

Tipp 26/07

Wirksame Breite ebener druckbeanspruchter und einseitig gestützter Einzelblechfelder ohne Längssteifen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN EN 1993-1-5:2019-10 [1] in Verbindung mit Berichtigung 1:2020-07 [2] und DIN EN 1993-1-5/NA:2018-11 [3]

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann die wirksame Fläche $A_{c,eff}$ bei ebenen druckbeanspruchten Einzelblechfeldern ohne Längssteifen, entsprechend [1], Abschnitt 4.4, mit Hilfe der folgenden Gleichung bestimmt werden.

$$A_{c,eff} = \rho * A_c$$

In dieser Gleichung werden die folgenden Eingangswerte berücksichtigt.

- ρ Abminderungsfaktor für das Beulen
- A_c wirkliche Querschnittsfläche des druckbeanspruchten Blechfeldes

Alternativ kann diese wirksame Fläche $A_{c,eff}$ auch mittels der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$A_{c,eff} = \rho * b_{eff} * t$$

In dieser Gleichung werden die folgenden Eingangswerte berücksichtigt.

- ρ Abminderungsfaktor für das Beulen
- b_{eff} wirksame Querschnittsbreite des druckbeanspruchten Blechfeldes
- t Dicke des druckbeanspruchten Blechfeldes

Die Blechdicke des druckbeanspruchten Feldes t ist im Allgemeinen bekannt. Somit bleiben nur noch der Abminderungsfaktor für das Beulen ρ und die wirksame Querschnittsbreite des druckbeanspruchten Blechfeldes b_{eff} als ungekannte Größen. Deren Ermittlung soll nachfolgend genauer betrachtet werden.

Der Abminderungsfaktor für das Beulen ρ ist bei einseitig gestützten Querschnittsteilen, entsprechend [1], Abschnitt 4.4(2), mittels der folgenden Gleichungen zu berechnen.

- für $\bar{\lambda}_p \leq 0,748$ $\rho = 1,0$
- für $\bar{\lambda}_p > 0,748$ $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p} \leq 1,0$

Für die Ermittlung dieses Abminderungsfaktors ρ wird auch der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ benötigt.

Für die Berechnung des Schlankheitsgrades $\bar{\lambda}_p$ ist die folgende Gleichung anzuwenden.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\frac{b}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}}$$

In dieser Gleichung werden die folgenden Werte berücksichtigt.

- f_y Streckgrenze des Blechmaterials

σ_{cr}	kritische elastische Beulspannung
$\bar{b}$	Maßgebende Breite
t	Blechdicke des Blechfeldes
ε	Materialbeiwert
k_{σ}	Beulwert in Abhängigkeit vom Randspannungsverhältnis ψ

Die Streckgrenze f_y und die Blechdicke t sind normalerweise innerhalb eines Projektes bekannt.

Die kritische elastische Beulspannung σ_{cr} darf mit Hilfe der folgenden Gleichung ermittelt werden.

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma} \cdot \sigma_E$$

In dieser Gleichung werden der Beulwert des einseitig gestützten Blechfeldes k_{σ} und die elastische Beulspannung σ_E berücksichtigt.

Der Beulwert des einseitig gestützten Blechfeldes k_{σ} ist entsprechend [1], Tabelle 4.2 in Abhängigkeit von der Lage des Maximalwertes der Druckspannung σ_1 und für das relevante Randspannungsverhältnis ψ zu berechnen.

Der Maximalwert der Druckspannung σ_1 und seine Lage – am freien Blechrand oder an der Stützung des Blechs – in dem einseitig gestützten druckbeanspruchten Querschnittsteil sollten projektbezogen bekannt sein. Somit muss nur noch das Randspannungsverhältnis ψ berechnet werden. Es ist entsprechend [1], Tabelle 4.2 begrenzt. Bei einem Maximalwert der Druckspannung σ_1 an dem freien Rand ist ψ innerhalb eines Bereiches von $1,0 \geq \psi \geq -3$ und bei einem Maximalwert der Druckspannung σ_1 an der Stützung ist ψ innerhalb eines Bereiches von $1,0 \geq \psi \geq -1$ zulässig. In beiden Fällen ist das Randspannungsverhältnis ψ nach der folgenden Gleichung zu bestimmen.

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

Dabei müssen die Randspannungen σ_1 und σ_2 an den Rändern des einseitig gestützten Blechfeldes berücksichtigt werden. Diese Randspannungen sind projektbezogen zu ermitteln und damit kann das Randspannungsverhältnis ψ bestimmt werden.

Innerhalb der zulässigen Grenzen für das Randspannungsverhältnis ψ kann der Beulwert k_{σ} , entsprechend [1], Tabelle 4.2, nach den folgenden Gleichungen bestimmt werden.

Maximalwert der Spannung σ_1 an dem freien Rand

- für $\psi = 1,0$ $k_{\sigma} = 0,43$
- für $\psi = 0$ $k_{\sigma} = 0,57$
- für $\psi = -1,0$ $k_{\sigma} = 0,85$
- für $1,0 > \psi > -3,0$ $k_{\sigma} = 0,57 - 0,21 \cdot \psi + 0,07 \cdot \psi^2$

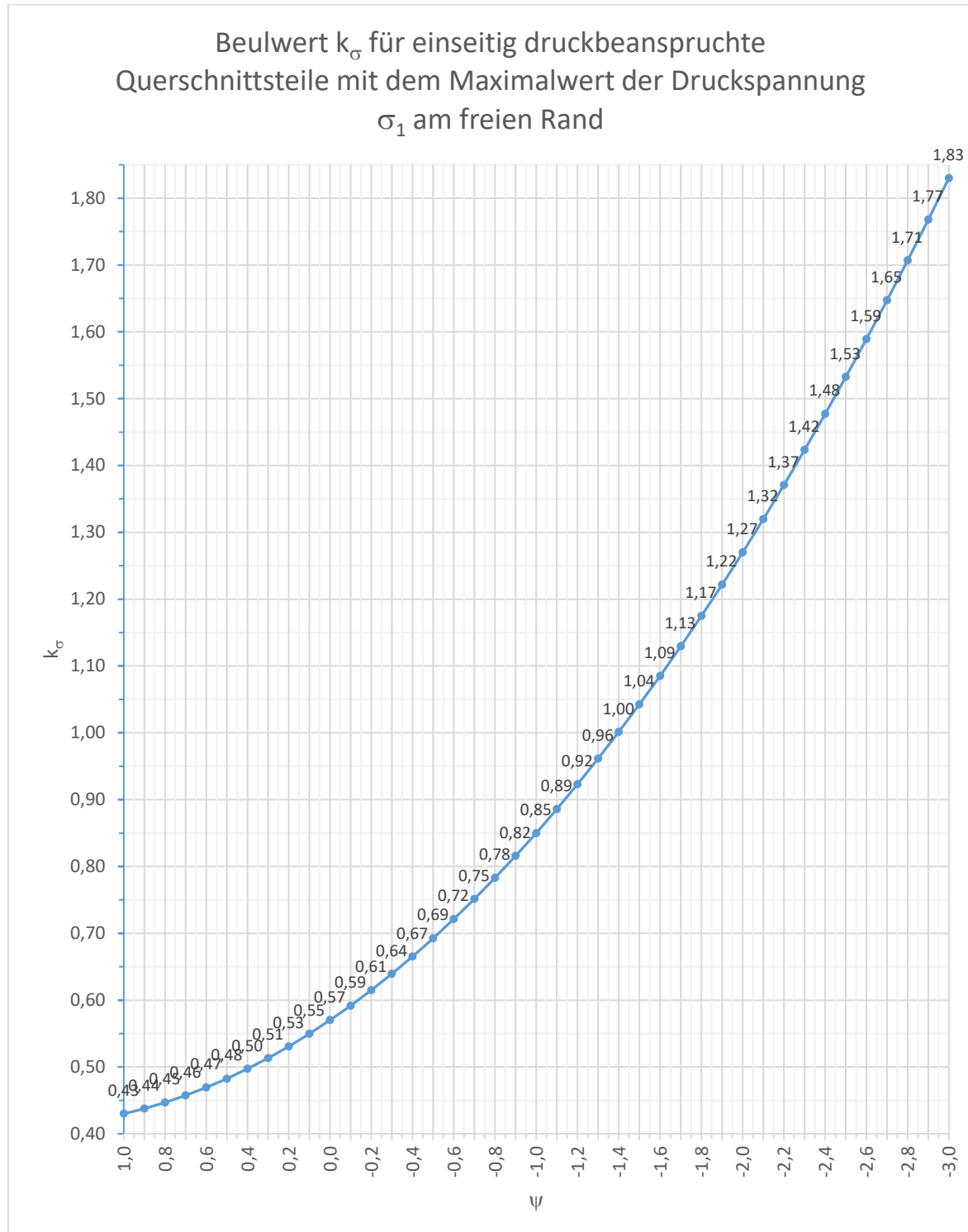
Maximalwert der Spannung σ_1 an der Stützung

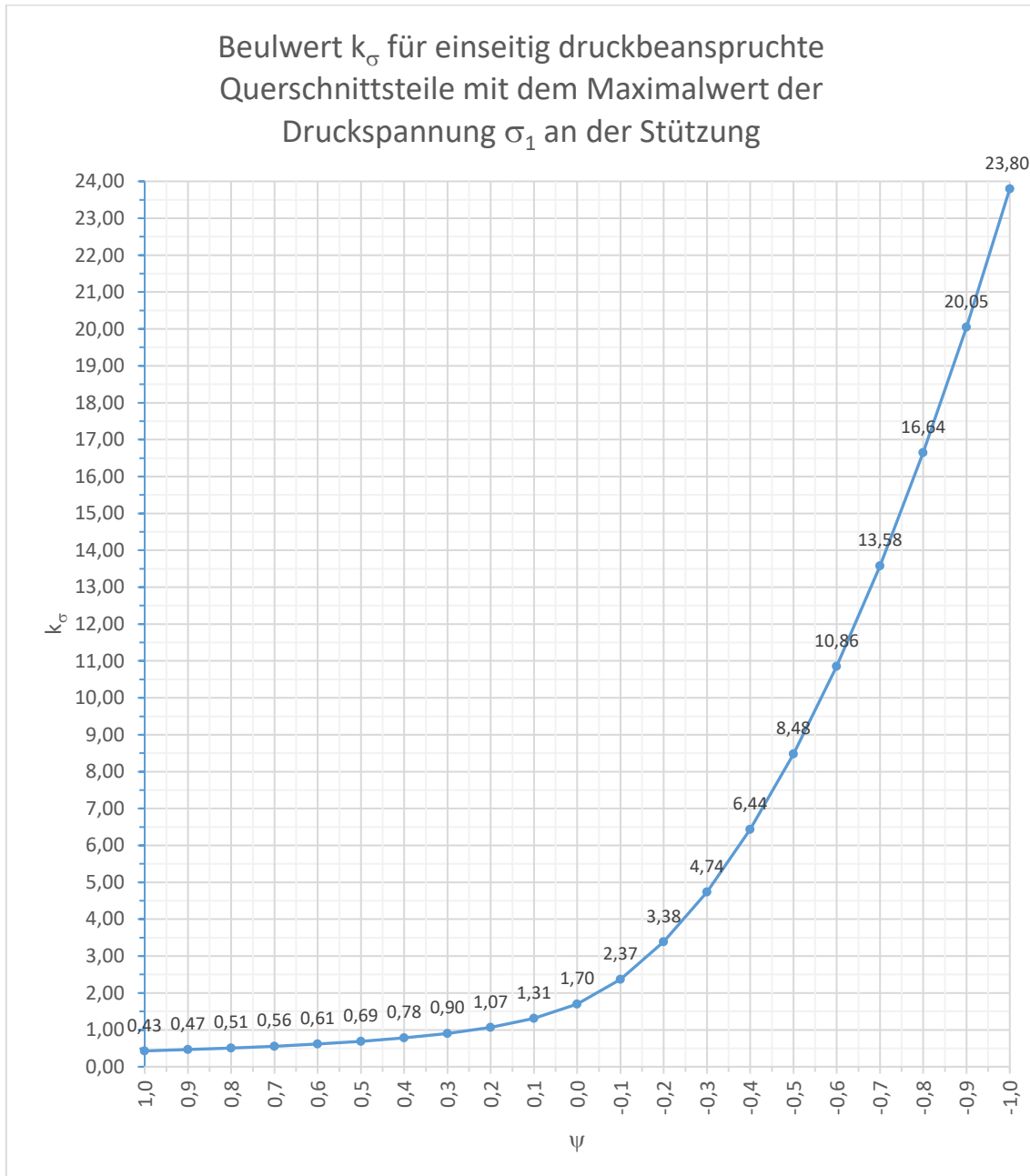
- für $\psi = 1,0$ $k_{\sigma} = 0,43$
- für $1,0 > \psi > 0$ $k_{\sigma} = \frac{0,578}{\psi + 0,34}$
- für $\psi = 0$ $k_{\sigma} = 1,70$
- für $0 > \psi > -1,0$ $k_{\sigma} = 1,7 - 5 \cdot \psi + 17,1 \cdot \psi^2$
- für $\psi = -1,0$ $k_{\sigma} = 23,8$

Bei genauer Betrachtung der Gleichungen für k_{σ} bei einem Maximalwert der Druckspannung σ_1 am freien Rand fällt auf, dass die für den Bereich $-1,0 > \psi > -3,0$ angegebene Gleichung für k_{σ} über den gesamten

Randspannungsbereich von $1,0 > \psi > -3,0$ angewandt werden kann. Somit ist die Angabe von punktuellen Stützstellen für $\psi = 1,0$, $\psi = 0,0$ und $\psi = -1,0$ überflüssig.

Eine Auswertung dieser Gleichungen zur Bestimmung des Beulwertes k_σ ergeben die folgenden graphischen Verläufe der jeweiligen Funktion.





Die elastische Beulspannung σ_E kann, entsprechend [1], Anhang A.1 (2), mittels der folgenden Gleichung ermittelt werden.

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 * E * t^2}{12 * (1 - \nu^2) * b^2} \approx 190000 * \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

In dieser Gleichung finden, zusätzlich zu den schon eingeführten, die folgenden Werte Berücksichtigung.

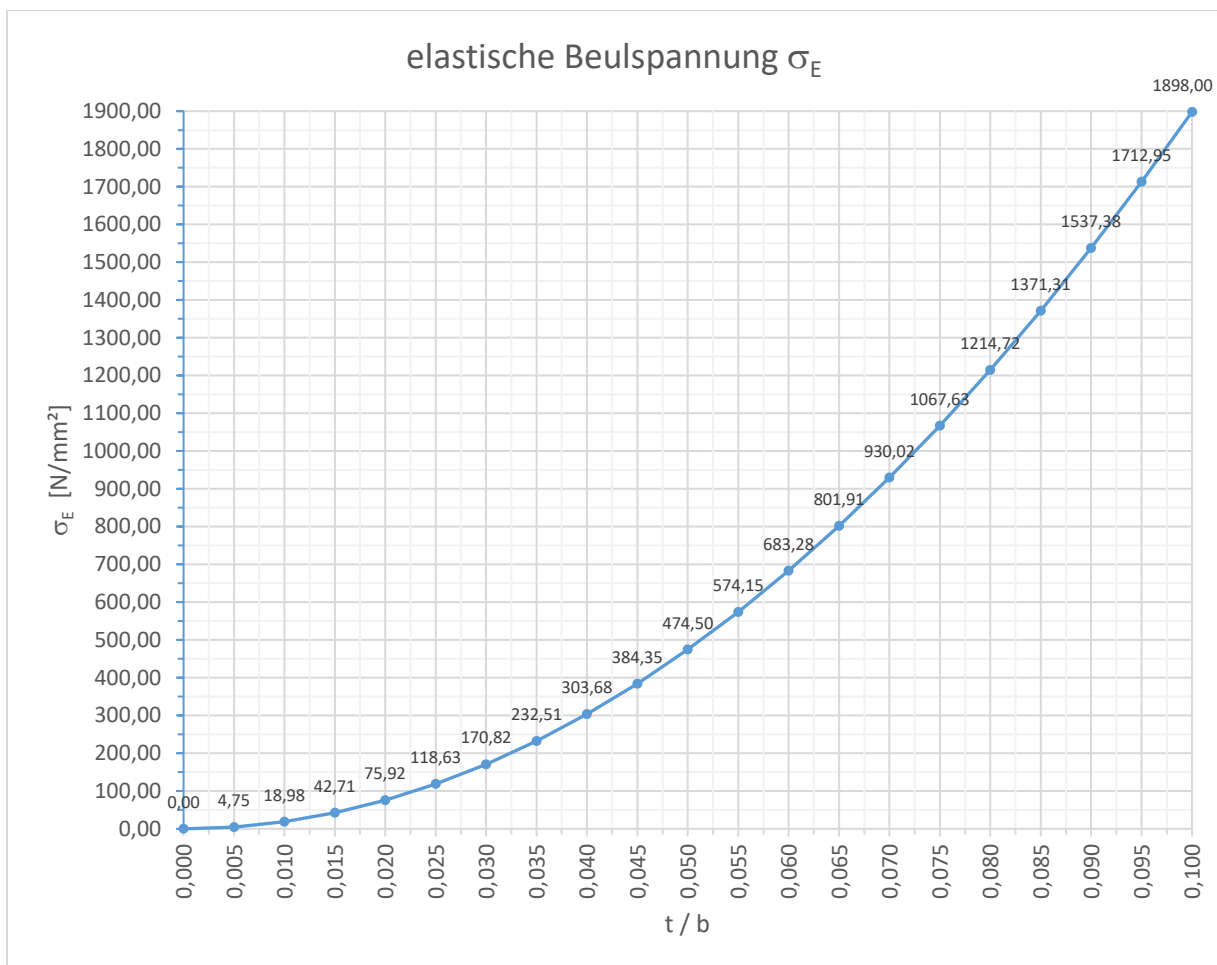
- E Elastizitätsmodul des Stahls
- ν Querdehnzahl des Stahls
- b Breite des Blechfeldes

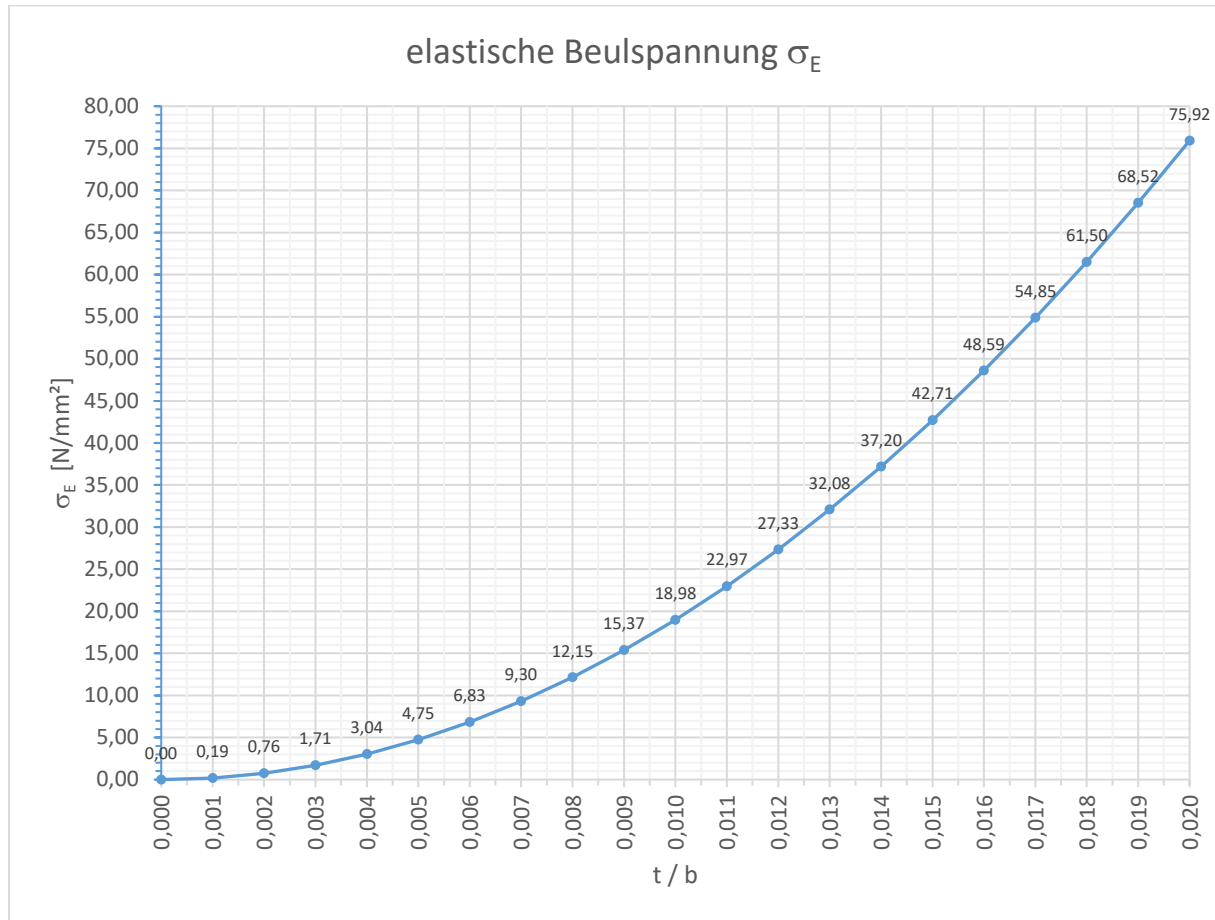
Der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl des Stahls können aus [4], Abschnitt 3.2.6 entnommen werden und sind mit $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ und $\nu = 0,3$ anzunehmen.

