

Ćwiczenie nr 1 – cz.3

Dyfuzja pary wodnej zachodzi w kierunku od środowiska o wyższej temperaturze do środowiska chłodniejszego. Para wodna dyfundująca przez przegrody budowlane w okresie zimowym napotyka na coraz „chłodniejsze” warstwy materiału. Gdy temperatura w porach materiału spadnie poniżej temperatury punktu rosy, para wodna zawarta w powietrzu ulegnie skropleniu, zwiększając wilgotność materiału. Tego typu zawilgocenie:

- wpływa na zmniejszenie izolacyjności cieplnej przegród, co może prowadzić do zjawiska przemarzania,
- powoduje pogorszenie trwałości i walorów użytkowych materiałów, z których wykonana jest przegroda.

1. SPRAWDZENIE WYSTĘPOWANIA RYZYKA KONDENSACJI POWIERZCHNIOWEJ ORAZ KONDENSACJI MIĘDZYWARSTWOWEJ W ŚCIANIE ZEWNĘTRZNEJ

1.1. Obliczenie temperatury punktu rosy

1.1.1. Wyznaczenie temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody bez mostków cieplnych liniowych

Temperatura powierzchni wewnętrznej [°C]:

$$t_i = t_i - q \cdot R_{si} = t_i - U \cdot (t_i + t_e) \cdot R_{si}$$

gdzie:

q – gęstość strumienia cieplnego płynącego przez przegrodę,

U – współczynnik przenikania ciepła przegrody,

t_i – temperatura obliczeniowa wewnętrzna

t_e – temperatura powietrza zewnętrznego,

R_i – przy sprawdzaniu minimalnej temperatury wewnętrznej powierzchni przegród nieprzezroczystych należy przyjmować $R_i=0,167$ (m² K)/W.

Przykład:

$$t_i = +20^\circ\text{C}$$

$$t_e = -24^\circ\text{C}$$

$$U = 0,212 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\varphi_i = 49\%$$

temperatura na powierzchni przegrody od strony wewnętrznej:

$$t_i = t_i - U \cdot (t_i + t_e) \cdot R_i = 20 - 0,212 \cdot (20 - (-24)) \cdot 0,167 = 18,44^\circ\text{C}$$

1.1.2. Wyznaczenie ciśnienia cząstkowego pary wodnej w pomieszczeniu

Wilgotność względna powietrza wewnętrznego:

$$\varphi_i = \frac{p_i}{p_{ni}} \cdot 100\%$$

gdzie:

p_i – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, [Pa]

p_{ni} – ciśnienie stanu nasycenia, [Pa]

stąd ciśnienie cząstkowe pary wodnej w pomieszczeniu :

$$p_i = \frac{\varphi_i \cdot p_{ni}}{100}$$

φ_i – obliczeniowa wilgotność względna powietrza w pomieszczeniu (z tematu ćwiczenia)

p_{ni} – ciśnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej przy temperaturze t (tabela poniżej)

Przykład c.d.:

dla $t_i = +20^\circ\text{C} \Rightarrow p_{ni} = 2340\text{Pa} = 23,4\text{ hPa}$ (z tabeli NA.3 PN-EN ISO 6946:1999)

$$p_i = \frac{49\% \cdot 23,40\text{hPa}}{100\%} = 11,47\text{hPa}$$

-punkt rosy (odczytany z tabeli NA.3 PN-EN ISO 6946:1999) dla $p_i = 11,47\text{ hPa}$

$$t_s = 9^\circ\text{C}$$

$$t_i \geq t_s$$

$$18,44^\circ\text{C} > 9^\circ\text{C}$$

Wniosek: Na wewnętrznej powierzchni przegrody nie ma ryzyka wystąpienia kondensacji pary wodnej.

