

# Radondiffusion – Theorie

## Wasserdampf, Radon und Diffusion

Raphael Grapentin

15. Juni 2023



# Inhalt

1. Diffusion
2. Konvektion
3. Wasserdampfdiffusion und sd-Wert
4. Wasser, Wasserdampf und Radon
5. Radondiffusion durch Dampfsperren
6. Zusammenfassung

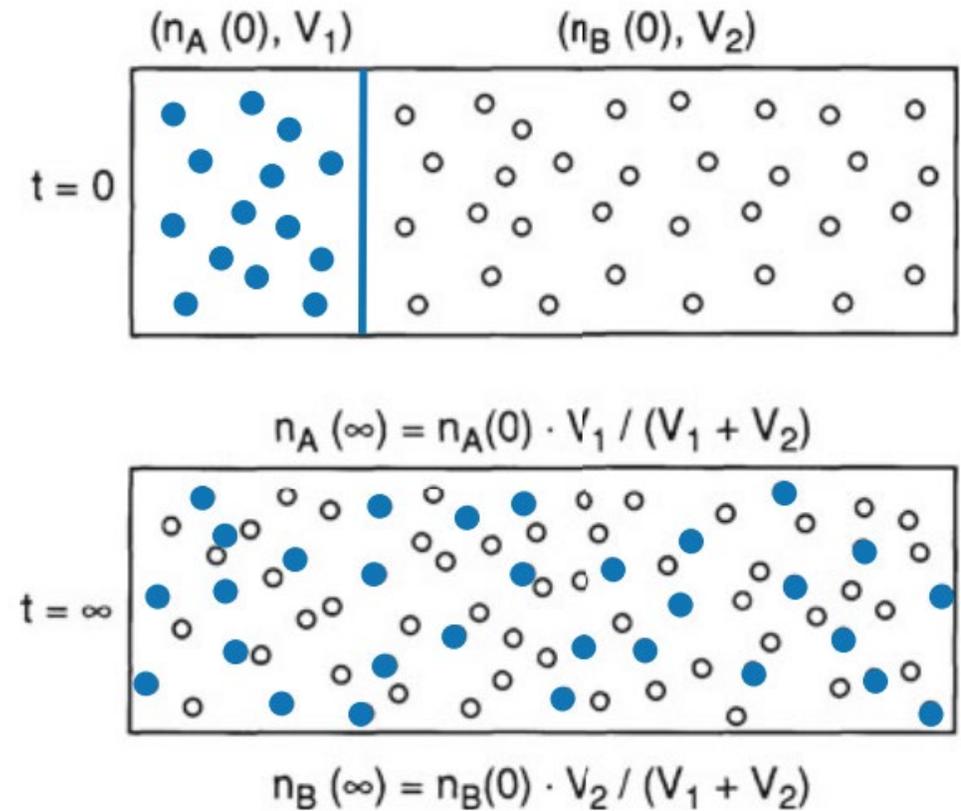
# Diffusion

# Diffusion

Öffnet man eine Flasche mit einer intensiv riechenden Substanz (z. B. Parfüm oder  $\text{H}_2\text{S}$ ), so kann man den Geruch bald im ganzen Zimmer wahrnehmen. Die aus der Flasche entweichenden Moleküle müssen also durch die Luft bei Atmosphärendruck trotz der kleinen freien Weglänge  $\Lambda$  von 10–100 nm in kurzer Zeit Wege von mehreren Metern zurückgelegt haben! Diese Wanderung von Molekülen einer Sorte A durch ein Gas der Sorte B, die zu einer gleichmäßigen räumlichen Verteilung der Konzentration von A führt, heißt *Diffusion*.

# Diffusion

- Teilchentransport
- Von Gebiet mit hoher Konzentration zu Gebiet mit tiefer Konzentration
- Ohne äussere Einflüsse



# Diffusion

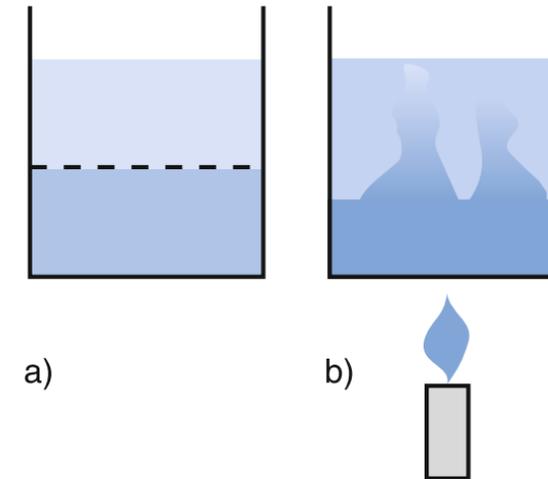
- Diffusionskoeffizient für Gase
- Abhängig von Masse  $m$  und Grösse  $\sigma$
- Gibt an, wie schnell die Diffusion stattfindet

$$D = \frac{\Lambda \cdot \bar{v}}{3} = \frac{1}{n \cdot \sigma} \sqrt{\frac{8kT}{9\pi m}}$$