Die Breite des Blechfeldes kann mit der maßgebenden Breite des Blechfeldes $\bar{b}$ gleichgesetzt werden. Dementsprechend ist die Breite des Blechfeldes für einseitig gestützte Gurtelemente $b = \bar{b} = c$ und für gleich- und ungleichschenklige Winkel $b = \bar{b} = h$ anzusetzen.

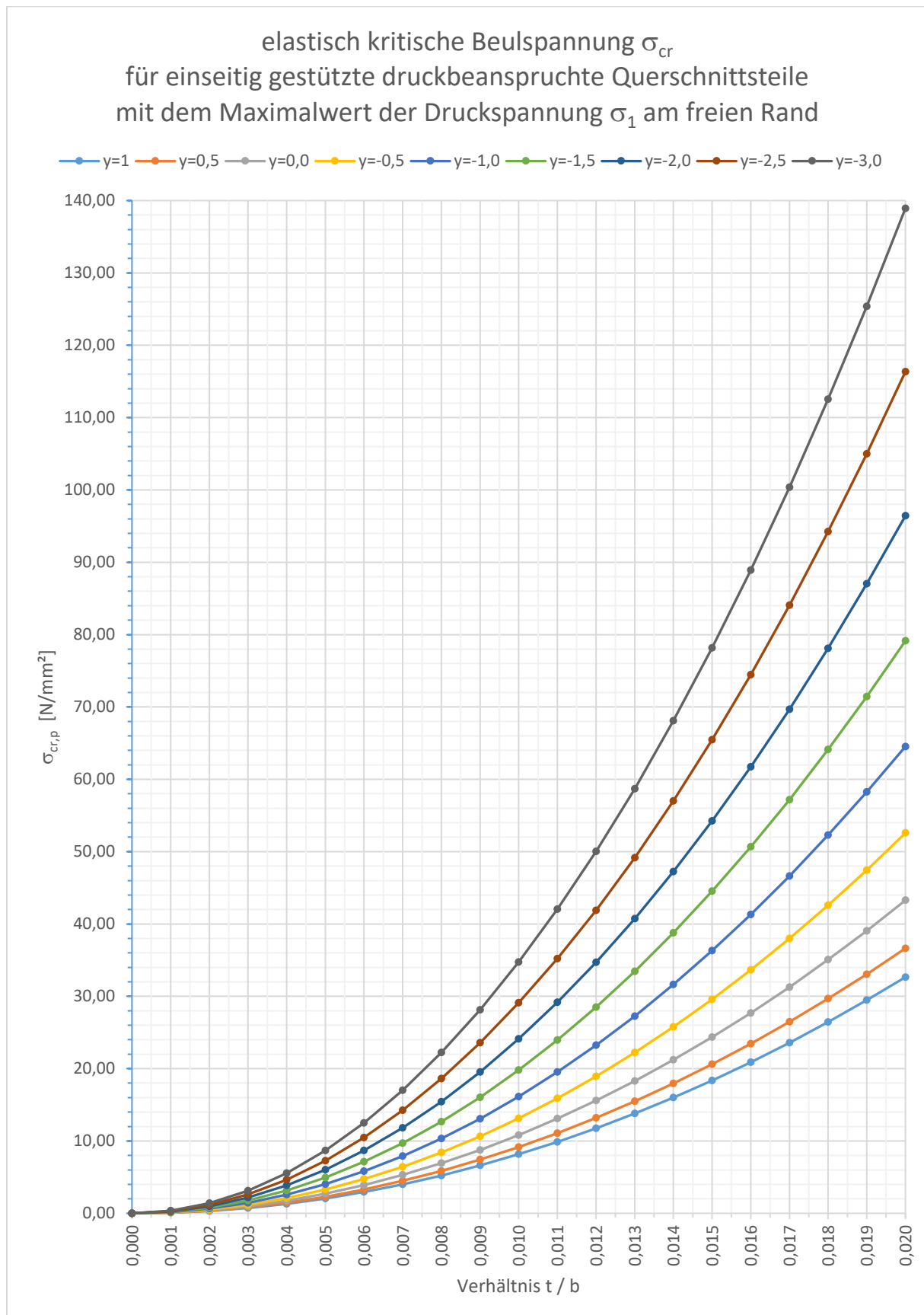
Nach Auswertung der Gleichung der elastischen Beulspannung σ_E für $0 \leq \frac{t}{b} \leq 0,10$ und detaillierter für

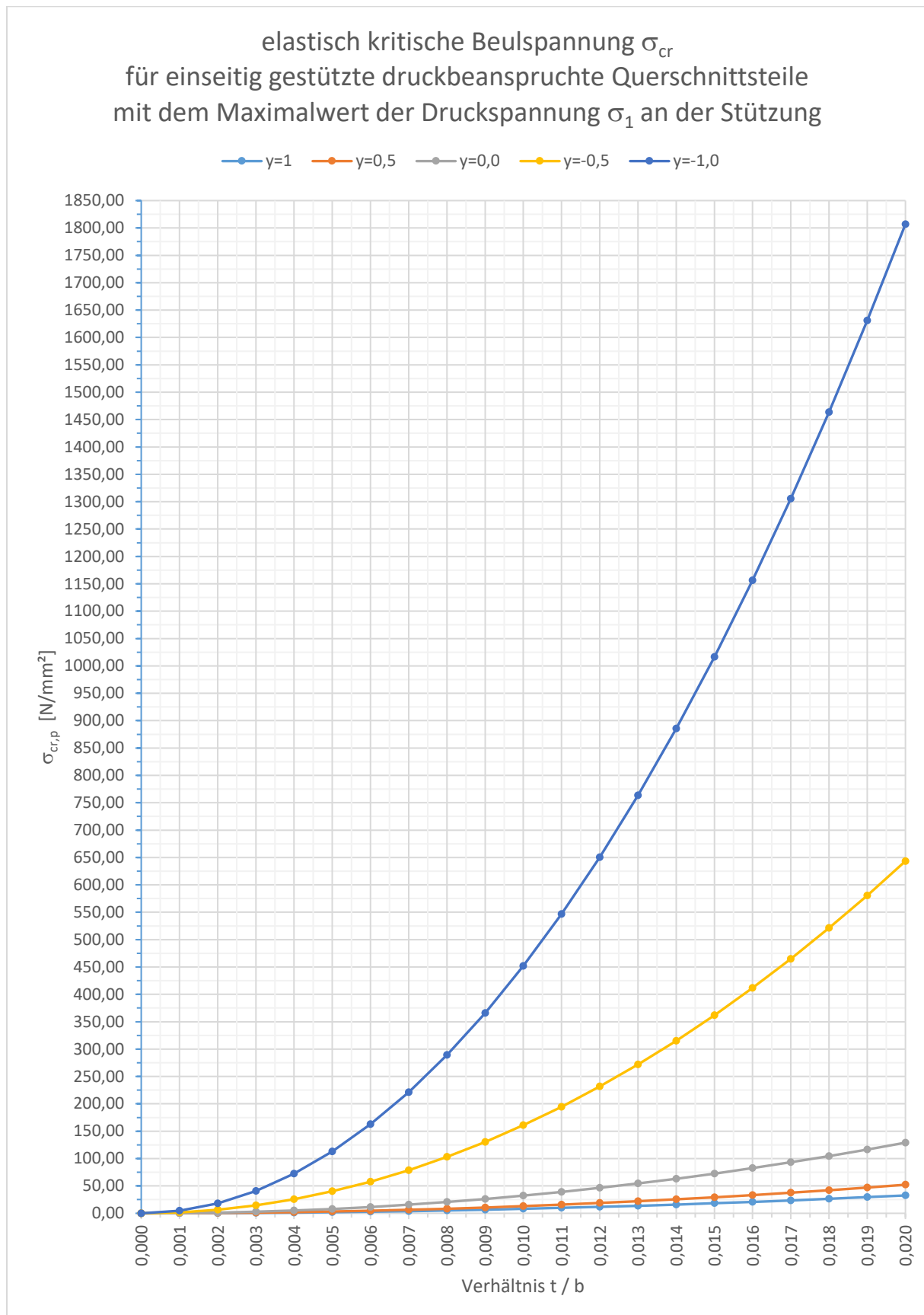
$0 \leq \frac{t}{b} \leq 0,02$ ergeben sich die beiden folgenden Diagramme.





Somit kann nach der Ermittlung des Randspannungsverhältnisses ψ und des Verhältnisses $\frac{t}{b}$ mit Hilfe der vorgestellten Diagramme die kritische elastische Beulspannung σ_{cr} einfach ermittelt werden. Die Ergebnisse der Ermittlung von σ_{cr} für geometrische Verhältnisse $0 \leq \frac{t}{b} \leq 0,02$ und verschiedene Randspannungsverhältnisse ψ (hier mit y bezeichnet) können den beiden folgenden Diagrammen entnommen werden.





Damit kann wiederum der Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ mit Hilfe der Gleichung $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$ berechnet werden.

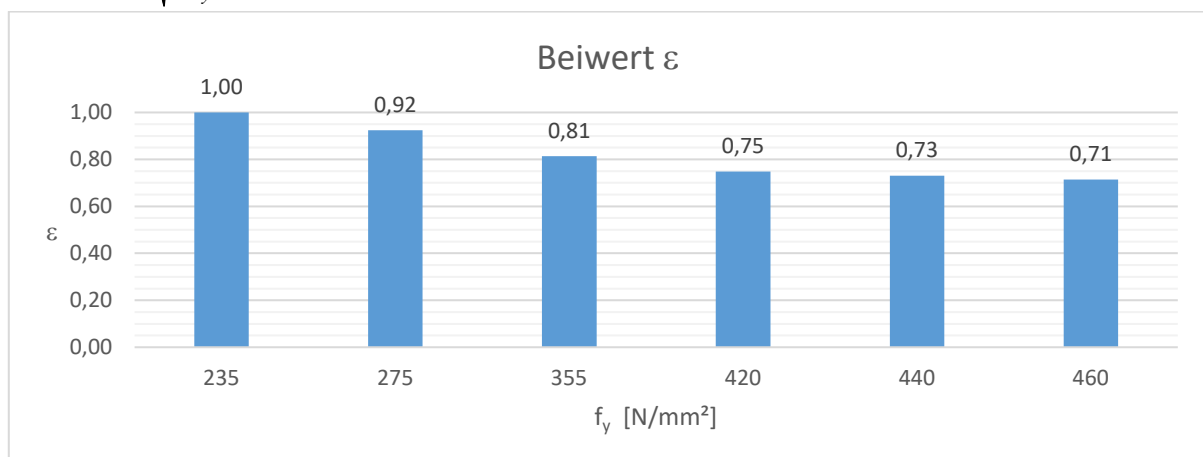
Alternativ darf dieser Schlankheitsgrad $\bar{\lambda}_p$ auch auf einen zweiten Weg mittels der Gleichung

$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}}$ berechnet werden. Hierfür werden der Materialbeiwert ε , der Beulwert k_σ in Ab-

hängigkeit von Randspannungsverhältnis ψ und das Verhältnis $\frac{\bar{b}}{t}$ benötigt.

Der Materialbeiwert ε wird mit Hilfe der folgenden Gleichung ermittelt und die Ergebnisse für in Deutschland normativ geregelte Stähle kann dem folgenden Diagramm entnommen werden.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$



Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Beulwertes k_σ wurde schon oben dargelegt und die entsprechenden Diagramme sind anzuwenden.

Das geometrische Verhältnis $\frac{\bar{b}}{t}$ kann mittels der obigen Erläuterungen berechnet werden. Damit das bei

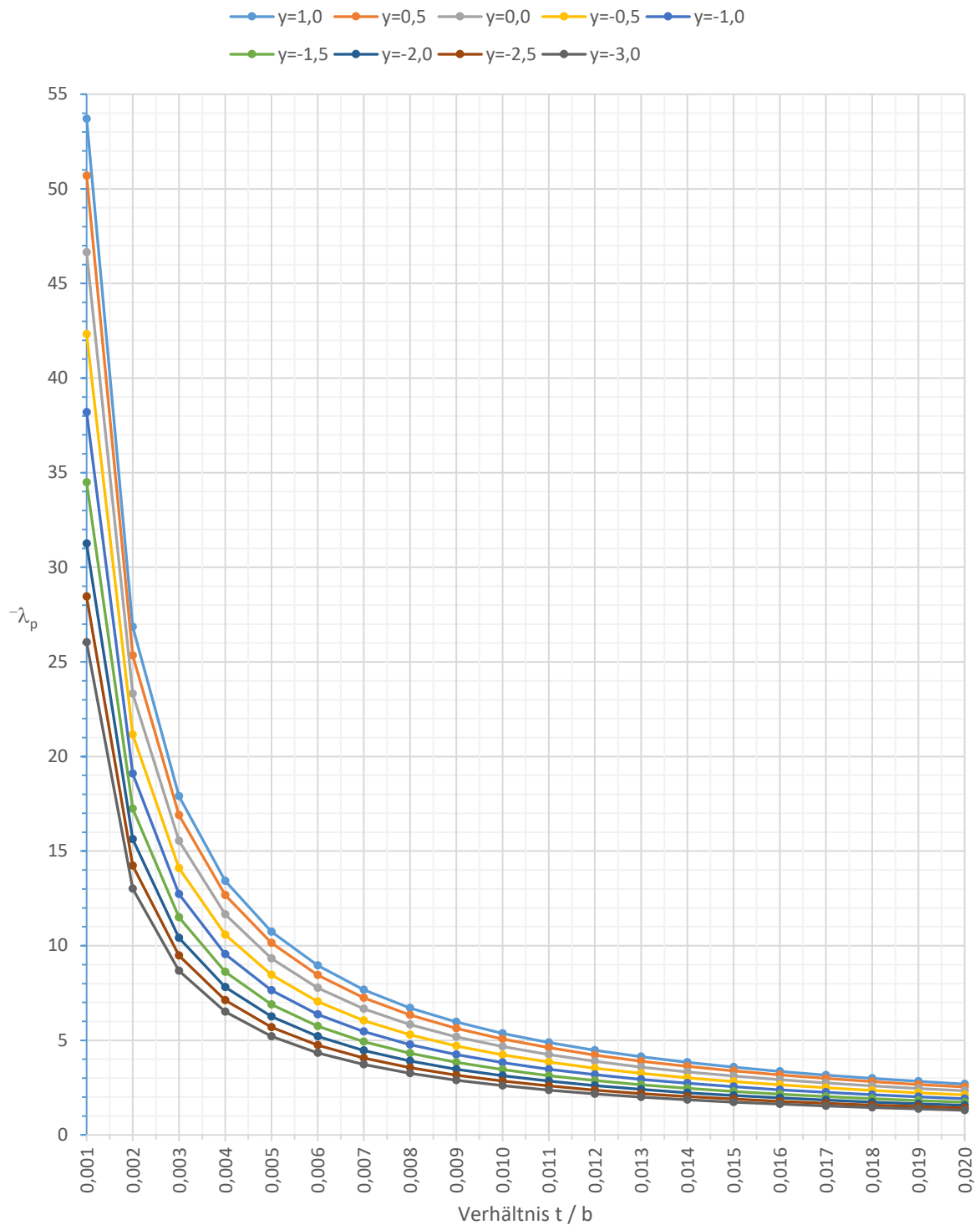
der Ermittlung der elastisch kritischen Beulspannung notwendige Verhältnis $\frac{t}{b} = \frac{t}{\bar{b}}$ verwendet werden

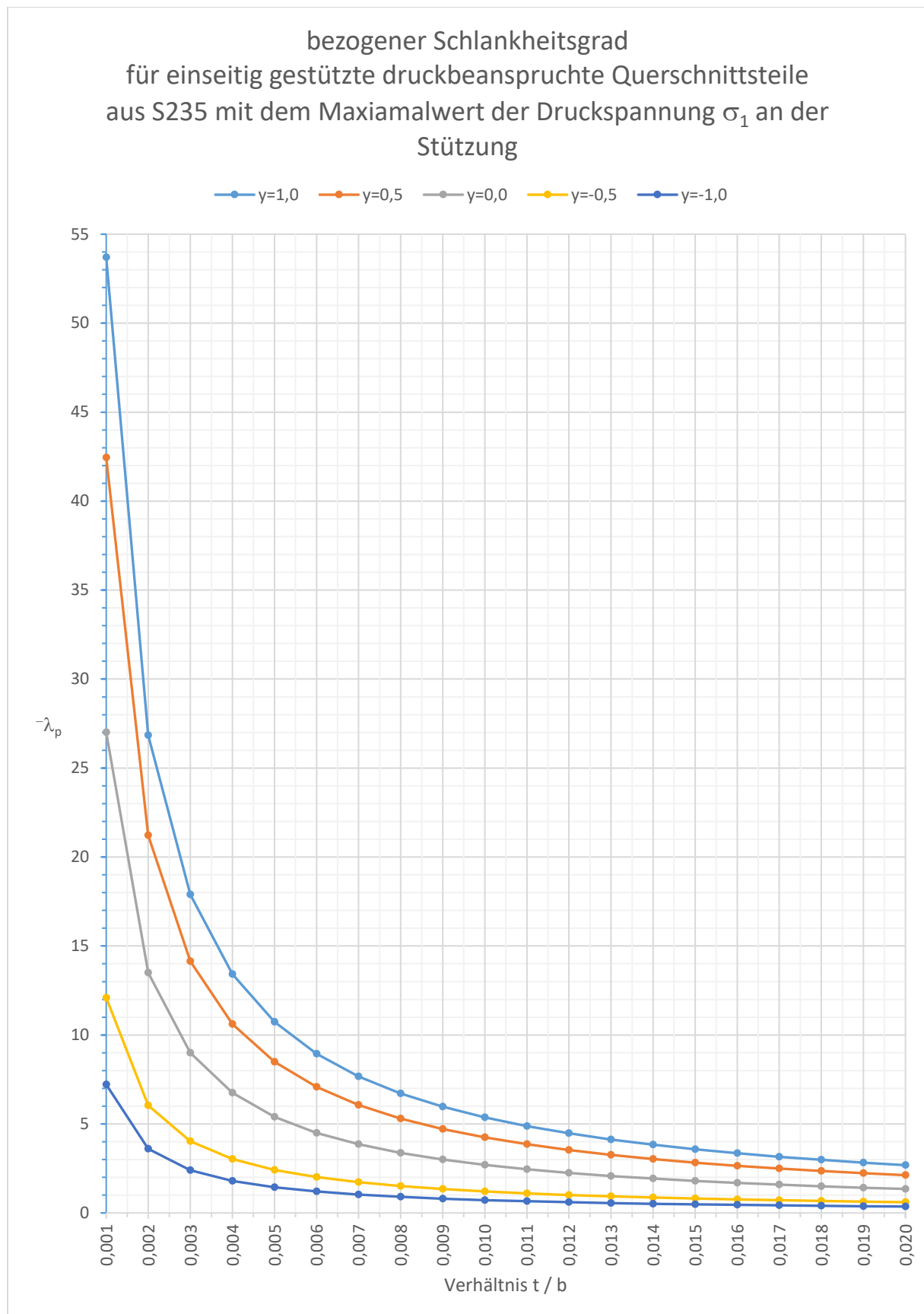
kann, wurde die Gleichung aus [1] zur Ermittlung des Schlankheitsgrades folgendermaßen angepasst und für $0,001 \leq \frac{t}{b} \leq 0,020$ sowie die in Deutschland üblichen Stahlsorten mit unterschiedlichen

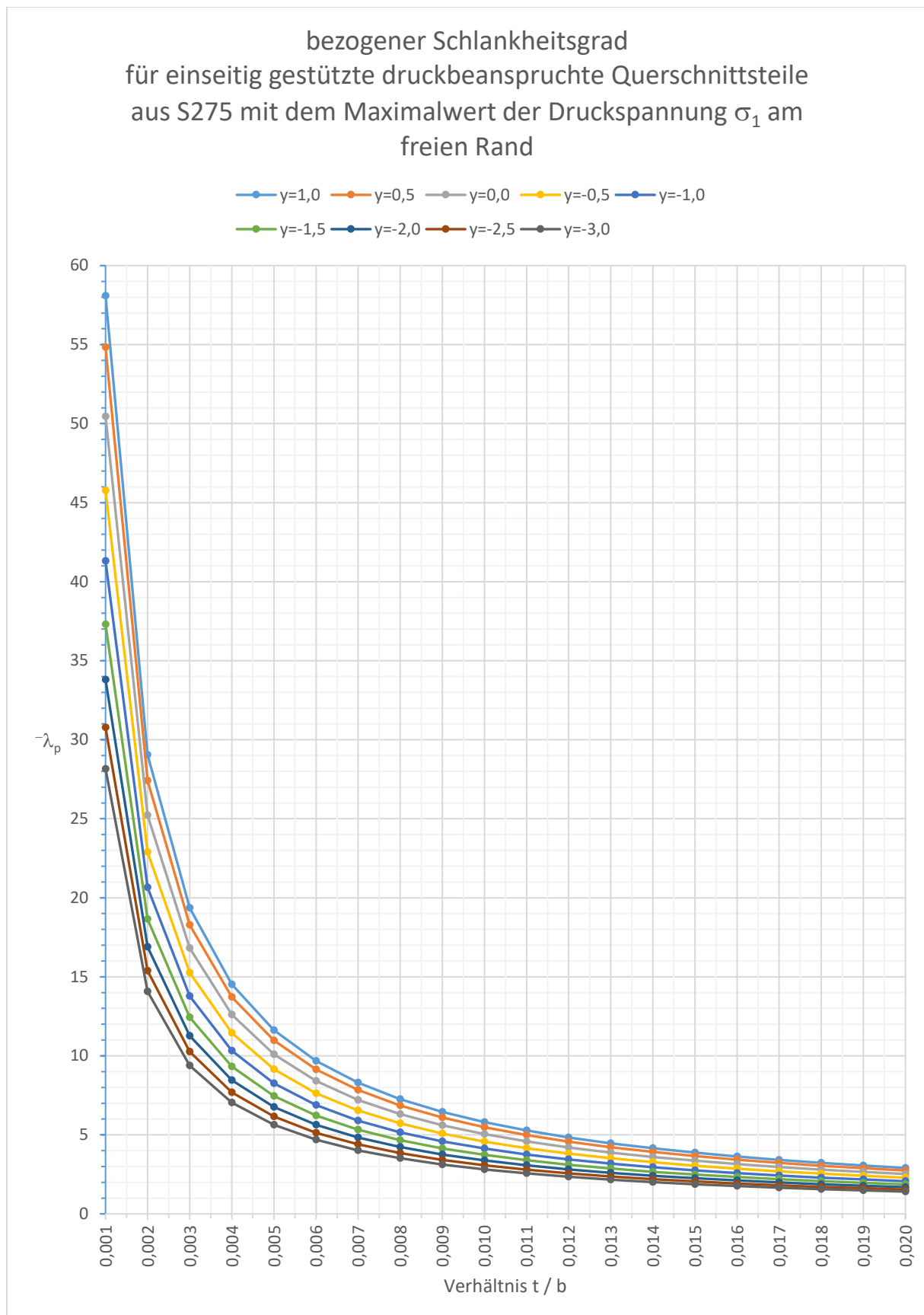
Randspannungsverhältnissen ψ (in den Diagrammen als y angegeben) ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden 12 Diagrammen aufbereitet.

