Vergleich der gravimetrisch bestimmten Wassergehalte mit den Startwerten der TDR-Signale für die acht Segmente der TDR-Sonden verdeutlicht, dass eine direkte Zuordnung von Wassergehalt und TDR-Signal nicht ohne weitere Betrachtungen möglich ist. So zeigen die Messwerte in Tabelle 5, dass in Bereichen, in denen die gravimetrische Feuchtebestimmung den Sättigungsfeuchtezustand aufweist, die TDR-Sonde nicht den einer Sättigungsfeuchte zugehörigen Signalwert aufweist. So liegt der der Sättigungsfeuchte des Ziegels zugehörige TDR-Signalwert bei  $\approx 22.500$ .

Die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte liegen beim Ziegel zwischen 4,74 und 18,88 Vol.-% und beim Beton zwischen 7,86 und 12,81 Vol.-%. Die TDR-Signale lassen demgegenüber keine direkte Zuordnung für die 8 Messbereiche erkennen.

**Tabelle 5: Zuordnung der TDR-Sondenabschnitte zum Wassergehalt - TDR-Messwerte am 16.09.2017**

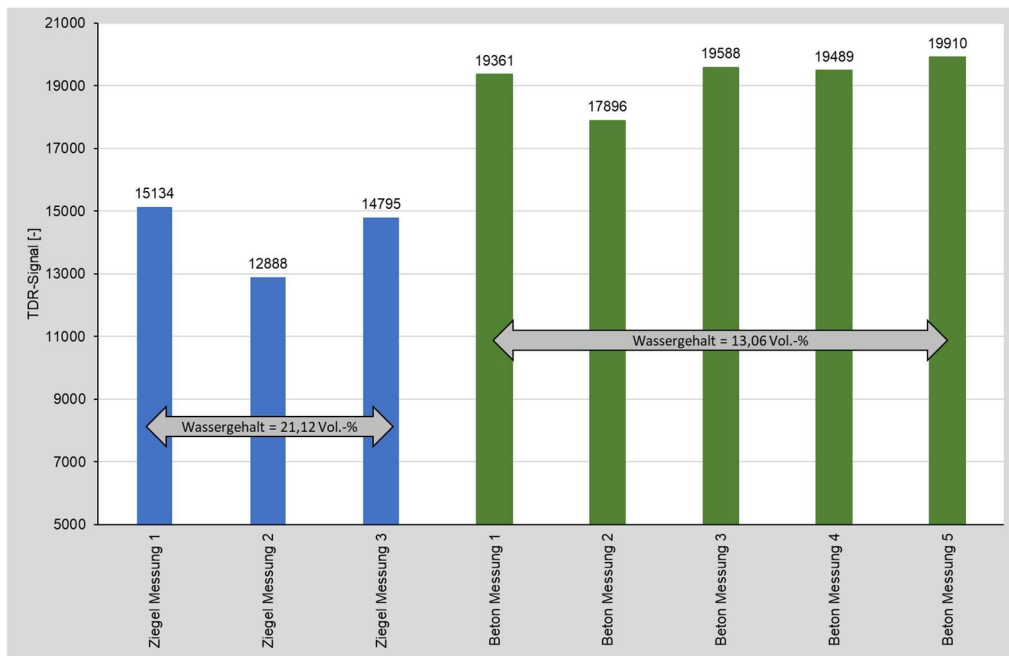
	TDR-Sensor	Materialart	Wassergehalt u (M.-%)	Wassergehalt u <sub>v</sub> (V.-%)	TDR-Messwert Tag der Installation
Bohrkern I	1	Putz/Ziegel	2,36	4,60	18.300
	2	Ziegel	1,38	2,70	21.003
	3	Ziegel	6,80	13,26	22.550
	4	Ziegel	9,98	19,45	19.526
	5	Ziegel	9,25	18,04	24.368
	6	Ziegel	9,68	18,88	22.743
	7	Ziegel	10,83*	21,12	15.134
	8	Ziegel	10,83*	21,12	12.888
Bohrkern II	1	Putz/Ziegel	3,18	6,21	21.887
	2	Ziegel	2,43	4,74	22.586
	3	Ziegel	1,64	3,19	21.138
	4	Ziegel	3,50	6,82	18.698
	5	Ziegel	5,16	10,06	15.506
	6	Ziegel	6,21	12,10	21.706
	7	Ziegel	10,51	20,49	18.235
	8	Ziegel	10,83*	21,12	14.795
Bohrkern III	1	Putz/Beton	3,39	7,45	21.702
	2	Beton	3,49	7,68	22.634
	3	Beton	3,61	7,93	22.639
	4	Beton	5,37	11,81	21.811
	5	Beton	5,82	12,81	22.515
	6	Beton	5,94*	13,06	19.361
	7	Beton	5,94*	13,06	17.896
	8	Beton	5,94*	13,06	19.588
Bohrkern IV	1	Putz/Beton	5,52	12,15	21.331
	2	Beton	5,05	11,10	18.848
	3	Beton	4,82	10,60	19.192
	4	Beton	5,10	11,21	19.084
	5	Beton	5,78	12,71	18.084
	6	Beton	5,03	11,06	21.004
	7	Beton	5,94*	13,06	19.489
	8	Beton	5,94*	13,06	19.910

\* kein labortechnischer Feuchtegehalt (nur noch Nassbohrung möglich) - Proben durchfeuchtet

Entsprechend wurden von MOCult mit den vom Projektpartner TRUEBNER bereitgestellten TDR-Sonden die TDR-Signalwerte bei maximalem Wassergehalt der Materialfeuchte bestimmt. In Bild 39 sind hierzu für einen gesättigten Ziegel und einen gesättigten Beton die gemessenen TDR-Signalwerte gegenübergestellt. Die Versuchsergebnisse belegen, dass sich bei den beiden gesättigten Materialproben ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Signalthöhe und dem zugehörigen Wassergehalt der im Messbereich der Sonde befindlichen



Materialfeuchte einstellt. So führt ein hoher Wassergehalt im Messbereich der Sonde zu einem kleineren Signalwert als ein geringerer Wassergehalt, der einen höheren Signalwert zur Folge hat, wie dies die beiden unterschiedlichen Sättigungsfeuchtegehalte von Beton ( $u_v = 13,06 \text{ V.-%}$ ) und Ziegel ( $u_v = 21,12 \text{ V.-%}$ ) belegen.



**Bild 39: TDR-Messwerte bei max. Wassergehalt aus Bestimmung der Eigenfeuchte**

Aufgrund dieser Zuordnungsproblematik wurden umfangreiche labortechnische Untersuchungen mit Hilfe der vom Projektpartner TRUEBNER entwickelten „Laborsonden“ durchgeführt. Hierbei standen die nachfolgenden Aspekte im Fokus der vorgenommenen Analysen:

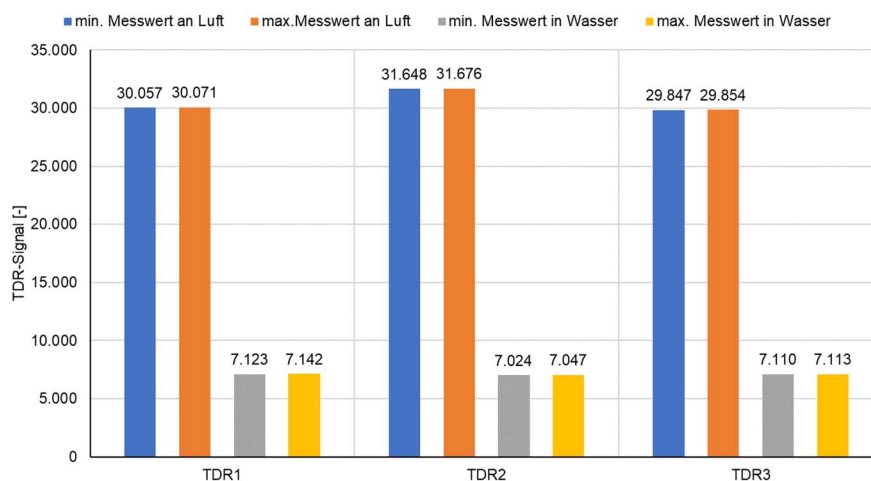
- Vergleich der TDR-Messwerte der drei zur Verfügung stehenden Laborsonden zur Klärung der Messcharakteristik von Einzelsonden,
- Bestimmung der TDR-Messwerte für trockenes und maximal wassergesättigtes Probenmaterial,
- Einfluss der Gleichförmigkeit des Gefüges und der Geometrie des entnommenen Probenmaterials.

Zunächst wurde eine Methodik herausgearbeitet und ein Versuchsstand im Labor aufgebaut, um mit den vom Projektpartner TRUEBNER bereitgestellten „TDR-Laborsonden“ nebst dem zugehörigen Messsystem die Signalwerte für feuchtetechnisch vorkonditionierte Materialproben analysieren zu können. Mit diesen Versuchen sollte einerseits die Messcharakteristik der drei TDR-Laborsonden herausgearbeitet werden. Hierzu sollten die Materialproben sowohl im Sinne einer Trockenlagerung im Klima  $20 \text{ °C}$  und  $65 \text{ % r. F.}$  als auch unter Wasser bis zur Gewichtskonstanz vorgelagert werden, um dann die Messungen mit jeder der drei Sonden vorzunehmen. Insgesamt sollten die Messungen mindestens über 7 Versuche vorgenommen werden, um aus den Ergebnissen den Minimalwert, den Maximalwert und die Schwankungsbreite für die beiden Feuchtezustände der unterschiedlichen Materialprobe für die beiden Lagerungsrandbedingungen zu bestimmen.

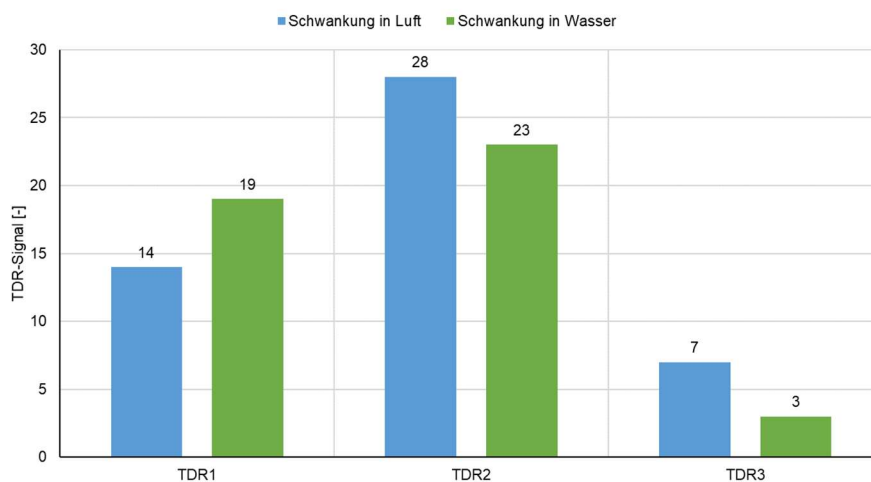
In einem ersten Schritt sollte aber die Messcharakteristik der drei Sonden ohne Materialeinfluss untersucht werden. Hierzu wurden die Sonden in der Luft und unter Wasser ohne Störeinflüsse platziert, um die jeweiligen TDR-Signalmesswerte zu erfassen. Die Messungen an Luft und im Wasser wurden im Labor sieben Mal hintereinander durchgeführt. Aus den Messwerten konnte so der Minimal- und der Maximalwert (Bild 40) sowie die Schwankungsbreite (Bild 41) ermittelt werden.

Die Messungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- TDR-Signalwerte (in **Luft** gelagert): 29.800 bis 31.700 → **Werte > 29.800**,
- TDR-Signalwerte (in **Wasser** gelagert): 7.000 bis 7.200 → **Werte < 7.200**,
- Schwankungsbreite (in Luft gelagert): 7 bis 28 (≈ 0,10 %),
- Schwankungsbreite (in Wasser gelagert): 3 bis 23 (≈ 0,35 %),
- TDR-Sonde Nr. 2 weist die höchsten und niedrigsten Messwerte auf,
- TDR-Sonde Nr. 2 zeigt größte Schwankungsbreite,
- prozentuale Abweichung der TDR-Sonden untereinander: (in Luft gelagert) ≈ 6,0 %  
(in H<sub>2</sub>O gelagert) ≈ 1,5 %.



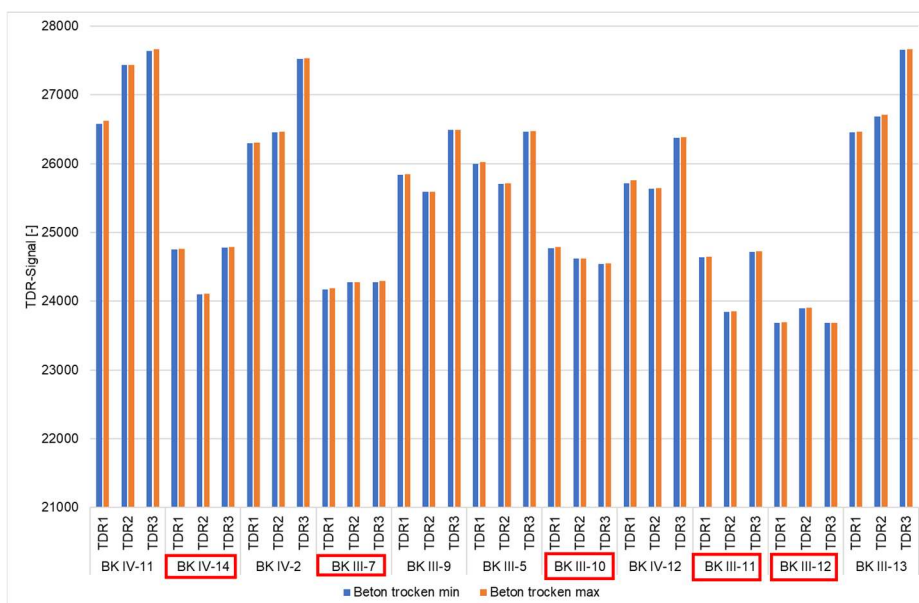
**Bild 40: TDR-Signal ohne Probenmaterial in Luft und in Wasser**



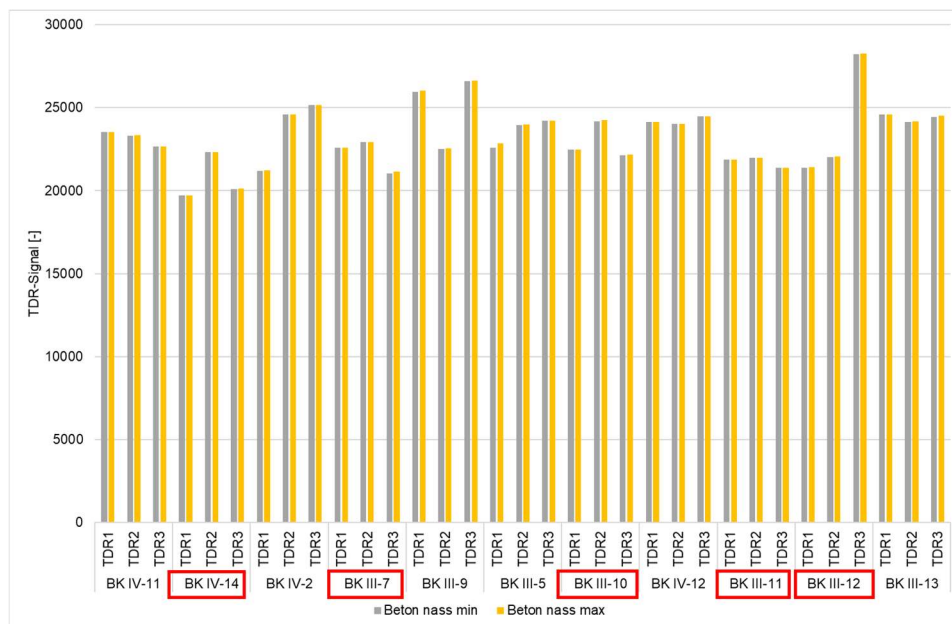
**Bild 41: Schwankungsbreite der Einzelmessungen der TDR-Signalwerte in Luft und im Wasser**

In einem zweiten Schritt konnten nun die Laborversuche mit den Probenmaterialien durchgeführt werden, die mit der Bohrkernentnahme gewonnen wurden. Hierzu wurden diese Proben entsprechend in Luft oder Wasser vorgelagert. Dabei sollte mit diesen Versuchsreihen geklärt werden, welche Probengeometrie für die Bestimmung von Kalibrierkurven erforderlich ist, um eine aussagefähige Feuchtebestimmung vornehmen zu können. Zum anderen sollten die Messwerte für trockenes und wassergesättigtes Probenmaterial ermittelt werden.

Um auch hier den Einfluss der Sondencharakteristik herauszuarbeiten, wurde jede Probe mit allen drei verfügbaren TDR-Laborsonden gemessen. In Bild 42 und Bild 43 sind die Ergebnisse für die Bohrkernstücke aus Beton dargestellt. Bei den getrockneten Proben ist der Einfluss der Probengeometrie deutlich zu erkennen (Bild 42). Bohrkernstücke, deren Länge geringer ist als die Länge der TDR-Sonde (12 cm), führen zu sehr hohen Messwerten, da hier der Anteil der Luft bei der Messung groß ist. Ähnlich verhalten sich auch Messwerte bei wassergesättigtem Probenmaterial (Bild 43).



**Bild 42: Minimale und maximale Messwerte an getrockneten Bohrkernen aus Beton**



**Bild 43: Minimale und maximale Messwerte an wassergesättigten Bohrkernen aus Beton**

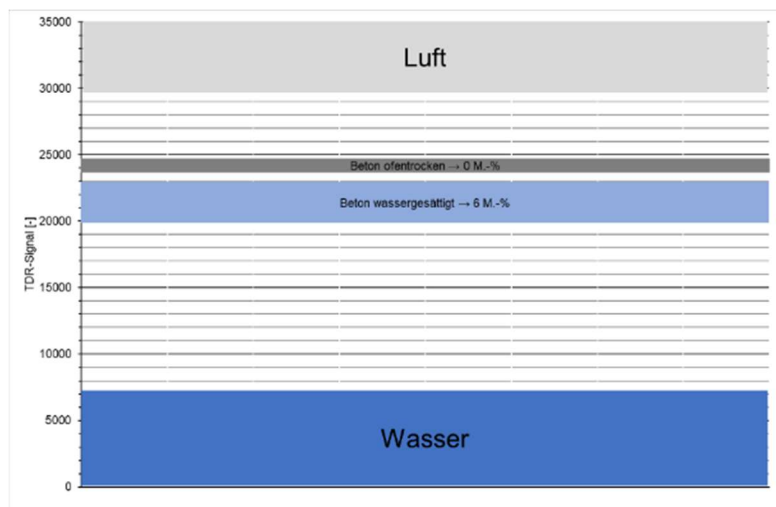
Die TDR-Signalwerte für das trockene und wassergesättigte Betonprobenmaterial sind in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: TDR-Signalthöhe in Abhängigkeit des Wassergehaltes u (M.-%)**

Beton		Ziegel	
trocken (0 M.-%)	wassergesättigt (6 M.-%)	trocken (0 M.-%)	wassergesättigt (11 M.-%)
23.600–24800	19.800–23.000	25.300–28.400	18.150–23.800

Um die Signalwerte der TDR-Sonde für die beiden Grenzfeuchtezustände des Betons mit den Signalwerten für eine probenfreie Lagerung der TDR-Sonde in Luft und Wasser zu vergleichen, soll Bild 44 die in der Tabelle aufgezeigten Messbereiche grafisch verdeutlichen. Dabei wird erkennbar, dass ein Unterschied von nur 6 M.-% Materialfeuchte in einem TDR-Messbereich von 600 Signalwerteneinheiten abgebildet wird.

Sollten für den Materialfeuchtegleichgewichtszustand bei Trockenlagerung eine Präzisierung herbeigeführt werden, müssten zeitlich äußerst aufwändige Messungen vorgenommen werden, da zunächst das Sorptionsfeuchtegleichgewicht in der makroskopischen Probe hergestellt werden müsste, bevor das TDR-Signal erfasst und bewertet werden kann. Im Bereich der hygroskopischen Materialfeuchte wäre der gesamte Materialfeuchtebereich einzustellen, um mit der TDR-Sonde die für jede Feuchtestufe im Bereich der Materialfeuchtegleichgewichtszustände bei einer Probenlagerung zwischen 0 % r. F. und 99 % r. F. das zugehörige TDR-Signal zu erfassen. Entsprechende Konditionierungen der Proben müssten aber über mindestens einem halben und zwei Jahren vorgenommen werden und waren daher im geförderten DBU-Vorhaben nicht vorgesehen.



**Bild 44: Messbereiche Betonprobenmaterial - ofentrocken bis wassergesättigt**

Um insbesondere die für die Bewertung der Feuchtezustände der Wandbauteile der Zeppelintribüne relevanten Feuchtezustände abzusichern, wurden im Rahmen des DBU-Vorhabens die Probekörper entsprechend der zu erwartenden Raumluftfeuchten in drei Umgebungsfeuchten bei 23 °C ausgelagert, so bei 75 % r. F., bei 93 % r. F. und bei 99 % r. F.. Mit zunehmender Dauer der Auslagerung des Probekörpers bei den vorgenannten Klimaten nähert sich die im Probekörper einstellende Materialfeuchte zunehmend der Materialausgleichsfeuchte. Da die Sorptionsgleichgewichtsfeuchte mit Blick auf die Probengeometrie mehrere Monate erfordert, können im vorliegenden Untersuchungsbericht nur vorläufige Ergebnisse aufgezeigt werden.

