

Peter Kozub

## Wasseraufnahmeprüfer nach Karsten – Neue Erkenntnisse und neues Auswerteverfahren.

(Der Text basiert auf den Artikel: KOZUB, Peter (2020): *Karsten Tube Penetration Test - New findings and new evaluation method*. In: Siegesmund, S. & Middendorf, B. (ed.): *Monument Future: Decay and Conservation of Stone*. Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. Vol. I, Mitteldeutscher Verl., pp. 277-282. Dieser Artikel wurde hier auf Deutsch übersetzt und geringfügig geändert und ergänzt.)

### Einführung

Die Kenntnis der Kenngrößen des Feuchtetransports hat in der Steinrestaurierung eine große Bedeutung. Diese lassen sich unter Laborbedingungen in den meisten Fällen mit großer Genauigkeit bestimmen. Ihre Ermittlung setzt allerdings die Entnahme von Proben voraus, die zumindest bei kleinen und wertvollen Objekten vielfach nicht akzeptabel ist. Die Ermittlung dieser Eigenschaften direkt am Objekt ist schwieriger. Eine der wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Wasseraufnahmekoeffizient ist die Messung mit s.g. Karsten'schen Prüfröhrchen.

Der Wassereindringtest nach Karsten wird seit seiner Entwicklung in den Jahren 1958/60<sup>1</sup> häufig als einfache, zerstörungsfreie Schnelltestmethode für das Eindringen von Wasser in poröse Materialien wie Beton, Stein oder Putz eingesetzt.

Maßgebliche Größe für die Beurteilung ist der Wasseraufnahmekoeffizient ( $w$ -Wert)<sup>2</sup>. Er beschreibt, wieviel Wasser eine definierte Fläche eines Materials in einer bestimmten Zeitspanne durch kapillare oder absorptive Kräfte aufgenommen wird<sup>3</sup>:

$$w = \frac{m}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

Mit dem  $w$ -Wert sind auch andere Kenngrößen des Feuchtetransports mathematisch verknüpft, u.a. der Wassereindringkoeffizient ( $B$ -Wert) und die Wasseraufnahmekapazität ( $WAK$ ):

$$WAK = \frac{w}{B \cdot \rho_w} \quad (2)$$

### Herleitung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Die Formel des Wasseraufnahmekoeffizienten wird aus dem s.g.  $\sqrt{t}$ -Gesetz abgeleitet.

Die Zusammenhänge bei Kapillardruck (Kapillanzug; kapillare Zugkraft  $P_K$ ) lassen sich über die **Gleichung von Young und Laplace** für die Zylinderkapillare mit einem Radius  $r$  wie folgt beschreiben:

$$P_K = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \gamma}{r} \quad (3)$$

<sup>1</sup> WENDLER/SNETHLAGE 1989, p. 110, (erstmalig publiziert in: KARSTEN, 1960)

<sup>2</sup> In früheren Publikationen auch  $A$ -Wert genannt s. z.B.: KÜNZEL 1971, p. 22ff.

<sup>3</sup> SCHWARZ 1972, p. 206, bzw. SCHWARZ / KÜNZEL / GÖSELE 1971, p. 2.

Strömungsdruck (Strömungswiderstand  $P_V$ ), bei laminarer Strömung, die beim Kapillartransport in Baustoffen meist gegeben ist, ist nach **Hagen-Poiseuille-Gesetz** proportional zur Eindringtiefe  $x(t)$  und zur Fließgeschwindigkeit:

$$P_V = \frac{8 \cdot \eta}{r^2} \cdot x(t) \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \quad (4)$$

Dem Kapillarzyug wirken weitere Kräfte entgegen, die den Transport einschränken. Der Hydrostatischen Druck  $P_H$  in Abhängigkeit der Höhe des Flüssigkeitsmeniskus.

$$P_H = \rho_F \cdot g \cdot h \quad (5)$$

Bei Beschleunigung muss zusätzlich die Massenträgheit des Kapillarwassers (Trägheitsdruck  $P_T$ ) überwunden werden:

$$P_T = \frac{\Delta(\rho_F \cdot x(t) \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t})}{\Delta t} \quad (6)$$

Für die Beschreibung des Wasseraufnahmekoeffizienten können nach Lykow<sup>4</sup> bei geringen Saughöhen und beim waagerechten Saugen kann der Einfluss von Trägheitsdruck und hydrostatischen Druck für geringe Sauggeschwindigkeiten vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich folgende allgemeine Differentialbeziehung des Kräftegleichgewichts aus Strömungsdruck ( $P_V$ ) und Kapillardruck ( $P_K$ ) in einer Einzelkapillare:

$$P_V - P_K = 0 \quad (7a)$$

$$\left( \frac{8 \cdot \eta}{r^2} \cdot x(t) \cdot \frac{\Delta x(t)}{\Delta t} \right) - \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \gamma}{r} \right) = 0 \quad (7b)$$

Durch Umstellen nach der Eindringtiefe ergibt sich:

$$x(t) = \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \gamma}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{t} \quad (8)$$

Diese Beziehung wird in der Literatur als Vt-Gesetz bezeichnet und zeigt sich genauso bei der kapillaren Wasseraufnahme poröser Baustoffe mit unterschiedlicher Porenstruktur<sup>5</sup>.