# Konvektion

# Konvektion

Erwärmt man den Boden eines Flüssigkeitsgefäßes (■ Abb. 10.21), so wird die tiefste Flüssigkeitsschicht zuerst erwärmt und erreicht deshalb eine höhere Temperatur als die darüberliegenden Schichten. Ihre Dichte wird dadurch geringer (außer bei Wasser unter  $4^{\circ}\text{C}$ ), und die Flüssigkeitsschicht steigt wegen des Auftriebes nach oben, während die darüberliegenden kälteren Schichten nach unten sinken. Dieser Vorgang, den man **Konvektion** nennt, führt zu einem Wärmetransport vom wärmeren in das kältere Raumgebiet. Man kann die Flüssigkeitskonvektion sehr schön mit gefärbtem Wasser demonstrieren.



■ **Abb. 10.21** Erzeugung von Konvektion in einer Flüssigkeit: **a** Schichtung von gefärbtem und ungefärbtem Wasser bei gleicher Temperatur; **b** Durchmischung durch Konvektion bei Erwärmung

# Konvektion

- Teilchentransport
- Durch Druck- oder Temperaturunterschiede
- Entsteht durch äussere Einflüsse

→ Luftstrom, Wind

Konvektion ist viel stärker als Diffusion. Nur wenn ein Gebäude gegen Konvektion dicht ist, ist eine Betrachtung der Diffusion überhaupt sinnvoll.

# Wasserdampfdiffusion und sd-Wert

# Wasserdampfdiffusion und $s_d$ -Wert

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$

Gibt den Diffusionswiderstand eines Bauteils bezüglich einer gleich dicken Luftschicht an.

Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$

Gibt die Luftschichtdicke an, die nötig ist, um den gleichen Diffusionswiderstand zu erzielen.

| Beispiel     | $\mu$   |
|--------------|---------|
| Luft         | 1       |
| Mineralfaser | 1       |
| Holz         | 50      |
| Stahlbeton   | 150     |
| PE-Folie     | 100'000 |

| Beispiel     | Dicke | $s_d$ |
|--------------|-------|-------|
| Luft         | 1 m   | 1 m   |
| Mineralfaser | 20 cm | 0.2 m |
| Holz         | 2 cm  | 1 m   |
| Stahlbeton   | 20 cm | 30 m  |
| PE-Folie     | 5 mm  | 500 m |

# Wasserdampfdiffusion und $s_d$ -Wert

$s_d = 1 \text{ m}$  entspricht:

**0.01 mm PE-Folie**



**2 cm Holz**



**1 m Luft**



|             |                            |
|-------------|----------------------------|
| Dampfbremse | Schicht mit $s_d$ ab 1.3 m |
| Dampfsperre | Schicht mit $s_d$ ab 130 m |

# Wasser, Wasserdampf und Radon

# Wasser, Wasserdampf und Radon

Gewicht

$$1 \text{ u} = 1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Wasserstoff:  $1 \text{ g/mol} \equiv 1 \text{ u}$

Sauerstoff:  $16 \text{ g/mol} \equiv 16 \text{ u}$

Wasser  $\text{H}_2\text{O}$ :  $18 \text{ g/mol} \equiv 18 \text{ u}$

Wasserdampf  $\text{H}_2\text{O}$ :  $18 \text{ g/mol} \equiv 18 \text{ u}$

Radon:  $222 \text{ g/mol} = 222 \text{ u}$

→ Radon ist 12-mal schwerer als Wasser(dampf)

|             |       |
|-------------|-------|
| 1           | 1,008 |
| <b>H</b>    |       |
| Wasserstoff |       |
| 2,2         | 0,09  |

|            |        |
|------------|--------|
| 8          | 15,999 |
| <b>O</b>   |        |
| Sauerstoff |        |
| 3,44       | 1,43   |

|           |        |
|-----------|--------|
| 86        | 222,02 |
| <b>Rn</b> |        |
| Radon     |        |
|           | 9,73   |