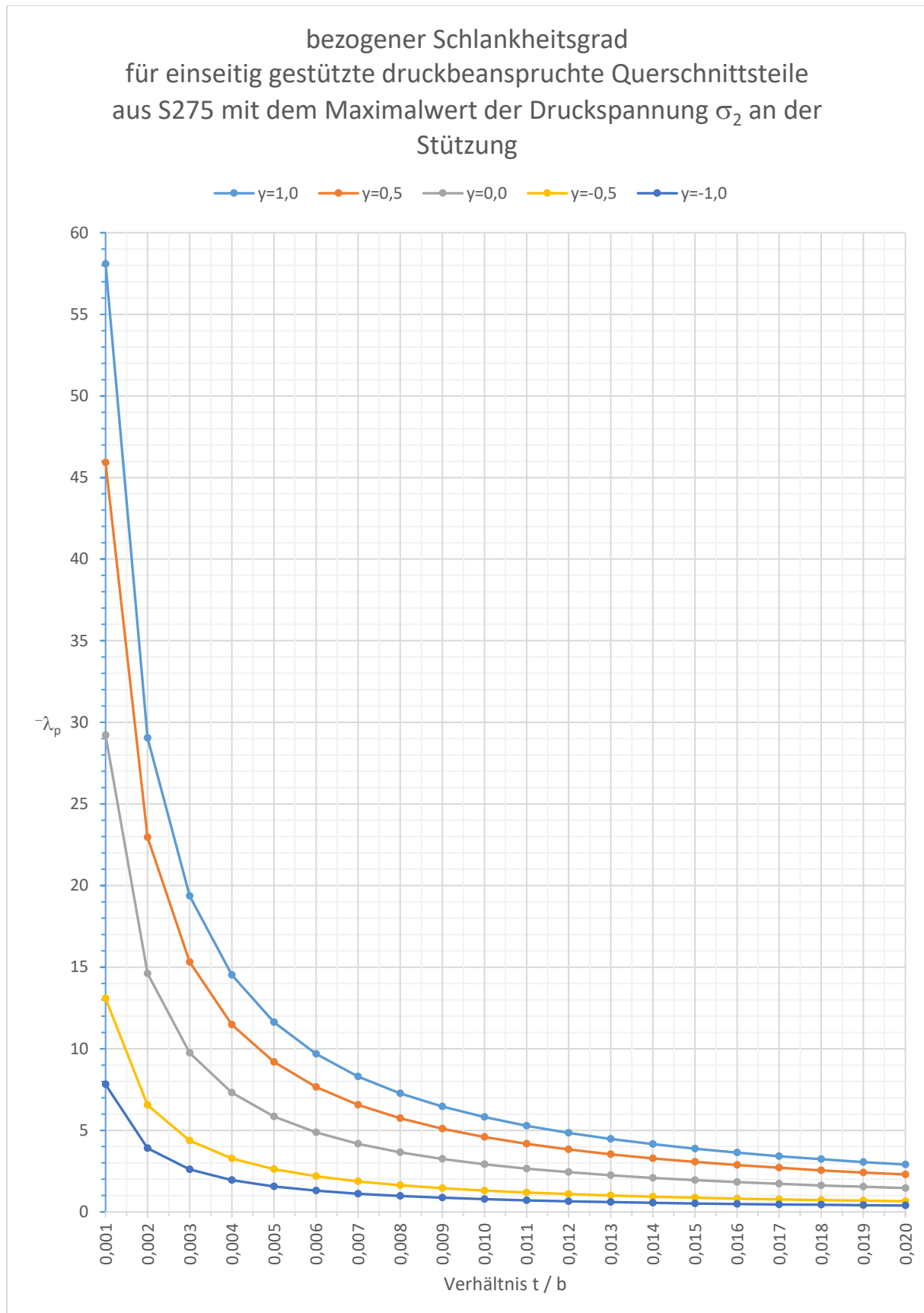
$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{1}{\frac{t}{\bar{b}}}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = \frac{\frac{1}{\frac{t}{b}}}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}}$$

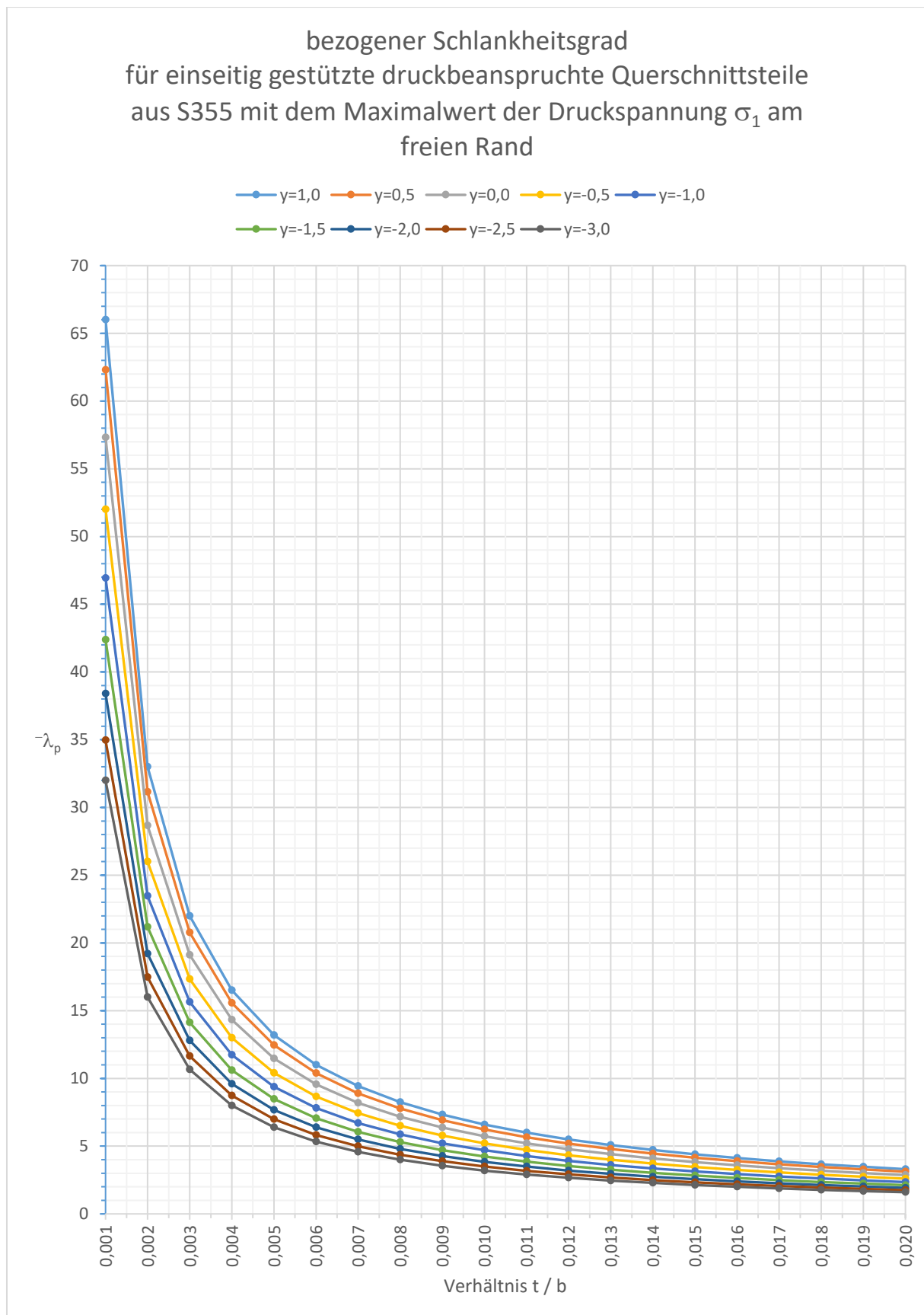
bezogener Schlankheitsgrad
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S235 mit dem Maximalwert der Druckspannung σ_1 am
freien Rand