Von Beginn an wurden in wiederkehrenden zeitlichen Abständen die TDR-Signalwerte für die gelagerten Proben erfasst. Änderte sich der Signalwert nicht mehr signifikant, wurde der Probekörper entnommen und die Masse erfasst, um den erreichten Materialfeuchtegehalt bestimmen zu können, wohlwissend, dass die eigentliche Materialfeuchteausgleichssituation noch nicht erreicht werden konnte. Allerdings bedingte die verfügbare Anzahl von drei TDR-Sonden die gewählte Vorgehensweise.

Die Problematik dieser Art der TDR-Signalwertermittlung zur Materialfeuchtebestimmung liegt im erforderlichen hohen zeitlichen Aufwand. Schließlich ist abhängig der verwendeten Probengeometrie damit zu rechnen, dass die Erfassung möglichst vieler Feuchtezustände zu Messdauern von mehreren Jahren führen kann. Hinzu kommt, dass aufgrund der verschiedenen TDR-Sondencharakteristiken die Proben mit jeder zum Einsatz kommenden Sonde zu vermessen sind, um hinreichend genaue Messdaten zu generieren.

In Bild 45 und Bild 46 ist der Versuchsaufbau zur Vorlagerung und Kalibrierung der untersuchten Materialproben aufgezeigt. So werden die Betonproben hier über relativen Umgebungsfeuchten von 75 % r. F., 93 % r. F. und 99 % r. F. gelagert.



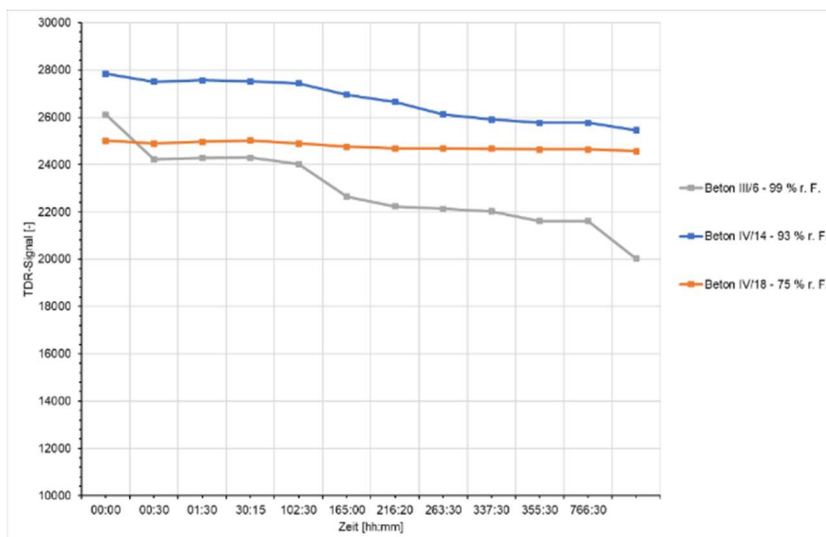
**Bild 45: Versuchsaufbau im Labor (Lagerung von Proben in Boxen mit unterschiedlichen relativen Feuchten bei 75, 93 und 99 % r. F.)**



**Bild 46: Blick in eine Lagerbox mit TDR-Sonde: Probe über einer gesättigten NaCl-Lösung (75 % r. F.)**

In Bild 47 sind die ersten Messergebnisse an den Betonproben (die Massenkonstanz bzw. Messwertkonstanz ist noch nicht erreicht) aufgezeigt. Die Messverläufe zeigen den zeitlichen Verlauf der TDR-Signalwerte im Zuge der sich anpassenden Materialfeuchte. Auch hier ist der Einfluss der Sondencharakteristik zu erkennen. So wäre zu erwarten, dass sich bei den Lagerungen in 93 % r. F. und 99 % r. F. sehr ähnliche Signalwertverläufe ausbilden. Jedoch zeigt sich, dass die Lagerung bei 75 % r. F. und die Lagerung bei 93 % r. F. ähnliche Werte aufweisen. Dies ist nicht die Folge eines Messfehlers, sondern ist der Sondencharakteristik geschuldet.

Als Folge wäre es vorteilhaft, das Probenmaterial mit möglichst vielen unterschiedlichen Messsonden zu untersuchen, da sich nur so eindeutige Messbereiche des Wassergehaltes festlegen lassen.

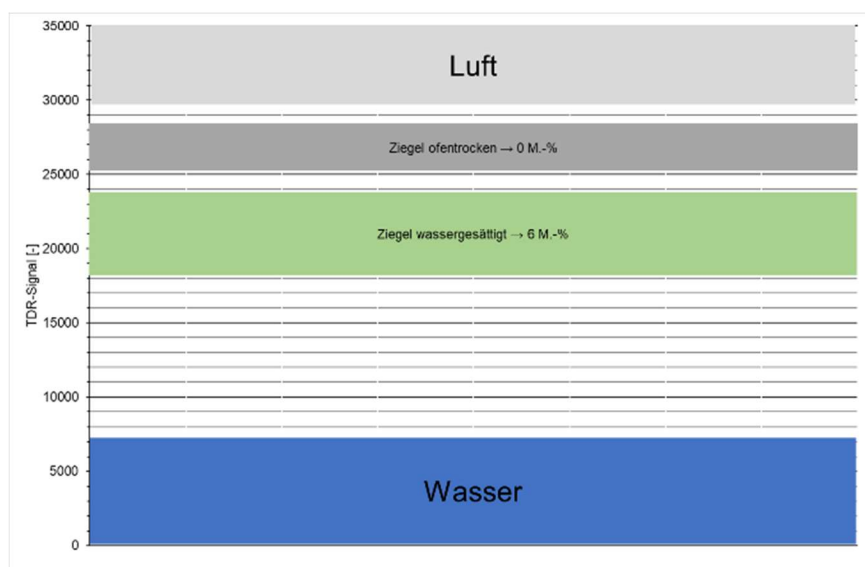


**Bild 47: Erste Ergebnisse zum TDR-Signalverlauf einer sich an den Feuchteausgleichszustand anpassenden Betonprobe**

Eine ähnliche Situation ergibt sich auch bei den untersuchten Ziegelproben. Allerdings erfolgt der sorptionsbedingte Feuchteausgleich rascher als beim Beton. Dies kann auf die andersartige Porenverteilung der Ziegelprobe zurückgeführt werden, da die nanoskaligen Gelporenräume des Betons fehlen (vergleiche die beiden mit der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmten Verläufe der Porengrößenverteilungskurve von Beton (Bild 87) und Ziegel (Bild 85)) [7, 8].

Die Zuordnung der TDR-Signalwerte für den wassergesättigten und den ofentrockenen Ziegel im Vergleich zu den Signalwerten einer probenfreien TDR-Sonde in Luft bzw. im Wasser sind in Bild 48 aufgezeigt. Hier beträgt die gemessene Differenz des Wassergehalts bei ca. 11 M.-%, die zwischen der trockenen und wassergesättigten Probe eine TDR-Signaldifferenz von 1500 aufweist. Wie beim Beton muss auch im Fall des Ziegels eine sorptionspezifizierte Analyse des Zusammenhangs zwischen der Materialausgleichsfeuchte im hygroskopischen Feuchtebereich zumindest zwischen 75 und 99 % r. F. vorgenommen werden, um eine genauere Zuordnung der TDR-Signalwerte zu den jeweilig im Ziegelmaterial vorliegenden Materialfeuchte vornehmen zu können.

Da ein Materialfeuchtegehalt von 6 M.-% gegenüber einer trockenen Materialprobe sich durch eine TDR-Signaldifferenz von 600 ausweist und sich ein Materialfeuchtegehalt von 11 M.-% durch eine TDR-Signaldifferenz von 1500 abzeichnet, scheint eine materialunabhängige Betrachtung der TDR-Signalwerte zur Feuchtebewertung grundsätzlich möglich. Doch müssen hierzu weitere materialspezifische Kalibrierversuche vorgenommen werden, um die Materialfeuchtegehalte sowohl im hygroskopischen als auch im überhygroskopischen Feuchtebereich anhand der TDR-Signalwerte zuverlässig bestimmen zu können.



**Bild 48: Messbereiche Ziegelprobenmaterial - ofentrocken bis wassergesättigt**

Folglich wurde in enger Zusammenarbeit der Projektpartner TRUEBNER und MOCult ein großangelegtes Messprogramm ausgearbeitet und gestartet. Hierin kommt eine größere Zahl an TDR-Laborsonden zum Einsatz, um auf reproduzierbare Weise einen Zusammenhang zwischen dem Materialfeuchtegehalt und den TDR-Signalen in Abhängigkeit der materialspezifischen Sorptionscharakteristik des in der Feuchtebestimmung zum Einsatz kommenden Pro-

bematerials abzuleiten. Es wird erwartet, dass das zu untersuchende Material gerade im hygroskopischen Feuchtebereich einen Einfluss auf die TDR-Signalwerte hat. Die Erwartung wird damit begründet, dass sich das in den Nanoporen der Baustoffe bei höheren relativen Feuchten (> 60 % r. F.) infolge von Sättigungsdampfdruckerniedrigung einstellende Kapillarkondensat entsprechend der Van der Waals-Kräfte eine andere Kraftwechselwirkung als zwischen den Wassermolekülen im freien Wasser eingeht. Dieser Effekt wirkt sich direkt auf das Zeitverhalten des TDR-Signals aus. Gerade bei Beton, dessen Nanostruktur sich durch die sogenannten Gelporen auszeichnet, die als Folge der Hydratation ohne eine Ofentrocknung wassergefüllt bleiben, stellt sich dies ein. Das sogenannte Gelporenwasser ist gleichermaßen wie das Kapillarkondensat Kraftwechselwirkungen mit den Oberflächen der Porenwände des Betons unterworfen.

Folglich erwarten die beiden Projektpartner, dass es möglich sein wird, mit den umfangreicheren Laboruntersuchungen, die weit über das ursprüngliche Arbeitsprogramm des DBU-Vorhabens hinausgehen, sogenannte Eichkurven für die TDR-Messungen zu erstellen. Dabei wird aber davon ausgegangen, dass es mit der Bestimmung der Porengrößenverteilungskurven mittels Quecksilberdruckporosimetrie gelingen wird, mit Kenntnis der Größenverteilung aller Nanoporen mit einem Radius kleiner 10 nm und dessen Volumenanteil des untersuchten Baustoffs, den Anteil des TDR-Signalwerts theoretisch abzuleiten, der auf das Kapillarkondensat bzw. das Gelporenwasser zurückzuführen ist.

Damit können die Eichkurven bzw. die hinsichtlich Kapillarkondensation bzw. Gelporen modifizierten Bewertungskurven im Messprogramm hinterlegt werden, so dass der Output der Messungen dann nicht mehr die Größenangabe des TDR-Signals sein wird, sondern die gesuchte zugehörige Bewertung des Materialfeuchtegehalts.

### **3.3.2 Gegenüberstellung und Bewertung der Messdaten am Bauwerk**

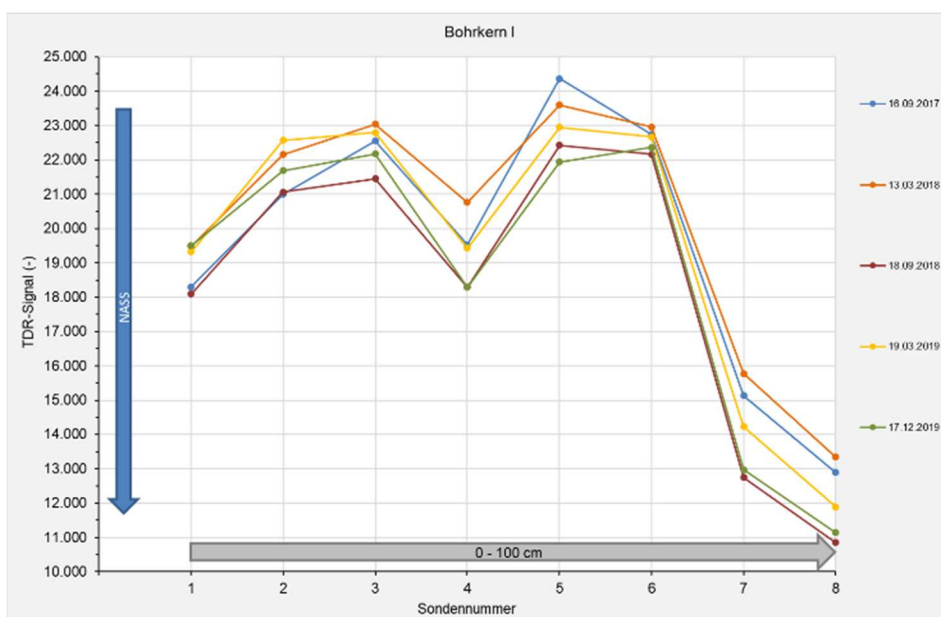
Die Untersuchungen und Überlegungen zur Überlagerung der in den Bauwerksuntersuchungen und im Labor analysierten Materialfeuchtegehalt und der zugehörigen TDR-Signale konnten zeigen, dass eine Zuordnung absoluter Werte zum Materialfeuchtegehalt zum ausgegebenen TDR-Signalwert grundsätzlich möglich ist. Doch zeigten die durchgeführten Kalibrierungsversuche, dass mit der im Rahmen dieses Projektes eingesetzten Methode dies in der ursprünglich angesetzten vereinfachten Versuchsdurchführung nicht hinreichend genau gelingt. Vielmehr sind weitere aufwändige labortechnische Messungen notwendig, um in Verbindung mit der Charakterisierung der Porenstruktur auf wissenschaftlich begründete Weise den Materialfeuchtegehalt hinreichend genau für jedes Material mittels TDR-Sonde bestimmen zu können. Derartige Untersuchungen gehen mit Blick auf den erforderlichen Zeitbedarf weit über das ursprüngliche Arbeitsprogramm des Forschungsprojektes hinaus.

Doch ist für die gezielte gleichförmige Trocknung der massiven Baukonstruktionen der Zeppelintribüne eine derart genaue Materialfeuchtecharakterisierung auch nicht erforderlich, schließlich sollen mit den vor Ort installierten TDR-Sonden für die im Umfeld der Sonde verarbeiteten Materialien (vor allem Ziegelmauerwerk im OG und Betonschüttung im EG) einzig die zeitliche Veränderung der Bauteilfeuchte erfasst werden, um eine gleichförmige und langsame Abtrocknung der Bauteile durch eine kontrollierte und bedarfsgerechte Raumbelüftung sicherzustellen. Dieser relative Vergleich ist, mit dem im DBU-Vorhaben entwickelten und zum Einsatz kommenden TDR-Messverfahren problemlos möglich ist.



In der baupraktischen Umsetzung werden täglich zwei Messungen mit jeder der vier installierten TDR-Sonde durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden im Folgenden nur ausgewählte Messverläufe dargestellt. Für diese werden die gewonnenen Ergebnisse und daraus abgeleiteten Erkenntnisse im Weiteren erläutert.

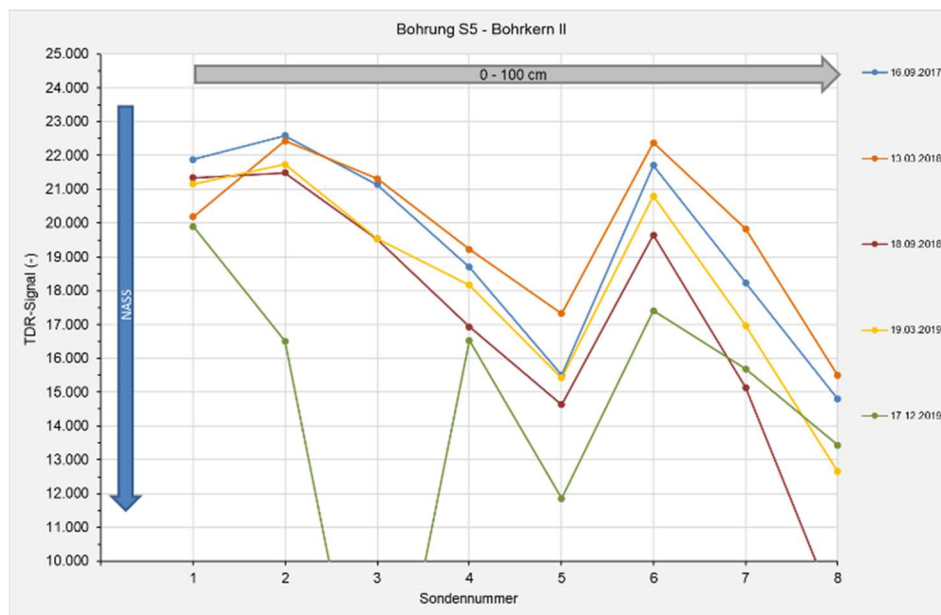
So zeigt Bild 49 die Messdaten der in Position #2 (Bohrkern I) installierten TDR-Sonde (vgl. Bild 9). Die gemessenen Kurvenverläufe der TDR-Signal verdeutlichen, dass sich der Wassergehalt im untersuchten Mauerwerksabschnitt zuerst (September 2017 bis März 2018) verringert, sich anschließend der Materialfeuchtegehalt im Mauerwerksabschnitt in Bezug auf das Einbaudatum in den weiteren Monaten bis zum Dezember 2019 aber wieder erhöht. Somit nimmt der Feuchtegehalt des Bauteils über die gesamte Tiefe hinweg eher zu als das sich in 2019 eine Trocknung eingestellt hätte.



**Bild 49: TDR-Sonde in Position #2 (Bohrkern I im Ziegelmauerwerk des OGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne**

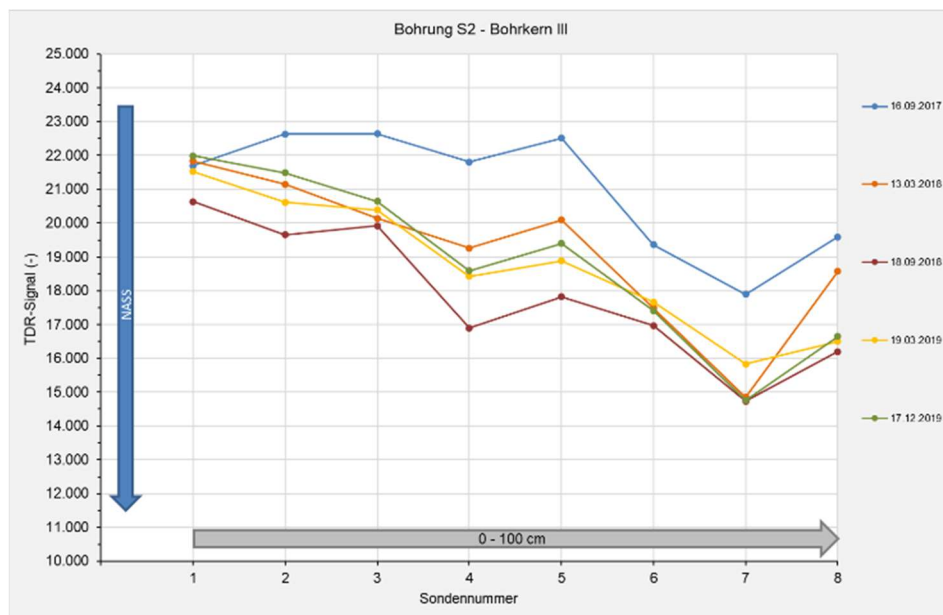
Auch die Signalverläufe der TDR-Sonde in Position #3 (Bohrkern II), die Sonde befindet sich auch im OG oberhalb von Position #2, zeigen, dass im Anschluss an die dargestellte Messreihe, die im März 2018 erfolgte, die TDR-Signalwerte der tiefer gelegenen Segmente der TDR-Sonde zunehmen. Eine Zunahme der Signalwerte geht mit einer Zunahme der Materialfeuchte im untersuchten Bauteil einher, wie dies in Bild 50 dargestellt ist.

Analog der erfassten Feuchtesituation der TDR-Sonde in Position #2 steigt auch in diesem Mauerwerksabschnitt das Feuchteniveau nach dem März an. Hinzu kommt, dass ab Juli 2019 in einer Tiefe zwischen 19 cm und 43 cm extrem niedrige Messwerte erfasst wurden. Dies weist auf einen möglichen Wassereintritt in diesem Bereich hin.