Cisnienie cząstkowe pary wodnej nasyconej p_n w powietrzu w funkcji temperatury

| Tempe- ratura °C | Cisnienie pary nasyconej, hPa | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ,0 | ,1 | ,2 | ,3 | ,4 | ,5 | ,6 | ,7 | ,8 | ,9 |
| 30 | 42,44 | 42,69 | 42,94 | 43,19 | 43,44 | 43,69 | 43,94 | 44,19 | 44,45 | 44,69 |
| 29 | 40,06 | 40,30 | 40,53 | 40,77 | 41,01 | 41,24 | 41,48 | 41,72 | 41,96 | 42,19 |
| 28 | 37,81 | 38,03 | 38,26 | 38,48 | 38,71 | 38,94 | 39,16 | 39,39 | 39,61 | 39,84 |
| 27 | 35,66 | 35,88 | 36,09 | 36,31 | 36,52 | 36,74 | 36,95 | 37,17 | 37,39 | 37,59 |
| 26 | 33,62 | 33,82 | 34,03 | 34,23 | 34,43 | 34,63 | 34,84 | 35,04 | 35,25 | 35,44 |
| 25 | 31,69 | 31,88 | 32,08 | 32,27 | 32,46 | 32,66 | 32,84 | 33,04 | 33,24 | 33,43 |
| 24 | 29,85 | 30,03 | 30,21 | 30,40 | 30,59 | 30,77 | 30,95 | 31,14 | 31,32 | 31,51 |
| 23 | 28,10 | 28,25 | 28,45 | 28,63 | 28,80 | 28,97 | 29,15 | 29,32 | 29,50 | 29,68 |
| 22 | 26,45 | 26,61 | 26,78 | 26,95 | 27,11 | 27,27 | 27,44 | 27,61 | 27,77 | 27,94 |
| 21 | 24,87 | 25,04 | 25,18 | 25,35 | 25,51 | 25,66 | 25,82 | 25,98 | 26,13 | 26,29 |
| 20 | 23,40 | 23,54 | 23,69 | 23,84 | 23,99 | 24,13 | 23,28 | 24,43 | 24,57 | 24,73 |
| 19 | 21,97 | 22,12 | 22,27 | 22,41 | 22,54 | 22,68 | 22,83 | 22,97 | 23,10 | 23,24 |
| 18 | 20,65 | 20,79 | 20,91 | 21,05 | 21,19 | 21,32 | 21,45 | 21,58 | 21,72 | 21,85 |
| 17 | 19,37 | 19,50 | 19,63 | 19,76 | 19,88 | 20,01 | 20,14 | 20,27 | 20,39 | 20,52 |
| 16 | 18,18 | 18,30 | 18,41 | 18,54 | 18,66 | 18,78 | 18,89 | 19,01 | 19,14 | 19,26 |
| 15 | 17,06 | 17,17 | 17,29 | 17,39 | 17,50 | 17,62 | 17,73 | 17,84 | 17,95 | 18,06 |
| 14 | 15,99 | 16,10 | 16,21 | 16,31 | 16,42 | 16,53 | 16,63 | 16,74 | 16,84 | 16,95 |
| 13 | 14,98 | 15,08 | 15,18 | 15,28 | 15,38 | 15,48 | 15,59 | 15,69 | 15,78 | 15,88 |
| 12 | 14,03 | 14,13 | 14,22 | 14,31 | 14,41 | 14,51 | 14,60 | 14,70 | 14,79 | 14,88 |
| 11 | 13,12 | 13,21 | 13,30 | 13,40 | 13,40 | 13,58 | 13,67 | 13,75 | 13,85 | 13,94 |
| 10 | 12,28 | 12,37 | 12,45 | 12,54 | 12,62 | 12,70 | 12,79 | 12,87 | 12,96 | 13,04 |
| 9 | 11,48 | 11,56 | 11,63 | 11,71 | 11,79 | 11,87 | 11,95 | 12,03 | 12,11 | 12,18 |
| 8 | 10,73 | 10,81 | 10,88 | 10,96 | 11,03 | 11,10 | 11,17 | 11,25 | 11,33 | 11,40 |