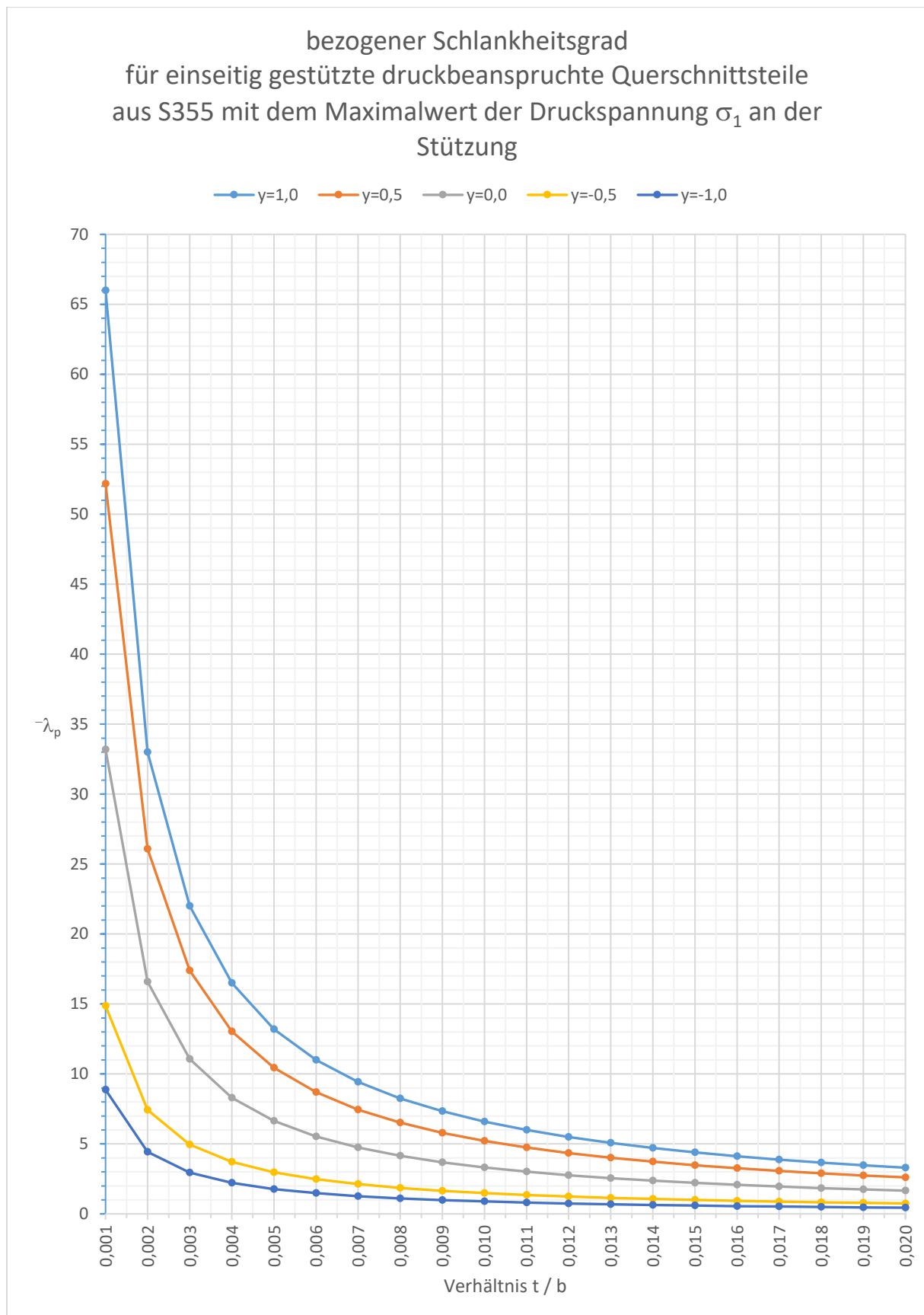


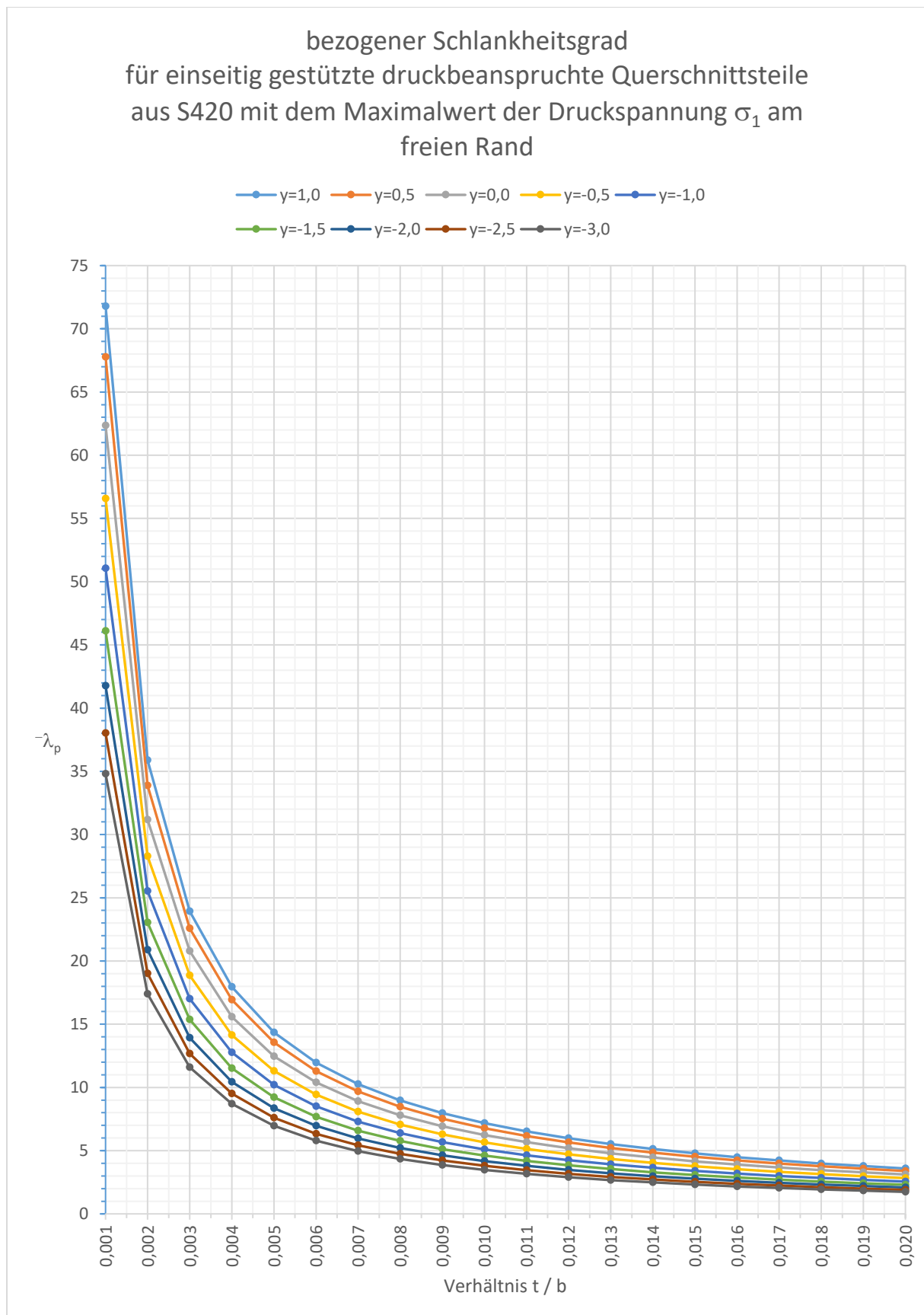


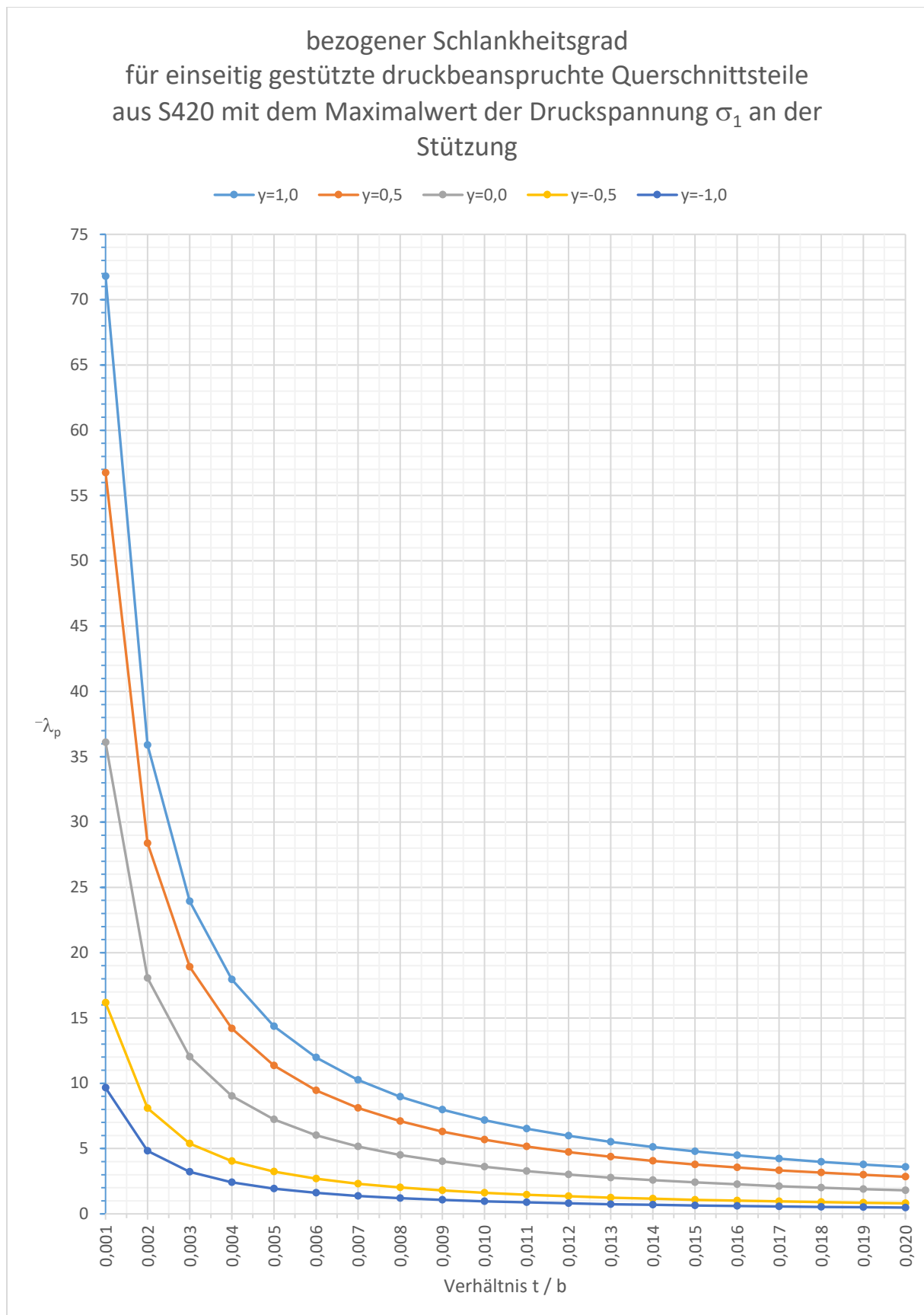




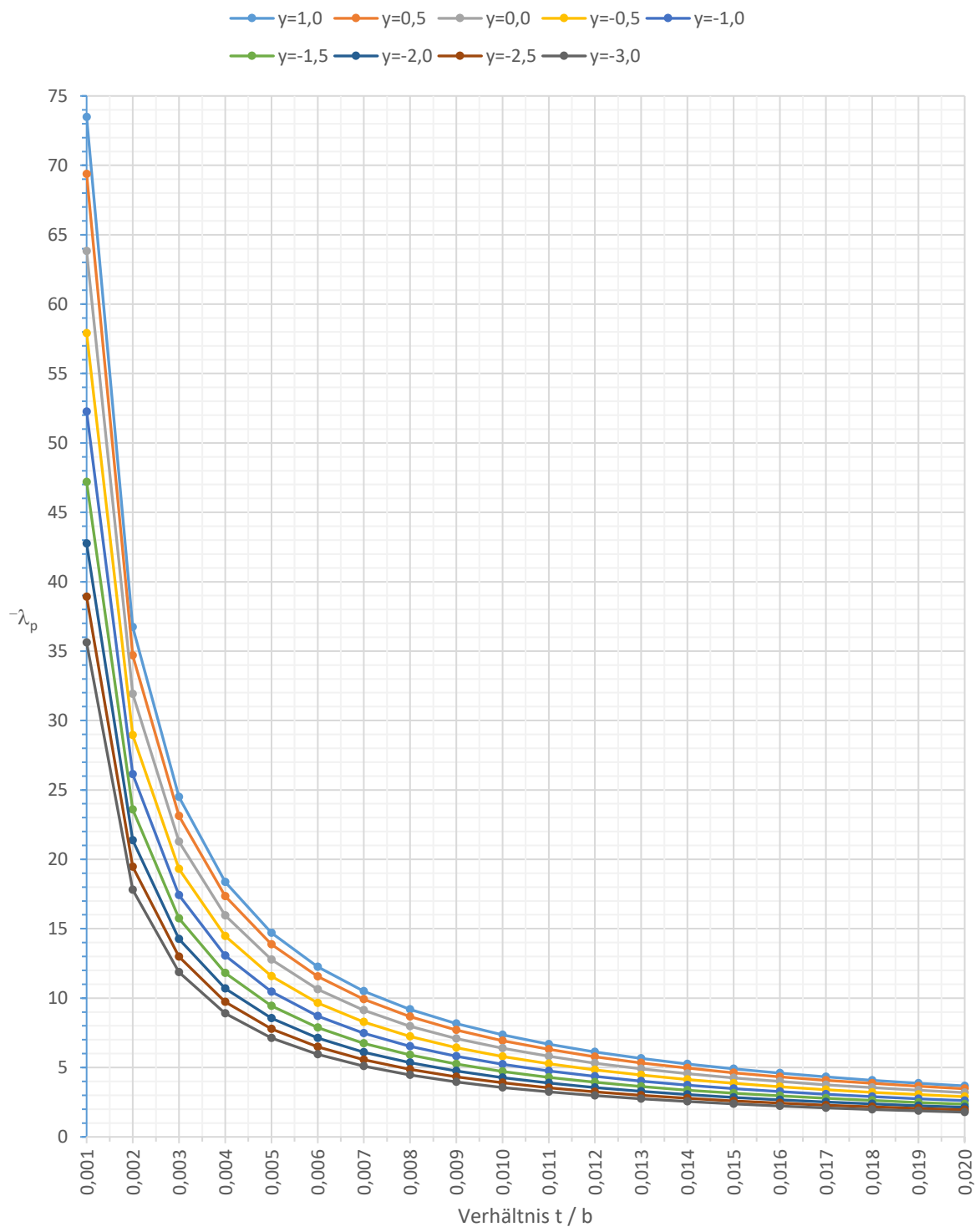


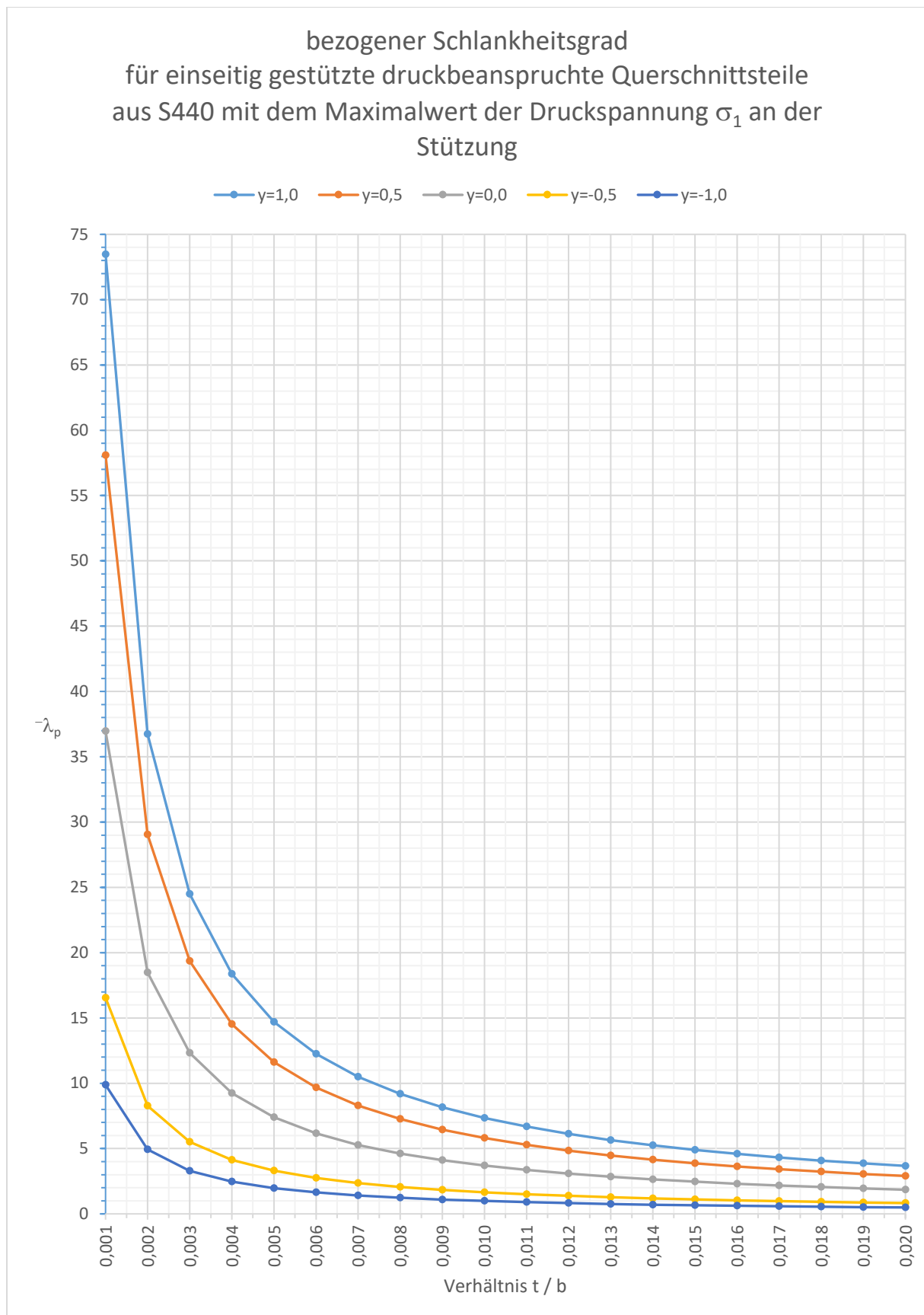


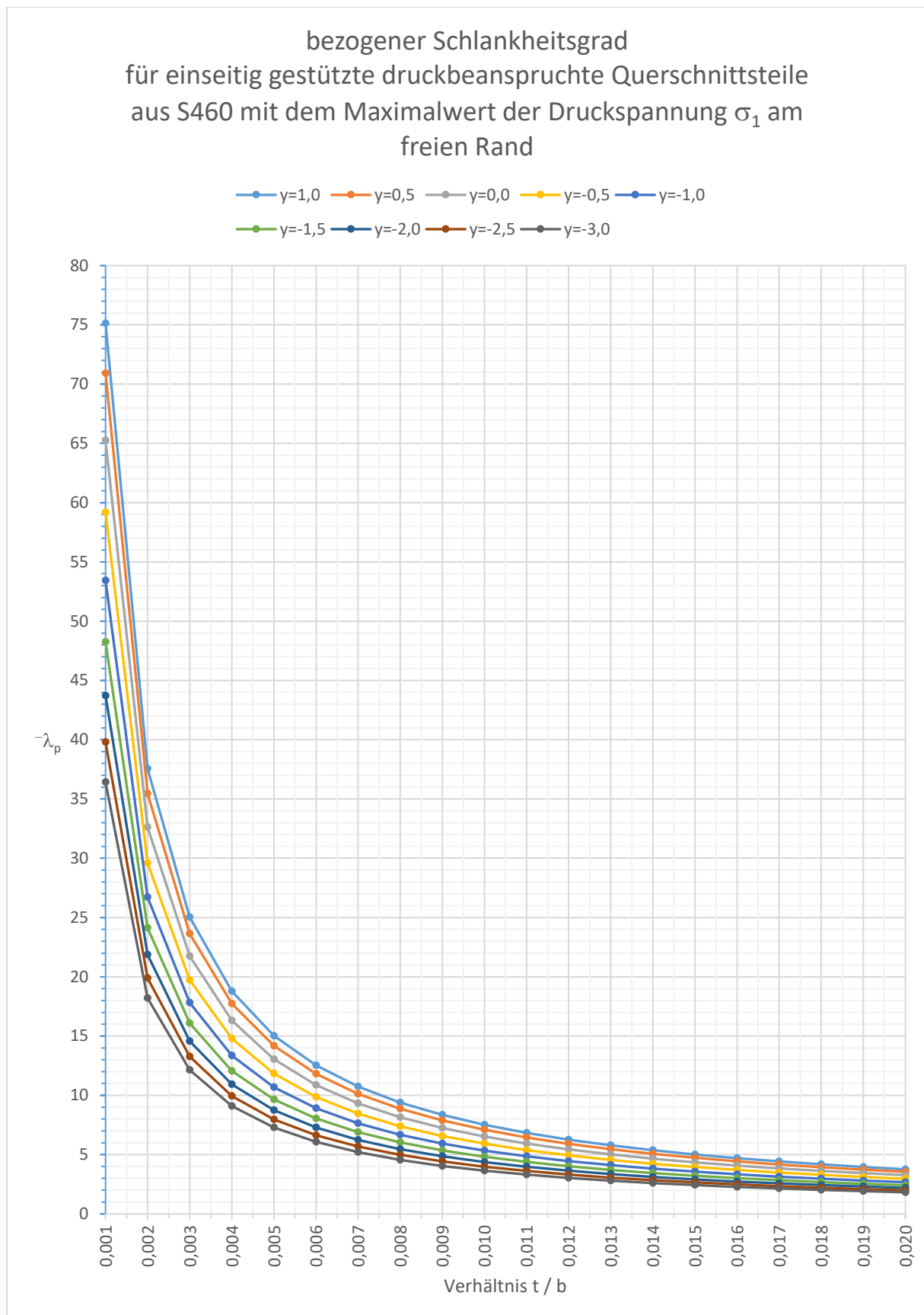


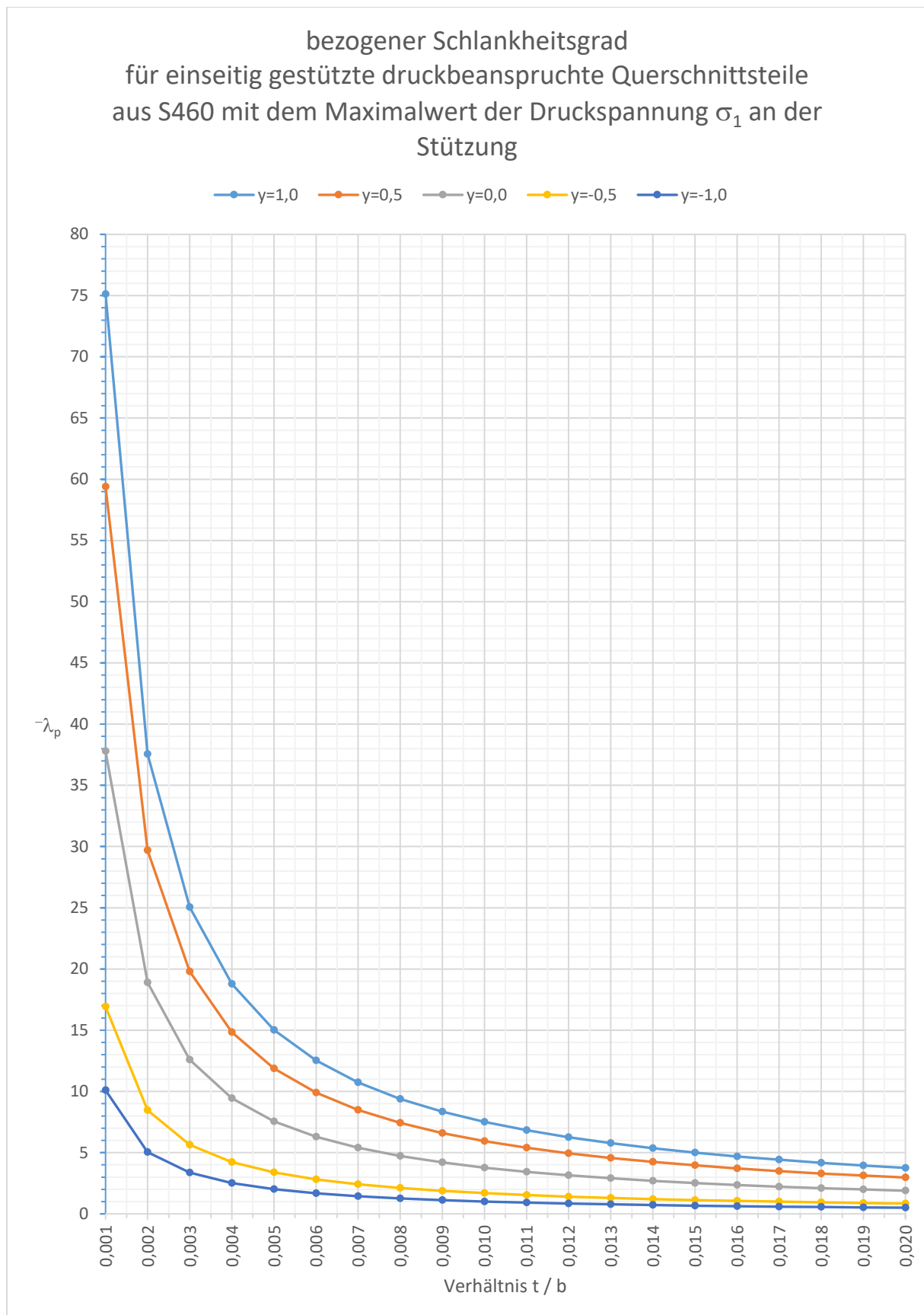


bezogener Schlankheitsgrad
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S440 mit dem Maximalwert der Druckspannung σ_2 am
freien Rand