**Bild 50: TDR-Sonde in Position #3 (Bohrkern II im Ziegelmauerwerk des OGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne**

Die Messreihen der TDR-Sonde in Position #1 (Bohrkern III) sind in Bild 51 dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, dass sich in diesem Untersuchungsabschnitt in der massiven Betonkonstruktion keine Trocknung einstellen konnte. In Bezug auf das Einbaudatum der TDR-Sonde erhöhte sich das Feuchteniveau bis Ende 2018, danach reduzierte sich kurzfristig Anfang 2019 das Feuchtniveau. Eine weitere Veränderung in Richtung Austrocknung lässt sich aus den Messreihen der TDR-Sonde nicht beobachten. Dies lässt sich anhand der Zeitverläufe der TDR-Signale zur Erreichung der Materialausgleichsfeuchte in den Betonproben, wie diese in Bild 51 wiedergegeben sind, erklären. So zeigen die Betonproben eine sehr langsame Anpassung an die Sorptionsfeuchte. Bei den Ausgleichversuchen mit 75 % r. F. und 93 % r. F. zeigt sich, dass die TDR-Messsignale Werte zwischen 24.500 und 26.000 annehmen. Eine rasche Anpassung an das Sorptionsfeuchtegleichgewicht zeigt am ehesten die in 99 % r. F. ausgelagerte Probe, also bei nahezu wasserdampfgesättigter Umgebungsluft. Hier liegt der bislang erreichte TDR-Signalwert bei etwa 20.000. Dieser Signalwert ist kleiner als die in den oberflächennahen Bereichen der Betonwand gemessenen TDR-Signalwerten, die nach Bild 51 abgesehen der im März 2018 und im Dezember 2019 gemessenen Werte (beide Messreihen wurden in der kalten Jahreszeit aufgenommen), auf eine Trocknung der Randzone hinweisen. Sobald aber während der kalten Witterungsperioden die relativen Feuchten im Raum zwangsläufig auch mit kontrollierter Raumbelüftung ansteigen, nimmt entsprechend des Sorptionsbestrebens des Betons die Betonrandzone wieder einen höheren Materialfeuchtegehalt zumindest in der Randzone an.

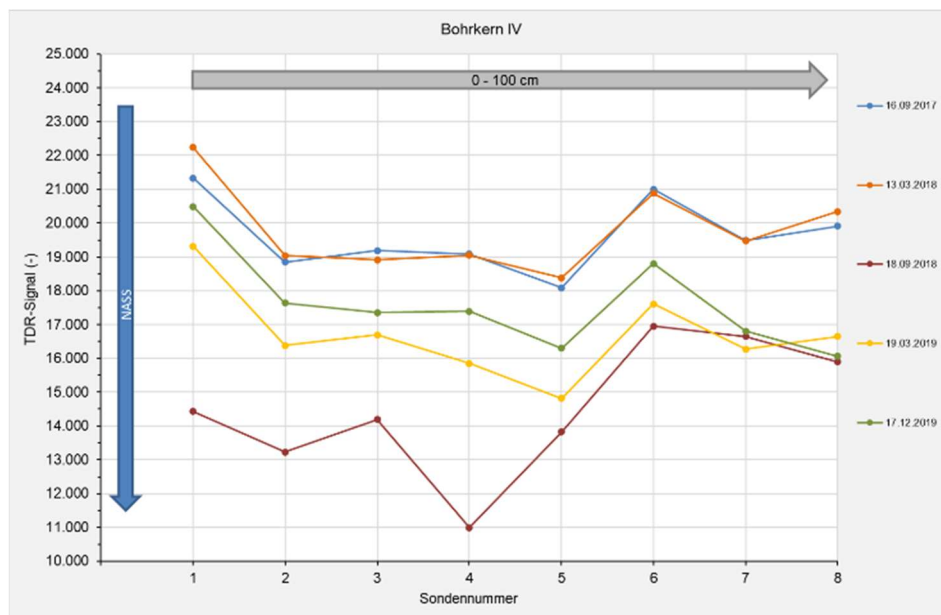


**Bild 51: TDR-Sonde in Position #1 (Bohrkern III in der Betonwand des EGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im konditionierten Bereich der Zeppelintribüne**

Im nichtkonditionierten Bereich lässt sich im Jahr 2018 eine Zunahme des Materialfeuchtegehalts bis in eine Tiefe von 43 cm mittels der TDR-Sonden feststellen. Doch nahm bis Dezember 2019 die Feuchtebelastung in diesem Konstruktionsbereich wieder in signifikanter Weise ab. Der nichtkonditionierte Bereich zeigt eine zu Beginn der Messungen insgesamt günstigere, also trockenere Feuchtesituation über die Bauteiltiefe. Demgegenüber verdeutlichen die TDR-Signale des oberflächennahen Sondensegments, dass die Betonrandzone abhängig der jeweilig vorherrschenden Raumluftsituation starken Änderungen unterworfen ist, die auf das Bestreben einer sorptionsbedingten Feuchteanpassung zurückgeführt werden kann.

Ein Vergleich der TDR-Signalwerte mit den Werten der Randzone im konditionierten Betonbauteil (vgl. Bild 52) verdeutlicht, dass mit einer gezielten Konditionierung des Raumes eine Stabilisierung der Feuchteverhältnisse in der Randzone erreicht werden kann. Auch wenn es noch größerer Zeiträume bedarf, um in den tieferen Bereichen des Betonbauteils mit der Konditionierung den angestrebten eingeschwungenen Systemausgleich zu erreichen, so erlaubt bereits der Vergleich von Bild 51 und Bild 52, dass die kontrollierte Raumbelüftung für das angestrebte Ziel der Sicherung und des Erhalts der Substanz grundsätzlich förderlich ist.

Die Messdaten weisen darauf hin, dass im Spätsommer 2018 möglicherweise eine erhöhte Feuchtelast auf das Bauwerk eingewirkt hat. Dies würde den deutlichen Abfall der TDR-Signalwerte erklären, die mit einer Erhöhung der Feuchtelast einhergehen. Des Weiteren ist erkennbar, dass die Feuchtelast danach wieder abnahm. Allerdings konnte bis Dezember 2019 nicht das zum Messbeginn beobachtete Feuchteniveau erreicht werden. Dies lässt sich auf die langwierigen Trocknungsprozesse in den im Vergleich zu Ziegelmauerwerk deutlich dichteren Betonbauteilen zurückführen.



**Bild 52: TDR-Sonde in Position #4 (Bohrkern IV in der Betonwand des EGs) - TDR-Signalwerte für die 8 Sondensegmente im Zeitraum 09/2017 bis 12/2019 im nichtkonditionierten Bereich der Zeppelintribüne**

### 3.3.3 Fazit

Im vorliegenden Forschungsprojekt sollten mit Hilfe von TDR-Sonden anhand der gemessenen TDR-Signalverläufe Rückschlüsse auf die Feuchteverteilung im Bauteilinnern ermöglicht werden. Entsprechend wurden vom Projektpartner TRUEBNER die entsprechenden Sonden nebst der zugehörigen Messtechnik entwickelt und bereitgestellt. Seitens MOCult wurden die TDR-Sonden hinsichtlich ihres Verhaltens beim Einsatz in feuchtebelasteten Wandbauteilen aus Ziegelmauerwerk und aus Beton charakterisiert, um über materialspezifische Kalibrierkurven den Zusammenhang zwischen TDR-Signalwerten und zugehöriger Materialfeuchte zuverlässig ableiten zu können. Ziel ist, anhand der 8 über die Sondenlänge verteilte Sensorsegmente eine kontinuierliche Messung der sich zeitlich stets abhängig der Feuchte- und Trocknungsrandbedingungen im Bauteil einstellenden Feuchtesituation mit hinreichender Genauigkeit erfassen zu können.

So war zu Projektbeginn angedacht, die für den Einbau der TDR-Sonden erforderlichen Bohrungen zu nutzen, um an den entnommenen Bohrkernen die vorhandene Eigenfeuchte des Bauteils bestimmen zu können, die dann mit den TDR-Messdaten verknüpft werden können. Darüber hinaus wurden umfangreiche labortechnische Untersuchungen vorgenommen, um die in der Zeppelintribüne verbauten Materialien hinsichtlich aller feuchte-technisch relevanten Materialkenngrößen und Materialfunktionen zu charakterisieren. Ferner wurden die TDR-Sonden an trockenem und wassergesättigten Probematerialien hinsichtlich deren Messcharakteristik untersucht, in dem der TDR-Signalverlauf im Zuge einer Trocknung oder Befeuchtung beobachtet und bewertet wurde. Die Untersuchungen zeigten aber rasch, dass diese Vorgehensweise nicht zielführend war, schließlich verfügt jedes einzelne Sondensegment über eine eigene Sondencharakteristik. Die TDR-Sonden können untereinander große Abweichungen aufweisen. Zudem ist der TDR-Messbereich für minimale und maximale Feuchtegehalte in porösen mineralischen Baustoffen extrem klein und entsprechende Beobachtungen einer kleinen Feuchtänderung sind folglich nur schwer zu detektieren.

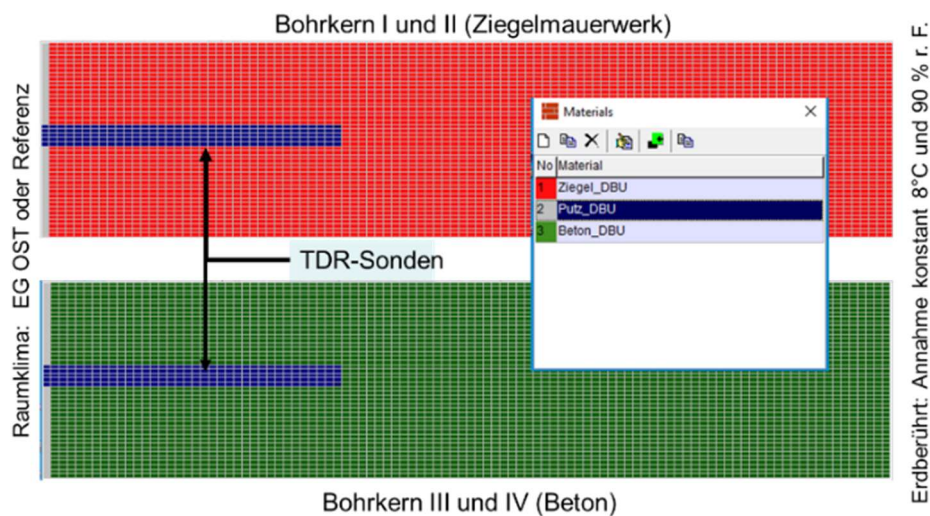
Entsprechend der vorangestellten Ausführungen ist daher die mit den in der Zeppelintribüne verbauten Sonden zunächst nur möglich, einen relativen Vergleich der zeitveränderlichen Feuchtzustände infolge sich ändernder Randbedingungen (Feuchtelasten und/oder Raumklimakonditionierung) vornehmen zu können. Folglich ist es bereits mit den im DBU-Vorhaben vorgenommenen Entwicklungen und den hierbei gewonnenen Erkenntnissen möglich, Veränderungen der im Bauteilinneren vorherrschenden Feuchteverteilung hinsichtlich des Feuchtniveaus zeitveränderlich erfassen und bewerten zu können.

Doch konnten die bisherigen Erkenntnisse des Vorhabens genutzt werden, um die Herstellung der TDR-Sonden für künftige Messeinsätze zu optimieren und Methoden für die erforderliche Kalibrierung der TDR-Sonden zu entwickeln und zu optimieren. Grundsätzlich müssen im Vorfeld der Installation von TDR-Sonden alle Messabschnitte so mit Sondensegmenten ausgestattet werden, dass sich diese messtechnisch nur noch durch geringfügige Unterschiede auszeichnen. Des Weiteren wurde im Rahmen der Projektbearbeitung bereits festgestellt, dass die zum Einsatz kommenden TDR-Sondensegmente bereits vor dem Verbau der Multisensorsonde im Labor an den trockenen und wassergesättigten Materialien des Bauteils kalibriert werden sollte. Diese Vorgehensweise einer „Erstmessung“ sollte zumindest bis zur genaueren Charakterisierung des TDR-Sondenverhaltens im hygrokopischen Feuchtebereich der Materialien gewahrt werden. Losgelöst des DBU-Vorhabens sollte es erst mit dem Vorliegen der Untersuchungen zum Einfluss sorptionsbedingter Feuchteänderungen in nanoporösen Materialstrukturen auf das TDR-Messsignal den beiden Projektpartnern gelingen, Eichkurven für die verschiedenen Baumaterialien alleine aus im Labor bestimmbareren Strukturmerkmalen, so insbesondere der Porengrößenverteilung der Nanoporen, abzuleiten.

Die im Zuge der Projektbearbeitung angeschobenen Laboruntersuchungen, die messtechnisch aufwändig und zeitintensiv sind, werden als relevant erachtet, um das sich bereits im Vorhaben als technisch zielführend erweisende Verfahren zur Feuchtebewertung von feuchtelasteten Bauteilen aus Ziegelmauerwerk und Beton mittelfristig als genaues Messsystem zur kontinuierlichen Bestimmung der Feuchteverteilung in Bauteilen bereitstellen zu können. Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten nur erste, aber richtungsweisende Ergebnisse herausgearbeitet und mit den zuvor aufgezeigten Ergebnissen validiert werden.

### **3.4 Entwicklung von Simulationsmodellen zur Bewertung anthropogen induzierter Einflüsse**

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollten für den Einsatz der Echtzeitanalyse vereinfachte thermisch-hygrische Simulationsmodelle für die Zeppelintribüne entwickelt werden. Bei üblichen thermisch-hygrischen Simulationsberechnungen kommen zum einen komplexe mathematische Algorithmen zum Einsatz, zum anderen müssen die zu untersuchenden Materialien im Hinblick auf ihre physikalischen Eigenschaften und die klimatischen Randbedingungen möglichst realitätsnah abgebildet werden [5, 6]. Bild 53 zeigt die Modelle von Mauerwerksabschnitten aus Beton bzw. Ziegel, wie sie üblicherweise bei diesen Berechnungen verwendet werden.



**Bild 53: Simulationsmodelle - Bohrkerne (zwei Materialien)**

Dieses führt zu zeitaufwändigen Berechnungen, die mit Hilfe von Programmtools wie DELPHIN der TU Dresden durchgeführt werden. Mit Hilfe dieses Programmes sollten im Rahmen des Projektes mögliche Vereinfachungen überprüft und validiert werden. Hierzu wurden im Labor die erforderlichen Materialkennwerte bestimmt (Abschnitt 3.1.1 und Anhang: Bestimmung der Porenverteilung) und die Baustoffe der Zeppelintribüne materialtechnisch im Programm berücksichtigt. Im nächsten Schritt erfolgte die Erfassung der klimatischen Parameter. Hierzu wurden die bereits in den vergangenen Jahren erfassten Klimate der zu untersuchenden Gebäudeabschnitte in das Simulationsprogramm eingepflegt. Materialtechnisch wurde davon ausgegangen, dass sich alle Baustoffe vor Beginn der Klimakonditionierung im Zustand der Wassersättigung befanden. Für die erste Vereinfachung des ursprünglichen Simulationsmodells wurde ein sogenanntes „1-Material-Modell“ erstellt. Die sich daraus ergebenden Materialfeuchten wurden mit dem Feuchteniveau verglichen, das an den Bohrkerne, die zur Installation der TDR-Sonden am Bauwerk entnommen wurden, im Labor durch gravimetrische Feuchtebestimmung ermittelt werden konnte (Tabelle 5).

Nach der Validierung des numerischen Modells konnten im Anschluss die Material- und Klimaparameter verifiziert werden. Tabelle 7 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Validierung für Bohrkerne III (Beton) aus dem konditionierten Bereich im EG der Zeppelintribüne. So verdeutlichen die Werte der Tabelle, dass eine Vereinfachung der Berechnung in Form einer Reduzierung auf den Hauptbaustoff noch zu nutzbaren Ergebnissen führt. Jedoch zeigen sich für die Sondenabschnitte 2 + 3 in der Simulation ein etwa 3,5 V.-% höhere Materialfeuchtegehalte. Im Rahmen der weiteren Simulationsberechnungen wurde versucht, diese Problematik zu beseitigen, in dem die in den Berechnungen zugrunde gelegten feuchtetechnischen Kennwerte angepasst wurden. Die Anpassung der feuchtetechnischen Kennwerte hatte lediglich einen geringen Einfluss auf die Wandtiefen der Sondenabschnitte 2 + 3, so dass in den weiteren Vereinfachungen die im Labor bestimmten Kennwerte genutzt wurden.

**Tabelle 7: Exemplarische Darstellung für Bohrkern III im konditionierten Bereich - mit realen Klimadaten**

	TDR Sensor	Materialart	Wassergehalt $u_v$ (V.-%)	Wassergehalt Simulation (V.-%)
Bohrkern III	1	Putz/Beton	7,45	7,690
	2	Beton	7,68	11,382
	3	Beton	7,93	11,632
	4	Beton	11,81	12,449
	5	Beton	12,81	12,980
	6	Beton	13,06	13,051
	7	Beton	13,06	13,059
	8	Beton	13,06	13,062

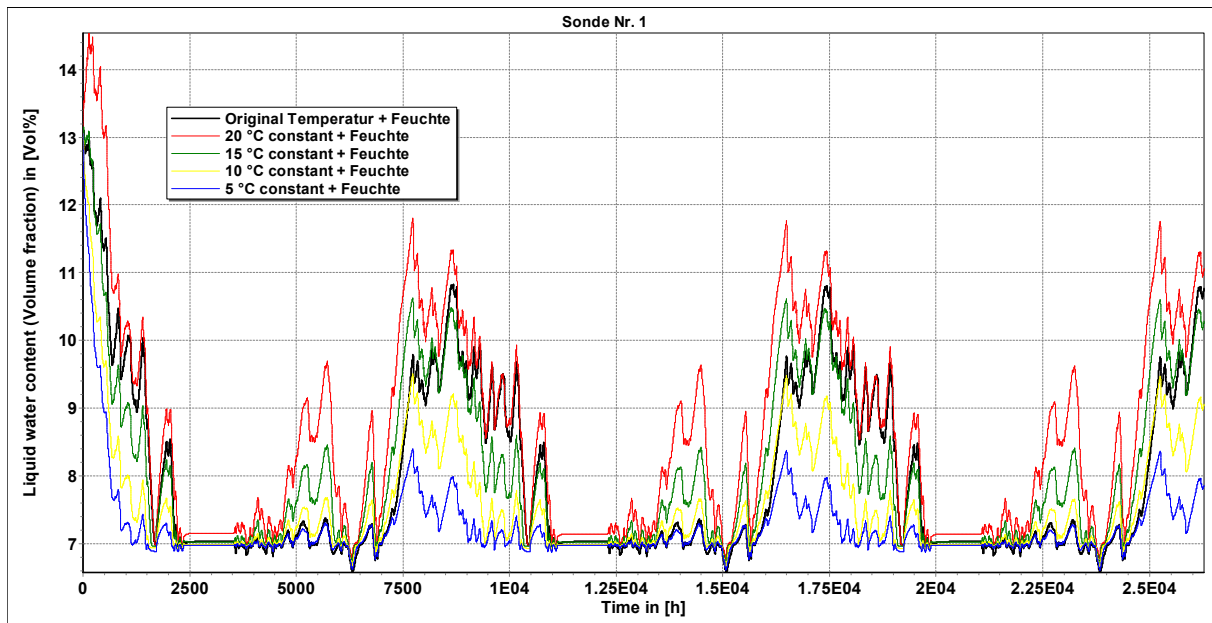
Nach der Validierung der Material- und Randparameter erfolgten verschiedene Simulationsberechnungen zur Vereinfachung. Hierbei wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt:

- Berechnung der Feuchtezustände mit Energiebilanzierung bei konstanter Innentemperatur,
- Berechnung der Feuchtezustände ohne Energiebilanzierung.

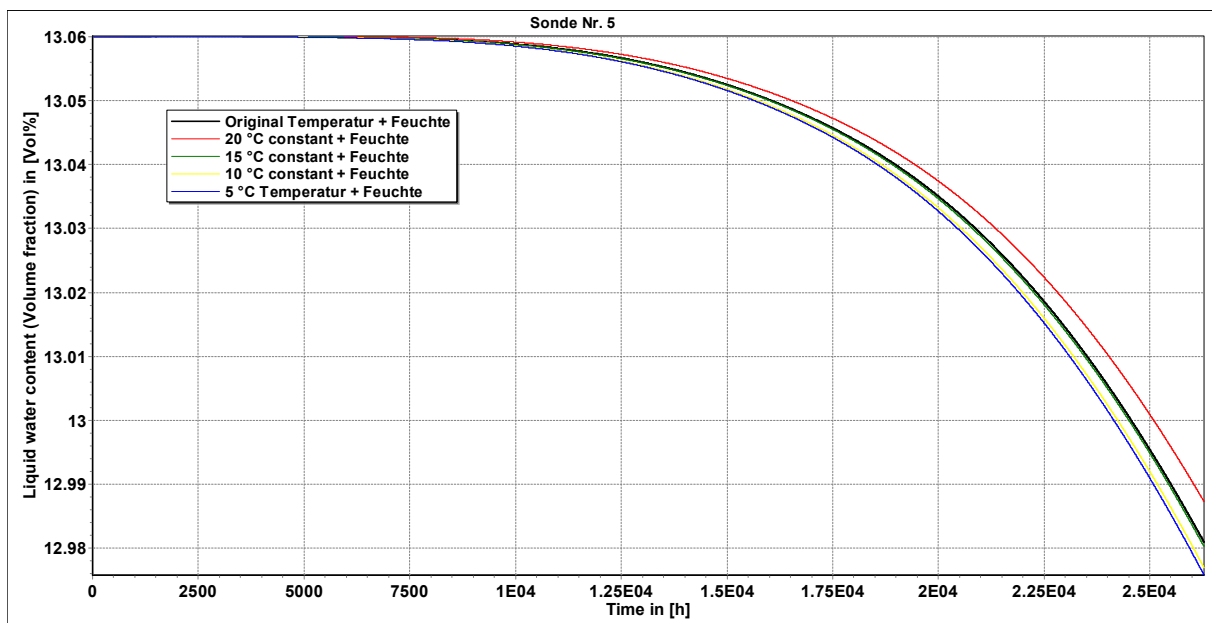
In den Darstellungen von Bild 54 und von Bild 55 sind die Ergebnisse der Simulationsberechnungen für verschiedene jeweils konstant gehaltene Innenklimate und für verschiedene Wandtiefen dargestellt. Hier wird deutlich, dass bei einem konstanten Innenklima von 15 °C sehr ähnliche Feuchteniveaus erreicht werden. Ein gleiches Ergebnis zeigen die zu Beginn des Vorhabens bestimmten Feuchtegehaltsbestimmungen des Wandquerschnitts im EG des konditionierten Bereichs (vergleiche die berechneten Feuchtegehalte mit den originalen Messdaten in Tabelle 7).