Im Sinne des Wasseraufnahmekoeffizienten wird nun die Eindringtiefe ( $x(t)$ ) durch die flächenbezogene Masse des aufgenommenen Wassers ( $m$ ) ersetzt<sup>6</sup>:

$$m(t) = \left[ \rho_w \cdot \theta_{cap} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \gamma}{2 \cdot \eta}} \right] \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

<sup>4</sup> LYKOW 1958.

<sup>5</sup> RUCKER-GRAMM 2008, p. 38.

<sup>6</sup> STELZMANN et al. 2017, p. 65 bzw. STELZMANN 2020, pp.12f.

Der Ausdruck in eckigen Klammern wird von Schwarz, Künzel und Gösele<sup>7</sup> als die Materialkonstante Wasseraufnahmekoeffizient zusammengefasst:

$$m = w \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

Diese nach der Umstellung nach Variable  $w$  ergibt die bereits erwähnte Formel (1).

Aus der Formel (9) und (10) ergibt sich unter Voraussetzung eines in etwa konstanten kapillaren Wassergehaltes folgende Zusammenhang:

$$w = \rho_w \cdot \theta_{cap} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \gamma}{2 \cdot \eta}} \quad (11)$$

Diese Formel beschreibt die Abhängigkeit des Wasseraufnahmekoeffizienten von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit ( $\sigma$ ), dem Kapillarradius ( $r$ ), dem Benetzungswinkel ( $\gamma$ ), der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit ( $\eta$ ), der Dichte der Flüssigkeit ( $\rho$ ) und dem kapillaren Wassergehalt (Wasserkapazität  $WAK$ ) ( $\theta_{cap}$ ).

### Bedeutung von $w$ -Wert in der Steinrestaurierung

Die Bedeutung von  $w$ -Wert in der Steinrestaurierung wird aus vielen Studien eindeutig ersichtlich. Durch die Messung gewonnene Informationen über das Verhalten des Materials gegenüber Wasser in unterschiedlichen Stadien der Verwitterung und in unterschiedlichen Phasen der restauratorischen Bearbeitung helfen sowohl bei der Ermittlung der Verwitterungsvorgänge als auch bei der Überprüfung der durchgeführten restauratorischen Maßnahmen.

Diese, wohl gesagt zerstörungsfreie Messmethode kann unproblematisch direkt am Objekt eingesetzt werden. Da keine Veränderungen durch die Anwendung zu erwarten sind, ist die Messung gleicher Stelle mehrmals durchführbar.

Eine einfache Handhabung und schnelle Anwendung erlaubt die Durchführung von größerer Zahl der Messungen in einem dichten Raster<sup>8</sup>. Das ermöglicht sowohl das Abtasten von großen Bereichen erhöht und präzisiert aber gleichzeitig die Genauigkeit der Werte.

Der dadurch ermittelte  $w$ -Wert wird bei vielen Berechnungen in Betracht gezogen. Der Wasseraufnahmekoeffizient wird z.B. in der Baustofftechnik häufig genutzt, um die Saugfähigkeit der Materialien zu klassifizieren um die durch Wasser verursachte Schäden, beispielsweise Durchfeuchtungen, Frostschäden oder Schimmel- und Algenbefall besser einschätzen zu können.

Gängig ist folgende Einteilung des Wasseraufnahmekoeffizienten:

- saugend:  $w > 2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$
- wasserhemmend:  $w \leq 2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$
- wasserabweisend:  $w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$
- wasserundurchlässig:  $w \leq 0,001 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$

<sup>7</sup> SCHWARZ / KÜNZEL / GÖSELE 1971, p. 2.

<sup>8</sup> SNETHLAGE / PFANNER 2013, p. 84.

Der  $w$ -Wert wird auch zur Bestimmung der erforderlichen Mindesteindringtiefe für das Festigungsmittel über die Ermittlung der Tiefenlage des Maximums der mittleren Feuchteverteilung, die in erster Näherung vom diesem Wert abhängig ist<sup>9</sup>:

$$\begin{aligned} w = 0,1 \dots 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}: & \quad s = 1,0 \text{ cm} \\ w = 0,5 \dots 3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}: & \quad s = 3,0 \text{ cm} \\ w > 3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}: & \quad s = 6,0 \text{ cm} \end{aligned}$$

Auch bei der Beschreibung des Trocknungsverhaltens der Materialien mittels der s.g. „Künzel-Zahl“, ein Produkt von  $w$ -Wert und  $s_d$ -Wert ist es erforderlich die Wasseraufnahmekoeffizienten der beteiligten Materialien zu ermitteln<sup>10</sup>.