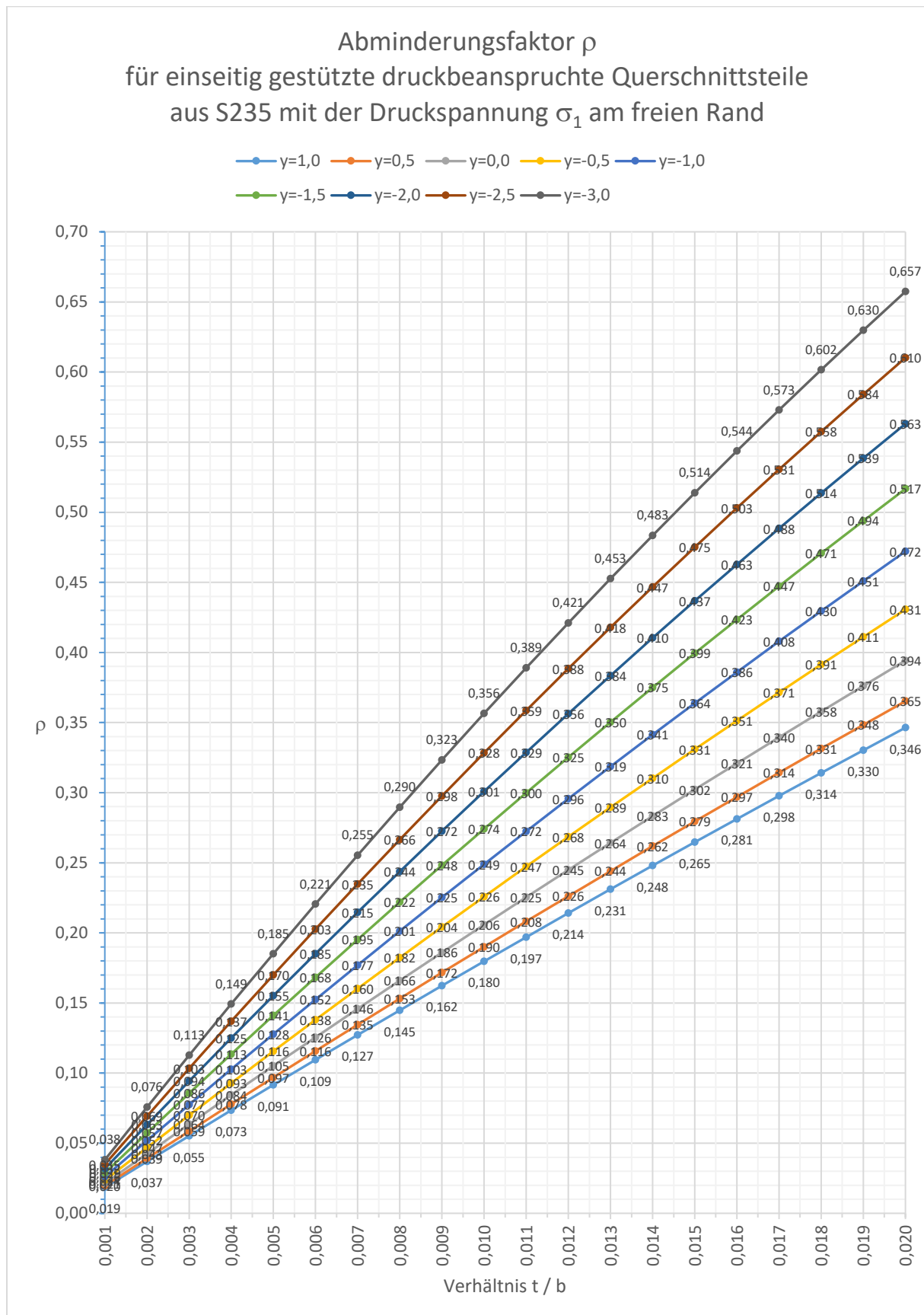


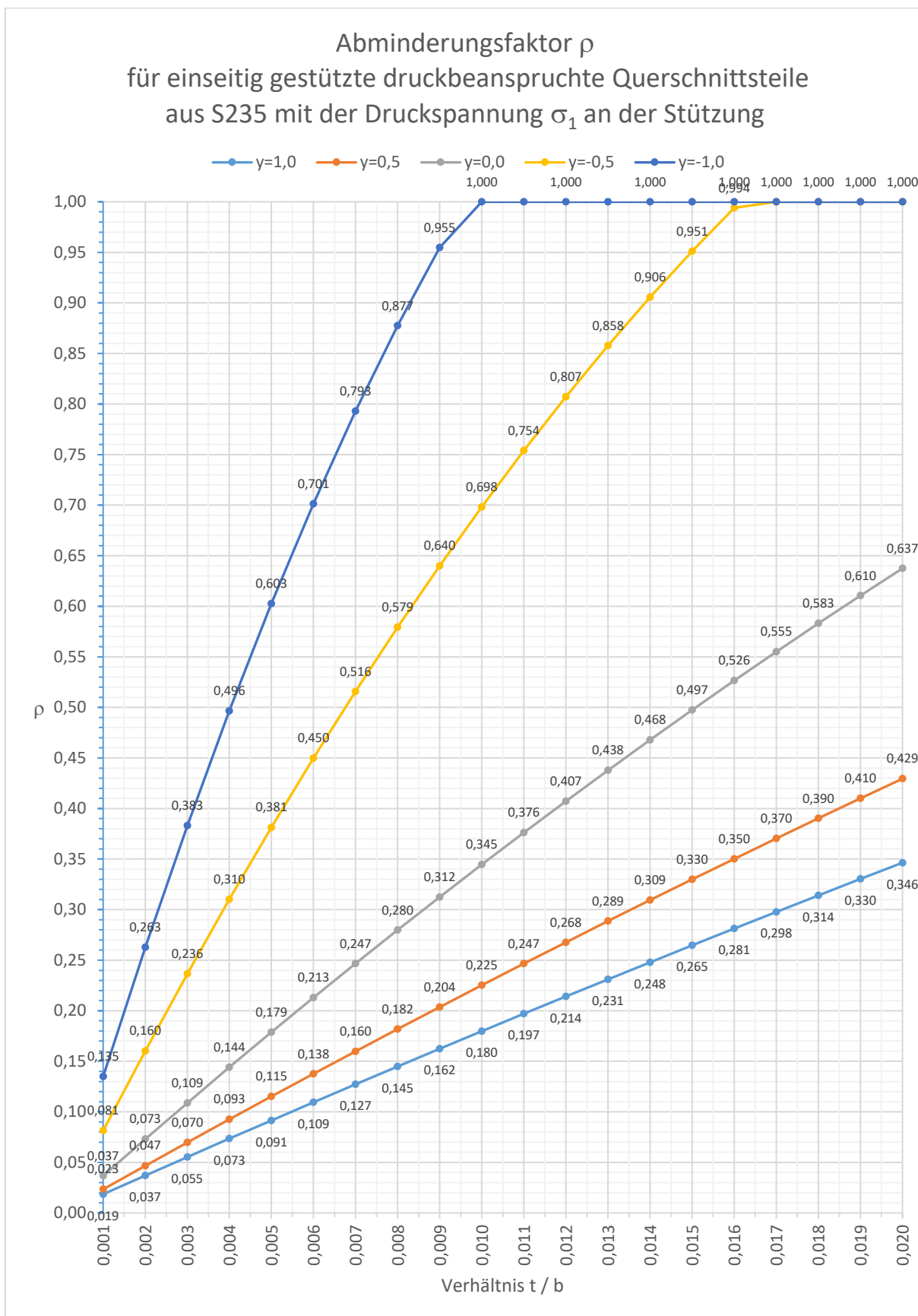




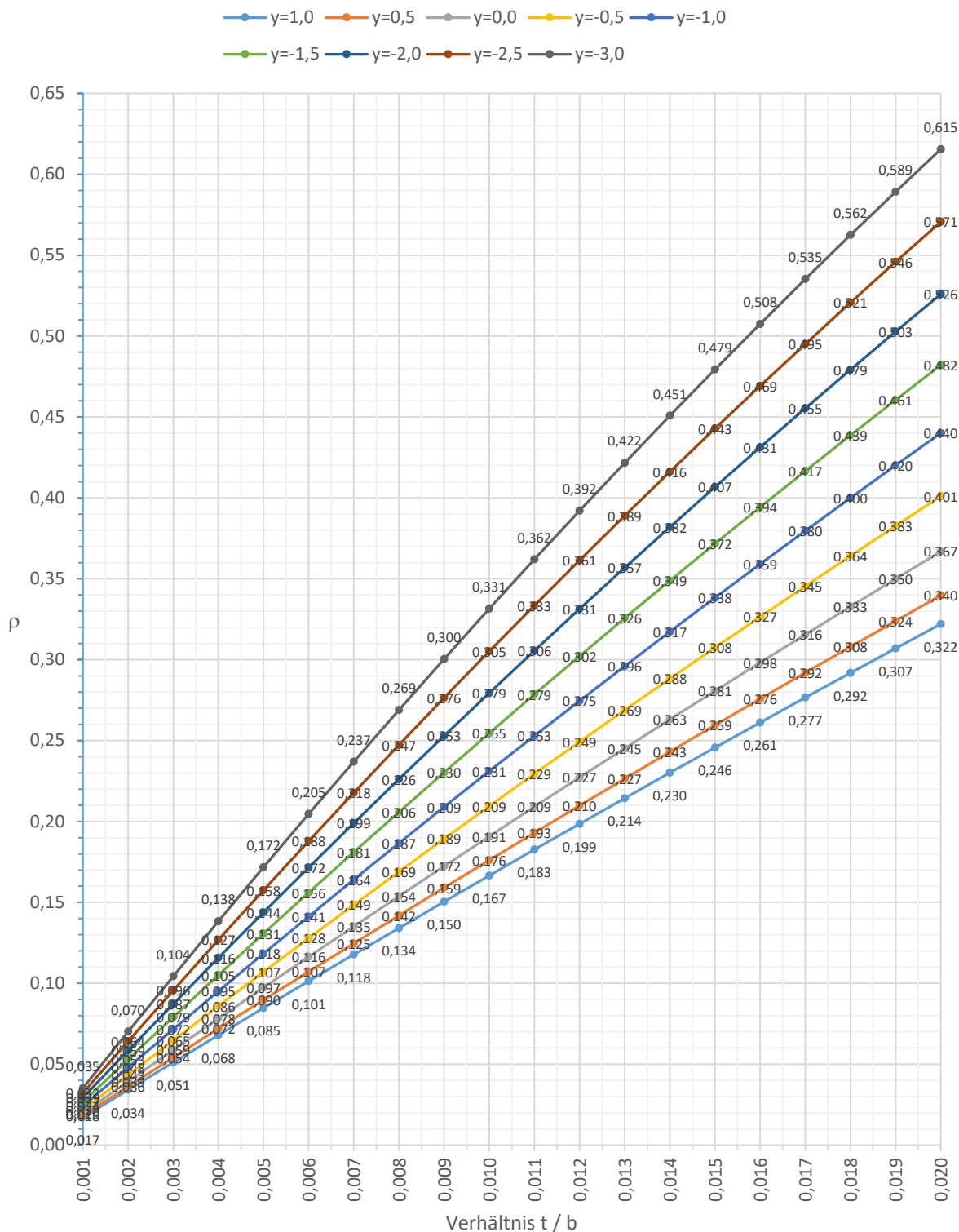


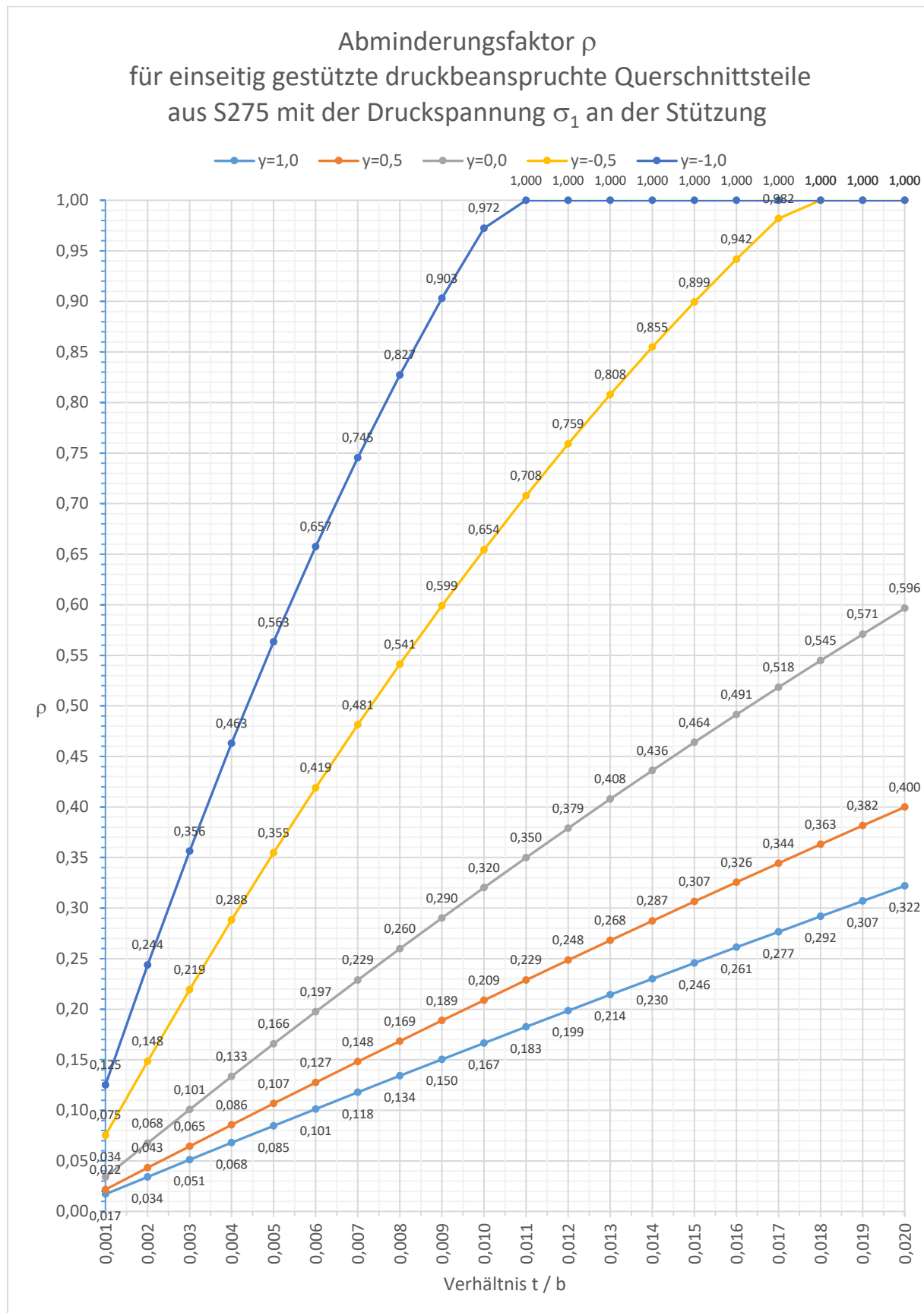
Somit kann der Abminderungsfaktor für das Beulen ρ in Abhängigkeit von dem geometrischen Verhältnis $\frac{t}{b} = \frac{t}{b}$, dem Randspannungsverhältnis ψ und der Lage der maximalen Druckspannung im Blechfeld ermittelt werden. Dies wurde für $0,001 \leq \frac{t}{b} \leq 0,020$ sowie die in Deutschland üblichen Stahlsorten mit unterschiedlichen Randspannungsverhältnissen ψ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden 12 Diagrammen aufbereitet, wobei wieder zu beachten ist, dass ψ in den Diagrammen als y angegeben wird.



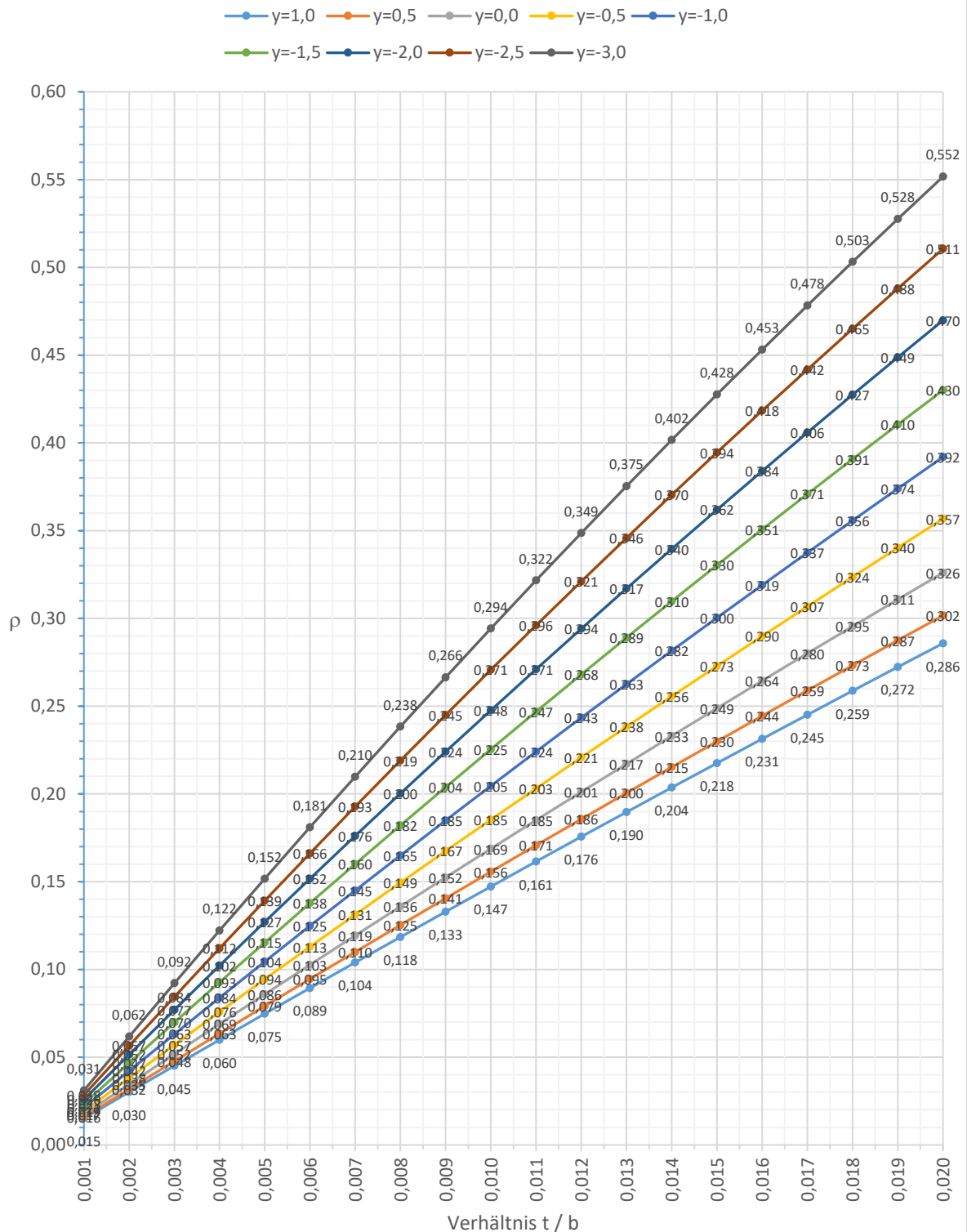


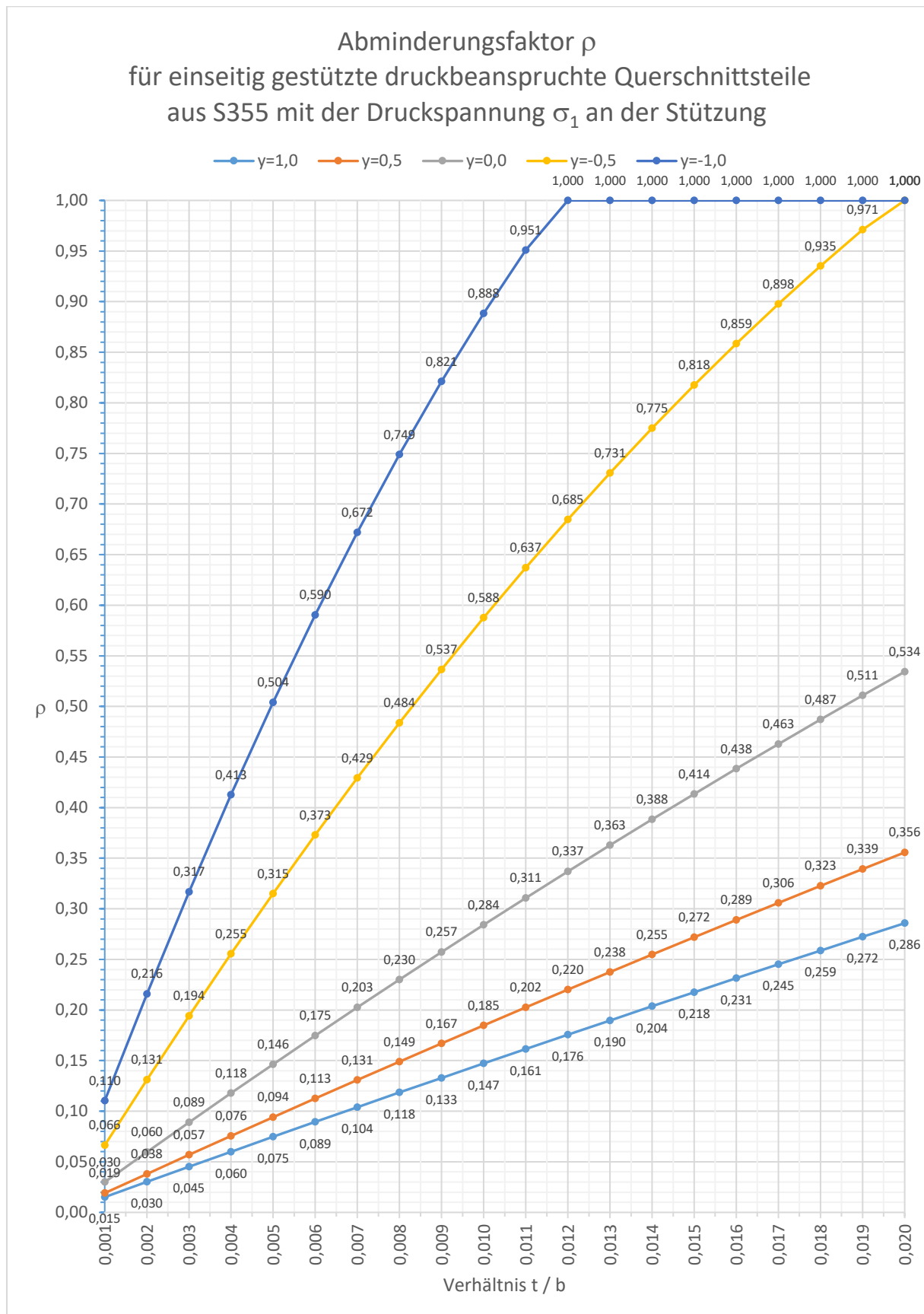
Abminderungsfaktor ρ
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S275 mit der Druckspannung σ_1 am freien Rand



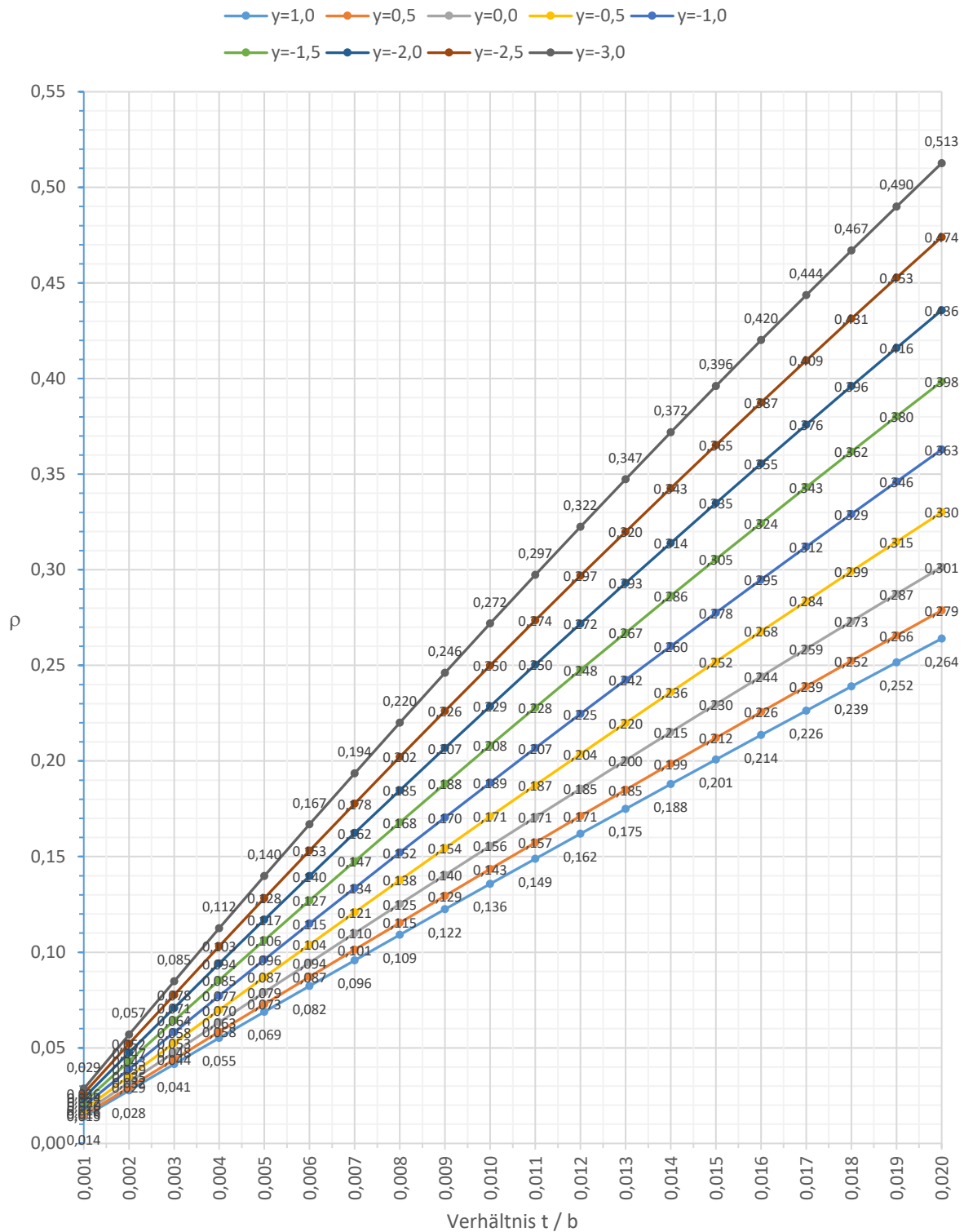


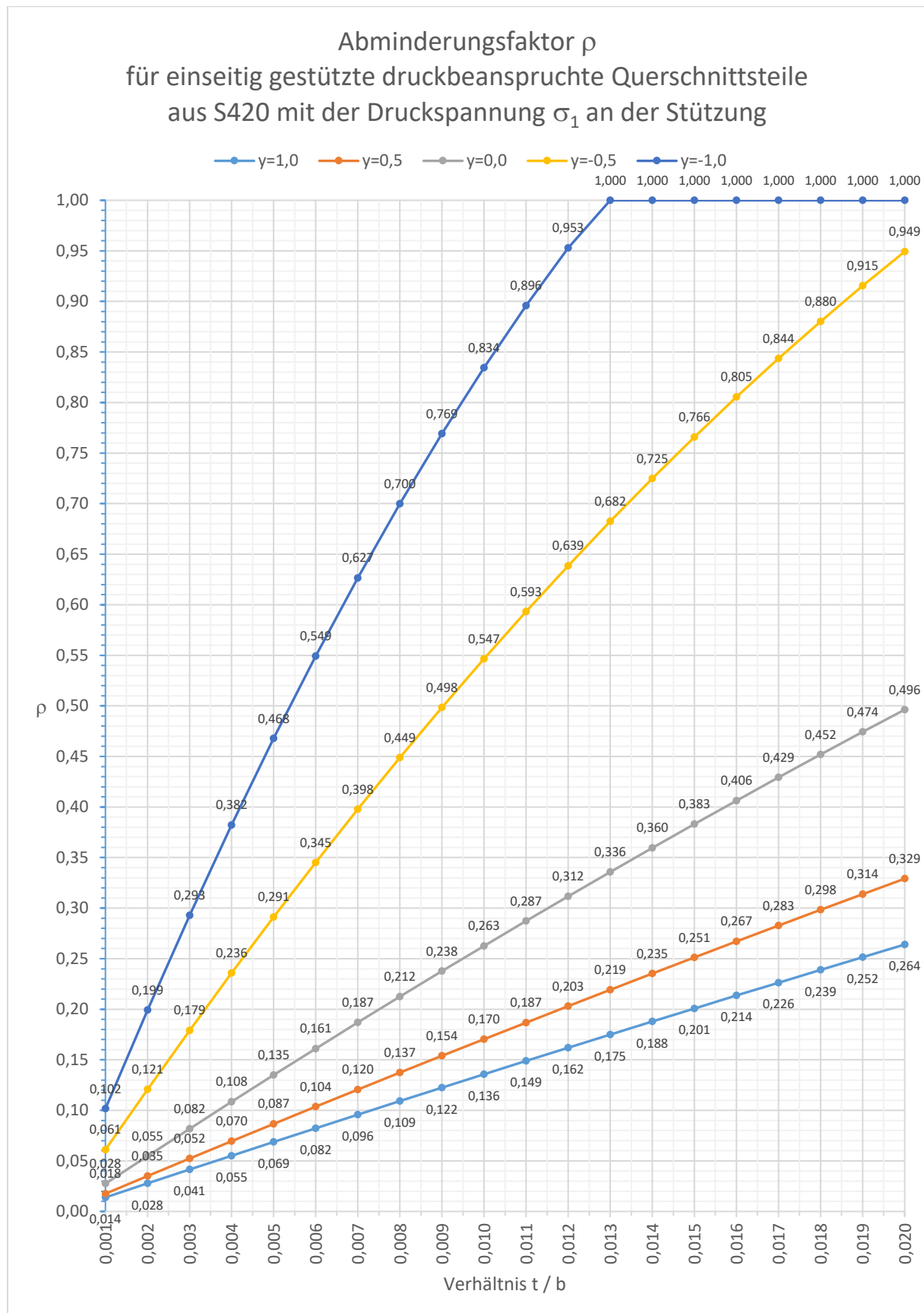
Abminderungsfaktor ρ
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S355 mit der Druckspannung σ_1 am freien Rand