**Tabelle 8: Exemplarische Darstellung für Bohrkern III im konditionierten Bereich - bei konstanter Temperatur**

	TDR Sensor	Wassergehalt Simulation (V.-%) bei konst. Innentemperatur 15 °C	Wassergehalt Simulation (V.-%) reale Daten
Bohrkern III	1	7,100	7,690
	2	11,381	11,382
	3	11,631	11,632
	4	12,445	12,449
	5	12,980	12,980
	6	13,052	13,051
	7	13,060	13,059
	8	13,060	13,062



**Bild 54: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 0–12 cm (Sonde Nr. 1) - Beton**



**Bild 55: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 49–61 cm (Sonde Nr. 5) - Beton**

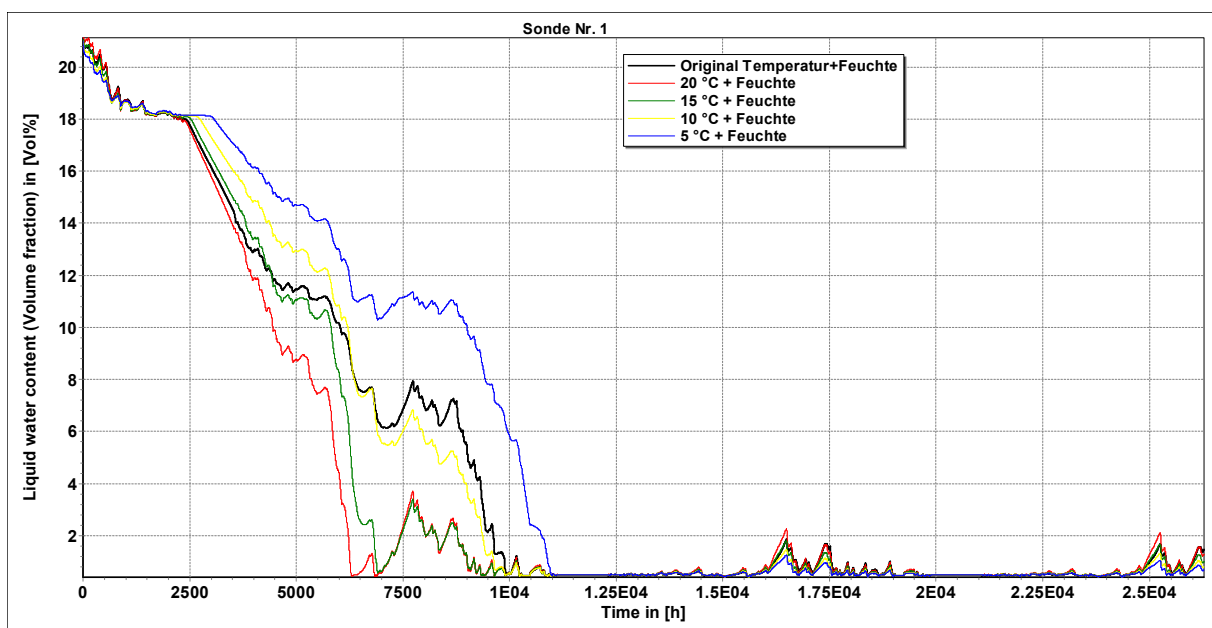
Analog zur Vorgehensweise der Betrachtungen am Betonbauteil im konditionierten Raumbereich des EGs wurden exemplarisch auch für einen Ziegelbohrkern die entsprechenden Simulationsberechnungen durchgeführt. Tabelle 9 zeigt, dass hier beim „1-Material-Modell“ der Wassergehalt über die komplette Betrachtungstiefe des Bauteils die labortechnisch bestimmten Materialfeuchtegehalte von den Simulationsergebnissen abweichen. Daher ist das „1-Material-Modell“ für alle jene Gebäudebereiche nur bedingt tauglich, die aus Ziegelmauerwerk bestehen. Die deutlichen Abweichungen zwischen Mess- und Rechenergebnissen müssen programmtechnisch abgefangen werden.



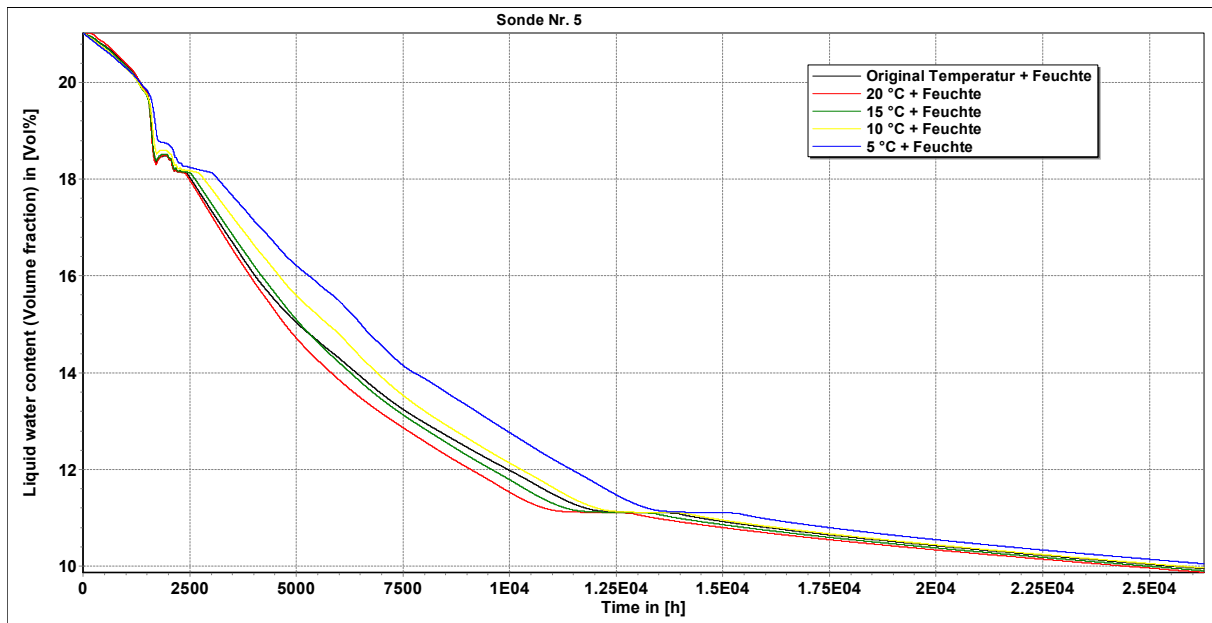
**Tabelle 9: Exemplarische Darstellung für Bohrkern II im konditionierten Bereich - mit realen Klimadaten**

	TDR Sensor	Materialart	Wassergehalt u (V.-%)	Wassergehalt Simulation (V.-%)
Bohrkern II	1	Putz/Ziegel	6,21	1,47
	2	Ziegel	4,74	7,71
	3	Ziegel	3,19	8,79
	4	Ziegel	6,82	9,55
	5	Ziegel	10,06	9,95
	6	Ziegel	12,10	10,16
	7	Ziegel	20,49	10,28
	8	Ziegel	21,12	10,34

Obwohl die vor Ort bestimmten Materialfeuchtegehalte von den mittels Simulation berechneten Werten abweichen, wurden als weitere Modellvereinfachung konstante Raumklimata angesetzt. In Bild 56 und Bild 57 sind die Ergebnisse für die Wandtiefen 0–12 cm und 49–61 cm dargestellt. Auch hier zeigt die Vereinfachung mit einer konstanten Temperatur die besten Ergebnisse.



**Bild 56: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 0–12 cm (Sonde Nr. 1) - Ziegel**



**Bild 57: Wassergehalt bei unterschiedlichen jeweils konstanten Raumtemperaturen in einer Wandtiefe von 49–61 cm (Sonde Nr. 5) - Ziegel**

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse für die Modifizierung des Simulationsmodells dargestellt.

**Tabelle 10: Exemplarische Darstellung für Bohrkern II im konditionierten Bereich - bei konstanter Temperatur**

	TDR Sensor	Wassergehalt Simulation (V.-%) bei const. Innentemperatur 15 °C	Wassergehalt Simulation (V.-%) reale Daten
Bohrkern II	1	1,02	1,47
	2	7,69	7,71
	3	8,73	8,79
	4	9,51	9,55
	5	9,91	9,95
	6	10,13	10,16
	7	10,25	10,28
	8	10,32	10,34

Die für vereinfachte Simulationsberechnungen notwendigen Parameteranpassungen sind im Anhang dargestellt.

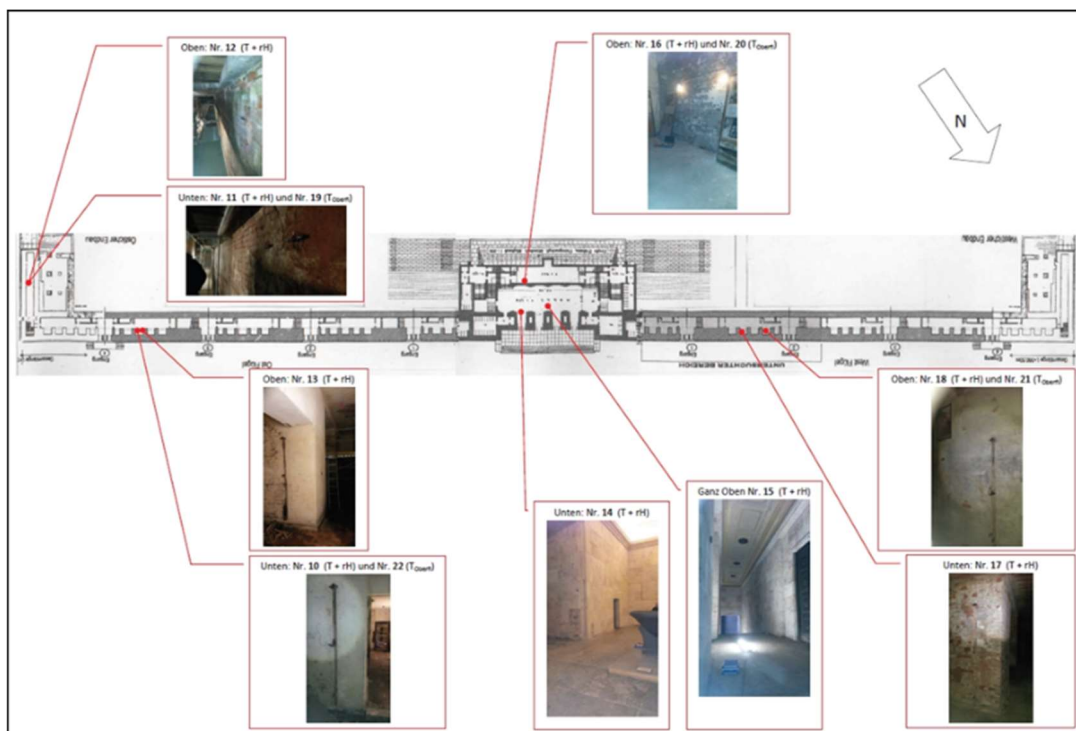
Der Vergleich der Feuchteverteilung der Simulationsberechnungen ohne eine Berücksichtigung der Innentemperatur, also ohne die thermische Konditionierung der oberflächennahen Bauteiltemperaturen führte zu deutlich geringeren Feuchtniveaus als diese vor Ort im Zuge der Feuchtebestimmung festgestellt wurden.

### 3.5 Entwicklung, Erprobung und Optimierung der Regelstrategie für minimalinvasive Lüftungssysteme

Vom Hochbauamt wurde 2014 ein baumklimatisches Konzept erarbeitet. 2014/2015 erfolgten die weiteren Planungen und baulichen Maßnahmen zu dessen Umsetzung unter Projektleitung des Hochbauamtes mit Unterstützung externer Planer.

Der Musterinstandsetzungsbereich befindet sich im Ostflügel der Zeppelintribüne, vom Endpylon Ost bis zur ersten Treppenanlage. Der Raumluftbereich ist in sich geschlossen. Der Bruttorauminhalt beträgt rund 5.600 m<sup>3</sup>. Das Nettoluftvolumen beträgt rund 2.700 m<sup>3</sup>. Der Anteil der Baumasse am gesamten Bruttovolumen beträgt damit rund 51 %. Der Gebäudeteil besteht im Flügelbereich aus Unter-, Erd- und Obergeschoss; im Endpylon ist ein großer Luft- raum vorhanden. Zwei interne Treppenanlagen führen vom EG ins OG. Eine Beheizung ist nicht vorhanden; jedoch Starkstrom für minimale Beleuchtung.

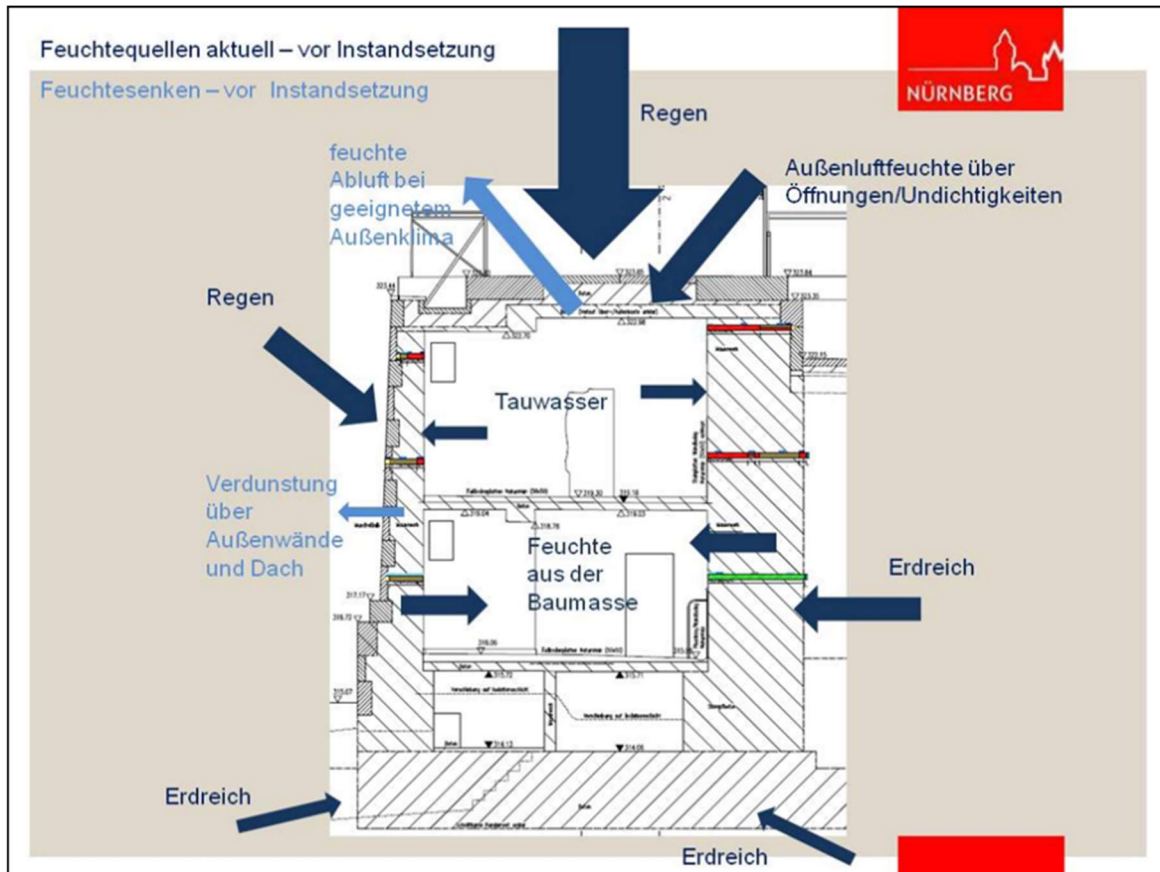
Zur Analyse und Überwachung der Raumklimasituationen wurden bereits im März 2014 umfangreiche Messungen der Raumklimaparameter (neun Messstellen) in Verbindung mit Messungen der Oberflächentemperaturen (vier Messstellen) zur Einschätzung der Tauwassergefahr im Ost- und Westflügel, Endpylon Ost sowie im Mittelbau durch das Hochbauamt begonnen. Bild 58 zeigt eine Übersicht der Messpositionen im Grundriss der Zeppelintribüne.



**Bild 58: Zeppelintribüne - Messpositionen Raumklima und Oberflächentemperaturen ab März 2014**

Die Situation der Feuchtebelastung aufgrund von Feuchtequellen ist in Bild 59 schematisch dargestellt. Die hohen Werte der relativen und absoluten Raumluftfeuchten ergeben sich zum Großteil aus dem seit Jahrzehnten eindringenden Regenwasser. Auch die unregelmäßig eindringende Außenluft transportiert, je nach Außenluftbedingungen, relativ viel Feuchtigkeit in das Gebäude. Feuchtigkeit aus dem Erdreich stellt eine weitere, wenn auch unbedeutende Feuch-

tequelle dar. Zusätzlich gibt es aufgrund der ungünstigen Klimabedingungen im Gebäude Tauwasserausfall. Bei günstigen Klimabedingungen wird feuchte Luft aus dem Gebäude durch die Öffnungen und Undichtigkeiten abtransportiert und etwas Feuchtigkeit kann aus der fast feuchtegesättigten Baumasse an den Innenraum abgegeben werden.



**Bild 59: Prinzipskizze der Feuchtequellen und Feuchtesenken vor der Instandsetzung**

Aufgrund der Schadensbilder und der erfassten Messdaten konnte aus bauklimatischer Sicht folgende Strategien formuliert werden:

- weiteren Eintrag von Regenwasser verhindern,
- Tauwasser vermeiden,
- (langsames) Abtrocknen der Baumasse,
- unregelmäßige Außenlufteinträge reduzieren,
- kontinuierliche Überwachung der Entwicklung der Raumluftfeuchten, Raum- und Oberflächentemperaturen - also Erfolgskontrolle und ggf. Regulierung der Entfeuchtungsmaßnahmen,
- kontinuierliche Überwachung der Entwicklung der Materialfeuchtesituation in verschiedenen Baumaterialien und Bauteilbereichen - also Erfolgskontrolle und ggf. Regulierung der Abtrocknung der Baumasse.

Das, basierend auf den Vorgaben der bauklimatisch erfassten und bewerteten Daten, erarbeitete Sanierungskonzept beruht im Wesentlichen auf folgenden Maßnahmen:

- gezieltes Absenken der relativen und absoluten Feuchtwerte,
- horizontales Abdichten des Baukörpers gegen eindringendes Regenwasser,
- gezieltes Entwässern und Ableiten des Regenwassers ohne weitere Schädigung der Bausubstanz,
- gezieltes Lüften zum Entfeuchten der Raumluft und der Bausubstanz, dazu muss die Gebäudehülle annähernd luftdicht sein, d. h. es darf keine großen Luftspalten/Fugen geben und die verbliebenen bzw. einzubauenden Öffnungen müssen geregelt zu öffnen und zu schließen sein.

Bild 60 zeigt die angestrebte Situation nach der Instandsetzung bzgl. Feuchtequellen und Feuchtesenken.