Nach Aussagen von Künzel ist diese Forderung erfüllt, wenn das Produkt des Diffusionswiderstandes und des Wasseraufnahmekoeffizienten einen bestimmten, empirisch ermittelten Wert nicht überschreitet:

$$s_d \cdot w \leq 0,1 \text{ kg/m h}^{0,5} \quad (12)$$

und die Werte der beiden Faktoren folgend Begrenzung nach oben aufweisen:

$$w \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5} \quad (13)$$

$$s_d \leq 2 \text{ m} \quad (14)$$

Auch bei den Anforderungen für die Hydrophobierung wird explizit auf die Mindesteindringtiefe von Hydrophobierungsmittel hingewiesen die sich mit Hilfe des vorher bestimmten  $w$ -Wertes abschätzen lässt. Zusätzlich wird auf die Anwendung für die Überprüfung der hydrophoben Wirkung hingewiesen. Dabei soll der  $w$ -Wert nach der Hydrophobierung kleiner als  $0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$  sein<sup>11</sup>.

Zusammenfassende und einzelne Restaurierungsschritte betreffende Beschreibung, belegt mit Grenzwerten und Zusammenhängen mit anderen Eigenschaften, Anforderungen und Qualitätsprüfungsvorschlägen befinden sich in den Publikationen von Snethlage und Pfanner<sup>12</sup> bzw. Snethlage und Wendler<sup>13</sup>.

## Messung, Auswertung und Berechnung

Der Erfinder des Wasserprüfers Rudolf Karsten schlägt eine einfache Anwendung und Auswertung der Messung vor als „Wassereindringen“. „In regelmäßigen Zeitabständen wird die Menge des eingedrungenen Wassers abgelesen.“<sup>14</sup>. In späteren Publikationen bezeichnet

<sup>9</sup> Bereits in: SNETHLAGE / WENDLER 1995, p. 14 (dort noch als  $W$ -Wert), SNETHLAGE / PFANNER 2013, p. 124.

<sup>10</sup> SNETHLAGE / PFANNER 2013, p. 125; 166, KÜNZEL 1969, KÜNZEL 1976, WEHLE / GARIGLIO 2015.

<sup>11</sup> SNETHLAGE / PFANNER 2013, p. 182f; p. 243f.

<sup>12</sup> SNETHLAGE / PFANNER 2013.

<sup>13</sup> SNETHLAGE / PFANNER 2013.

<sup>14</sup> KARSTEN 1960, p. 381.

er diese Größe als „Wassereindringvermögen“ und beschreibt die Messung genauer. Die Werte werden in „ml Wasser je Minute [oder in] ml Wasser je Minute und  $\text{cm}^2$  [...] indem die Meßmittelwerte durch die Größe der Prüffläche (meist  $3 \text{ cm}^2$ ) geteilt werden“ angegeben<sup>15</sup>. In dieser Art wird es also kein Wasseraufnahmekoeffizient berechnet.

Die Vorgehensweise bei der Messung ist nicht genau definiert. Die von Karsten vorgeschlagene Anwendungsart wird aber von zahlreichen Autoren und Anbieter dieses Prüfgerätes in unterschiedlichen Varianten übernommen.

Es gibt zwar einige Normen, die die Messung regeln sollten, den „Normenwirrwarr bei der Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten“ beklagen bereits 2004 Fitz und Krus in ihren Artikel<sup>16</sup>.

Es gibt, wie gesagt, zahlreiche verschiedene Normen<sup>17</sup>, die die Ermittlung von Wasseraufnahmekoeffizienten an Probematerialien beschreiben. In den meisten von ihnen gilt, die von Schwarz, Künzel und Gösele definierte Formel (1)<sup>18</sup>.

In einigen wenigen Normen, die die Messung mit Wassereindringprüfer nach Karsten beschreiben<sup>19</sup>, wird ähnliches Messprinzip vorgeschlagen wie von dem Erfinder selbst. Keine von diesen Normen schlägt eine Berechnung von  $w$ -Wert aus diese Messung vor.

Nichtsdestotrotz berechnen einige Autoren<sup>20</sup> den Wasseraufnahmekoeffizient aus dieser Messung mittels Formel (1) nach Schwarz, Künzel und Gösele.

## Notwendigkeit Umrechnung

Bei vielen Untersuchungen ist man gezwungen, die mit Karsten ermittelte Werte mit den  $w$ -Werten aus der Literatur, die nach DIN an Probematerialien unter Laborbedingungen ermittelt worden sind, zu vergleichen. Viele  $w$ -Werte, die in der Literatur zu finden sind, und die zur Vergleich gezogen werden, sei es aus finanziellen oder konservatorischen oder auch materialtechnischen Gründen, sind in dieser Weise ermittelt worden.

Auch die bereits erwähnten Klassifizierungen und Berechnungen (z.B. Einschätzung der Saugfähigkeit, Bestimmung der erforderlichen Mindesteindringtiefe für das Festigungs- bzw. Hydrophobierungsmittel oder Beschreibung des Trocknungsverhaltens der Materialien) beruft man sich auf die  $w$ -Werte die nach DIN ermittelt worden sind.