**Legende**

- Symbol: schwarz = Feststoff, blau = Flüssigkeits, rot = Gas, unterstrichen = radioaktiv
- Ordnungszahl, Atomgewicht, Name, Chlor, Elektronengas, Dichte
- Serie (Flächenfarbe): Alkalimetalle, Erdalkalimetalle, Übergangsmetalle, Actinoide, Metalle, Halbmetalle, Nichtmetalle, Halogene, Edelgase, unbestimmt
- Schraffur: durchgehend = natürliches Element, schraffiert = künstliches Element

**Gruppe**

1 2 13 14 15 16 17 18

1 H He  
2 Li Be B C N O F Ne  
3 Na Mg Al Si P S Cl Ar  
4 K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr  
5 Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe  
6 Cs Ba La Hf Ta W Re Os Ir Pt Au Hg Tl Pb Bi Po At Rn  
7 Fr Ra Ac Rf Db Sg Bh Hs Mt Ds Rg Cn Nh Fl Mc Lv Ts Og

Lanthanoide: Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu  
Actinoide: Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr

# Wasser, Wasserdampf und Radon

«Grösse» (kovalenter Atomradius)

1 pm =  $1 \times 10^{-12}$  m

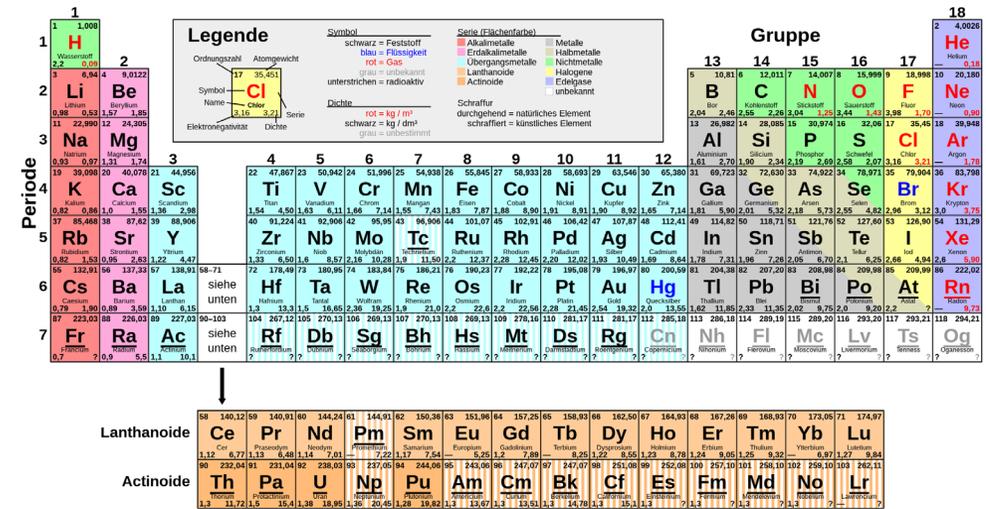
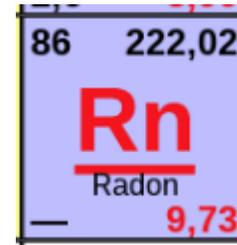
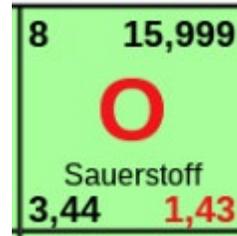
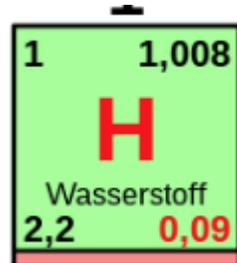
Wasserstoff: 30 pm

Sauerstoff: 73 pm

Wasser H<sub>2</sub>O: 300 pm

Radon: 150 pm

→ Radon ist halb so gross wie Wasser



# Wasser, Wasserdampf und Radon

Gewicht

Wasserdampf H<sub>2</sub>O: 18 g/mol ≡ 18 u  
Radon: 222 g/mol = 222 u

Radon ist 12-mal schwerer bei halber Grösse

«Grösse»

Wasserdampf H<sub>2</sub>O: 300 pm  
Radon: 150 pm

$$D = \frac{\Lambda \cdot \bar{v}}{3} = \frac{1}{n \cdot \sigma} \sqrt{\frac{8kT}{9\pi m}}$$

→ Diffusionskonstante (in Gas) von Radon ist ca. 1.7-mal kleiner als die Diffusionskonstante von Wasserdampf

# Wasser, Wasserdampf und Radon

Typische Wert für Diffusionskonstanten D in [m<sup>2</sup>/s]