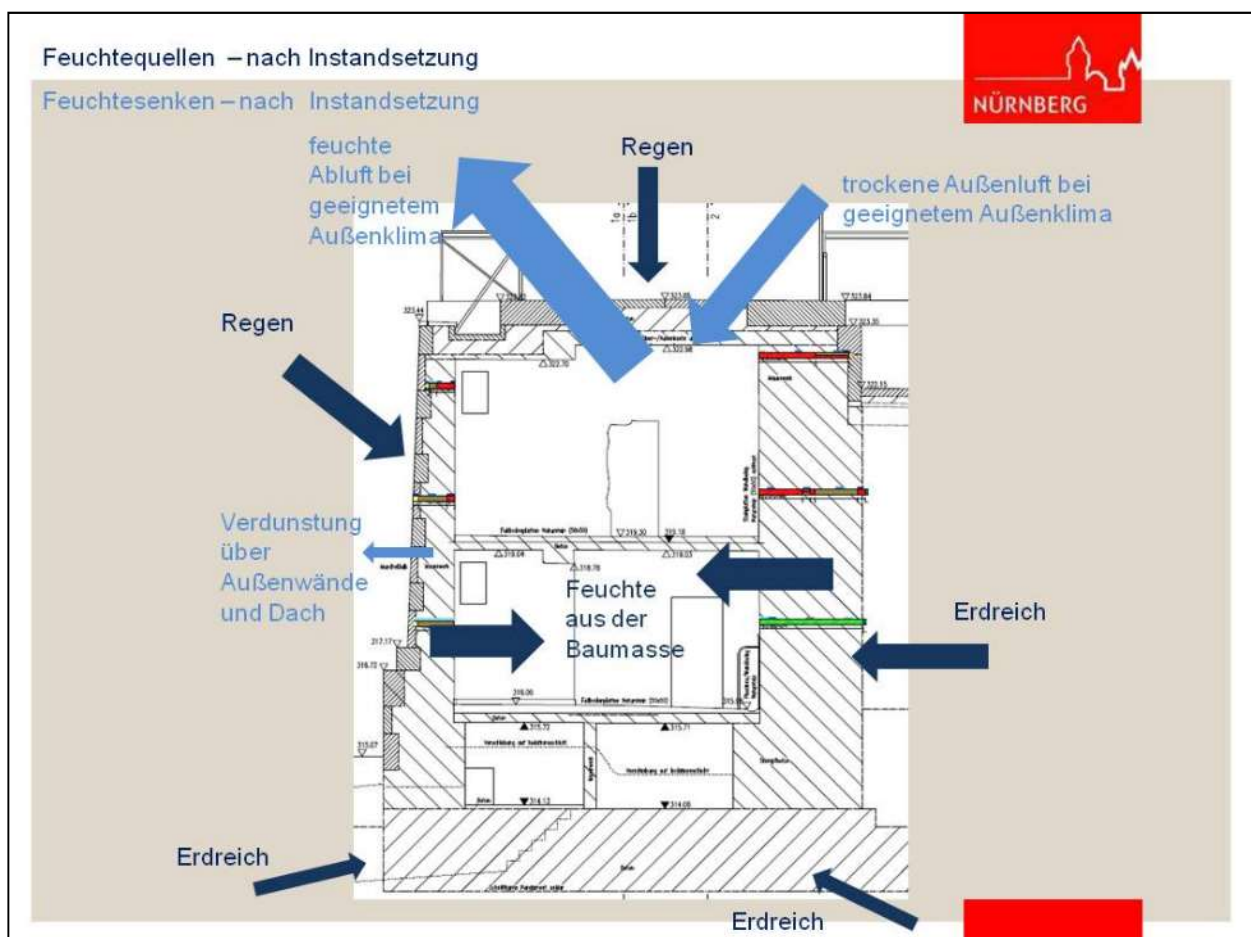


Bild 60: Prinzipskizze Feuchtequellen und Feuchtesenken nach der Instandsetzung

### **3.5.1 Entwicklung und Umsetzung einer denkmalgerechten an die Problemstellung der Zeppelintribüne angepassten Regelstrategie unter Berücksichtigung aller klimatischen und materialtechnischen Randbedingungen**

Kernbestandteil des Konzepts ist ein kontrolliertes Lüften und damit der Abtransport der Feuchte über den Transportweg Luft. Dies kann jedoch nur bei geeigneten Außenluftbedingungen erfolgen, die dann vorliegen, wenn die absolute Feuchte der Außenluft geringer ist als die der Raumluft. Das unkontrollierte Eindringen von Außenluft ist daher möglichst zu verhindern und es müssen definierte Öffnungen für das Einströmen trockener Außenluft bzw. das Abführen der feuchten Raumluft geschaffen werden.

Das Grundprinzip der Luftdurchströmung besteht in der gegenüberliegenden Anordnung der Außenluftöffnung und der Dachventilatoren. Hierbei übernimmt eine entsprechend abgestimmte Regelung den Vergleich der Innen- und Außenklimabedingungen und regelt das Schließen und Öffnen entsprechend. Dadurch wird eine gleichmäßige Querströmung erzwungen. Voraussetzung hierfür sind offene Innentüren, die luftdichte Abschottung von Unter- und Erdgeschoss, also eine insgesamt luftdichte Hülle. Die Lufteinströmung erfolgt über eine motorisch gesteuerte Jalousieklappe in der südlichen Deckenöffnung des Endpylons. Mit den Dachventilatoren werden zwei Luftströmungen erzwungen:

- vom Endpylon über den Flügel bis zum Ende des Musterabschnitts an der ersten Treppenanlage,
- vom Endpylon über die beiden Flügelenden in das Untergeschoss (über zwei Nachströmschächte) und von dort bis zur Mitte des Musterinstandsetzungsbereiches im Bereich des Eingangs.

Um die „gefangenen Räume“ lüftungstechnisch zu erfassen, werden zusätzlich zwei Rohrventilatoren zur Erzeugung einer Luftwalze/Durchströmung eingesetzt. Die Aktivierung der Ventilatoren erfolgt über einen Feuchtecontroller (Regelgerät). Das Regelgerät misst die Lufttemperaturen und die relativen Luftfeuchten innen und außen über kombinierte Sensoren und errechnet daraus die jeweiligen absoluten Feuchtegehalte und vergleicht diese miteinander. Sobald Entfeuchtungspotenzial durch die Außenluft möglich ist, werden die Ventilatoren aktiviert. Des Weiteren wird vom Regelgerät eine möglich auftretende Risikofeuchte erkannt. Diese tritt ein, wenn sich ein Taupunkt in der Außenluft einstellt, der unter der prognostizierten Wandoberflächentemperatur liegt. Das sehr schlanke und technisch minimierte Lüftungskonzept soll die sukzessive Entfeuchtung der Raumluft und damit die Abtrocknung der Baumasse ermöglichen. Die anlagentechnischen und baulichen Maßnahmen sind dabei minimal und beschränken die Eingriffe in die historische Bausubstanz deutlich.

### **3.5.2 Erprobungen des Anlagenbetriebs unter kontinuierlicher Datenerfassung**

Um bewerten zu können, ob die Lüftungsanlage innerhalb der vorgegebenen Parameter arbeitet, ist eine kontinuierliche Übermittlung einer Reihe von Messwerten notwendig.

Um das Innere der Zeppelintribüne zu Entfeuchten darf die Lüftungsanlage nur dann in Betrieb sein, wenn die Außenluftfeuchte absolut trockener als die Innenluft ist.

Die Regelung der Anlage hat Sensoren für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte im Inneren und im Außenbereich. Daraus werden die absoluten Feuchten berechnet und die Abluftgeräte nur dann eingeschaltet, wenn die absolute Feuchte außen kleiner ist als die innen. Die Anlage

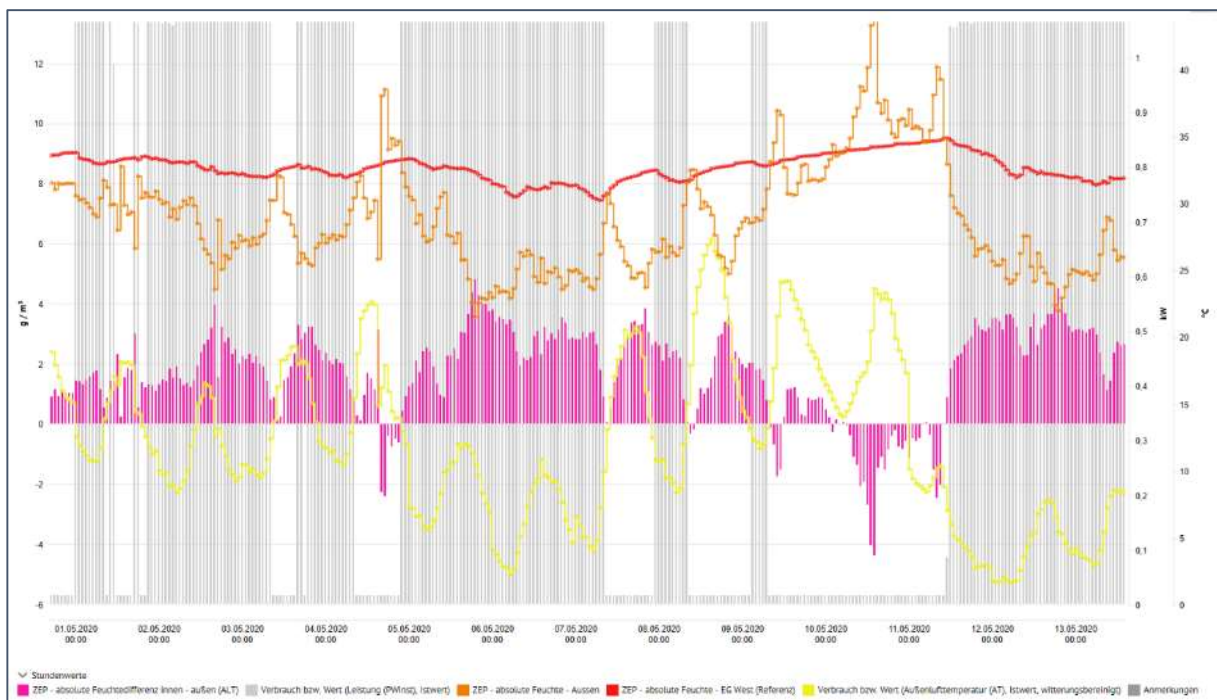
bleibt auch dann ausgeschaltet, wenn die Außenluftfeuchte starken Änderungen unterliegt.

Zur Kontrolle wurden neben den Sensoren der Regelung weitere Messfühler installiert, die den zeitlichen Verlauf der absoluten Feuchte über Jahre hinweg erfassen.

Zur Kontrolle wurden neben den Sensoren der Regelung weitere Messfühler installiert, die den zeitlichen Verlauf der absoluten Feuchte über Jahre hinweg erfassen.

Ein Stromzähler liefert die Daten, wann die Lüftung in Betrieb ist und wann nicht.

Das folgende Diagramm (Bild 61) zeigt einen Ausschnitt über knapp zwei Wochen.



**Bild 61: Zeitlicher Verlauf der absoluten Feuchten, der Außenlufttemperatur und der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage**

- die rote Linie ist die absolute Feuchte innen
- die orange Linie ist die absolute Feuchte der Außenluft
- die gelbe Linie ist die Außentemperatur
- die pinken Balken sind die Differenz zwischen absoluter Feuchte innen und außen (nur im positiven Bereich darf die Lüftung arbeiten)
- die grauen Balken sind die elektrische Leistung der Abluftmotoren

Einstellungen der Regelung:

- relative Sollwertfeuchte (Maximalfeuchte) Innenraum (einstellbar 40 bis 80 %): Einstellwert: 55 %
- Schalthysterese Sollwertfeuchte: (Werkseinstellung: 2 %) Einstellung: 2 %
- relative Minimalfeuchte Innenraum. Bei Unterschreiten dieses Wertes wird die Entfeuchtung gesperrt: Einstellwert: 40 % (mind. 7% unter der Sollwertfeuchte)
- Einschaltlaufzeit der Ventilatoren: (Werkseinstellung: 10 min) Einstellung: 90 min
- Pausenschaltung der Ventilatoren: (Werkseinstellung: 10 min) Einstellung: 10 min

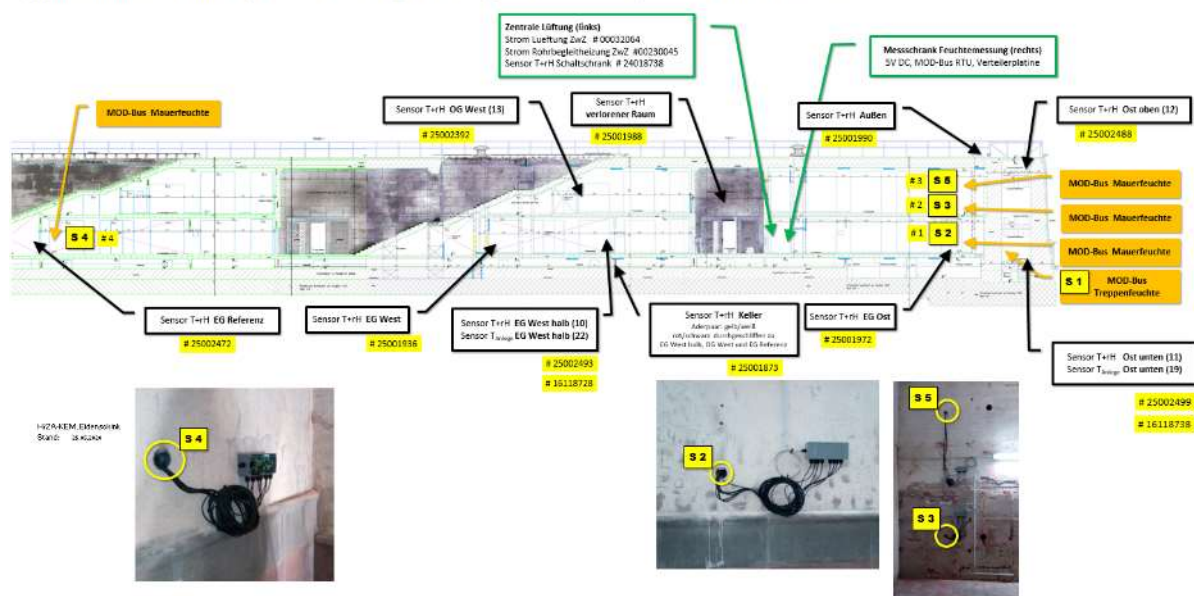
- Abschaltverzögerung von 60 min zur Vermeidung von zu hohen Schaltzyklen
- Frostunterbrechung: bei Raumlufttemperaturen unter 2 °C wird die Lüftung deaktiviert.

An weiteren relevanten Stellen im Gebäude sind zusätzliche zehn Sensoren analog Bild 62 montiert, um die räumlichen Klimaverhältnisse im gesamten Bereich zu messen.



**Bild 62: M-Bus-Sensor für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte**

**Zeppelintribüne - Schnitt Süd-/Westansicht - Lage Datenlogger und Sensoren, MOD-BUS Mauerfeuchte**



**Bild 63: Schnitt durch den Mustersanierungsbereich und den unsanierten Referenzbereich mit der Lage der Sensoren**

Diese Sensoren sind über einen M-Bus mit dem Datenlogger Fabrikat Lertes im Steuerschrank über Datenleitungen verbunden, werden ausgelesen und dort gespeichert. Die Häufigkeit der Abfrage aller Sensoren ist abhängig von deren Dynamik gewählt: Stromzähler alle 15 Minuten und die Luftsensoren alle 60 Minuten. Die Sensoren im Mauerwerk (S2 bis S4) werden ebenfalls von dem Datenlogger über MOD-Bus zweimal täglich erfasst.

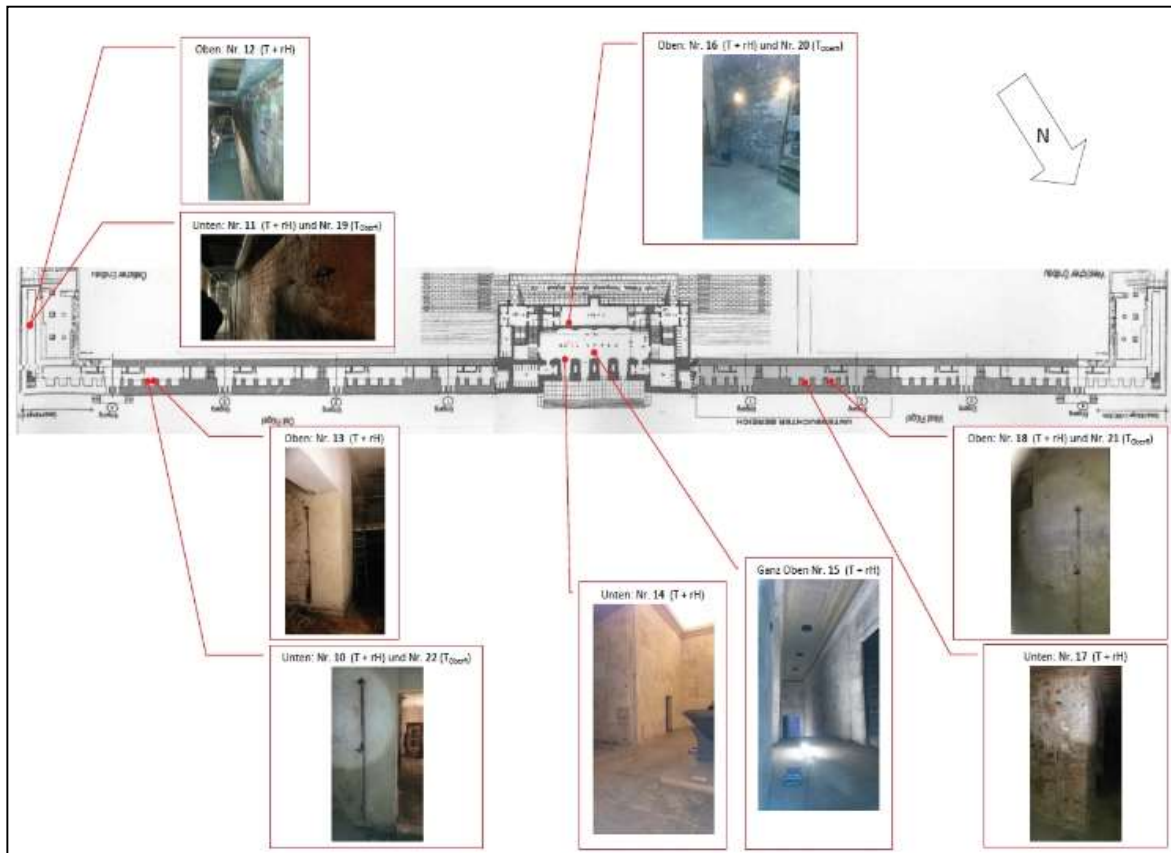
Mittels Mobilfunk übermittelt der Datenlogger die Messwerte täglich per Email in die bereits vorhandene Energiecontrollingsoftware InterWatt der Stadt Nürnberg und diese stehen dann zur Auswertung zur Verfügung.

### 3.5.3 Messergebnisse

Messungen im Jahr 2014 zeigen für die Raumtemperaturen Spannweiten im Bereich von -2 bis 18 °C in Raumbereichen ohne natürliche Belüftung und -6 bis 22 ° in Bereichen mit natürlicher Belüftung, vgl. auch Bild 65.

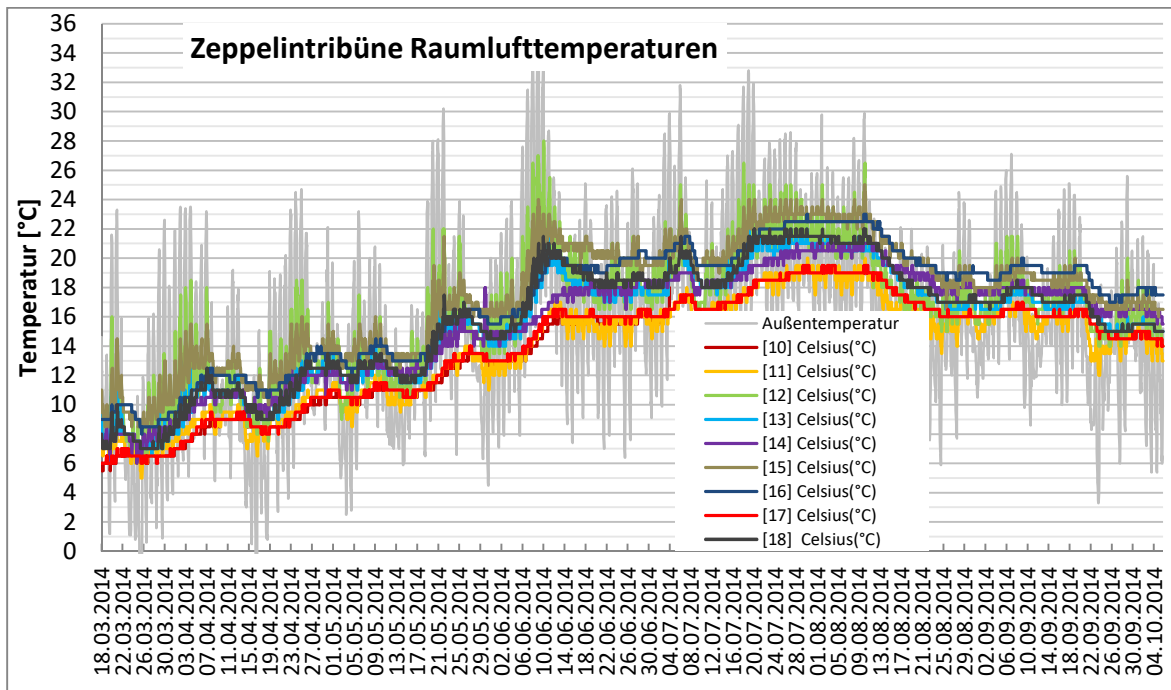
Bild 64 zeigt die Lage der Messfühler der Vorab-Messungen im Jahr 2014.