Der direkte Vergleich dieser Werte mit dem Werten aus der Karsten-Messung ist allerdings nicht ohne weiteres möglich. Bei den nach DIN ermittelten Werten sind die Probengeometrie (Bohrkerne) und die Vorgehensweise (Benetzen der Standfläche) klar festgelegt. Das Wasser breitet sich in dem Probekörper somit zweidimensional (Wasserfront approximativ als Fläche) aus. Somit gilt hier die oben erwähnte Formel nach Schwarz, Künzel und Gösele. Die Wasseraufnahme mittels dem Karsten'schen Prüfröhrchen stellt einen dreidimensionalen Saugvorgang dar, da auch seitliche Bereiche der Messstelle Wasser aufnehmen. Somit ist es notwendig den  $w$ -Wert anders zu berechnen.

---

<sup>15</sup> KARSTEN 1997, p. 399.

<sup>16</sup> FITZ / KRUS 2004

<sup>17</sup> DIN 52 617: 1987, DIN EN 1015-18: 2003, DIN EN 1925: 1999, DIN EN 772-11: 2000-29, DIN EN ISO 15148: 2002-12, DIN EN ISO 15801: 2010.

<sup>18</sup> SCHWARZ / KÜNZEL / GÖSELE 1971.

<sup>19</sup> RILEM (1980), RILEM (2006), DIN EN 16302: 2013.

<sup>20</sup> z.B.: WEHLE / GARIGLIO 2015.

Es gibt einige Ideen das Problem zu umgehen. Z.B. in dem der Randbereich der Durchfeuchtung durch ein doppelt geschaltetes Rohr aus der Berechnung der Geometrie rausgenommen wird<sup>21</sup>.

### Bisherige Umrechnungsmodelle

Es gibt aber einige Versuche das Problem rein rechnerisch zu lösen. Bis vor kurzen ging man davon aus, dass der Durchfeuchungskörper im Idealfall die Form eines zentralen Zylinders, der von einem Vierteltorus umgeben ist besitzt. Die erste Beschreibung der Geometrie des Durchfeuchtungsbereiches erfolgte durch Wendler und Snethlage<sup>22</sup> (Abb. 1). Auch einige jünger Publikationen gehen, obgleich leicht modifiziert, von diesem Modell aus<sup>23</sup>.

Für die Auswertung der Messdaten stehen bis heute zwei Programme zur Verfügung - das Programm Calcarow von Wendler und Pfefferkorn und der Auswertealgorithmus von Niemeyer. Beide basieren auf der Tabellenkalkulation von Microsoft Excel. Die Auswertung der Messdaten mit beiden Programmen ist ausführlich bei D´ham, Meinhardt und Niemeyer beschrieben<sup>24</sup>.

Bei beiden Programmen ist auch der Vorgang der Berechnung sehr ähnlich. Da, wie bereits erwähnt, mit dem  $w$ -Wert auch andere Kenngrößen des Feuchtetransports mathematisch verknüpft sind (s. Formel (2)) kann die Umrechnung für eine andere Feuchteausbreitungsgeometrie erfolgen.

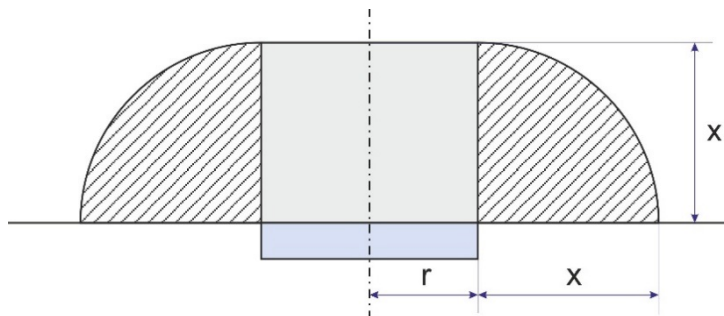


Abb. 1. Schematische Darstellung des beim Karsten-Röhrchen durchfeuchten Gesteinsvolumen nach WENDLER / SNETHLAGE 1989 (geringfügig verändert)

Zuerst wird angenommen, dass das Volumen der mit Wasser gefüllten Bereiche bei beiden Messarten (DIN und Karsten) gleich ist:

$$V_{DIN} = V_{Kar} \quad (15)$$

<sup>21</sup> PLEYERS 1999.

<sup>22</sup> WENDLER / SNETHLAGE 1989, pp. 111f.

<sup>23</sup> HENDRICKX 2013, p. 1314.

<sup>24</sup> D´HAM / MEINHARDT / NIEMEYER 2011, pp. 82-92.

Beide Programme gehen allerdings von der Annahme aus, dass der Durchfeuchtungsbereich bei der Karsten-Messung die Form eines zentralen Zylinders, der von einem Vierteltorus umgeben ist besitzt.

$$\frac{V_{H_2O}}{WAK} \cdot 100 = \pi r^2 x + \frac{\pi x^2 \cdot (4x + 3\pi r)}{6} \quad (16)$$

Nach der Umstellung, bei bekannten Radius des Röhrchens ( $r$ ) und Gesamtvolumen des aufgenommenen Wassers ( $V_{Kar}$ ), wird dann die Eindringtiefe bei der Karstenmessung berechnet ( $x_{Kar}$ ). Daraus ergeben sich die Wassermenge und das durchfeuchtete Volumen des Materials im Bereich des zentralen Zylinders ohne  $\frac{1}{4}$  Torus-Bereiches. Im nächsten Schritt wird, für diesen Bereich die Formel (1) nach Schwarz, Künzel und Gösele für die Berechnung von  $w$ -Wert angewendet.