Gas – Gas: 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s

Gas – Wasser: 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s

Feststoff – Feststoff: 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s

→ Sauerstoff – Luft: 1.76 × 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s (0 °C)

→ Sauerstoff – Wasser: 2.1 × 10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s (25 °C)

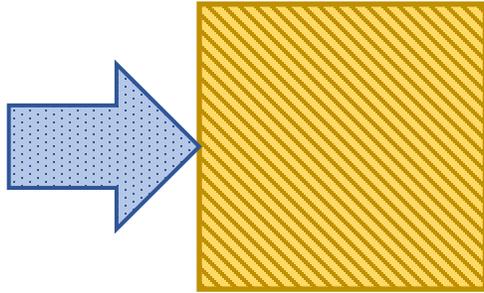
→ Kohlenstoff – Eisen: 15 × 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s (800 °C)

# Radondiffusion durch Dampfsperren

# Radondiffusion durch Dampfsperren

## Anfangszustand

Aussen sehr hohe Luftfeuchte, Innen trocken

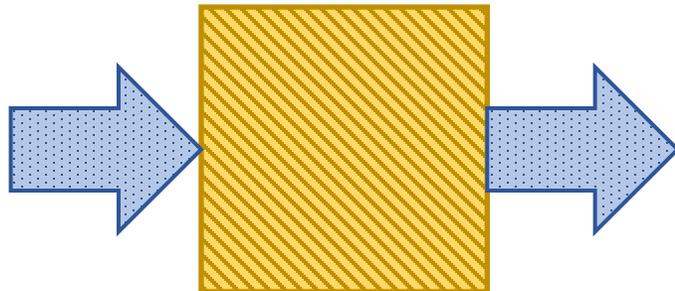


## Wasserdampf

Nicht permanente Exposition von aussen

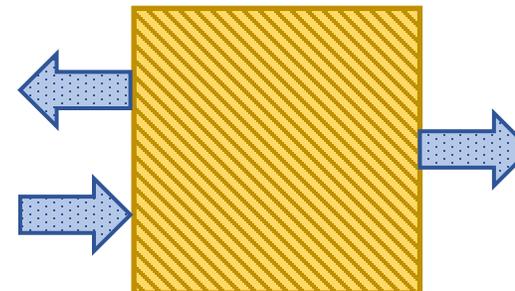
## Endzustand (nach sehr langer Zeit)

Das Bauteil ist gesättigt und Wasserdampf dringt durch



## Alternativ (nach sehr langer Zeit)

Die Luftfeuchtigkeit aussen hat abgenommen, Bauteil trocknet



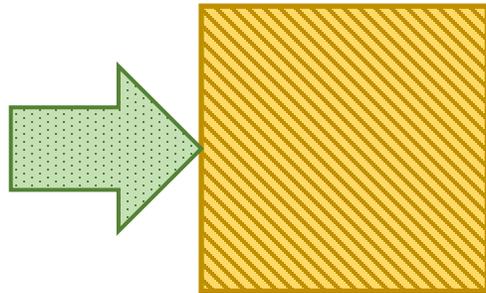
# Radondiffusion durch Dampfsperren

## Radon

Permanente hohe Exposition von aussen (Erdreich)

## Anfangszustand

Aussen sehr hohe Radonkonzentration, Innen nichts

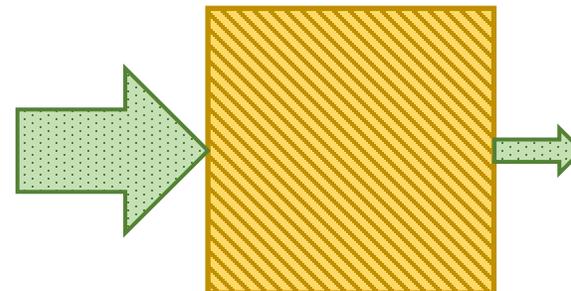
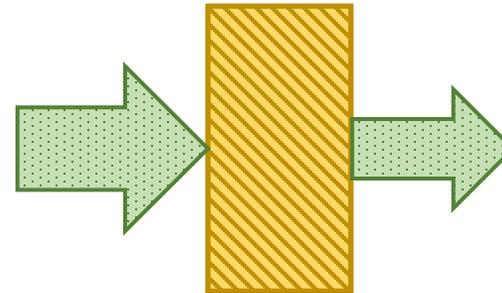