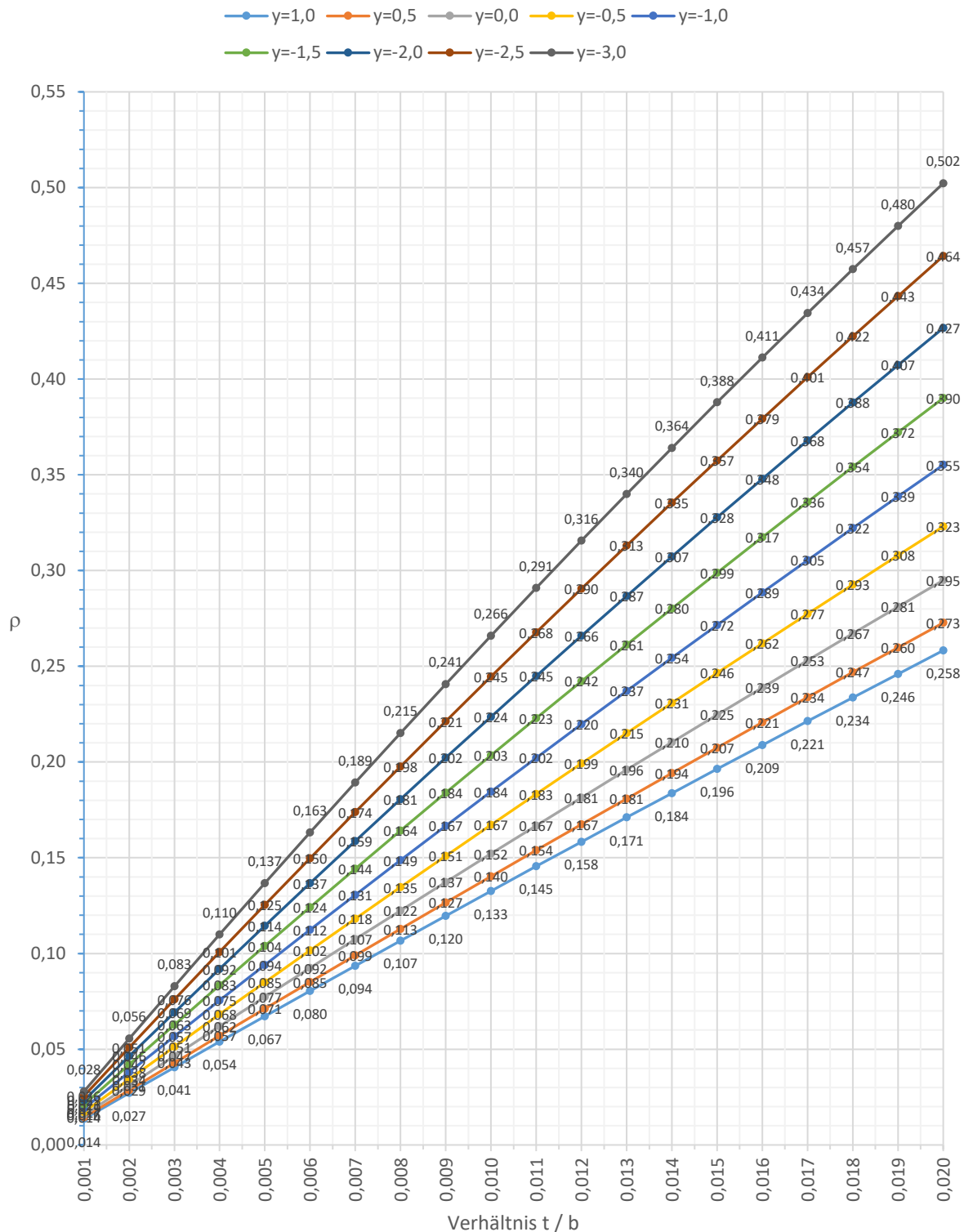


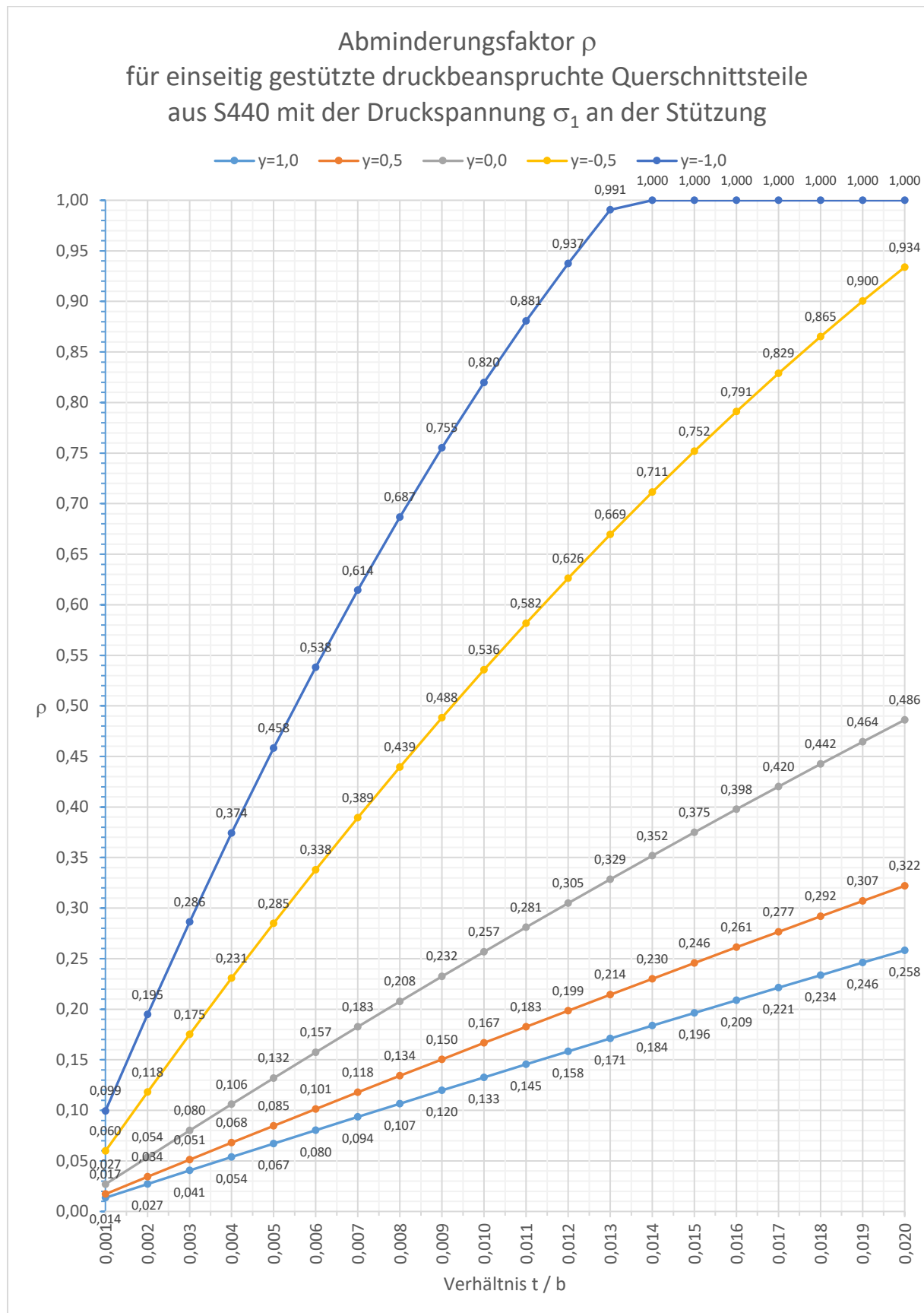
Abminderungsfaktor ρ
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S420 mit der Druckspannung σ_1 am freien Rand

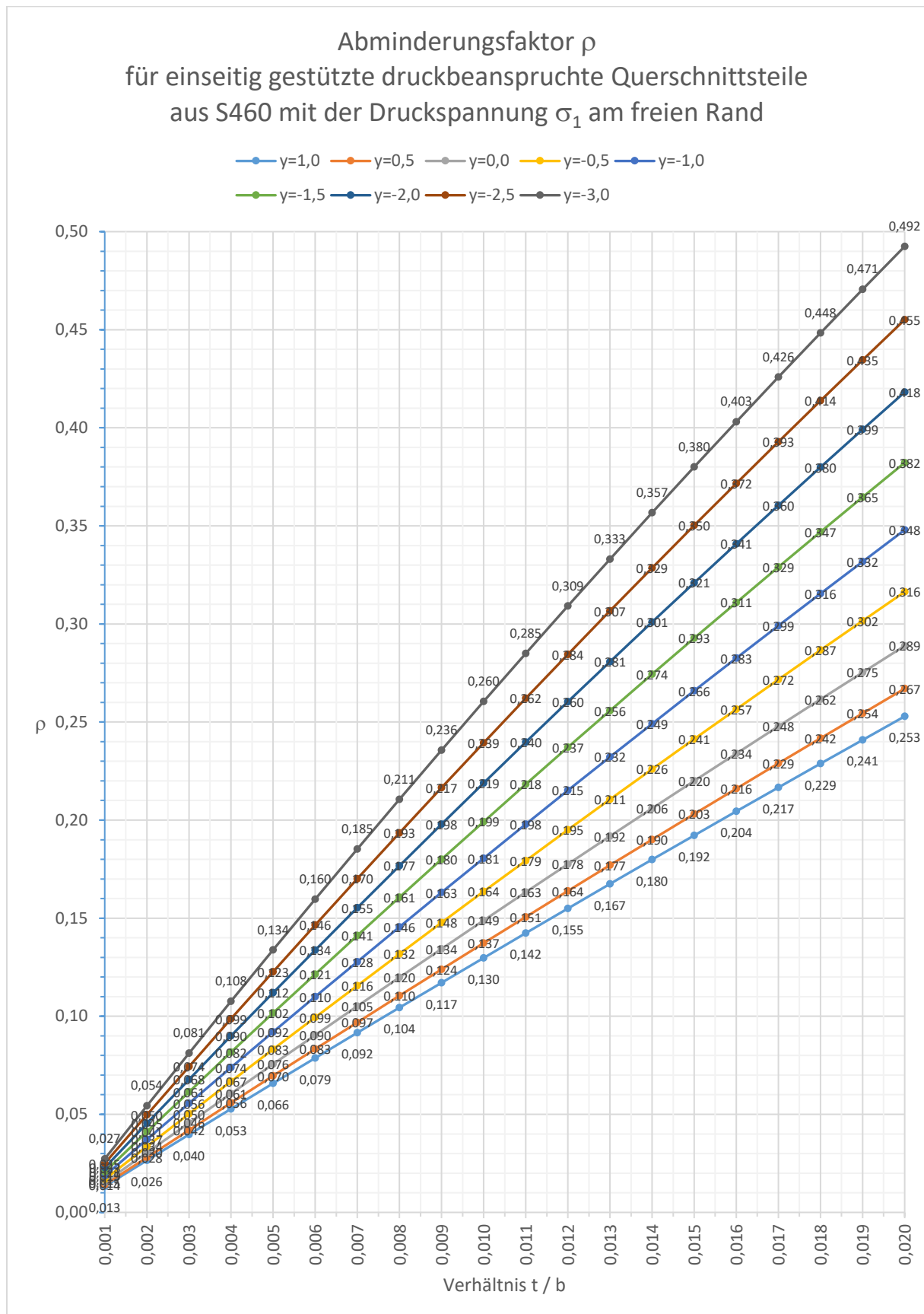


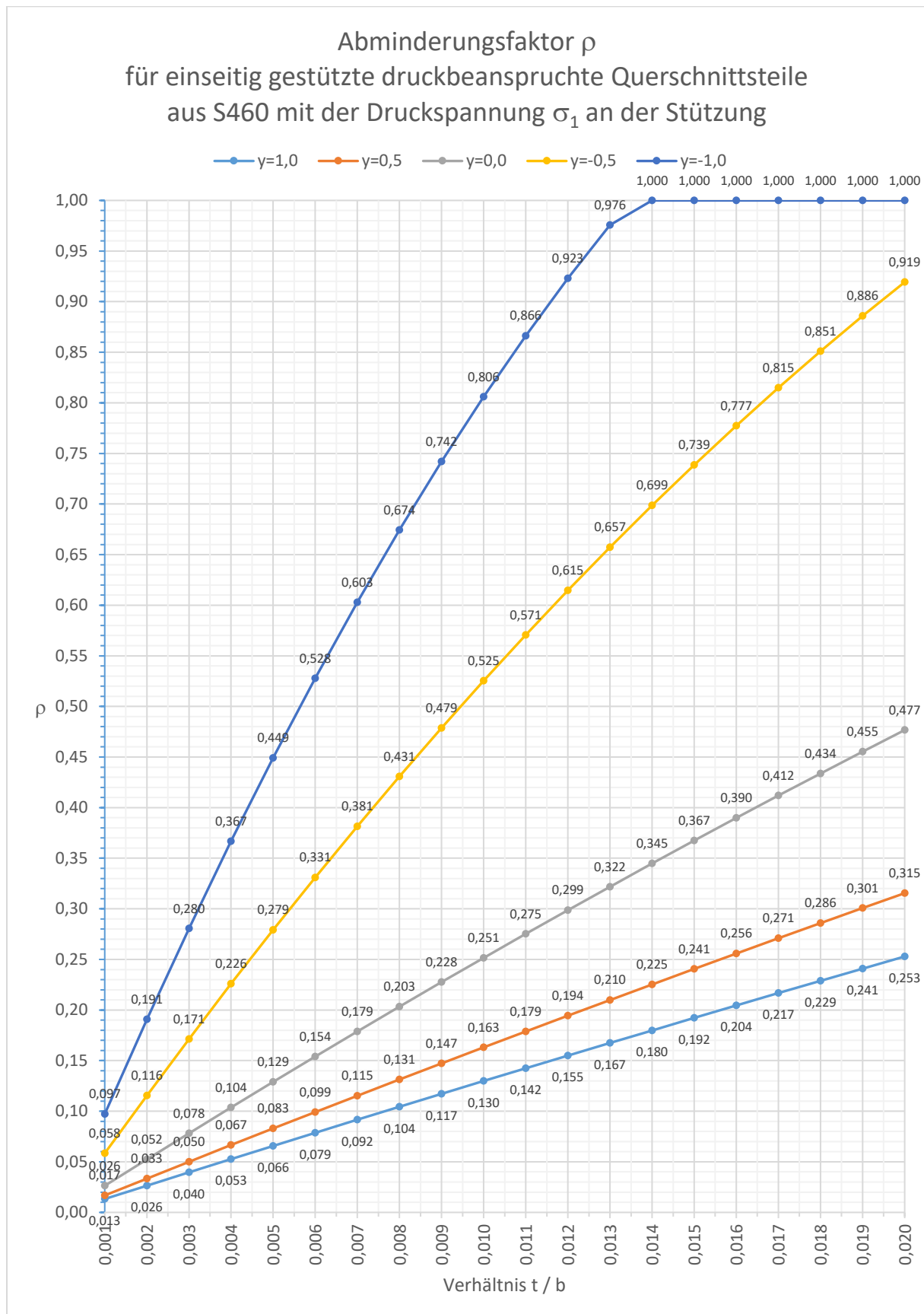


Abminderungsfaktor ρ
für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile
aus S440 mit der Druckspannung σ_1 am freien Rand









Mit Hilfe dieser Diagramme können der Abminderungsfaktor für das Beulen ρ und ggf. notwendige Zwischenwerte sehr schnell bestimmt werden.

Für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile ist die wirksame Breite b_{eff} entsprechend der Vorgaben aus [1], Tabelle 4.2 zu bestimmen. Dabei wird unterschieden, ob sich der Maximalwert der Druckspannung σ_1 an der Stützung oder an freien Rand des Bleches befindet. Die entsprechenden Bestimmungsgleichungen sind nachfolgend angegeben.

Maximalwert der Druckspannung σ_1 an dem freien Blechrand

- für $1,0 > \psi \geq 0,0$ $b_{eff} = \rho * c$
- für $\psi < 0,0$ $b_{eff} = \rho * b_c = \frac{\rho * c}{1 - \psi}$

Maximalwert der Druckspannung σ_1 an der Stützung des Bleches

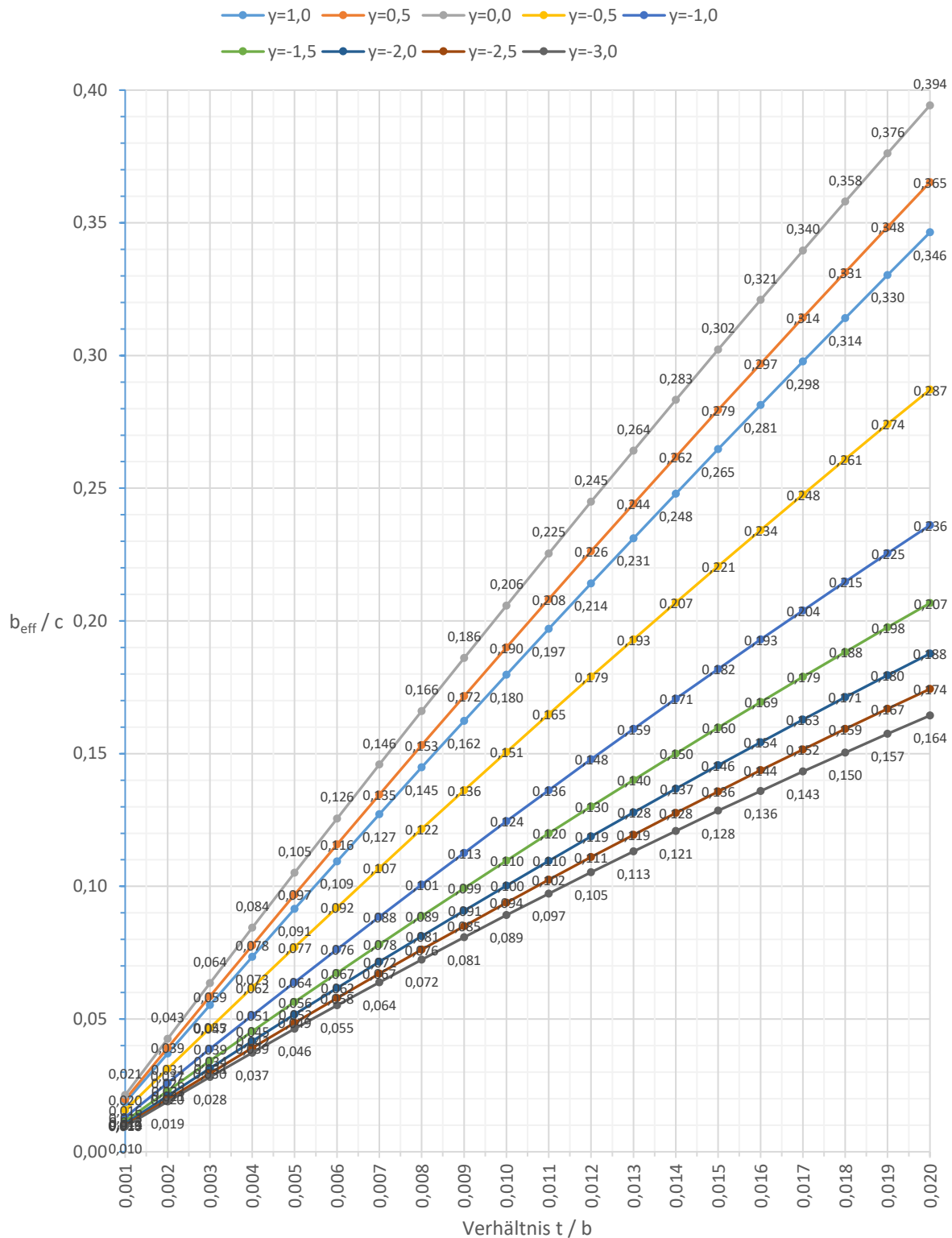
- für $1,0 > \psi \geq 0,0$ $b_{eff} = \rho * c$
- für $\psi < 0,0$ $b_{eff} = \rho * b_c = \frac{\rho * c}{1 - \psi}$