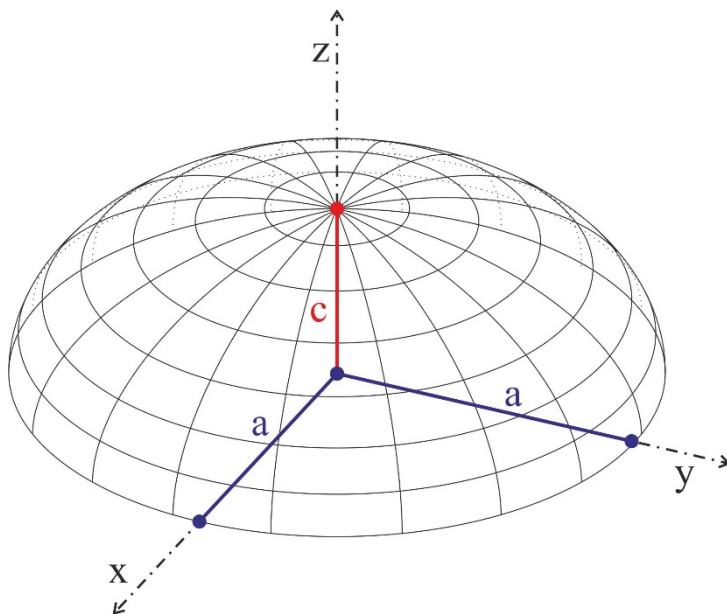


Abb. 3. Die geometrische Form eines abgeflachten Halb-Rotations-Ellipsoids als Ergebnis der Drehung einer Halbellipse um ihre z-Achse

### Neue Erkenntnisse und neue Lösungsansätze

Die mathematischen Darstellungen des Durchfeuchtungsbereiches in 3D Simulationen<sup>25</sup> und die direkten Beobachtungen an den Steinprobeplatten ergaben allerdings ein ganz anderes Wassereindringverhalten. Die geometrische Form der Durchfeuchtung entspricht demnach dem Halbellipsoid (Abb. 3).

Dieser Erkenntnis (in den meisten Fällen ist es eher abgeplattetes und nicht verlängertes

Ellipsoid, also  $a > c$ ) führte dazu, dass auch die mathematische Berechnungsmodelle von  $w$ -Wert aus dieser Messung revidiert werden müssten.

<sup>25</sup> HENDRICKX 2013, p. 1314.

Das neue Auswertungsprogramm KARSTEN 2.3 ellipsoid berücksichtigt die neuen Erkenntnisse. Das Berechnungsprogramm basiert ebenso auf der Tabellenkalkulation von Microsoft Excel um den Zugang und die Benutzung der Software zu erleichtern. Die Art der Berechnung wurde dabei beibehalten.

Zuerst wird das Volumen des Durchfeuchtungsbereiches in Form von Halb(rotations)ellipsoid ( $V_{HE}$ ) berechnet:

$$V_{HE} = \frac{2}{3}\pi a^2 c \quad (17)$$

Bei Karsten beträgt die Länge der Halbachse senkrecht zur Rotationsachse  $a$  bei der Berücksichtigung der Variable  $y$  (Faktor der seitlichen Ausbreitung):

$$a = xy + r \quad (18)$$

und die Länge der Halbachse parallel zur Rotationsachse  $c$  beträgt:

$$c = x \quad (19)$$

d.h. für Karsten gilt:

$$V_{HE} = \frac{2\pi x(xy + r)^2}{3} \quad (20)$$

Daraus ergibt sich durch die Umstellung nach Variable  $x$ :

$$x = \left( \frac{\sqrt{\frac{V_{HE}(81V_{HE}y + 8\pi r^3)}{y}}}{12\pi y^2} + \frac{81V_{HE}y + 4\pi r^3}{108\pi y^3} \right)^{1/3} + \frac{r^2}{9y^2 \left( \frac{\sqrt{\frac{V_{HE}(81V_{HE}y + 8\pi r^3)}{y}}}{12\pi y^2} + \frac{81V_{HE}y + 4\pi r^3}{108\pi y^3} \right)^{1/3}} - \frac{2r}{3y} \quad (21)$$

und das Volumen des zentrischen Bereiches des Halb(rotations)ellipsoids ( $V_B$ ):

$$V_B = \frac{2\pi x(\sqrt{(xy + r)^2 - r^2} \cdot (r^2 - (xy + r)^2) + (xy + r)^2 |xy + r|)}{3|xy + r|} \quad (22)$$

Im letzten Schritt wird, ähnlich wie bei den Vorgängerprogrammen für diesen Bereich die Formel (1) nach Schwarz, Künzel und Gösele für die Berechnung von  $w$ -Wert ange wendet (Abb. 3).