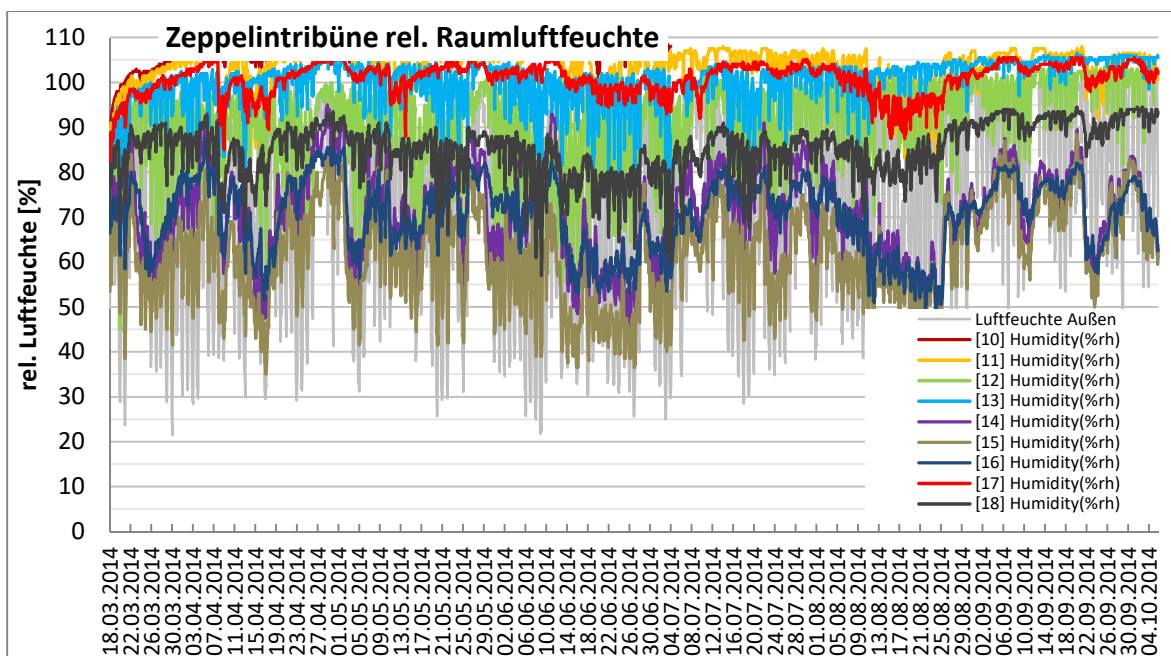
**Bild 64: Horizontalschnitt durch den Mustersanierungsbereich und dem unsanierten Referenzbereich mit der Lage der Sensoren bei den Vorab-Messungen**

Die Raumlufttemperaturen folgen sehr zeitverzögert den Außenlufttemperaturen. Die Trägheit ist dabei abhängig von der Lage der Messstellen im Gebäude. Je höher im Gebäude und je näher an Außenluftöffnungen, umso weniger träge folgt die Temperatur innen der außen (vgl. Bild 65).



**Bild 65: Messungen 2014 - Raumlufthemperaturen**

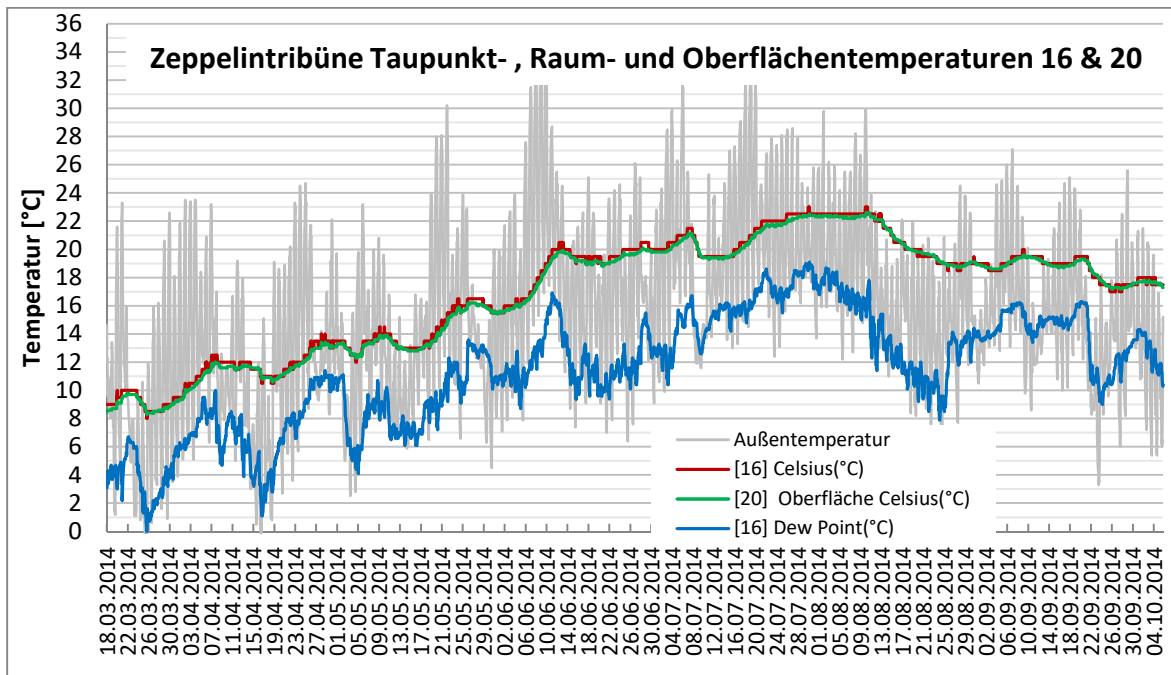
Messungen im Jahr 2014 der relativen Feuchte zeigen jahreszeitlich schwankende Messwerte zwischen 70 und 100 % in unbelüfteten Raumbereichen und 55 bis 95 % in belüfteten Bereichen, vgl. Bild 66.



**Bild 66: Messungen 2014 - relative Raumlufthfeuchten**

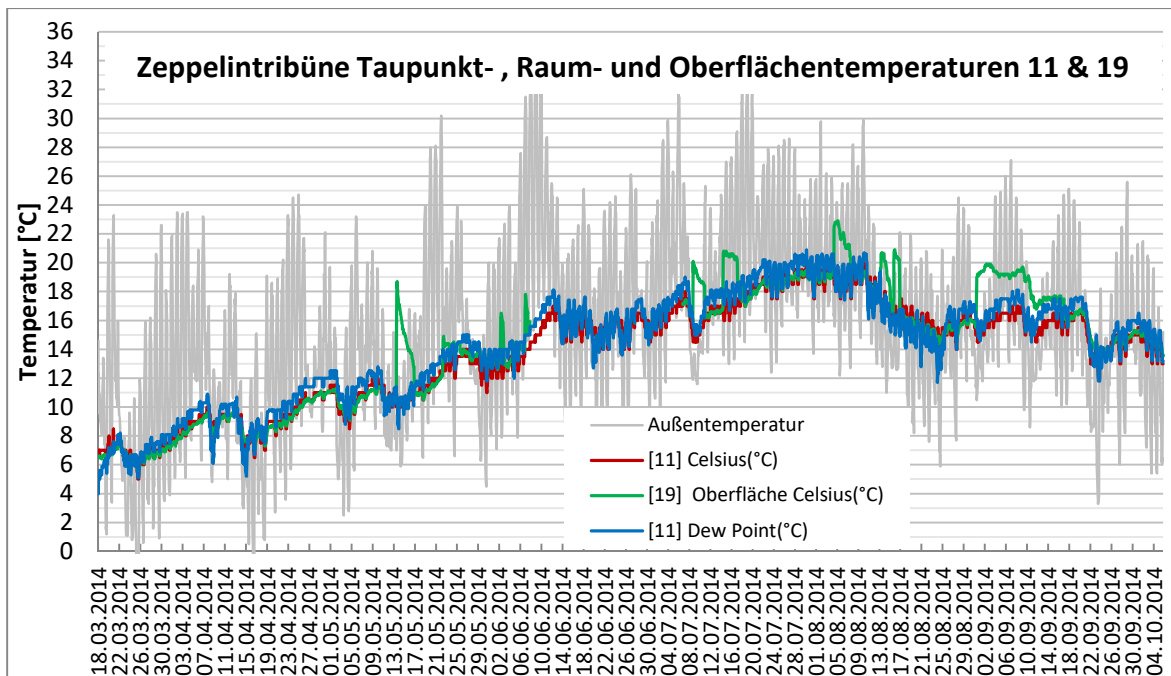
Bei den Messungen im Jahr 2014 wurden zudem Oberflächentemperaturen gemessen, um das Risiko von Tauwasserbildung bewerten zu können.

Bild 67 zeigt die Verläufe der Oberflächentemperaturen am Messpunkt Mittelbau Obergeschoss (grüne Kurve).



**Bild 67: Messungen 2014 - relative Raumlufffeuchten**

Die Temperaturwerte auf der Wandoberfläche haben ausreichend Abstand zum Verlauf der Taupunkttemperaturen (blaue Kurve), so dass hier keine Tauwassergefahr besteht. Die rote Kurve kennzeichnet die Raumtemperatur.

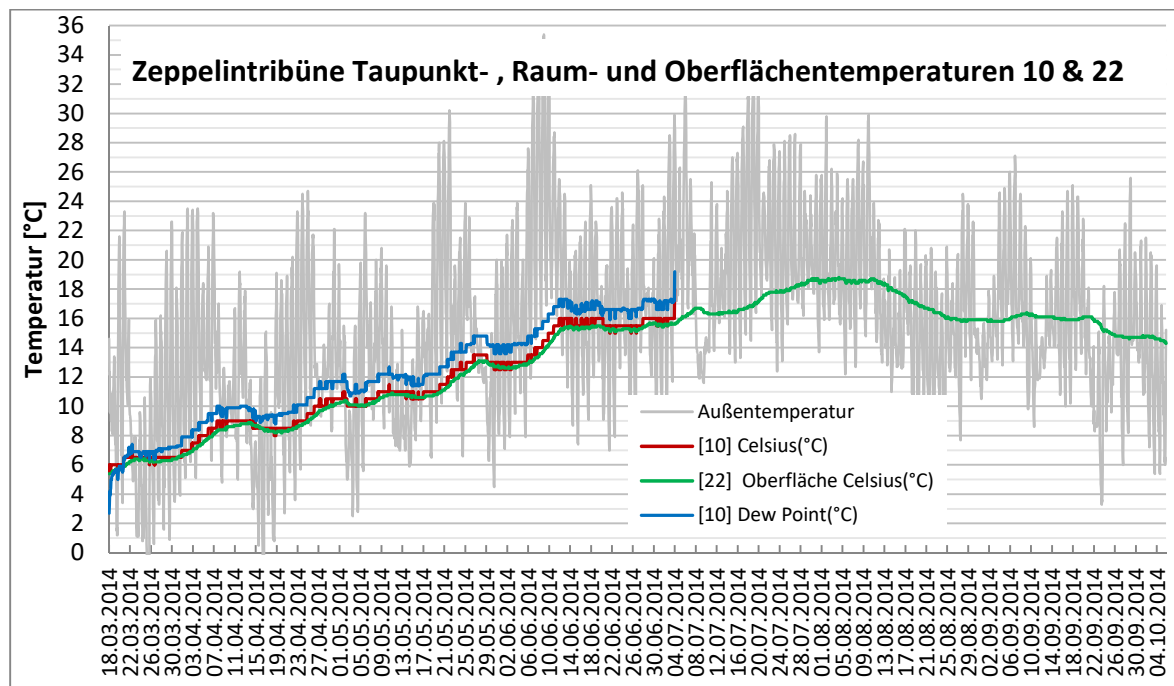


**Bild 68: Messungen 2014 - Oberflächentemperaturen am Messpunkt Endpylon Untergeschoss - grüne Kurve**

Bild 68 zeigt die Verläufe der Oberflächentemperaturen am Messpunkt Endpylon Untergeschoss (grüne Kurve).

Hier liegen die Temperaturwerte auf der Wandoberfläche im Bereich der Taupunkttemperaturen, so dass hier eine hohe Tauwassergefahr (blaue Kurve) besteht. Leider zeigt der Verlauf der grünen Kurve einige Ausreißer nach oben. Dabei handelt es sich um temporäre Messfehler. Die rote Kurve kennzeichnet die Raumtemperatur.

Bild 69 zeigt die Verläufe der Oberflächentemperaturen am Messpunkt Ostflügel Erdgeschoss (grüne Kurve).

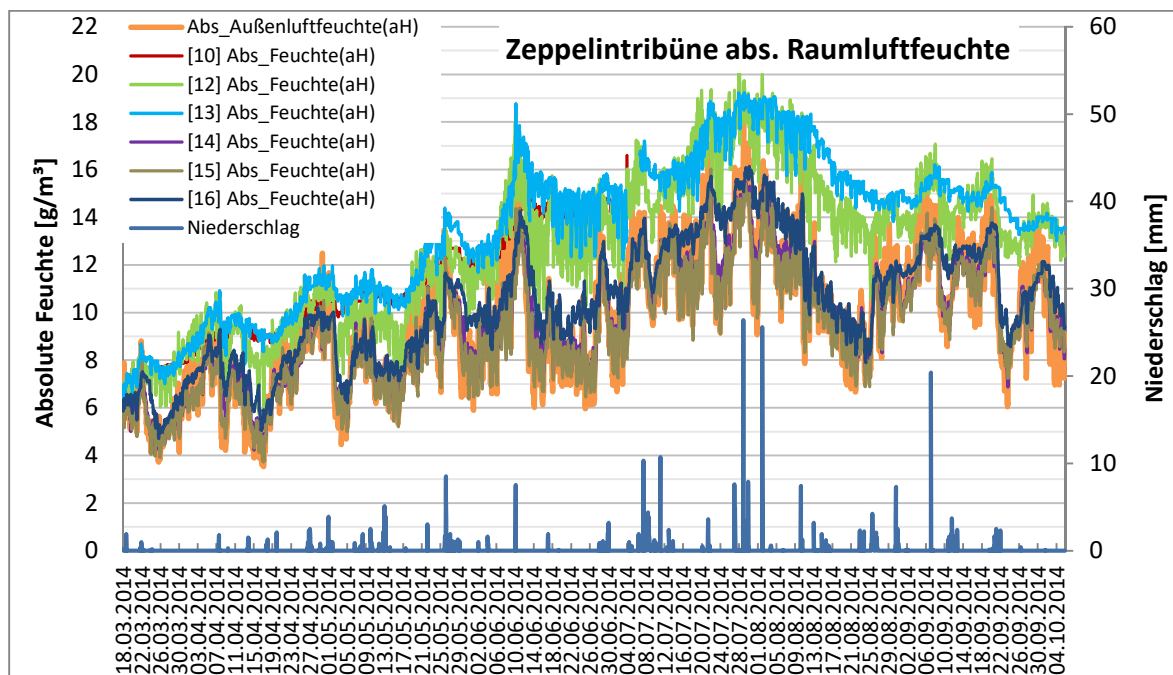


**Bild 69: Messungen 2014 - Oberflächentemperaturen am Messpunkt Ostflügel Erdgeschoss - grüne Kurve**

Die Taupunkttemperaturen (blaue Kurve) liegen hier bis zum Versagen des Raumtemperatursensors (rote Kurve) immer über der Wandoberflächentemperatur. Hier entsteht in jedem Fall Tauwasser. Das Erdgeschoss im Ostflügel ist sehr kühl, folgt sehr träge der Außentemperatur und ist schlecht belüftet.

Für die Messungen aus dem Jahr 2014 wurden die absoluten Feuchtwerte aus den Raumtemperaturen und relativen Luftfeuchten ermittelt. Diese zeigen jahreszeitlich schwankende Werte zwischen 4 und 20 g/m<sup>3</sup>, vgl. Bild 70.

Die Werte der absoluten Feuchte folgen direkter den Werten der absoluten Feuchte außen, vor allem an den Messpunkten im Mittelbau Erdgeschoss, welches bzgl. der Raumtemperatur sehr träge, jedoch relativ gut belüftet ist. Die Regenereignisse sind sichtbar. Das Niveau der absoluten Feuchte ist an den Messpunkten im Ostflügel Erdgeschoss und Endpylon Obergeschoss am höchsten. An allen Messpunkten im Mittelbau, der generell eine relative trockene Bausubstanz zeigt, werden die niedrigsten absoluten Feuchten gemessen.

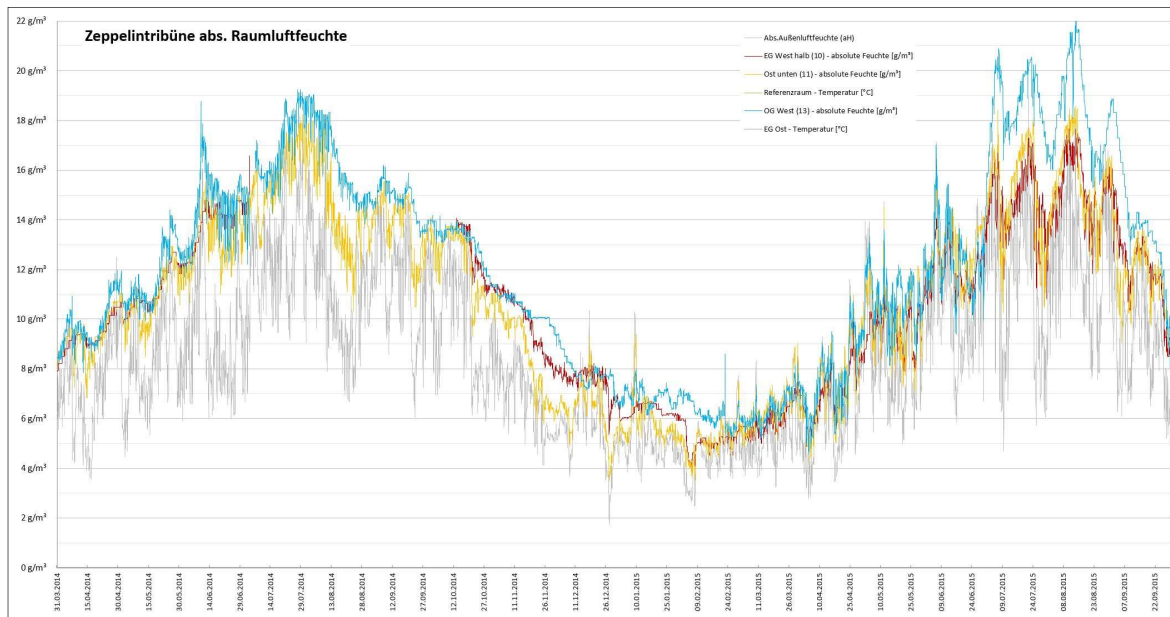


**Bild 70: Messungen 2014 - absolute Raumlufffeuchten**

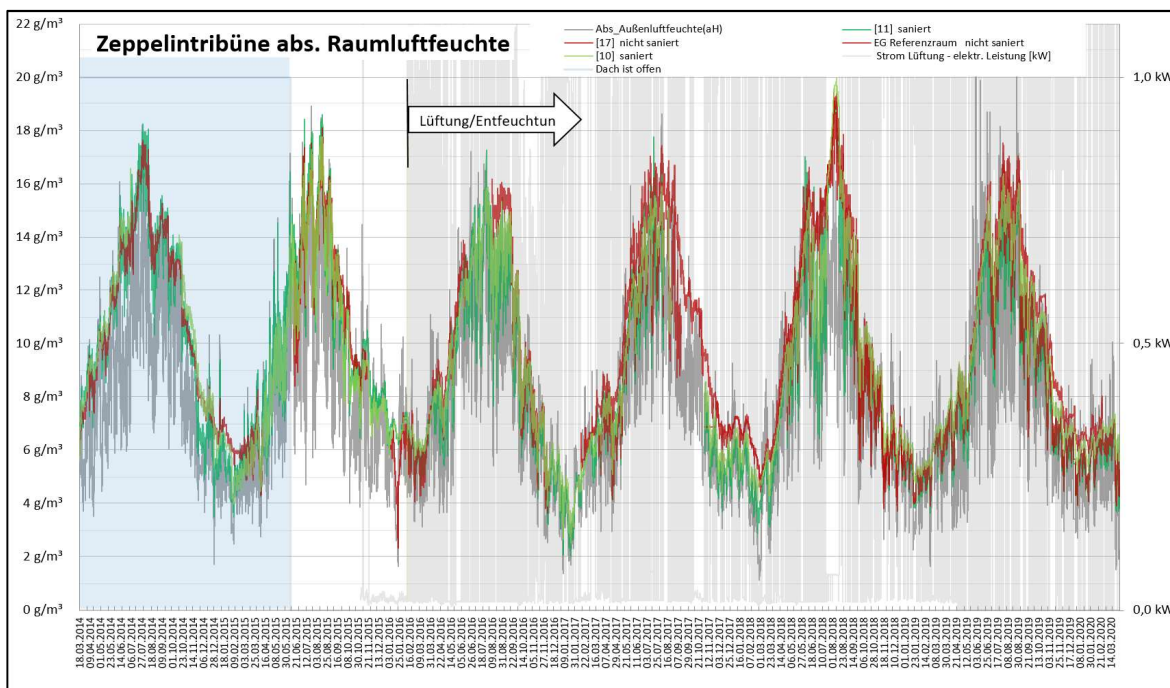
Die bauklimatischen Probleme in der Zeppelintribüne lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Raumtemperaturen innen folgen der Außentemperatur, wobei die Trägheit und das Niveau von Lage in der Tribüne abhängig sind.
- Die relativen Feuchtwerte sind abhängig von Temperatur und Außenluft: im Erdgeschoss sind sie immer am höchsten.
- Die Oberflächentemperaturen folgen der Außentemperatur und sind jeweils im Erdgeschoss am niedrigsten und damit am kritischsten hinsichtlich der Gefahr von Tauwasserbildung.
- Im Ostflügel tritt fast überall Tauwasser auf, im Mittelbau eher nicht.
- Die absoluten Feuchtwerte innen folgen der Entwicklung außen, wobei Regenereignisse sichtbar sind. Das Niveau ist abhängig von Lage in der Tribüne. Im Mittelbau sind die Werte am niedrigsten. Zudem sind die Werte nicht unbedingt dort am höchsten, wo die relative Luftfeuchte am höchsten ist, sondern dort, wo die Feuchtebelastung in der Baumasse am höchsten ist. So sind die Werte im Ostflügel im Obergeschoss am höchsten, wo eine gute Belüftung (Endpylon oben). Dort treten dann, neben sehr hohen, auch sehr niedrige Werte auf.