## Endzustand (nach sehr langer Zeit)

Dicke des Bauteils ist entscheidend

Radon Zerfällt im Bauteil

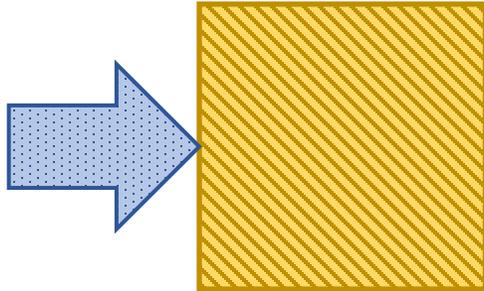
(Folgeprodukte nicht Gasförmig)



# Radondiffusion durch Dampfsperren

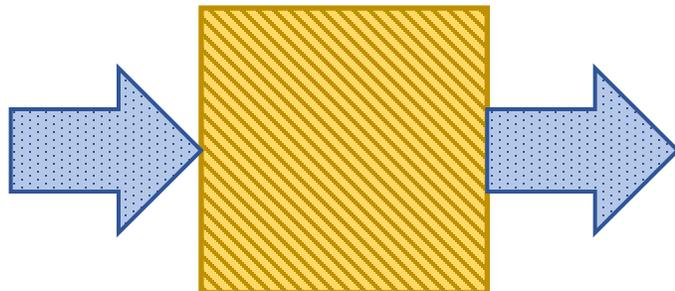
## Anfangszustand

Aussen sehr hohe Luftfeuchte, Innen trocken



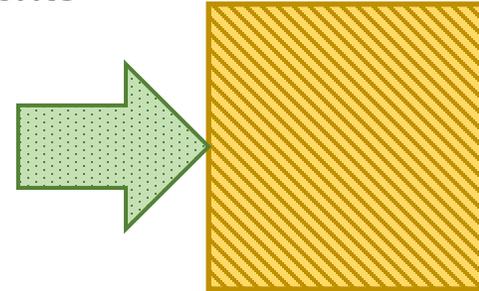
## Endzustand (nach sehr langer Zeit)

Das Bauteil ist gesättigt und Wasserdampf dringt durch



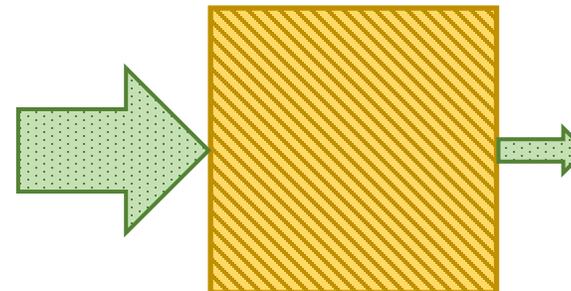
## Anfangszustand

Aussen sehr hohe Radonkonzentration, Innen nichts



## Endzustand (nach sehr langer Zeit)

Das Radon Zerfällt im Bauteil und nur ein Bruchteil dringt durch



# Radondiffusion durch Dampfsperren

Radon Diffusionskoeffizienten D von Dampfsperren

## Grosse Bandbreite

$3.4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  bis  $1.1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$

Diffusionslänge von Radon:

$$l = \sqrt{D/\lambda}$$

Als Radondicht gilt wenn die Dicke d des Materials mindestens die dreifache Diffusionslänge ist:

$$\frac{d}{l} \geq 3$$

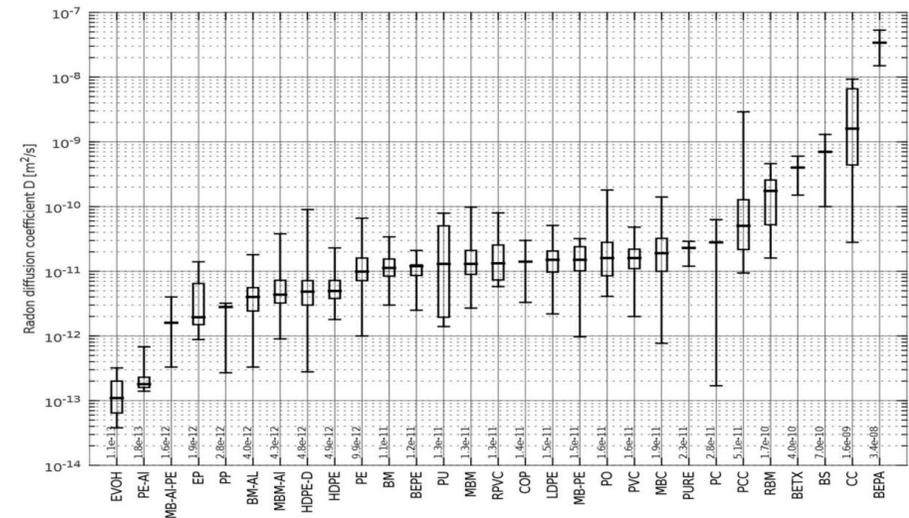


Fig. 4. Radon diffusion coefficients of different groups of waterproofing materials with plotted values of the medians. The boxes show the first and third quartiles and the whiskers indicate the minimum and maximum values.