| 7 | 10,02 | 10,08 | 10,16 | 10,23 | 10,30 | 10,38 | 10,45 | 10,52 | 10,59 | 10,66 |
| 6 | 9,35 | 9,42 | 9,49 | 9,55 | 9,61 | 9,68 | 9,75 | 9,82 | 9,88 | 9,95 |
| 5 | 8,72 | 8,78 | 8,84 | 8,90 | 8,96 | 9,02 | 9,07 | 9,13 | 9,19 | 9,25 |
| 4 | 8,13 | 8,19 | 8,25 | 8,31 | 8,37 | 8,43 | 8,49 | 8,54 | 8,61 | 8,66 |
| 3 | 7,59 | 7,65 | 7,70 | 7,76 | 7,81 | 7,87 | 7,93 | 7,98 | 8,03 | 8,08 |
| 2 | 7,05 | 7,10 | 7,16 | 7,21 | 7,27 | 7,32 | 7,37 | 7,43 | 7,48 | 7,53 |
| 1 | 6,57 | 6,62 | 6,67 | 6,72 | 6,77 | 6,82 | 6,87 | 6,91 | 6,96 | 7,00 |
| 0 | 6,11 | 6,16 | 6,21 | 6,26 | 6,30 | 6,35 | 6,40 | 6,45 | 6,49 | 6,53 |
| 0 | 6,11 | 6,05 | 6,00 | 5,95 | 5,92 | 5,87 | 5,82 | 5,77 | 5,72 | 5,67 |
| -1 | 5,62 | 5,57 | 5,52 | 5,47 | 5,43 | 5,38 | 5,34 | 5,31 | 5,27 | 5,22 |
| -2 | 5,17 | 5,14 | 5,09 | 5,05 | 5,01 | 4,96 | 4,92 | 4,89 | 4,84 | 4,80 |
| -3 | 4,76 | 4,72 | 4,68 | 4,64 | 4,61 | 4,56 | 4,52 | 4,48 | 4,44 | 4,40 |
| -4 | 4,37 | 4,33 | 4,30 | 4,26 | 4,23 | 4,19 | 4,15 | 4,12 | 4,08 | 4,05 |
| -5 | 4,01 | 3,98 | 3,95 | 3,91 | 3,88 | 3,85 | 3,82 | 3,79 | 3,75 | 3,72 |
| -6 | 3,68 | 3,65 | 3,62 | 3,59 | 3,56 | 3,53 | 3,50 | 3,47 | 3,43 | 3,40 |
| -7 | 3,37 | 3,35 | 3,33 | 3,30 | 3,27 | 3,24 | 3,21 | 3,18 | 3,15 | 3,12 |
| -8 | 3,10 | 3,06 | 3,04 | 3,01 | 2,98 | 2,96 | 2,94 | 2,91 | 2,88 | 2,86 |
| -9 | 2,84 | 2,81 | 2,79 | 2,76 | 2,74 | 2,72 | 2,69 | 2,67 | 2,64 | 2,62 |
| -10 | 2,60 | 2,58 | 2,55 | 2,53 | 2,51 | 2,49 | 2,46 | 2,44 | 2,42 | 2,39 |
| -11 | 2,37 | 2,35 | 2,33 | 2,31 | 2,29 | 2,28 | 2,26 | 2,24 | 2,21 | 2,19 |
| -12 | 2,17 | 2,15 | 2,13 | 2,11 | 2,09 | 2,08 | 2,06 | 2,04 | 2,02 | 2,00 |
| -13 | 1,98 | 1,97 | 1,95 | 1,93 | 1,91 | 1,90 | 1,88 | 1,86 | 1,84 | 1,82 |
| -14 | 1,81 | 1,80 | 1,78 | 1,77 | 1,75 | 1,73 | 1,72 | 1,70 | 1,68 | 1,67 |
| -15 | 1,65 | 1,64 | 1,62 | 1,61 | 1,59 | 1,58 | 1,57 | 1,55 | 1,53 | 1,52 |
| -16 | 1,50 | 1,49 | 1,48 | 1,46 | 1,45 | 1,44 | 1,42 | 1,41 | 1,39 | 1,38 |
| -17 | 1,37 | 1,36 | 1,35 | 1,33 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,26 |
| -18 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,15 |
| -19 | 1,14 | 1,13 | 1,12 | 1,11 | 1,10 | 1,09 | 1,07 | 1,06 | 1,05 | 1,04 |
| -20 | 1,03 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,95 | 0,94 |