Seit der baulichen Umsetzung des Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungskonzeptes im Jahr 2015 sind die absoluten Feuchtwerte an den verschiedenen Messstellen bereits merkbar gesunken. Sie sinken im Jahresverlauf von etwa 4 bis 22 g/m<sup>3</sup> vor Sanierung (Bild 71) auf 2 bis 16 g/m<sup>3</sup> nach Sanierung (Bild 72: grüne Kurven an den Messstellen im Mustersanierungsabschnitt mit Entfeuchtung durch gezieltes Belüften und nach den baulichen Abdichtungs- und Entwässerungsmaßnahmen).



**Bild 71: Messungen 2014/2015 - absolute Raumlufffeuchten vor Umsetzung der baulichen Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungsmaßnahmen**



**Bild 72: Messungen 2014 bis 2020 - absolute Raumlufffeuchten nach Umsetzung der baulichen Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungsmaßnahmen**

Die grünen Messkurven betreffen Messpunkte im Mustersanierungsabschnitt, während die roten Kurven in Raumbereichen ohne bauliche Abdichtungs-, Entwässerungs- und Entfeuchtungsmaßnahmen gemessen wurden. Jahreszeitliche Schwankungen sind sichtbar, die abnehmende Tendenz der absoluten Feuchtwerte in den Raumbereichen des Mustersanierungsabschnittes ist jedoch deutlich erkennbar.

#### 4 Fazit

Mit Hilfe des im Rahmen des Projektes entwickelten Feuchtemesssystems können Feuchtezustände in „Mauerwerksabschnitten“ kontinuierlich überwacht werden. Auch ist es problemlos möglich, Änderungen des Feuchteniveaus als Folge von z. B. Wasserzutritt bedingt durch Regen oder sonstige Undichtigkeiten detektieren zu können. Jedoch sind für die Messung von absoluten Feuchtezuständen noch weitere labortechnische Untersuchungen und Messreihen, so die Bestimmung von Eichkurven für verschiedene Baustoffe, notwendig. Diese Problematik ergibt sich aus dem relativ kleinen Messbereich, der sich aus der Differenz der TDR-Signalwerte einer trockenen und einer wassergesättigten Materialprobe ergibt. Die Bestimmung der Feuchtespeicherung und der daraus resultierenden TDR-Signale ist sehr zeitaufwändig und konnte im Rahmen des Projektes nicht abschließend realisiert werden. In diesem Kontext wird derzeit noch an der Methodik der Sondencharakterisierung gearbeitet. So wird angestrebt, dass alle im Rahmen einer Messreihe zum Einsatz kommenden TDR-Sonden bei der Grundmessung einen nahezu gleichen Wert anzeigen. Dies war bei den im Forschungsprojekt zum Einsatz gekommenen Sonden nicht der Fall. Hier müssen weitere Entwicklungen vorangetrieben werden. Demgegenüber konnte eine Miniaturisierung der Sonden bereits erfolgen, da Sonden mit einem Durchmesser von 50 mm, wie sie in der Zeppelintribüne zum Einsatz kamen, nur selten in der Denkmalpflege eingesetzt werden können.

Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass eine Vereinfachung thermisch-hygrischer Simulationsmodelle möglich ist. Entsprechend steht mit der Bearbeitung des DBU-Projekts für die Zeppelintribüne ein einfaches Simulationsmodell zur Verfügung. Jedoch konnten die Simulationsberechnungen nicht wie geplant validiert werden. Grund hierfür war, dass es während der Durchführung des Projektes immer wieder zu Änderungen bzw. Sprüngen im Feuchteniveau der untersuchten Wandbauteile in den zu untersuchenden Gebäudeabschnitten kam. Diese Änderungen wurden offensichtlich durch flüssiges Wasser in Tropfenform verursacht, wie mit Hilfe der TDR-Messreihen nachgewiesen werden konnte.

Solche Zustände sind demnach im Bauteilinneren/Wandquerschnitt möglich, da teilweise Hohlräume vorliegen. Solche Situationen, die defacto unplanbare Änderungen der Systemrandbedingungen bedeuten, lassen sich aktuell mit den verfügbaren Simulationsmodellen nicht abbilden. Dies gilt insbesondere für das vereinfachte Simulationsmodell. Zwar können Feuchtequellen im Simulationsmodell berücksichtigt werden, doch erfordert dies auch Kenntnisse zur Leistung der Quelle. Diese ist jedoch sporadisch, demnach unbekannt, kann also bestenfalls nur abgeschätzt werden. Da Feuchtequellen im Innern der betrachteten Bauteile einen erheblichen Einfluss auf die Klimasteuerung haben, wird sich MOCult auch nach Projektende im Rahmen weiterführender Arbeiten mit der Berücksichtigung von Quellen beschäftigen. Bislang ist die Klimasteuerung der Lüftungsanlage vereinfacht darauf ausgelegt, dass die absolute Feuchte der Außenluft mit der absoluten Feuchte der Innenluft verglichen wird. Ist die absolute Feuchte außen geringer als innen, wird die Lüftung eingeschaltet und somit trockenere Luft in die konditionierten Bereiche der Tribüne geleitet. In Zeiten, in denen die absolute Feuchte außen höher als innen ist, wird nicht gelüftet. Dies bedeutet allerdings auch, dass nicht ganzjährig konditioniert werden kann. Hierzu wären zusätzlich Aktoren, wie z. B. Entfeuchter notwendig.

Im Prinzip wurde ganzjährig, gemäß der Regelungseinstellungen, gelüftet, sofern dies raum-

lufttechnisch sinnvoll war. Eine Regelung nach einer anderen Steuerungsgröße, z. B. in Abhängigkeit der gemessenen (Material-)Feuchtezustände bzw. der Simulationsberechnungen war nicht möglich.

In der Zeitschrift „Schützen & Erhalten“, Ausgabe 11/2017 erfolgte die erste Vorstellung des Projekts.

Bedingt durch die Einschränkungen bei der Durchführung von Fachveranstaltungen wegen der Covid-19-Pandemie konnte eine gesonderte Vorstellung des Projekts bisher nicht erfolgen. Diese ist für 2021 geplant.

Die Vorstellung des Projekts und der Ergebnisse erfolgt zudem in der Fachzeitschrift „Schützen & Erhalten“ des Bundesverbandes für Feuchte und Altbausanierung 2021 und im Rahmen der „Hanseatische Sanierungstage“ in Lübeck im November 2021.



## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Hübner, Christof; Kaatze, Udo. 2016. Electromagnetic moisture measurement, <http://dx.doi.org/10.17875/gup2016-958> -Stand: 2018\_02\_03
- [2] WTA-Merkblatt 4-5-99/D: "Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik", Hrsg. WTA, 1999
- [3] WTA-Merkblatt 4-11-02/D: "Messung der Feuchte bei mineralischen Baustoffen", Hrsg. WTA, 1999
- [4] WTA-Merkblatt 5-6-99/D: „Bauwerksdiagnose“, Hrsg. WTA, 1999
- [5] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: „Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen, Hrsg. WTA, 2001
- [6] WTA-Merkblatt 6-2-13/D: „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“, Hrsg. WTA, 2013
- [7] DIN ISO 15901-1:2019-03 „Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberdruckporosimetrie und Gasadsorption – Teil 1: Quecksilberporosimetrie“, Berlin, Beuth Verlag, 2019
- [8] DIN 66139:2013-03 „Porengrößenanalyse – Darstellung von Porengrößenverteilungen“, Berlin, Beuth Verlag

## 6 Anhänge



**Bild 73: Bohrker n I - gesamt**



**Bild 74: Bohrker n I - Teilbereich 1**



**Bild 75: Bohrkern I - Teilbereich 2**



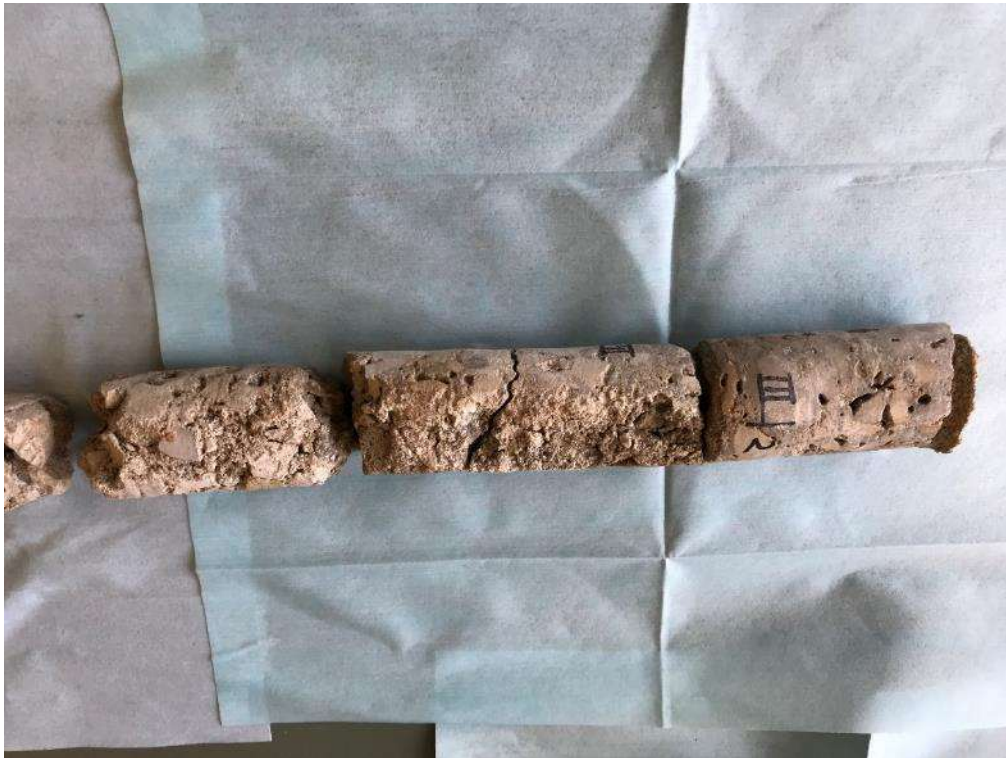
**Bild 76: Bohrkern I - Teilbereich 3**



**Bild 77: Bohrkerh I - Teilbereich 4**



**Bild 78: Bohrkerh III - gesamt**



**Bild 79: Bohrkern III - Teilbereich 1**



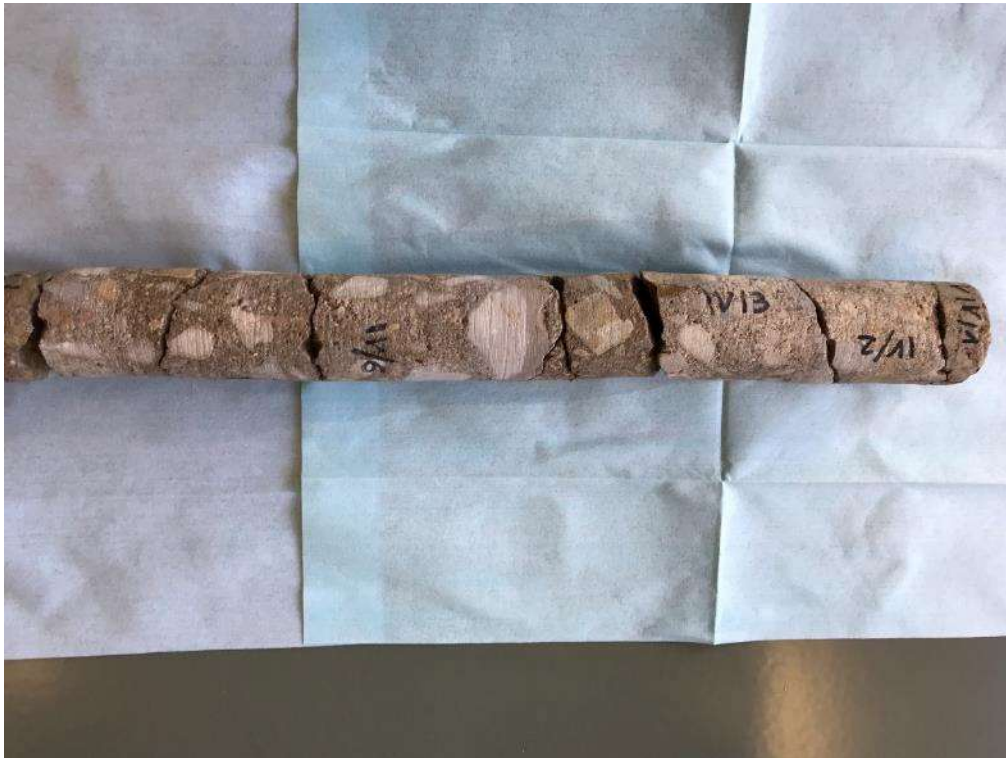
**Bild 80: Bohrkern III - Teilbereich 2**



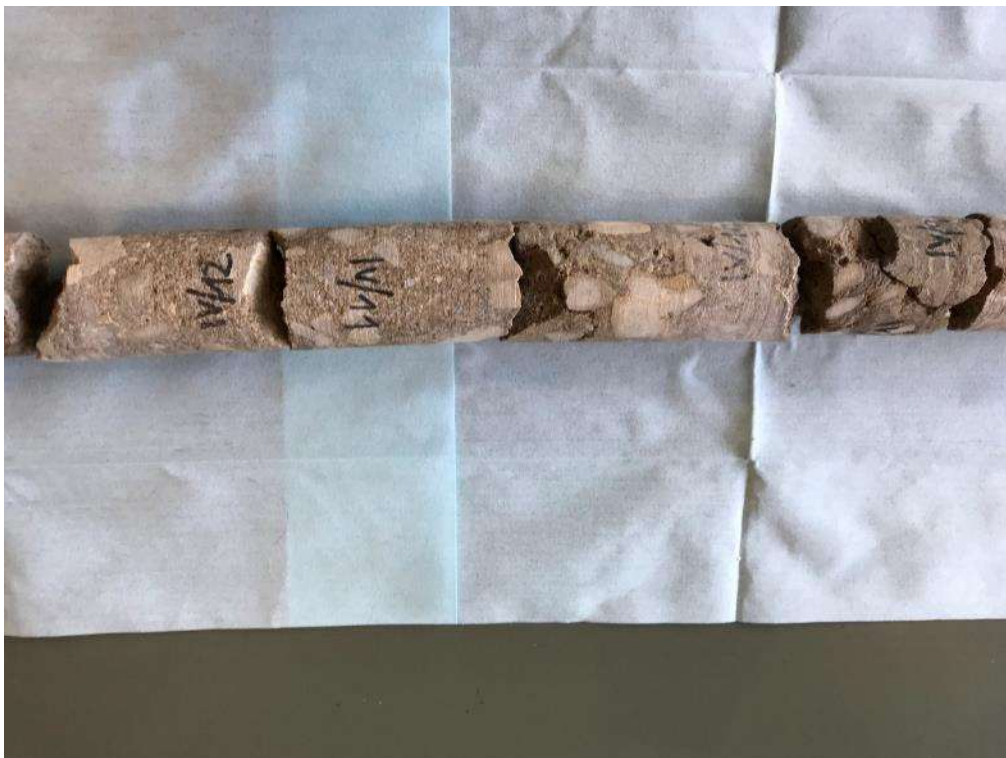
**Bild 81: Bohrkern III - Teilbereich 3**



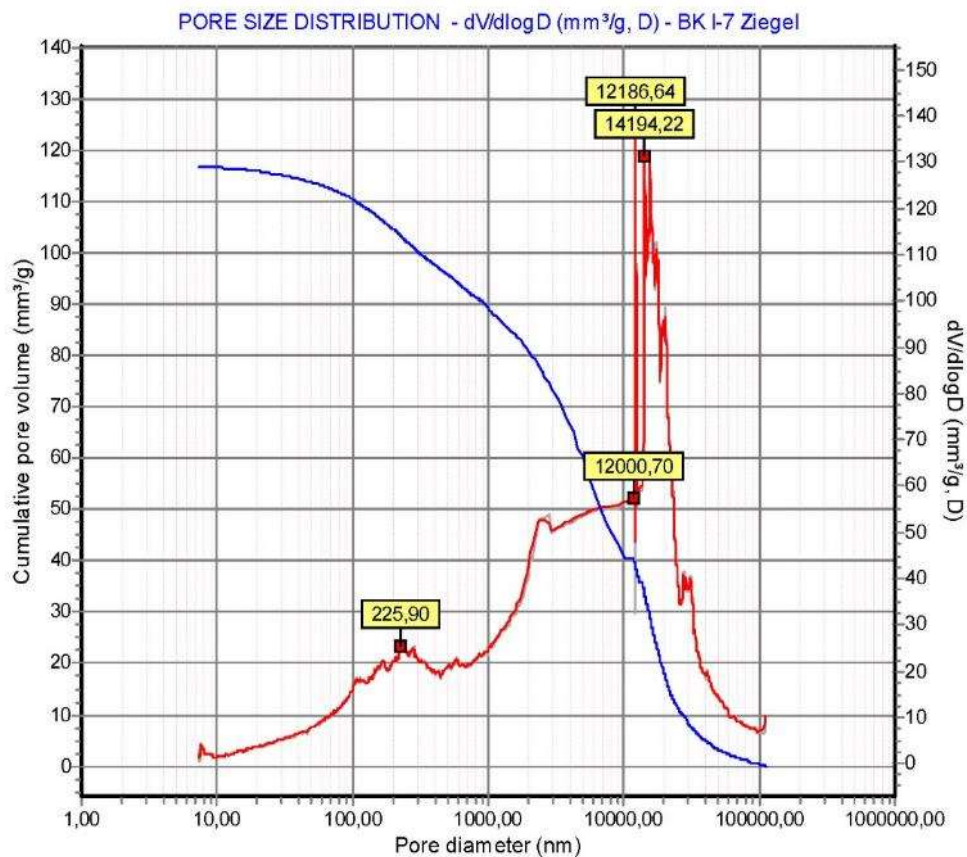
**Bild 82: Bohrkern IV - gesamt**



**Bild 83: Bohrkern IV - Teilbereich 1**



**Bild 84: Bohrkern IV - Teilbereich 2**



Derivative calculated with  
Moving average points:  
Smoothing factor:

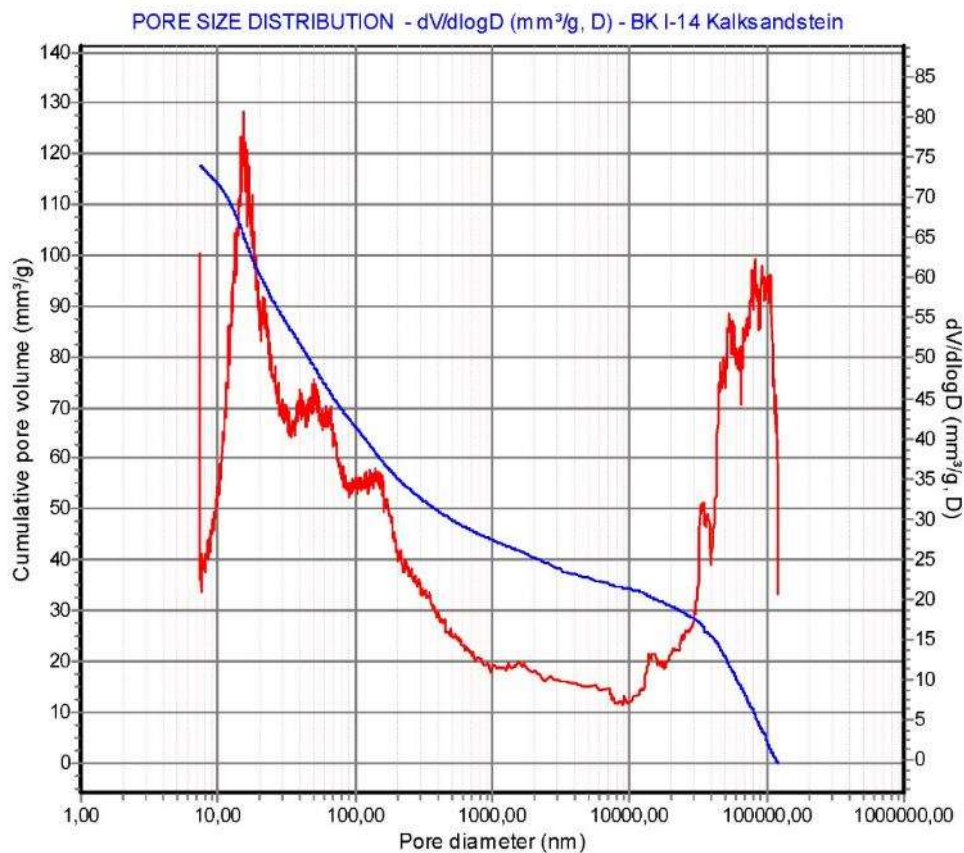
31  
0,50

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 200,7  
Total pore volume ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ): 116,88  
Total pore surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ ): 1,167  
Average pore diameter (nm): 400,75  
Median pore diameter (nm): 5270,30  
Modal pore diameter (nm): 12186,64  
Peak n. 2 Pore diamet. (nm): 14194,22  
Peak n. 3 Pore diamet. (nm): 12000,70  
Peak n. 4 Pore diamet. (nm): 225,90  
Span: 3,7061

with model : Cylindrical and Plate  
(4V/A)  
at ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) : 58,44  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 138,33  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 131,21  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 57,41  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 25,52  
at Min. Vol. (%) 10,0 at Max. Vol. (%) 51,0

**Bild 85: Porenverteilung Bohrkern I - Ziegel**





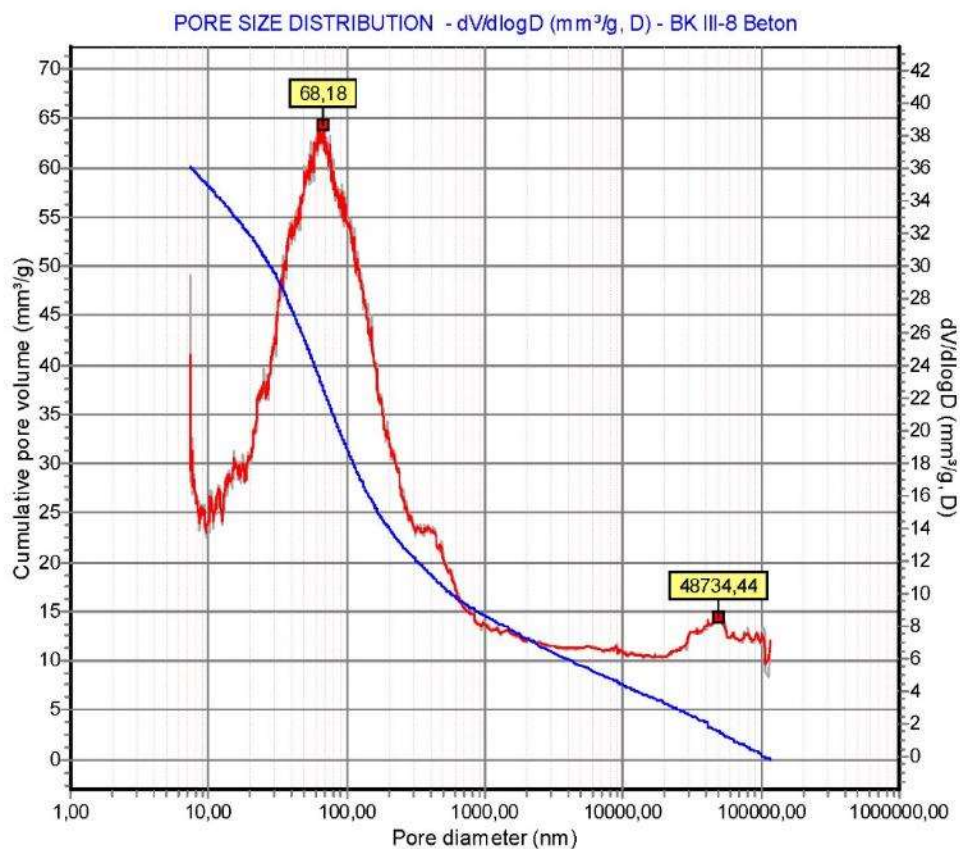
Derivative calculated with  
Moving average points:  
Smoothing factor:

31  
0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 200,5  
Total pore volume (mm<sup>3</sup>/g): 117,73  
Total pore surface area (m<sup>2</sup>/g): 10,249  
Average pore diameter (nm): 45,95  
Median pore diameter (nm): 163,25  
Modal pore diameter (nm): 15,37  
Span: 0,00

with model : Cylindrical and Plate  
(4V/A)  
at (mm<sup>3</sup>/g) : 58,87  
at dV/dlogD (mm<sup>3</sup>/g, D) : 80,78  
at Min. Vol. (%) 0,0 at Max. Vol. (%) 0,0

**Bild 86: Porenverteilung Bohrkern I - Muschelkalk**



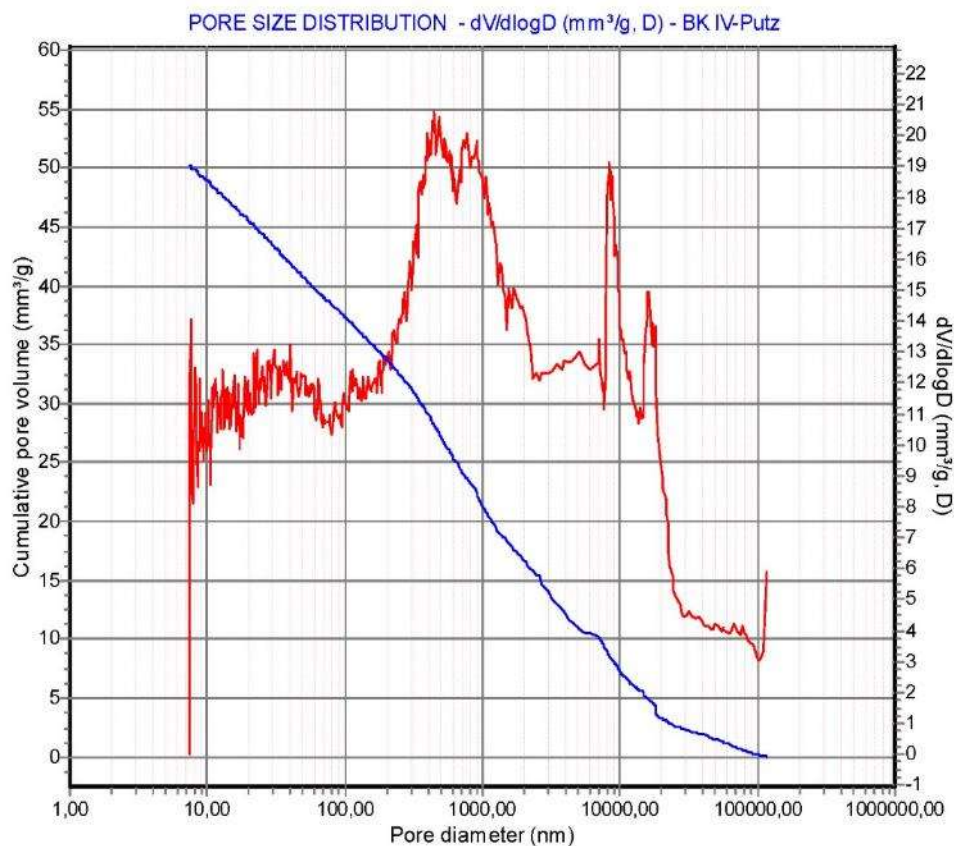
Derivative calculated with  
Moving average points:  
Smoothing factor:

31  
0,50

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 200,7  
Total pore volume ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ): 60,17  
Total pore surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ ): 4,729  
Average pore diameter (nm): 50,90  
Median pore diameter (nm): 110,85  
Modal pore diameter (nm): 68,18  
Peak n. 2 Pore diamet. (nm): 48734,44  
Span: 162,4253

with model : Cylindrical and Plate  
(4V/A)  
at ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) : 30,09  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 38,68  
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}$ , D) : 8,58  
at Min. Vol. (%) 10,0 at Max. Vol. (%) 90,0

**Bild 87: Porenverteilung Bohrkern III - Beton**



Derivative calculated with

Moving average points: 31  
Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 200,7

Total pore volume ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ): 50,26

Total pore surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ ): 2,681

Average pore diameter (nm): 74,99

Median pore diameter (nm): 635,41

Modal pore diameter (nm): 449,55

Span: 24,6604

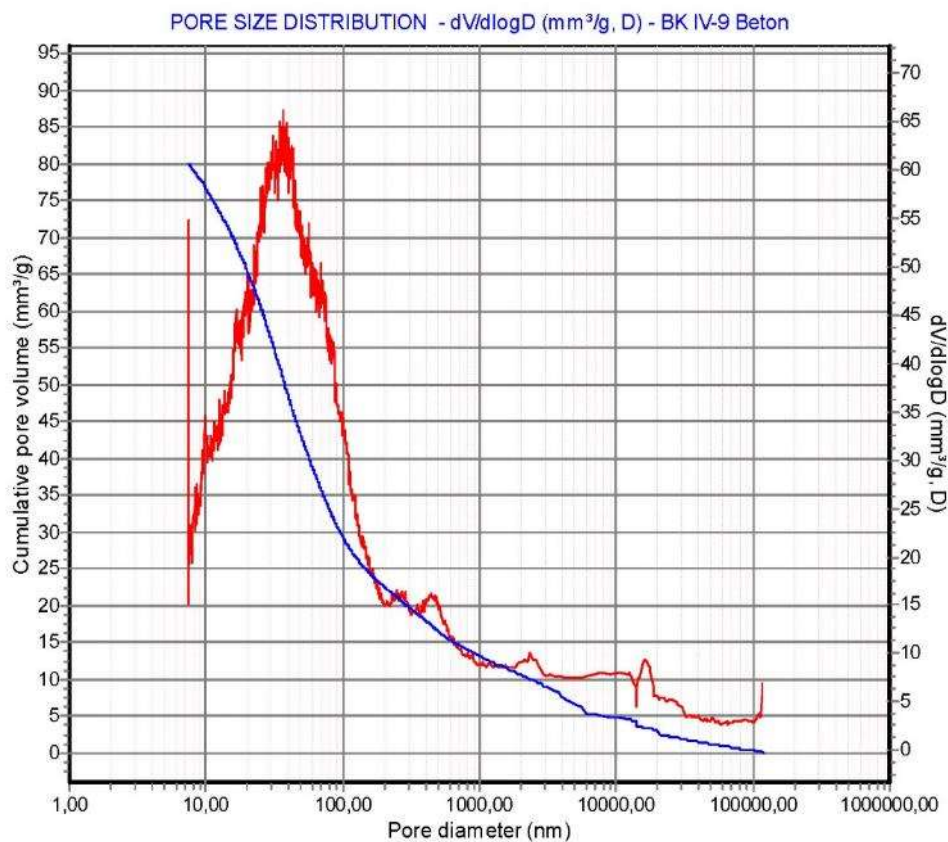
with model : Cylindrical and Plate  
(4V/A)

at ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) : 25,13

at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}, D$ ) : 20,80

at Min. Vol. (%) 10,0 at Max. Vol. (%) 90,0

**Bild 88: Porenverteilung Bohrkern IV - Putz**



Derivative calculated with

Moving average points: 31  
Smoothing factor: 0.00

Calc. press. range (MPa): 0.0 to 200,6

Total pore volume ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ): 80,01

Total pore surface area ( $\text{m}^2/\text{g}$ ): 8,769

Average pore diameter (nm): 36,49

Median pore diameter (nm): 56,61

Modal pore diameter (nm): 36,22

Span: 0,00

with model : Cylindrical and Plate  
(4V/A)

at ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) : 40,00

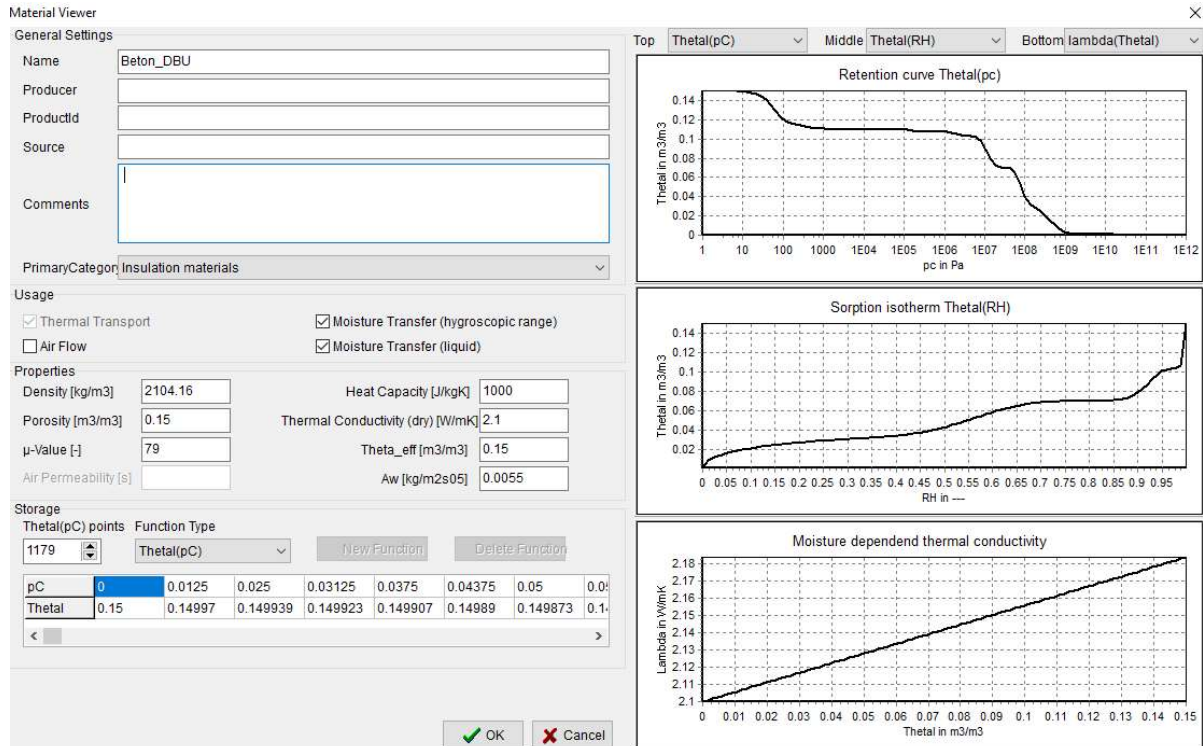
at  $dV/d\log D$  ( $\text{mm}^3/\text{g}, D$ ) : 66,24

at Min. Vol. (%) 0,0 at Max. Vol. (%) 0,0

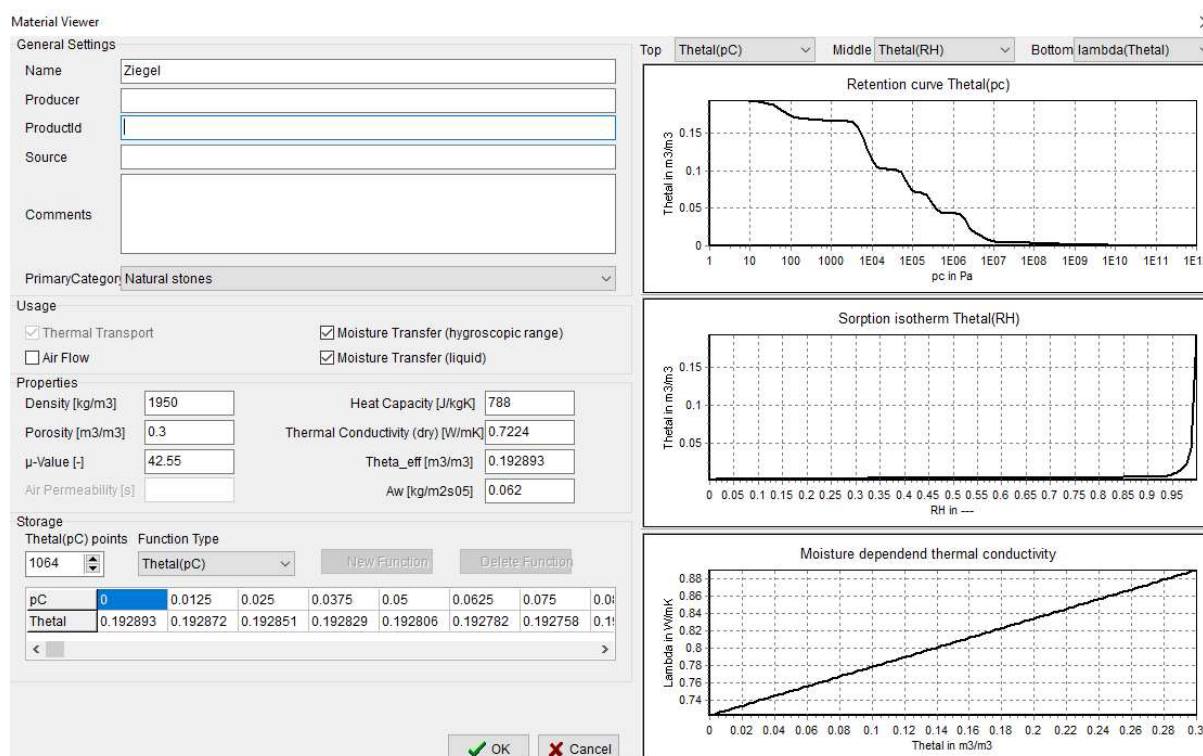
**Bild 89: Porenverteilung Bohrkern IV - Beton**

**Tabelle 11: Bauphysikalische Kennwerte der Bohrkernabschnitte**

	Entnahmetiefe (cm)	Materialart	Porosität $\sigma$ (%)	$\rho_{\text{roh}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{rein}}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Bohrkern I	0–1	Putz	23,05	1,73	2,25
	2–8	Ziegel	22,73	1,93	2,50
	8–15	Ziegel	24,06	1,93	2,54
	15–21	Ziegel	24,27	1,92	2,54
	21–29	Ziegel	21,02	1,92	2,44
	29–35	Ziegel	19,70	1,98	2,47
	35–42	Ziegel	19,80	2,00	2,49
	42–50	Ziegel	22,92	1,96	2,55
	50–57	Ziegel	23,13	1,91	2,49
	57–61	Ziegel	22,49	1,93	2,49
	61–67	Ziegel	23,32	1,92	2,51
67–72	Ziegel	23,72	1,92	2,52	
Bohrkern II	0–1	Putz	17,71	1,91	2,32
	1–4	Ziegel	15,96	2,04	2,43
	4–9	Ziegel	17,28	2,03	2,46
	9–14	Ziegel	15,33	2,06	2,43
	14–16	Mörtel	21,96	1,80	2,31
	16–17	Ziegel	20,14	1,95	2,44
	17–21	Ziegel	21,51	1,93	2,45
	21–27	Ziegel	22,09	1,93	2,47
	27–29	Ziegel	22,36	1,95	2,52
	29–34	Ziegel	22,55	1,92	2,49
	34–40	Ziegel	21,64	1,92	2,45
	40–46	Ziegel	19,48	1,91	2,38
	46–53	Ziegel	19,19	1,95	2,41
	53–56	Mörtel	19,10	1,87	2,31
	56–67	Ziegel	24,74	1,88	2,50
	67–68	Mörtel	20,46	1,86	2,34
	68–71	Ziegel	15,96	2,05	2,44
71–73	Mörtel	21,12	1,79	2,27	
Bohrkern III	0–1	Putz	28,51	1,86	2,61
	1–9	Beton	12,36	2,18	2,49
	9–16	Beton	12,45	2,22	2,53
	16–21	Beton	12,47	2,24	2,56
	21–30	Beton	11,61	2,25	2,55
	30–34	Beton	13,09	2,24	2,58
	34–46	Beton	13,55	2,18	2,52
	46–53	Beton	14,66	2,15	2,51
53–61	Beton	14,40	2,17	2,53	
Bohrkern IV	0–1	Putz	15,92	2,16	2,56
	1–7	Beton	15,00	2,16	2,54
	7–14	Beton	14,97	2,17	2,55
	14–17	Beton	13,27	2,26	2,61
	17–19	Beton	15,00	2,22	2,61
	19–28	Beton	13,23	2,22	2,56
	28–32	Beton	14,08	2,19	2,55
	32–37	Beton	12,42	2,28	2,60
	37–42	Beton	9,78	2,24	2,48
	42–52	Beton	15,03	2,15	2,53
	52–59	Beton	15,98	2,11	2,51
	59–67	Beton	13,67	2,22	2,57
	67–72	Beton	17,68	1,83	2,22



**Bild 90: Materialeigenschaften für die Simulationsberechnung - Beton**



**Bild 91: Materialeigenschaften für die Simulationsberechnung - Ziegel**