# Radondiffusion durch Dampfsperren

Diffusionslänge  $l = \sqrt{D/\lambda}$

Radondicht:  $\frac{d}{l} \geq 3$

## Beispiel

5 mm PE-Folie als Feuchteschutz

$$D = 9.9 \times 10^{-12} \frac{m^2}{s}$$

$$\lambda = 2.1 \times 10^{-6} \frac{1}{s}$$

$$l = \sqrt{D/\lambda} = 0.002 \text{ m}$$

$$\frac{d}{l} = 2.5 < 3$$

Diese Folie gilt nicht als Radondicht

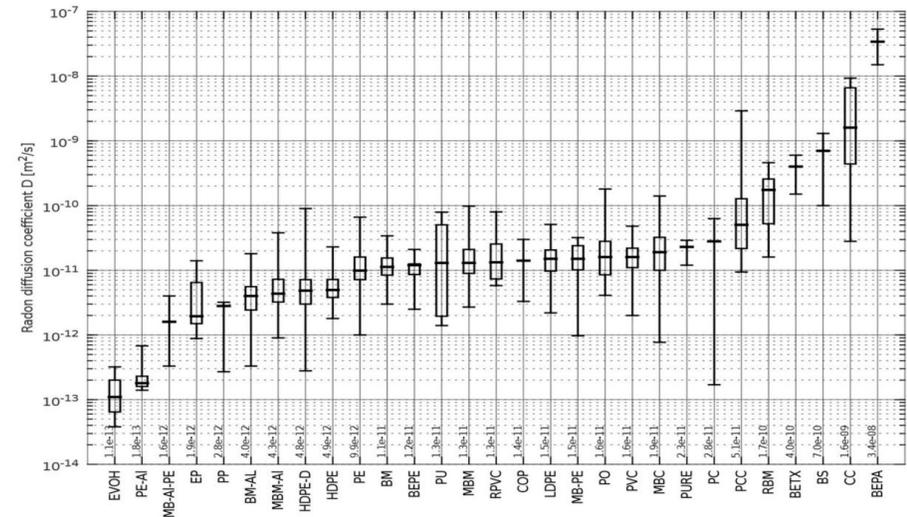


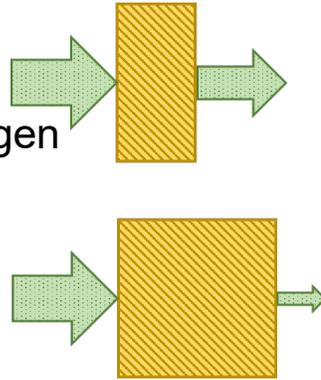
Fig. 4. Radon diffusion coefficients of different groups of waterproofing materials with plotted values of the medians. The boxes show the first and third quartiles and the whiskers indicate the minimum and maximum values.