1.2. Sprawdzenie ryzyka kondensacji pary wodnej przy założonej klasie wilgotności i przy kontrolowanych warunkach wewnętrznych

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (§321):

- 1/ na wewnętrznej powierzchni nieprzezroczystej przegrody zewnętrznej nie może występować kondensacja pary wodnej umożliwiającą rozwój grzybów pleśniowych,
- 2/ we wnętrzu przegrody nie może występować narastające w kolejnych latach zawilgocenie spowodowane kondensacją pary wodnej.

Ad 1/ Sprawdzenie tych warunków przeprowadza się według **rozdziału 6 PN-EN ISO 13788:2003**.

Nie dotyczy to przegród, w odniesieniu, do których praktyka wykazała, że zjawisko kondensacji wewnętrznej w tych przegrodach nie występuje, jak na przykład murowane ściany jednowarstwowe.

W celu zachowania warunku dotyczącego powierzchniowej kondensacji pary wodnej w odniesieniu do przegród zewnętrznych budynków mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego, użyteczności publicznej i produkcyjnych, rozwiązania przegród zewnętrznych i ich węzłów konstrukcyjnych powinny charakteryzować się współczynnikiem temperaturowym f_{Rsi} o wartości nie mniejszej niż wymagana wartość krytyczna, obliczona zgodnie z PN-EN ISO 13788:2003.

Wymagana wartość krytyczna współczynnika temperaturowego f_{Rsi} w pomieszczeniach ogrzewanych do temperatury co najmniej 20°C w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej należy określać według rozdziału 5 PN-EN ISO 13788:2003, przy założeniu, że średnia miesięczna wartość wilgotności względnej powietrza wewnętrznego jest równa $\phi = 50\%$, przy czym dopuszcza się przyjmowanie wymaganej wartości tego współczynnika równej 0,72.

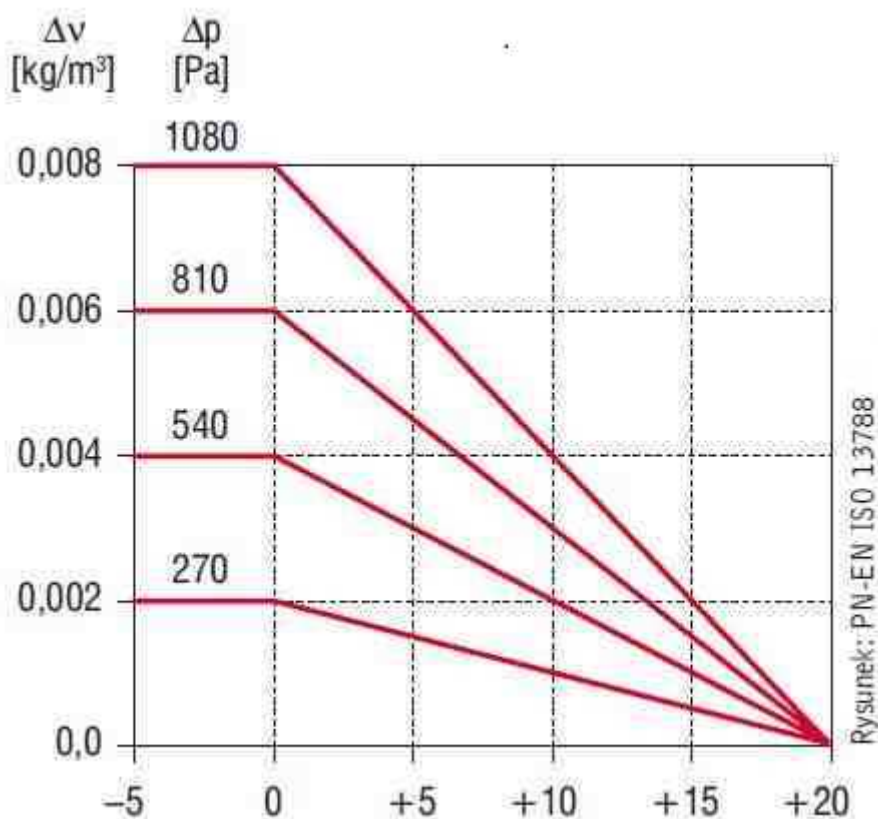
Ad 2/ Dopuszcza się kondensację pary wodnej wewnątrz przegrody w okresie zimowym, o ile struktura przegrody umożliwi wyparowanie kondensatu w okresie letnim i nie nastąpi przy tym degradacja materiałów budowlanych przegrody na skutek tej kondensacji.