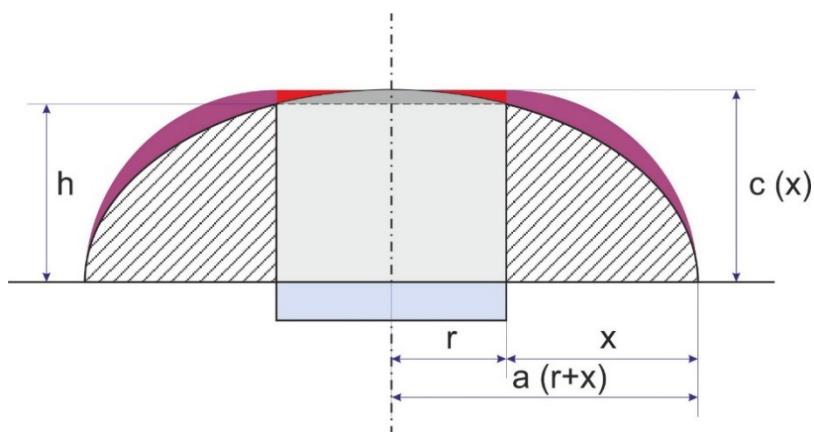


Abb. 4. Schematischer Vergleich der Modelle zur Wasseraufnahme nach WENDLER / SNETHLAGE 1989 und als Ellipsoid. Die Unterschiede im Bereich des Zylinders sind rot markiert und an der Seiten violett.

Abgesehen von der Anpassung der Geometrie des Durchfeuchtungsbereiches wird zusätzlich der s.g. Faktor- $y$  eingeführt. Je nach Porenstruktur des untersuchten Materials bzw. Porengrößen in unterschiedlichen Bereichen des Materials kann der kapillare Wassertransport in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich schnell erfolgen. Die Variable  $y$  beschreibt die seitliche Ausbreitung des Halbellipsoids also die Länge der Halbachse senkrecht zur Rotationsachse ( $a$ ) im Vergleich zur Halbachse parallel zur Rotationsachse ( $c$ ) bei gleichbleibenden Volumen des Durchfeuchtungsbereiches ( $V_B$ ).

Anders als bei den Vorgängerprogrammen muss die Wasseraufnahmekapazität ( $WAK$ ) nicht geschätzt werden. Diese Größe ist in den meisten Fällen schwer ermittelbar bzw. unbekannt. Bei dem Auswertalgorithmus des Programms geht man davon aus, dass die Messkurve, die die aufgenommene Wassermenge in der Zeit zeigt, den Verlauf der Wasseraufnahme ausreichend genau abbildet. Aus den gemessenen Werten wird schrittweise die Anpassung der zwei entscheidenden Größen vorgenommen -  $WAK$  und Variable  $y$ . Die Anpassung erfolgt mittels Bestimmtheitsmaß (Determinationskoeffizient)  $R^2$ :

(23)

$$R^2 = \left( \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \right)^2$$

Die optimierten Werte, die eine möglichst enge Übereinstimmung mit der Messkurve darstellen werden dann als Vorschlag automatisch generiert und angezeigt. Die Bestimmtheitsmaß der jeweiligen Einstellung wird in % angezeigt. Dadurch wird der Umrechnungsvorgang objektiviert (unabhängig von dem Anwender werden bei gleichen Messwerten gleiche Ergebnisse erzeugt) und ermöglicht die Auswertung auch bei völlig unbekanntem Material. Beide Variablen sind aber in dem Programm nach wie vor frei wählbar.

Bei dem Programm wird überdies eine andere Darstellung der Werte gewählt. Die meisten gemessenen Materialien zeigen einen inhomogenen Verlauf der Werte in unterschiedlichen

Tiefen bzw. Bereichen. Und das unabhängig davon, ob die Strukturen bereits verwittert oder anderweitig verändert sind oder ob man mit einem frischen und unbehandelten Material zu tun hat. Dieses wird auch zum Teil durch den Verlauf der Messkurve abgebildet und ist eine wertvolle Information für die Auswertung der Messergebnisse. Dementsprechend wird es im Programm, abgesehen von dem arithmetischen Mittelwert aller Abschnitte des  $w$ -Wertes und des  $B$ -Wertes, auch deren Verlauf in der berechneten Tiefe in einem Histogramm dargestellt (Abb. 4).

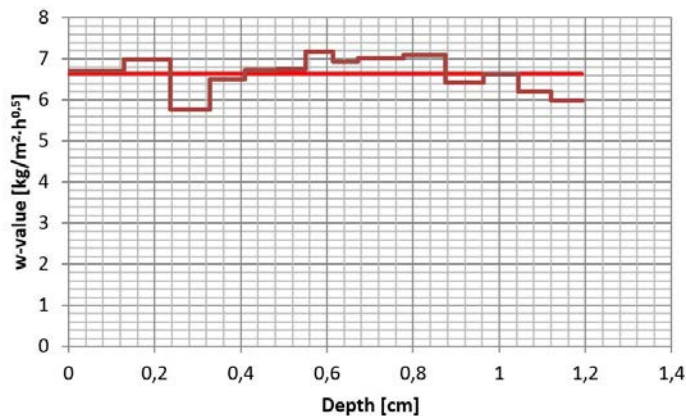


Abb. 5. Das Programm zeigt den Verlauf der Kurven für  $w$ -Wert und  $B$ -Wert in der berechneten Tiefe als Histogramm. Ein Beispiel aus der Messung des unbehandelten Leistadter Sandsteins. Die hellrote Linie markiert den arithmetischen Mittelwert.