# Radondiffusion durch Dampfsperren

## Aber

Zerfallsgesetz  $e^{-\lambda t} = \dots$

Ergibt ca.  $e^{-2.5} = 0.08 = 8\%$  des Radons dringen durch die Folie



## Radonschutz

- Zielwert
- Belastung des Bodens
- Weitere Bauteile

→ Kann trotzdem gewährleistet sein

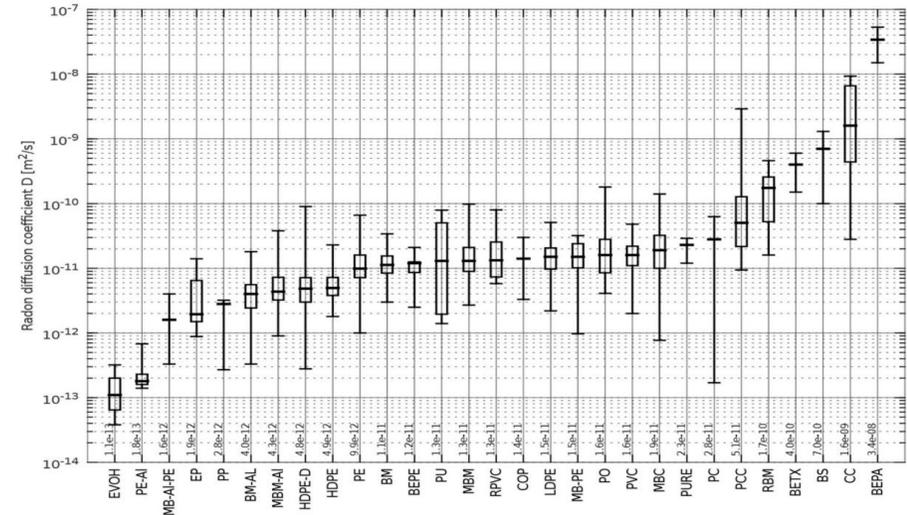


Fig. 4. Radon diffusion coefficients of different groups of waterproofing materials with plotted values of the medians. The boxes show the first and third quartiles and the whiskers indicate the minimum and maximum values.

# Zusammenfassung

# Zusammenfassung

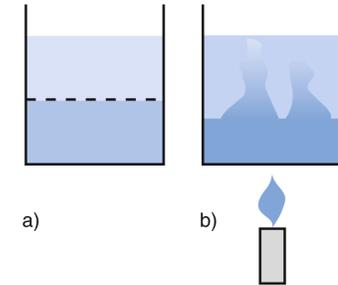
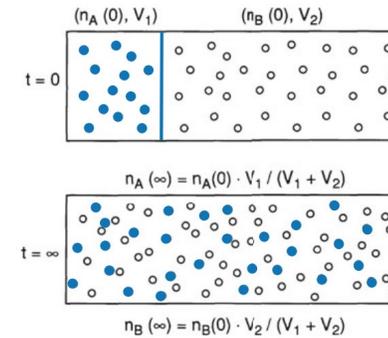
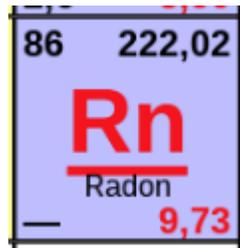
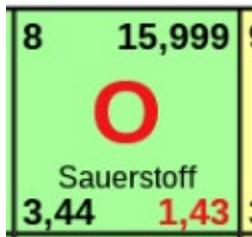
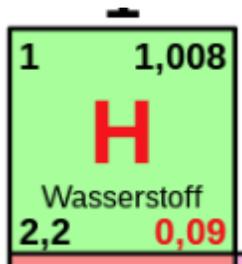
**Diffusion** ist Teilchentransport  
(langsam, passiert ohne äussere Einwirkung)

**Konvektion** ist Luftstrom  
(durch Druck- oder Temperaturunterschiede)

→ Konvektion ist meistens viel Stärker als Diffusion

Wasserdampfdiffusion und  $s_d$ -Wert

Wasser und Radon sind nicht gleich (Grösse, Masse)



| Beispiel     | Dicke | $s_d$ |
|--------------|-------|-------|
| Luft         | 1 m   | 1 m   |
| Mineralfaser | 20 cm | 0.2 m |
| Holz         | 2 cm  | 1 m   |
| Stahlbeton   | 20 cm | 30 m  |
| PE-Folie     | 5 mm  | 500 m |