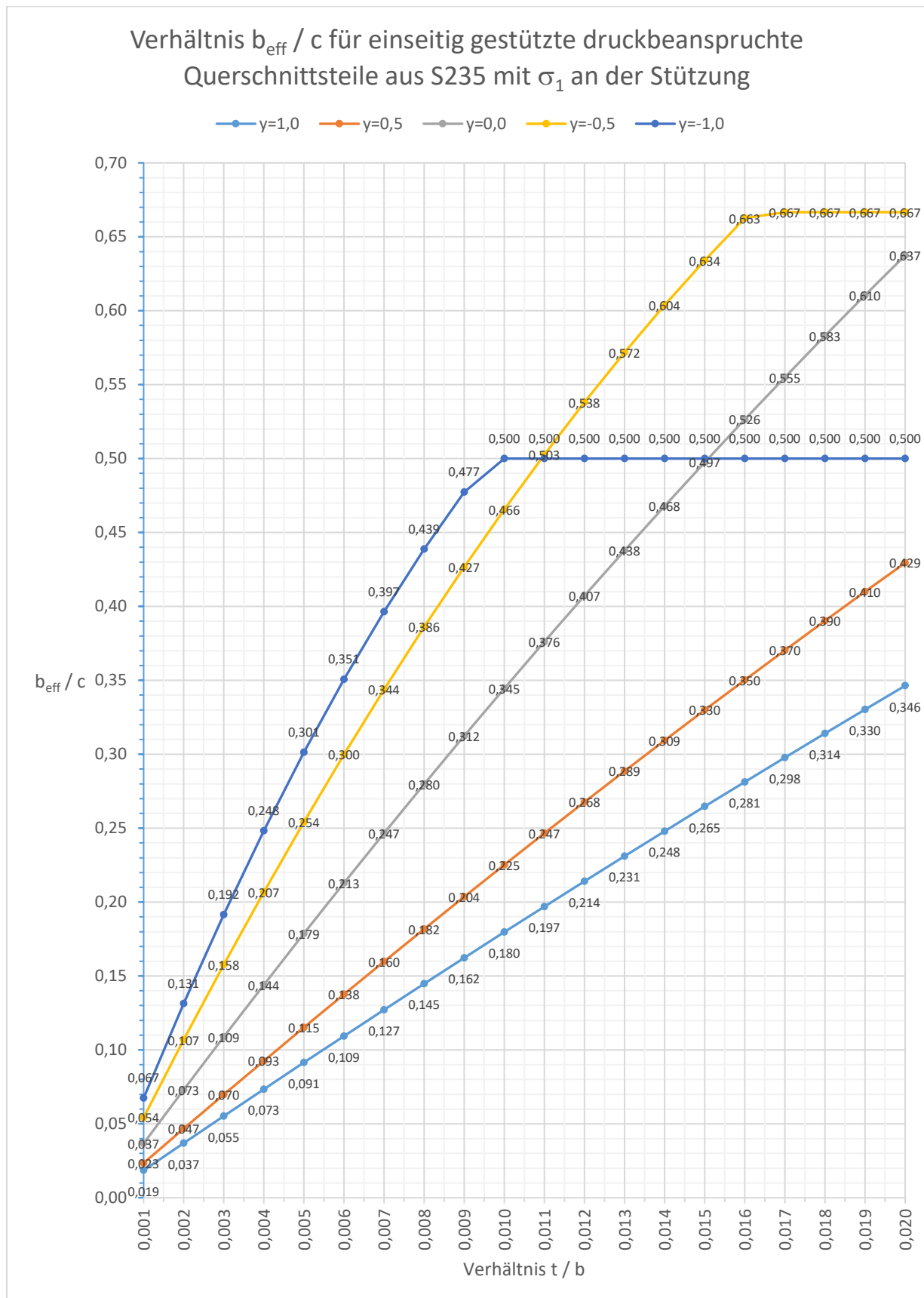
Aus dieser Zusammenstellung wird ersichtlich, dass die Gleichungen zur Ermittlung der wirksamen Querschnittsbreite b_{eff} grundsätzlich identisch sind. Für die Ermittlung der entsprechenden Breiten des Blechfeldes werden zusätzlich zu den schon bekannten, der folgenden Wert c – Breite des gesamten Blechfeldes – benötigt. Diese Breite des Blechfeldes c bei Winkelprofilen kann mit der Profilhöhe h gleichgesetzt werden.

Für das geometrische Verhältnis $0 \leq \frac{t}{b} \leq 0,02$, die zulässigen Randspannungsverhältnisse ψ und die in

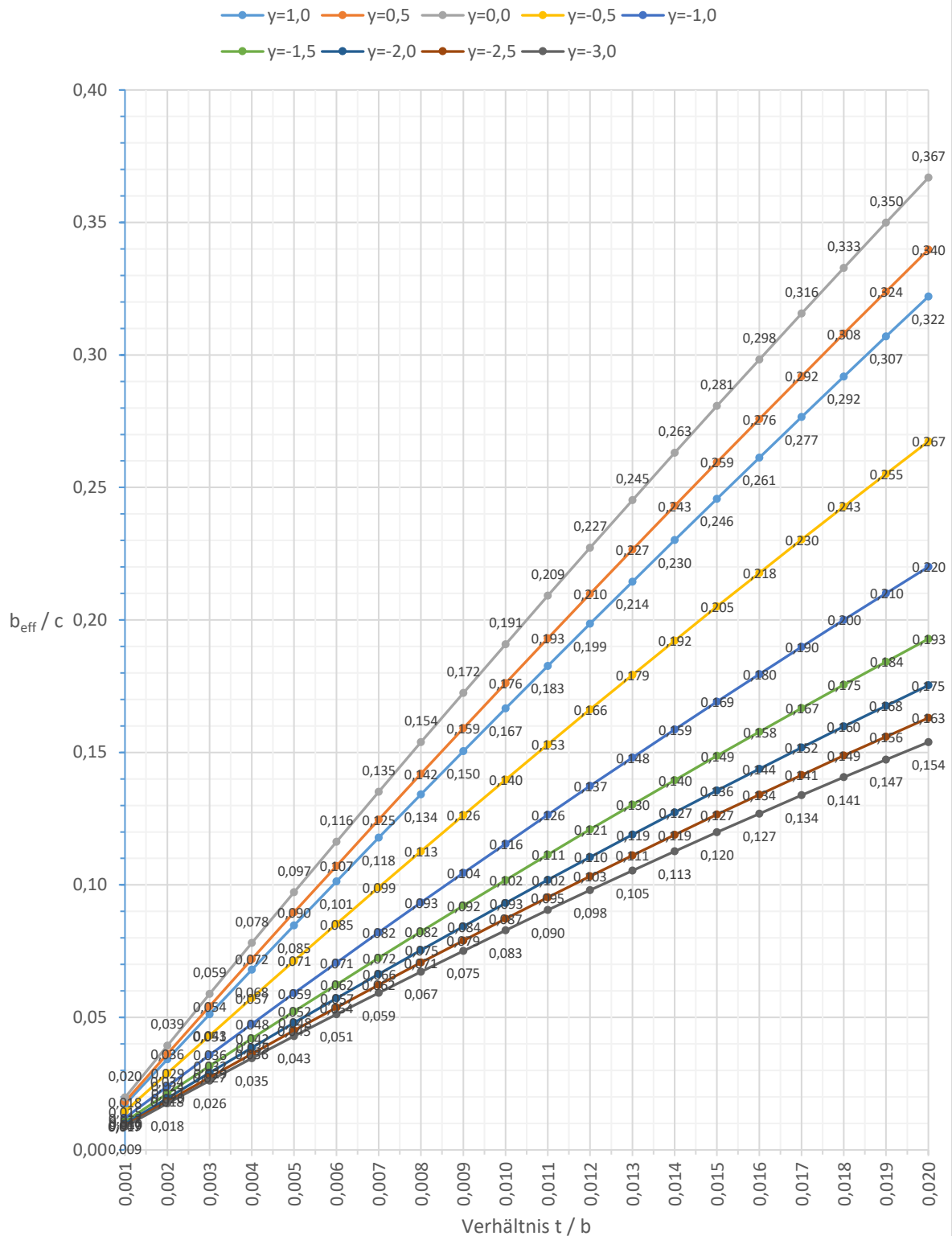
Deutschland üblichen Stahlsorten wurde die Verhältnisse $\frac{b_{eff}}{c}$ ermittelt. Die Ergebnisse sind in den folgenden 12 Diagrammen graphisch aufbereitet. Hierbei ist wiederum zu beachten, dass ψ in den Diagrammen als y angegeben wird.

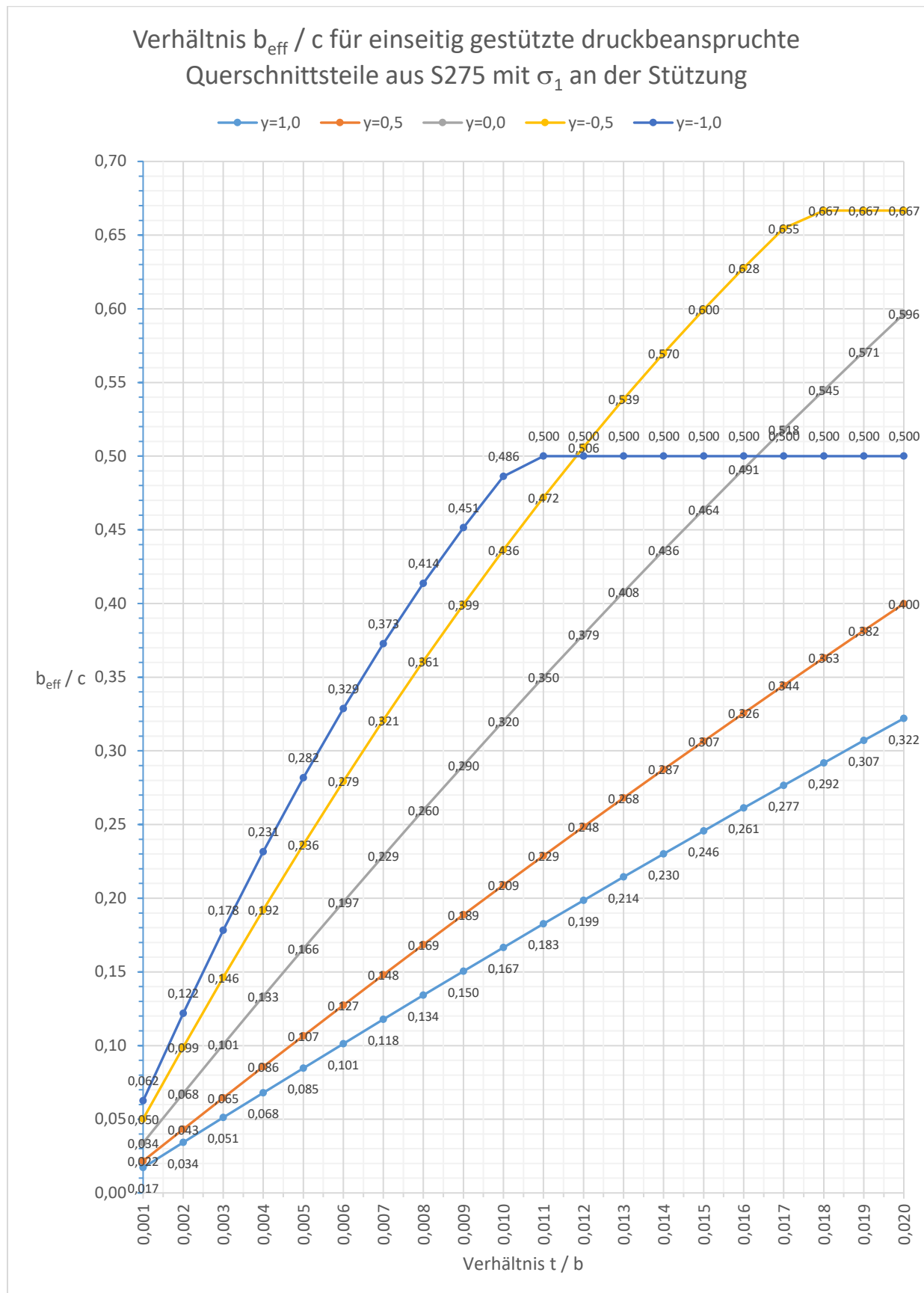
Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S235 mit σ_1 am freien Rand



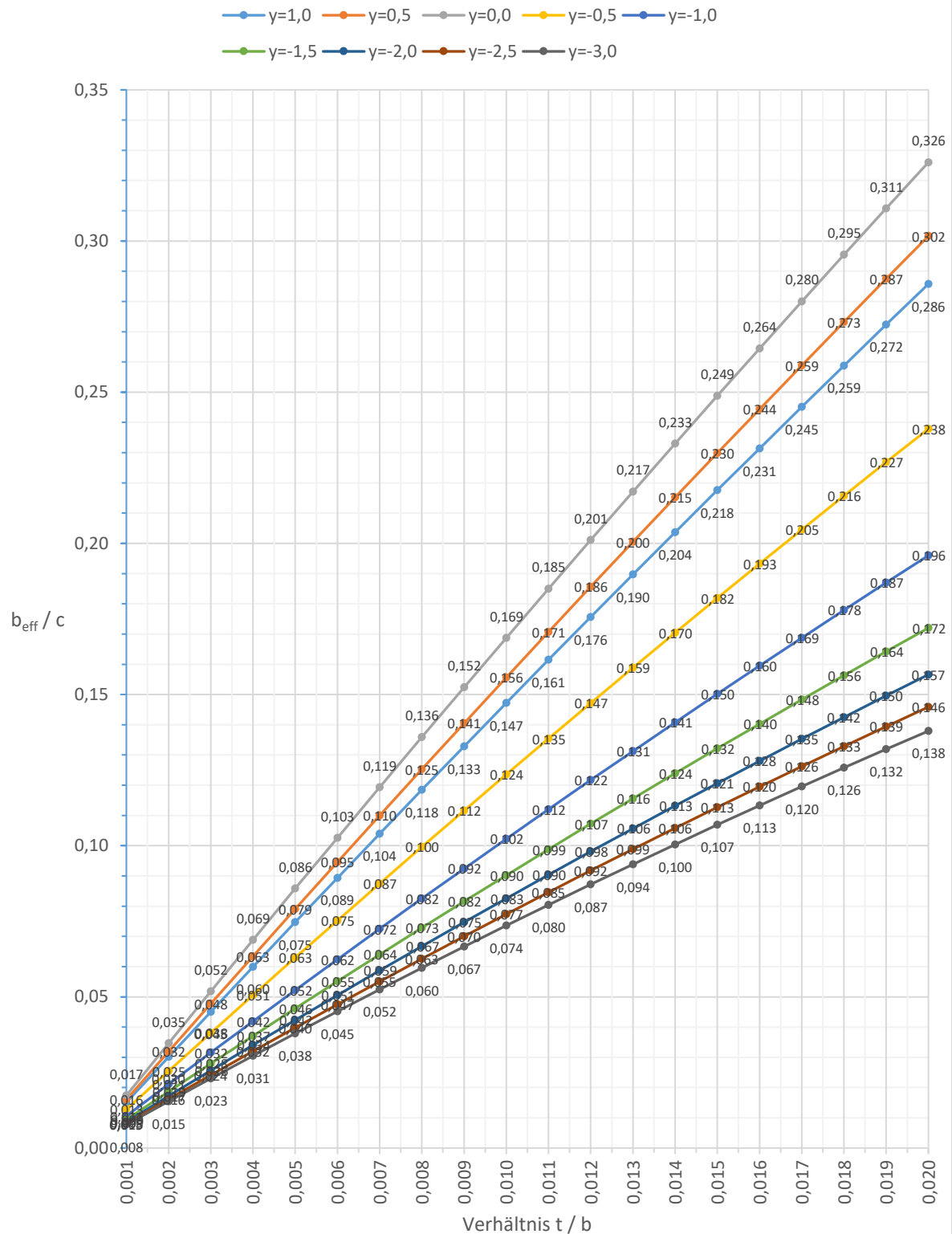


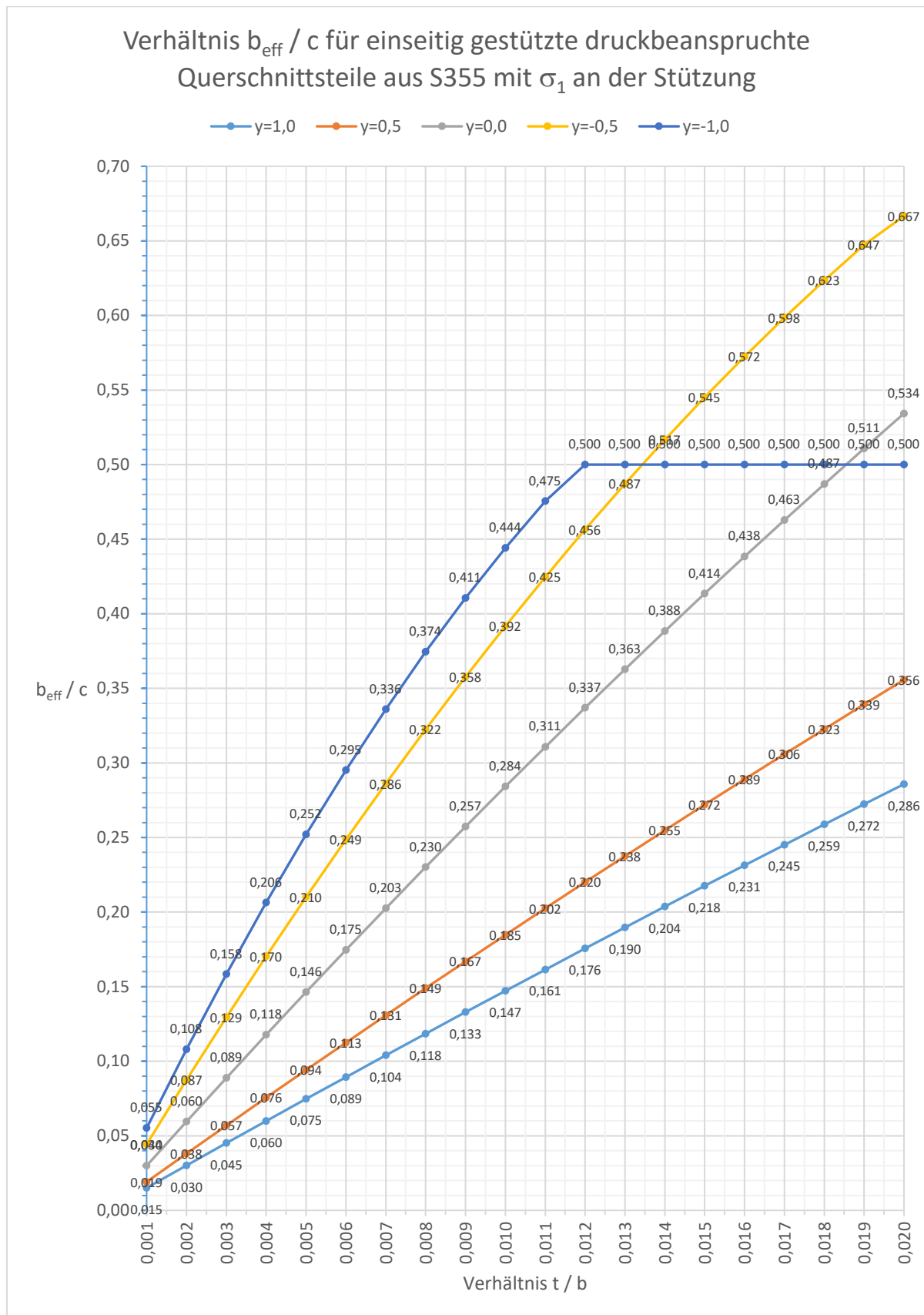
Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S275 mit σ_1 am freien Rand