Zusätzlich bietet das Programm die Möglichkeit die Daten (Rohdaten, Notizen, berechnete Werte und die dazugehörige Diagramme) in Form eines Protokolls auszudrucken oder als pdf-Datei gesondert zu speichern.

## Schlussbemerkungen

Die Messung mit s.g. Karsten'sche Prüfröhrchen zur Bestimmung von Wasseraufnahmekoeffizient hat sich in der restauratorischen Community seit längere Zeit etabliert. Diese einfache und zerstörungsfreie Messmethode liefert bei korrekter Anwendung zuverlässige und wichtige Informationen über die kapillaren Eigenschaften der Materialien.

Allerdings waren bis vor kurzen viele Faktoren, die diese Messung wesentlich beeinflussen immer noch nicht geklärt. Bei der Berechnung von des Wasseraufnahmekoeffizienten aus dieser Messung ging man von einem falschen geometrischen Modell des Durchfeuchtungsbereiches. Auch die unterschiedliche seitliche Ausbreitung des Wassers in den Materialstrukturen wurde nicht berücksichtigt. Bisherige Darstellung der Wert lediglich als arithmetischer Mittelwert aller Abschnitte führte zur Unverständnis dieser Größe und zu den Anwendungsproblemen bei inhomogenen und vor allem bei verwitterten Materialien. Das neue hier angebotene kostenlose open source Auswertungsprogramm berücksichtigt die neuen Erkenntnisse, erleichtert die Anwendung und optimiert die Auswertung dieser Messung auch bei Materialien deren Wasseraufnahmekapazität unbekannt ist.

## Literatur:

- D'HAM, Gerhard / MEINHARDT, Jeannine / NIEMEYER, Rolf (2010): *Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit Messröhrchen nach Karsten und Mirowski*. In: Auras, Michael / Meinhardt, Jeannine / Snethlage, Rolf (Hrsg.): *Leitfaden Naturstein-Monitoring*; IRB-Verlag, Stuttgart, pp. 82-92.
- FITZ, C. / KRUS, M. (2004): *Normenwirrwarr bei der Bestimmung von feuchtetechnischen Materialkennwerten*. IBP-Mitteilung 441, 31 (2004) Neue Forschungsergebnisse kurz gefasst. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- FRANK, W. (1973): *Einwirkung von Regen und Wind auf Gebäudefassaden. Stand der gegenwärtigen Kenntnisse aufgrund der Literatur*. In: Sonderdruck aus: *Berichte aus der Bauforschung*, H. 86., Verl. Wilhelm Ernst & Sohn, pp. 17-40.
- HENDRICKX, Roel (2013): *Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. The possibilities of analytical and numerical solutions*. In: *Materials and Structures* (2013) 46, pp. 1309–1320.
- KARSTEN, Rudolf (1960): *Bauchemie für Schule und Baupraxis*. 1. Aufl., Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, Kapitel 132. Prüfung von Baustoffen auf Wassereindringen, pp.381-382.
- KARSTEN, Rudolf (1997): *Bauchemie. Handbuch für Studium und Praxis*. 10. Aufl., C.F. Müller Verl., Heidelberg, Kapitel 104. Schnellprüfungen mit dem „Wassereindringprüfer nach KARSTEN“, pp. 397-404.
- KÜNZEL, H. (1969): *Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunstharzdispersionen*. In: *Kunststoffe im Bau* 12, Heidelberg, pp. 6-32.
- KÜNZEL, H. (1971): *Gasbeton. Wärme und Feuchtigkeitsverhalten*. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin.
- KÜNZEL, H. (1976): *Beurteilung des Regenschützes von Außenbeschichtungen*. In: IBP Mitteilungen 18, Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst, 4(1976), Institut für Bauphysik der Fraunhofer-Gesellschaft.
- LYKOW, A. W. (1958): *Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern*. Akademieverl. Berlin.
- PLEYERS, G. (1999): *Zerstörungsfreie Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme von Baustoffen – das Prüfröhrchen nach Pleyers*. 5. In: Internationales Kolloquium, Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen – „MSR '99“, Esslingen, Nov./Dez. 1999, Aedificatio Publishers: Freiburg, pp. 471-484.
- RUCKER-GRAMM, Petra (2008): *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen*. Unveröff. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung.
- SCHWARZ, B. (1972): *Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen*. In: *Gesundheits-Ingenieur* 93 (1972), H. 7, pp. 206-211.
- SCHWARZ, B. / KÜNZEL, H. / GÖSELE, K. (1971): *Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen*. Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Städtebau und Wohnungswesen

durchgeführt in der Außenstelle Holzkirchen des Instituts für Technische Physik der Fraunhofer-Gesellschaft, Az.: I 6 - 80 01 69 - 18, Stuttgart/Holzkirchen.