2.1.1. Wyznaczenie ciśnienia cząstkowego pary wodnej w pomieszczeniu przy założonej klasie wilgotności

Wilgotność wewnętrzną można opisać przy użyciu pięciu klas wilgotności (załącznik A normy PN-EN ISO 13788):

- 1 (powierzchnie magazynowe),
- 2 (biura, sklepy),
- 3 (mieszkania mało zagęszczone),
- 4 (mieszkania zagęszczone, hale sportowe, kuchnie, stołówki, budynki ogrzewanego grzejnikami gazowymi bez przewodów spalinowych),
- 5 (budynki specjalne, np.: pralnia, browar, basen kąpielowy).

Zmianę wartości Δv (wewnętrznego nadmiaru wilgoci) i Δp (nadwyżki wewnętrznego ciśnienia pary wodnej) w zależności od temperatury zewnętrznej odczytujemy z rysunku A.1 normy PN-EN ISO 13788). W obliczeniach zaleca się przyjmować górną wartość graniczną w odniesieniu do każdej klasy, o ile projektant nie wykaże że warunki są mniej ostre.



Rys. A.1 normy PN-EN ISO 13788. Zmiana klas wilgotności wewnętrznej w zależności od średniej miesięcznej temperatury zewnętrznej

Obliczanie czynnika temperaturowego na wewnętrznej powierzchni dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni na podstawie klas wilgotności wewnętrznej (tablica B.1 normy PN-EN ISO 13788)

| miesiąc | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------|------------|-------------|-------|------------|-------|------------------------|--------------------|------------|-----------|
| | θ_e | φ_e | p_e | Δp | p_i | $p_{sat}(\theta_{si})$ | $\theta_{si, min}$ | θ_i | f_{Rsi} |
| | °C | | Pa | Pa | Pa | Pa | °C | °C | |
| Styczeń | | | | | | | | | |
| Luty | | | | | | | | | |
| Marzec | | | | | | | | | |
| Kwiecień | | | | | | | | | |
| Maj | | | | | | | | | |
| Czerwiec | | | | | | | | | |
| Lipiec | | | | | | | | | |
| Sierpień | | | | | | | | | |
| Wrzesień | | | | | | | | | |
| Październik | | | | | | | | | |
| Listopad | | | | | | | | | |
| Grudzień | | | | | | | | | |

gdzie:

θ_e – średnia temperatura zewnętrzna

φ_e – wilgotność względna dla danej lokalizacji budynku

Wartości θ_e i φ_e przyjmuje się wg danych zamieszczonych na stronie http://www.transport.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735-p_1.htm.

p_e – zewnętrzne ciśnienie pary wodnej

$$p_e = \varphi_e \cdot p_{sat}(\theta_e)$$

Δp – nadwyżka wewnętrznego ciśnienia pary wodnej odczytana jako funkcja temperatury z Rysunku A.1 dla wybranej wilgotności budynku

p_i – wewnętrzne ciśnienie pary wodnej

$$p_i = p_e + 1,1 \cdot \Delta p$$

$p_{sat}(\theta_{si})$ – minimalne dopuszczalne ciśnienie pary nasyconej (z uwagi na niebezpieczeństwo rozwoju pleśni)

$$p_{sat}(\theta_i) = \frac{p_i}{0,8}$$

$\theta_{si, min}$ – minimalna dopuszczalna temperatura powierzchni, określona na podstawie minimalnego dopuszczalnego ciśnienia pary nasyconej

θ_i – temperatura wewnętrzna

f_{Rsi} – czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej

$$f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}}$$

Wybieramy miesiąc krytyczny (z maksymalną wartością f_{Rsi} w kolumnie 9). Sprawdzamy warunek:

$$f_{Rsi max} < f_{Rsi dop}$$

Obliczanie czynnika temperaturowego na wewnętrznej powierzchni dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni na podstawie kontrolowanej wilgotności wewnętrznej (tablica B.2 normy PN-EN ISO 13788)

| miesiąc | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|------------|------------|-------------|-------|------------------------|--------------------|-----------|
| | θ_e | θ_i | φ_i | p_i | $p_{sat}(\theta_{si})$ | $\theta_{si, min}$ | f_{Rsi} |
| | °C | °C | | Pa | Pa | °C | |
| Styczeń | | | | | | | |
| Luty | | | | | | | |
| Marzec | | | | | | | |
| Kwiecień | | | | | | | |
| Maj | | | | | | | |
| Czerwiec | | | | | | | |
| Lipiec | | | | | | | |
| Sierpień | | | | | | | |
| Wrzesień | | | | | | | |
| Październik | | | | | | | |
| Listopad | | | | | | | |
| Grudzień | | | | | | | |

gdzie:

θ_e – średnia temperatura zewnętrzna (wg danych zamieszczonych na stronie http://www.transport.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735-p_1.htm)

θ_i – utrzymywana temperatura wewnętrzna w budynku

φ_i – utrzymywana wilgotność względna w budynku powiększona o 0,05

p_i – wewnętrzne ciśnienie pary wodnej (na podstawie temperatury z tablicy E.1 normy PN-EN ISO 13788, związane z wewnętrzną wilgotnością względną, powiększoną o 0,05)

$p_{sat}(\theta_{si})$ – wewnętrzne minimalne dopuszczalne ciśnienie pary nasyconej (z uwagi na niebezpieczeństwo rozwoju pleśni)

$$p_{sat}(\theta_i) = \frac{p_i}{0,8}$$

$\theta_{si, min}$ – minimalna dopuszczalna temperatura powierzchni, określona na podstawie minimalnego dopuszczalnego ciśnienia pary nasyconej

f_{Rsi} – czynnik temperaturowy na powierzchni wewnętrznej

$$f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}}$$

Wybieramy miesiąc krytyczny (z maksymalną wartością f_{Rsi} w kolumnie 7). Sprawdzamy warunek:

$$f_{Rsi\ max} < f_{Rsi\ dop}$$

Tablica E.1 normy PN-EN ISO 13788 – Ciśnienie pary nasyconej i wilgotność objętościowa

| θ | p_{sat} | v_{sat} | θ | p_{sat} | v_{sat} |
|----------|-----------|-------------------|----------|-----------|-------------------|
| °C | Pa | kg/m ³ | °C | Pa | kg/m ³ |
| -20 | 103 | 0,00088 | 11 | 1312 | 0,00999 |
| -19 | 113 | 0,00096 | 12 | 1402 | 0,01054 |
| -18 | 124 | 0,00105 | 13 | 1497 | 0,01132 |
| -17 | 137 | 0,00115 | 14 | 1598 | 0,01204 |
| -16 | 150 | 0,00126 | 15 | 1704 | 0,01280 |
| -15 | 165 | 0,00138 | 16 | 1817 | 0,01360 |
| -14 | 181 | 0,00151 | 17 | 1937 | 0,01444 |
| -13 | 198 | 0,00165 | 18 | 2063 | 0,01533 |
| -12 | 217 | 0,00180 | 19 | 2196 | 0,01626 |
| -11 | 237 | 0,00196 | 20 | 2337 | 0,01725 |
| -10 | 259 | 0,00213 | 21 | 2486 | 0,01828 |
| -9 | 283 | 0,00232 | 22 | 2642 | 0,01937 |
| -8 | 309 | 0,00252 | 23 | 2808 | 0,02051 |
| -7 | 338 | 0,00274 | 24 | 2982 | 0,02171 |
| -6 | 368 | 0,00298 | 25 | 3166 | 0,02297 |
| -5 | 401 | 0,00324 | 26 | 3359 | 0,02430 |
| -4 | 437 | 0,00351 | 27 | 3563 | 0,02568 |
| -3 | 475 | 0,00381 | 28 | 3778 | 0,02714 |
| -2 | 517 | 0,00413 | 29 | 4003 | 0,02866 |
| -1 | 562 | 0,00447 | 30 | 4241 | 0,03026 |
| 0 | 611 | 0,00484 | 31 | 4490 | 0,03194 |
| 1 | 656 | 0,00518 | 32 | 4752 | 0,03369 |
| 2 | 705 | 0,00555 | 33 | 5027 | 0,03552 |
| 3 | 755 | 0,00593 | 34 | 5316 | 0,03744 |
| 4 | 813 | 0,00634 | 35 | 5619 | 0,03945 |
| 5 | 872 | 0,00678 | 36 | 5937 | 0,04155 |
| 6 | 935 | 0,00724 | 37 | 6271 | 0,04374 |
| 7 | 1001 | 0,00773 | 38 | 6621 | 0,04603 |
| 8 | 1072 | 0,00825 | 39 | 6987 | 0,04843 |
| 9 | 1147 | 0,00880 | 40 | 7371 | 0,05092 |
| 10 | 1227 | 0,00938 | | | |