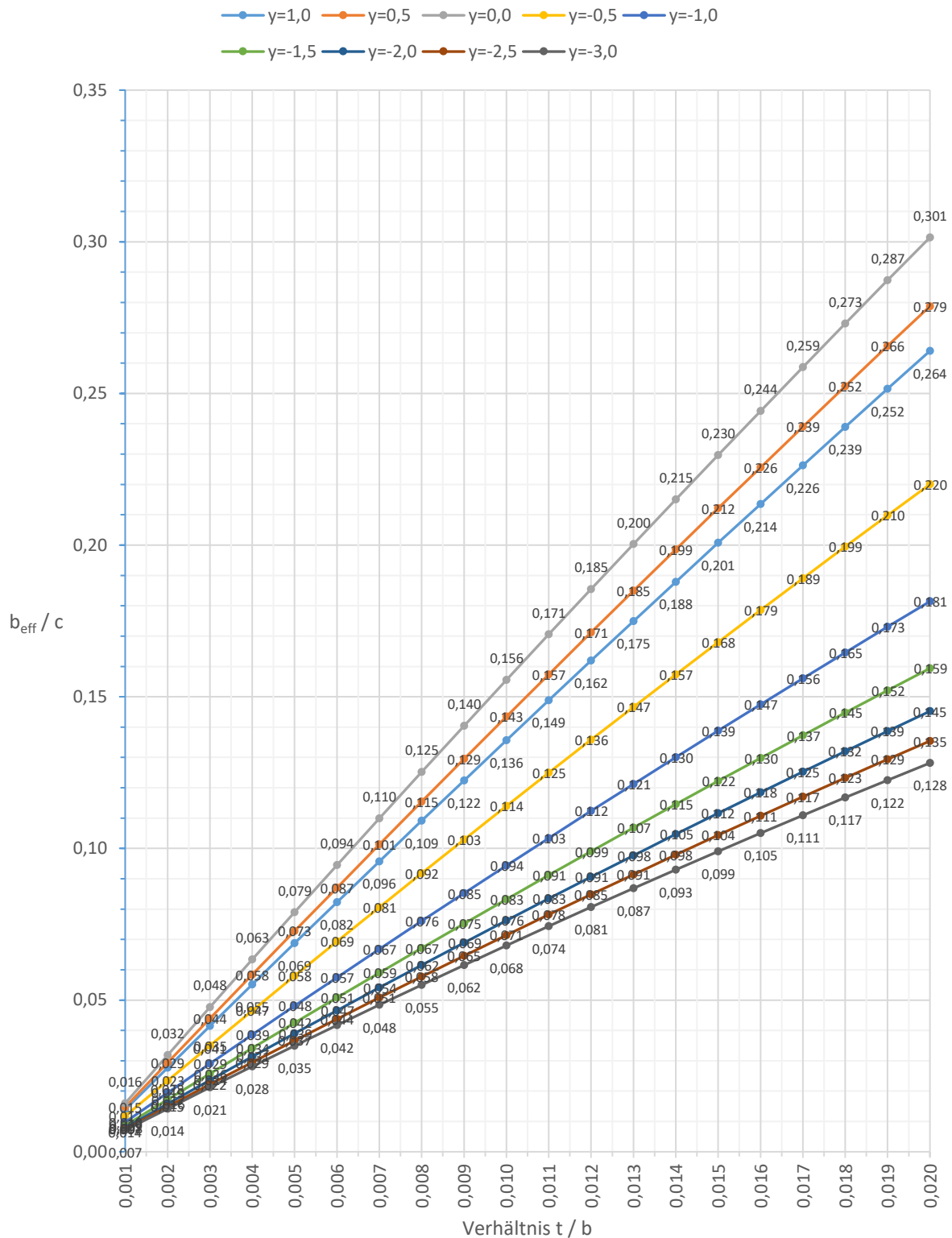


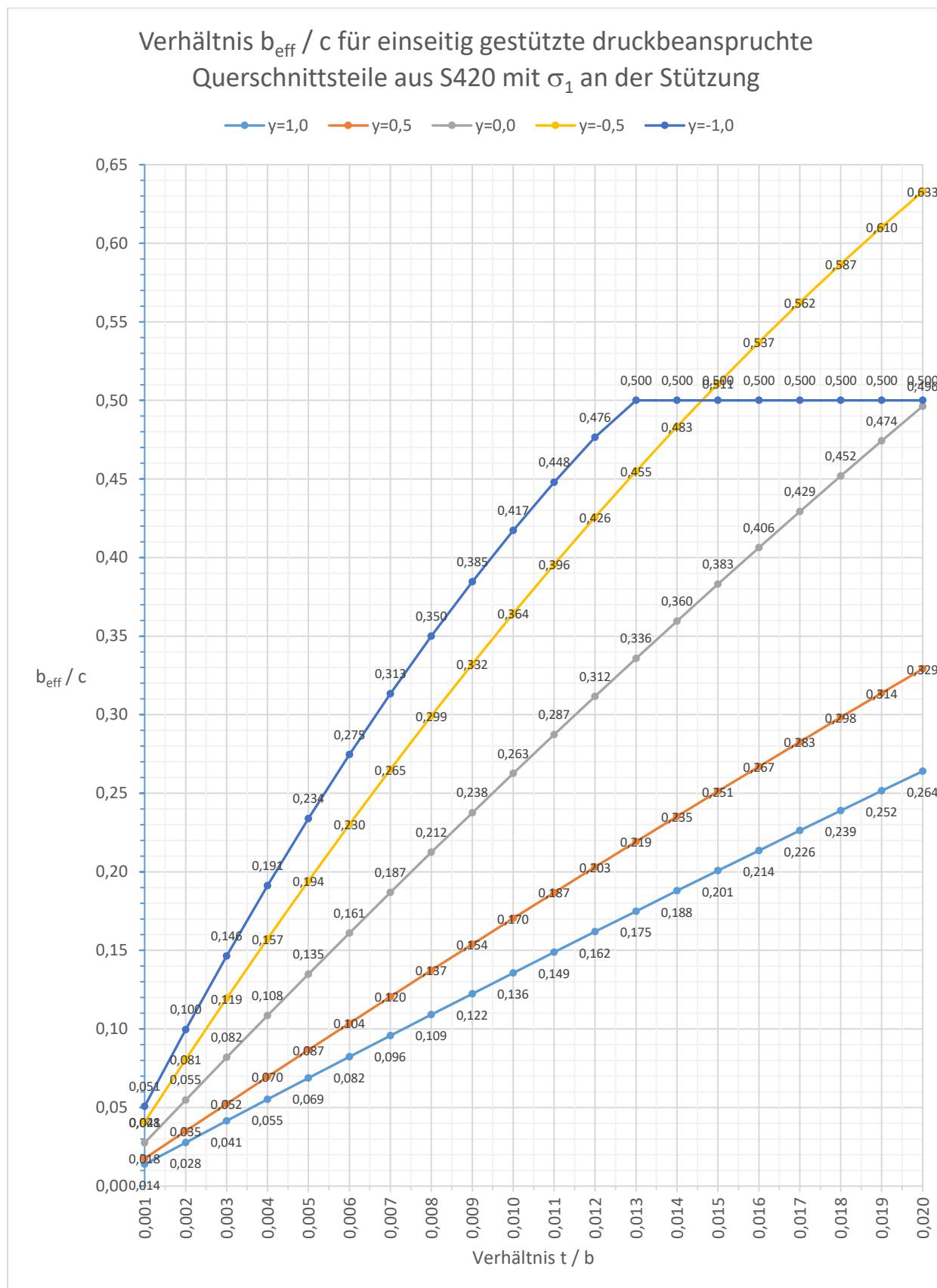
Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S355 mit σ_1 am freien Rand



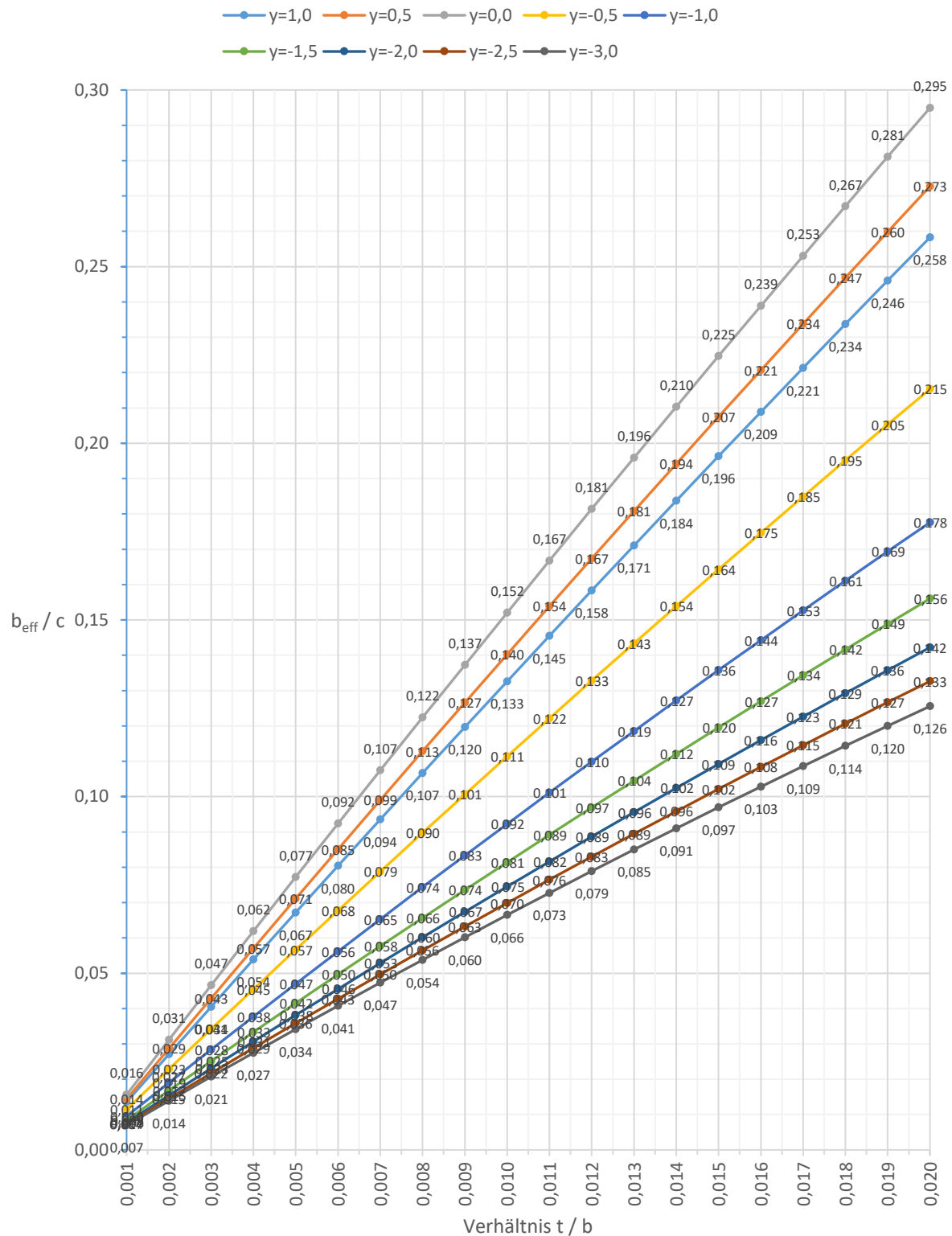


Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S420 mit σ_1 am freien Rand

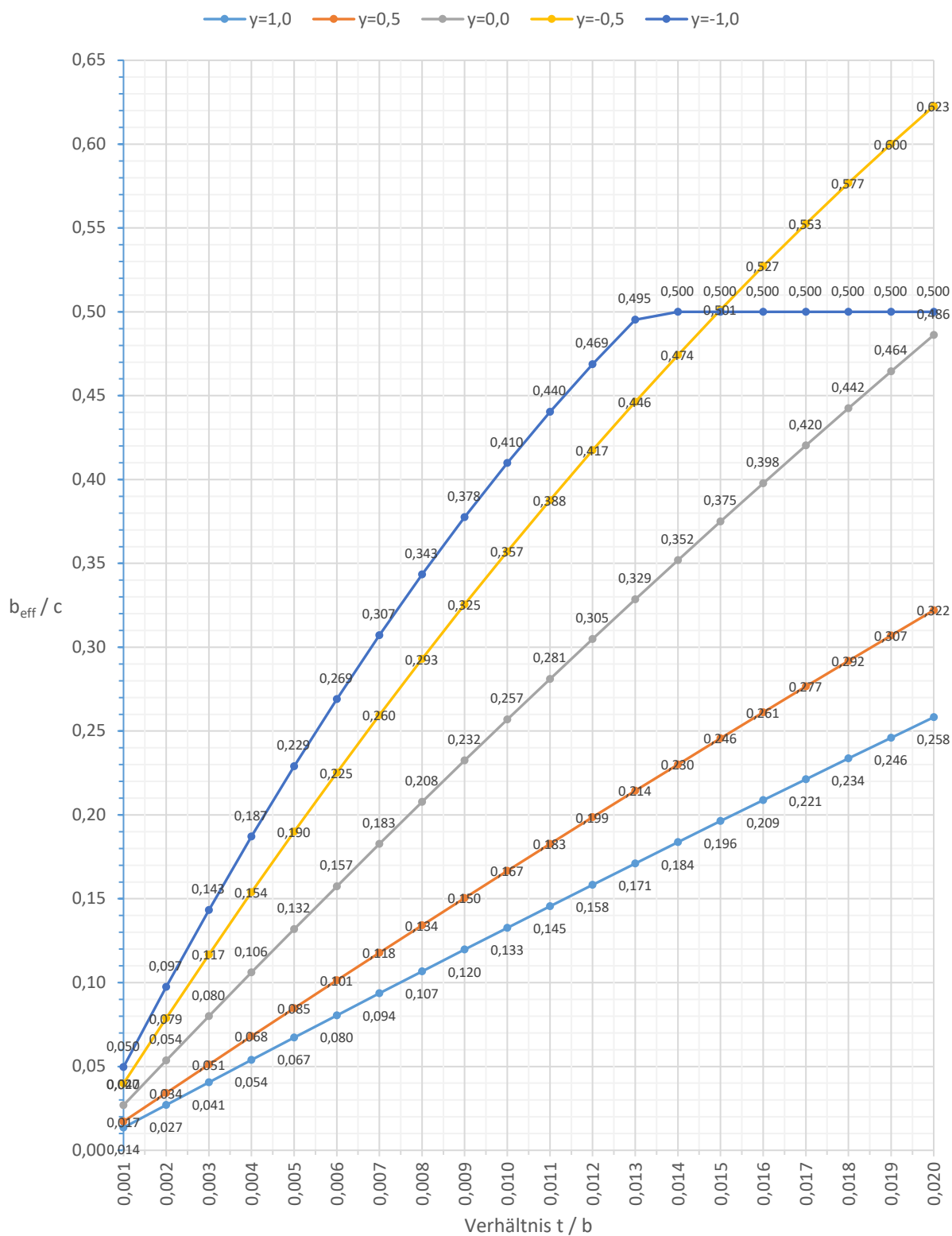




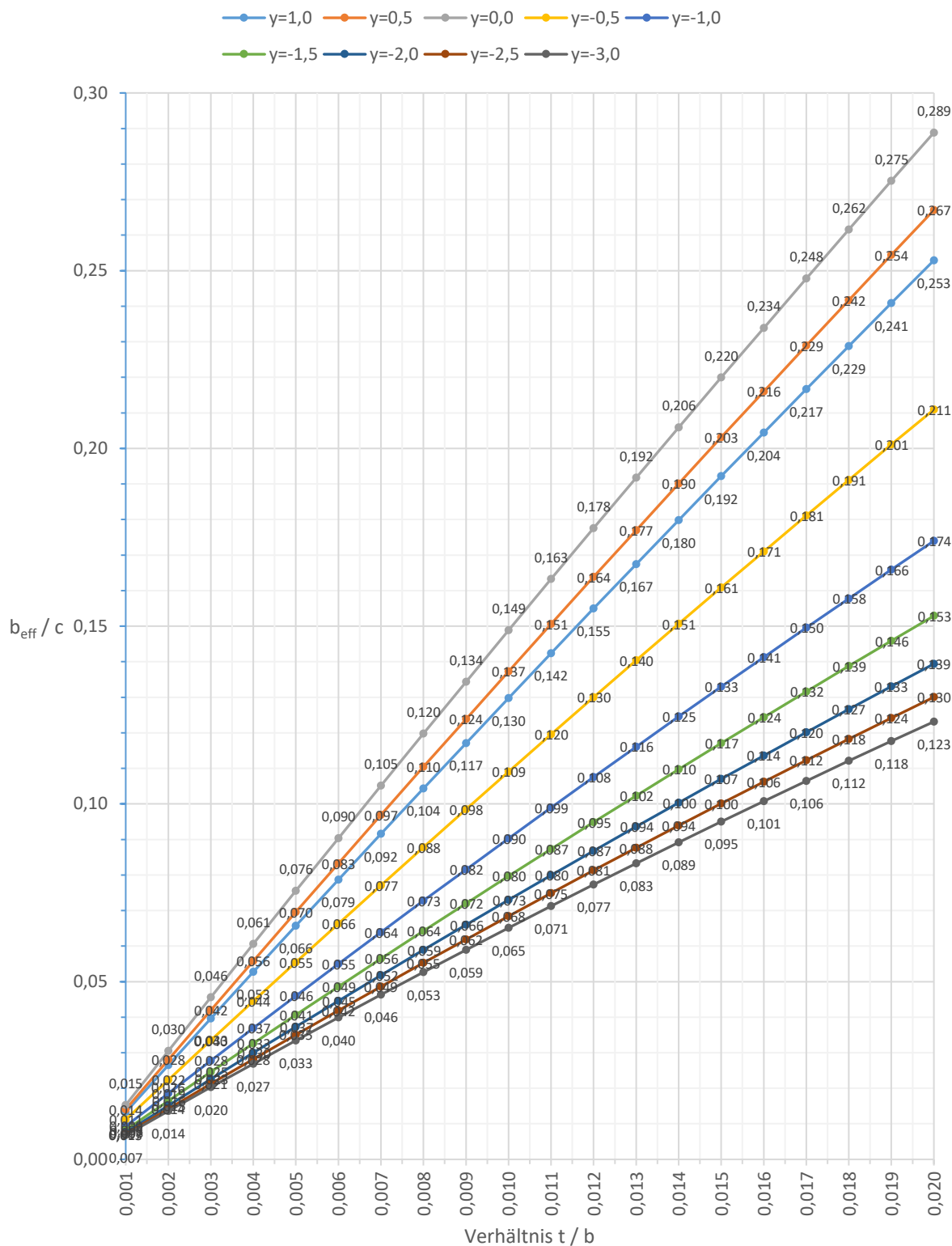
Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S440 mit σ_1 am freien Rand

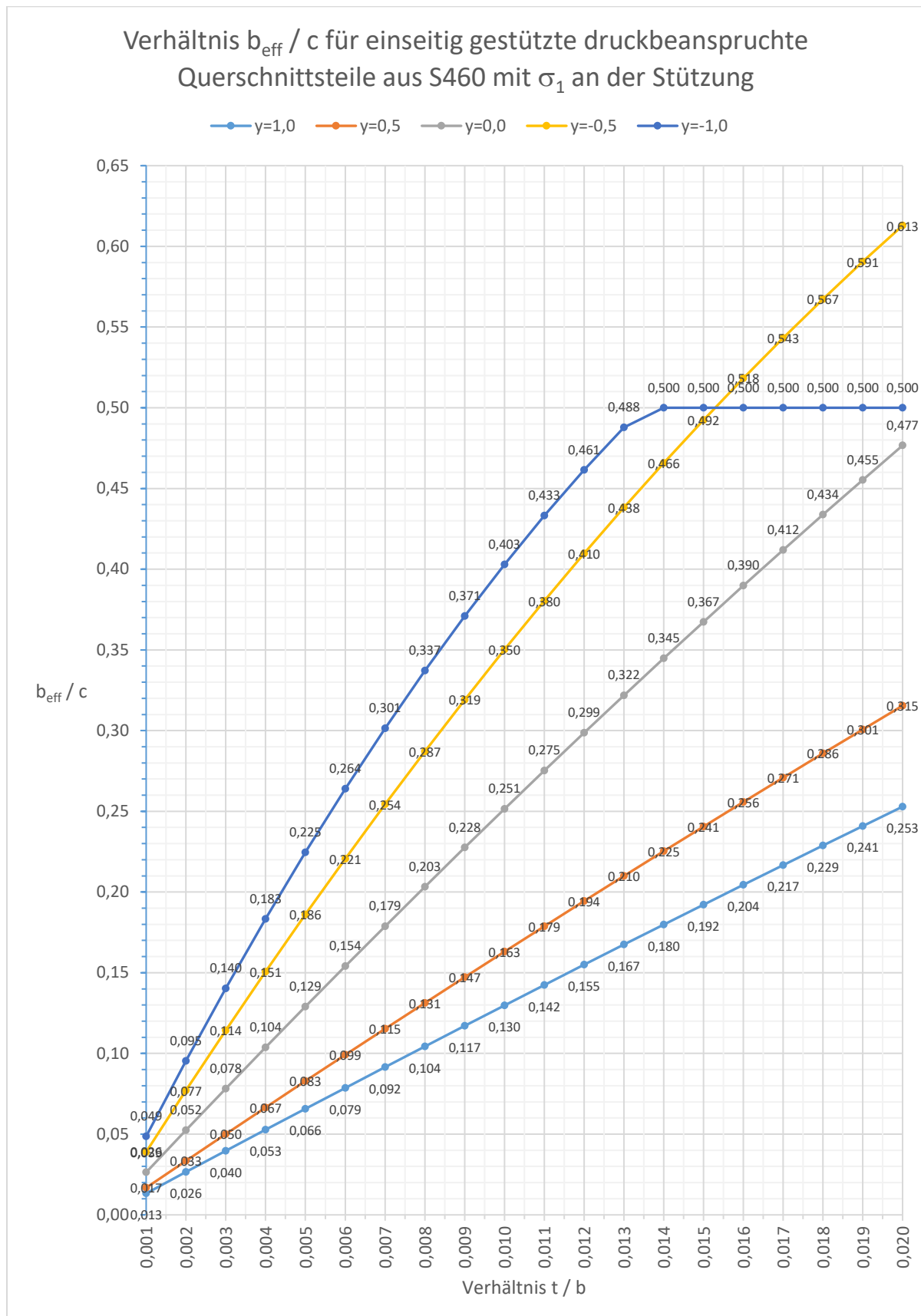


Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S440 mit σ_1 an der Stützung



Verhältnis b_{eff} / c für einseitig gestützte druckbeanspruchte
Querschnittsteile aus S460 mit σ_1 am freien Rand





Durch diese Diagramme können die wirksamen Breite b_{eff} von ebenen druckbeanspruchten Einzelblechfelder ohne Längssteifen aber mit einseitiger Stützung einfach und schnell berechnet werden.

Literatur:

- | | | |
|-----|--|--|
| [1] | DIN EN 1993-1-5:2019-10 | Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile |
| [2] | DIN EN 1993-1-5/Berichtigung 1:2020-07 | Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile |
| [3] | DIN EN 1993-1-5/NA:2018-11 | Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile |
| [4] | DIN EN 1993-1-1:2010-12 | Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau |

Impressum

Landesamt für Bauen und Verkehr
Bautechnisches Prüfam
T. Schellenberg
Gulbener Straße 24
03046 Cottbus
Telefon 03342 4266-3400
Telefax 03342 4266-7608
BPA@LBV.Brandenburg.de
<https://lbv.brandenburg.de>