- SNETHLAGE, R. / PFANNER, M. (2013): *Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein*. 4. Aufl., Fraunhofer IRB Verl..
- SNETHLAGE, R. / WENDLER, E. (1995): *Methoden der Steinkonservierung - Anforderungen und Bewertungskriterien*. In: Snethlage, R. (Hrsg.)(1995): *Natursteinkonservierung in der Denkmalpflege*. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Bd. 80, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, pp. 3-40.
- STELZMANN, Mario (2020): *Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur Untersuchung des Schlagregenschutzes von Fassaden denkmalgeschützter Bestandsgebäude*. Diss. Schriftenreihe der TU Dresden, Institut für Bauklimatik, Fraunhofer IRB Verl.
- STELZMANN, Mario et al. (2017): *Aw-Wert Messung in situ – Worauf ist bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten zu achten?* In: *Innendämmkongress – Beiträge aus Wissenschaft und Praxis vom 19. Bis 20. Mai 2017 in Dresden, Tagungsband Grunewald*, J. (Hrsg.) Dresden: TU Dresden, Institut für Bauklimatik, pp. 58-72.
- WEHLE, Barbara / GARIGLIO, Federico (2015): *Wasseraufnahmekoeffizienten historischer Aussenputze. Wasseraufnahmekoeffizienten der Aussenputze historischer Gebäude der Bauperiode 1850-1920*. Forschungsbericht, Schlussbericht, Bericht Nr. 72FE-006970-F-SB, Berner Fachhochschule.
- WENDLER, E. / SNETHLAGE, R. (1989): *Wasseraufnahmeprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte*. In: *Bautenschutz und Bausanierung 12/1989*, Verl. Rudolf Müller, Köln, pp. 110-115.

## Notation:

- $a$  – Länge der Halbachse des Ellipsoids senkrecht zur Rotationsachse  
 $B$  – Wassereindringkoeffizient  
 $c$  – Länge der Halbachse des Ellipsoids parallel zur Rotationsachse  
 $g$  – Erdbeschleunigung (in Deutschland etwa  $9,81 \text{ m/s}^2$ )  
 $h$  – Steighöhe (bzw. Eindringtiefe) der Flüssigkeit  
 $m$  - flächenbezogene Wasseraufnahme  
 $P_H$ – Hydrostatischer Druck  
 $P_K$ – Kapillardruck (Kapillarzug)  
 $P_T$ – Trägheitsdruck  
 $P_V$ – Strömungsdruck (Strömungswiderstand)  
 $r$  – Radius des Karsten-Prüfröhrchens  
 $R^2$  – Bestimmtheitsmaß (Determinationskoeffizient)  
 $s$  – Mindesteindringtiefe  
 $s_d$  – Wasserdampfdiffusionswiderstand  
 $t$  – Zeit  
 $V_B$  – Volumen des zentrischen Bereiches des Halb(rotations)ellipsoids  
 $V_{DIN}$  – Volumen des mit Wasser gefüllten Bereiches bei der Messung nach DIN  
 $V_E$  – Volumen des Rotationsellipsoids

$V_{H_2O}$  – Volumen des aufgenommenen Wassers  
 $V_{HE}$  – Volumen des Halb(rotations)ellipsoids  
 $V_{Kar}$  – Volumen des mit Wasser gefüllten Bereiches bei der Messung nach Karsten  
 $w$  – Wasseraufnahmekoeffizient  
 $WAK$  – Wasseraufnahmekapazität  
 $x$  – beobachteter Messwert der Reihe X (in der Formel 23)  
 $\bar{x}$  – Stichprobenmittelwerte der Reihe X (in der Formel 23)  
 $x$  - Entfernung zwischen Gesteinsoberfläche und Wasserfront (Eindringtiefe)  
 $y$  – beobachteter Messwert der Reihe Y (in der Formel 23)  
 $\bar{y}$  – Stichprobenmittelwerte der Reihe Y (in der Formel 23)  
 $y$  – Faktor für seitliche Ausbreitung  
 $\gamma$  - Benetzungswinkel (Rand-, Kontakt-, Youngwinkel)  
 $\eta$  – dynamischen Viskosität der Flüssigkeit (Wasser bei 20°C  $10^{-3}$  Ns/m<sup>2</sup>)  
 $\theta_{cap}$  – kapillare Wassergehalt (= Wasseraufnahmekapazität  $WAK$ ) (in der Formel (9))  
 $\rho_F$  – Dichte der Flüssigkeit  
 $\rho_W$  – Dichte des Wassers (bei 20°C und Normaldruck von 1013 mbar 998,207 kg/m<sup>3</sup>)  
 $\sigma$  – Oberflächenspannung der Flüssigkeit (Wasser bei 20°C  $72,75 \cdot 10^{-3}$  N/m)