# Zusammenfassung

**Radon Diffusionskonstante und Dicke sind entscheidend**

**Dampfsperren sind nicht automatisch Radondicht**

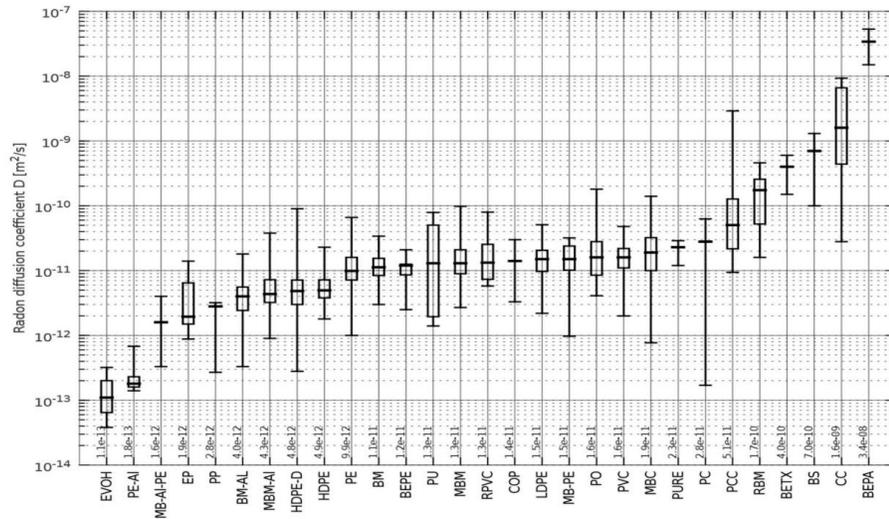
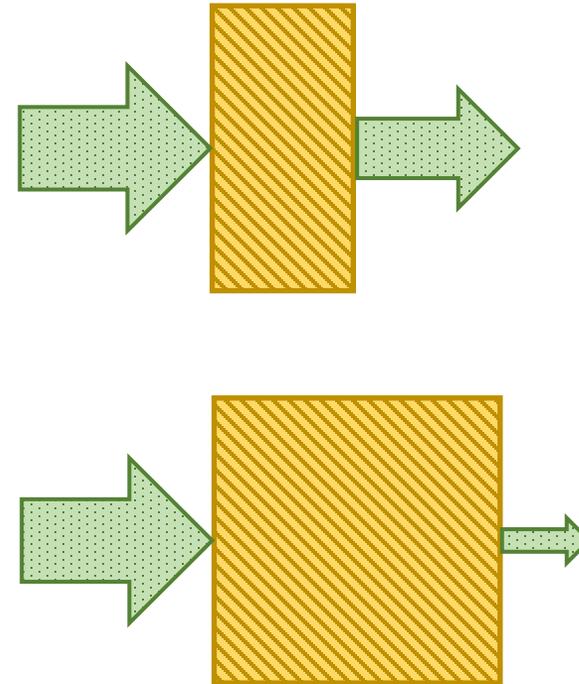


Fig. 4. Radon diffusion coefficients of different groups of waterproofing materials with plotted values of the medians. The boxes show the first and third quartiles and the whiskers indicate the minimum and maximum values.

# Fragen

# Quellen

Demtröder, W.; Experimentalphysik 1; 9. Auflage 2021

Jiránek, M.; Radon diffusion coefficients and radon resistances of waterproofing materials available on the building market; 2019

Wikipedia

Ampack

# Materialien

**Table 1**

Groups of studied waterproofing materials, with a description of their chemical composition.

|          |  |
|----------|--|
| BEPA     | dry sodium bentonite placed between two paper cartons  |
| BEPE     | PE sheet laminated to sodium bentonite   |
| BETX     | dry sodium bentonite placed between two geotextiles  |
| BS       | elastic bitumen sealant  |
| BM       | bitumen membrane made of oxidized asphalt  |
| BM-Al    | BM reinforced by an aluminium carrier foil   |
| MBM      | bitumen membrane made of SBS modified asphalt (a blend of asphalt and styrene-butadiene-styrene)                                     |
| MBM-Al   | MBM reinforced with an aluminium carrier foil  |
| MBC      | an elastic bitumen coating made of SBS modified asphalt  |
| MB-PE    | membranes combining SBS modified bitumen and a PE carrier film   |
| MB-Al-PE | membranes combining SBS modified bitumen and Al and PE carrier films   |
| CC       | cement coating   |
| PCC      | CC with the addition of polymers (usually acrylic, styrene-acrylic, silicone or epoxy resins)  |
| COP      | a copolymer - polymer membrane derived from two or more monomers   |
| EP       | epoxy paint or coating   |
| EVOH     | a polymer membrane comprising an EVOH (Ethylene Vinyl Alcohol) layer   |
| HDPE     | High-density polyethylene membrane   |
| LDPE     | Low-density polyethylene membrane  |
| HDPE-D   | HDPE dimpled membrane  |
| PC       | polymer coating or paint (without identification of the polymer)   |
| PE       | a polyethylene membrane of unknown density, or a membrane comprising several PE layers with different densities and other properties |
| PE-Al    | a membrane comprising several PE layers and an aluminium film  |
| PO       | a membrane made of unspecified thermoplastic polyolefins, or a membrane comprising several different polyolefin layers               |
| PP       | a polypropylene membrane   |
| PU       | a polyurethane membrane or coating   |
| PURE     | polyurea coating – a copolymer of an isocyanate and amine-terminated polymer resin   |
| PVC      | membranes made of plasticized polyvinylchloride  |
| RPVC     | membranes made of recycled PVC   |
| RBM      | a rubber membrane, usually made of EPDM (ethylene propylene diene monomer) or other resins   |

Note. Membrane - a prefabricated waterproofing product in the form of a strip or a foil manufactured in a factory. Coating – a wet waterproofing product applied in situ by spraying or by trowelling.