Ermittlung des an einer Wasserentnahmestelle verfügbaren Löchwasserdurchflusses

TECHNISCHE ERLÄUTERUNGEN

Die vorliegenden technischen Erläuterungen beschreiben ein hydraulisches Berechnungsverfahren zur Ermittlung des an einer Wasserentnahmestelle (Hydranten) verfügbaren minimalen Löschwasserdurchflusses, mit dem von den gültigen Vorschiften vorgeschriebenen Mindestdruck, ohne hierfür ein detailliertes Modell des Versorgungsnetzes erstellen zu müssen. In der Tat erweist sich - bei beschränkter Kenntnis seiner internen Funktionsweise - die detaillierte Netzmodellierung als nicht durchführbar, so dass eine *überschlägige* Simulation unerlässlich wird.

Dieses Verfahren baut auf dem Postulat auf, dass an einem gegebenen Punkt das gesamte vermaschte oder verzweigte Netz, ohne Druckerhöhungs- oder -minderungsanlage (Abb. 1) sich wie eine äquivalente Rohrleitung mit fiktiven hydraulischen Merkmalen verhält (d_i, l_i, k_i) (Abb. 2). Somit ergibt sich die Berechnung der Druckverluste im realen Netz zu der vereinfachten Formel $\Delta p = c_i \cdot Q^2$ *[Darcy-Weisbach, Strickler]* mit $c_i = (4^{10/3} \cdot l_i) \div (k_{s,i}{}^2 \cdot d_i{}^{16/3} \cdot \pi^2)$.

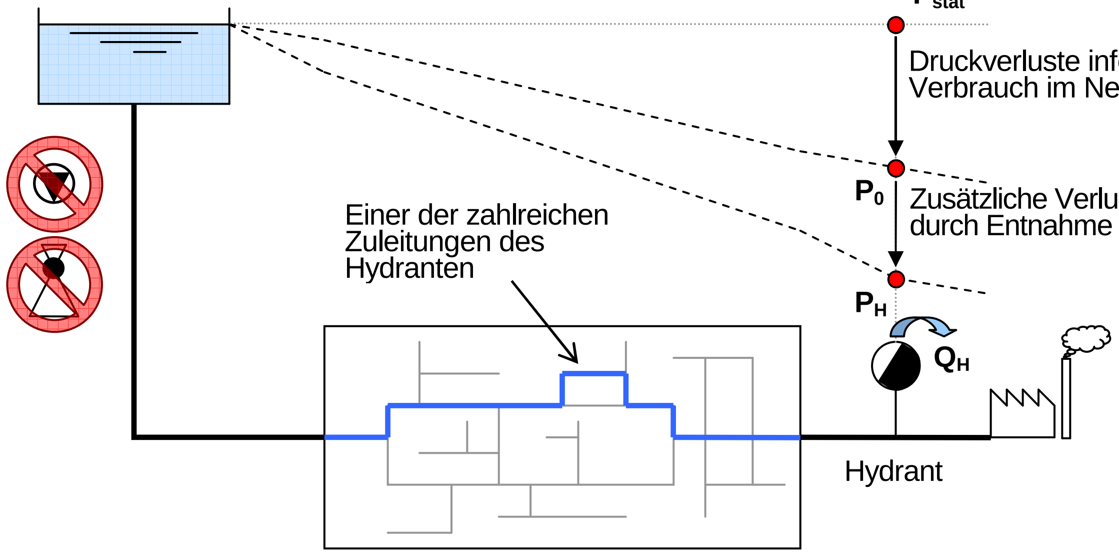


Abb. 1

Versorgungsnetz

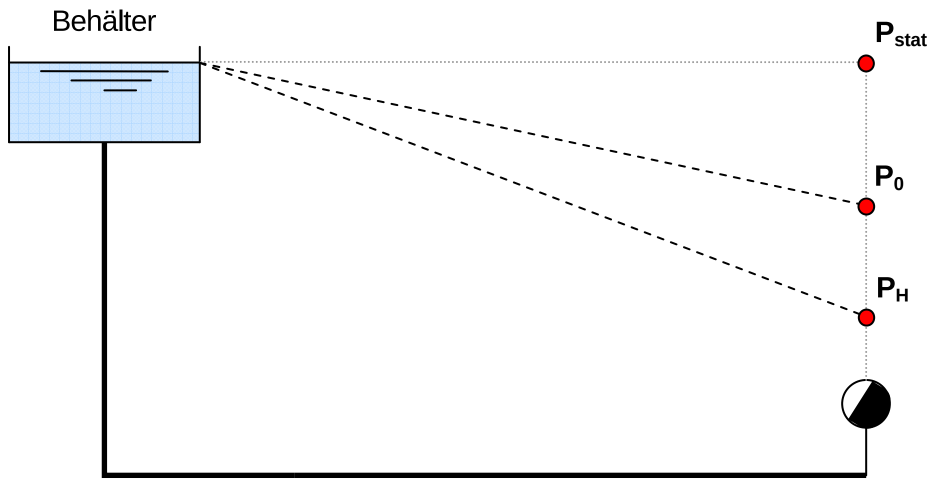


Abb. 2 **Aquivalente Rohrleitung d_i, l_i, k_i** Hydrant

Es sei darauf hingewiesen, dass das System Behälter (mit seinem Wasserspiegel, der den Druck im Netz bestimmt)-Netz (mit seinen hydraulischen Merkmalen d_n, l_n, k_n)-Hydrant (mit seiner Lokalisierung im Netz) eine feste Einheit bildet und jede daran vorgenommene Änderung die auf der vorliegenden Berechnung basierenden Schlussfolgerungen ungültig macht.

Das tatsächliche hydraulische Verhalten des Netzes (tatsächliche Verbräuche und tatsächliche Rauhigkeitsbeiwerte der Rohreitungen) wird durch eine vereinfachte Darstellung wiedergegeben, die anhand zweier vor Ort an der betrachteten Entnahmestelle durchgeführter Druckmessserien kalibriert wird. Die Messdaten ermöglichen in einem späteren Schritt die Ermittlung einer Polynomfunktion des 2. Grades, die die Beziehung zwischen dem dynamischem Druck am Hydranten und der hierüber entnommenen Wassermenge beschreibt, ohne die interne Funktionsweise des Netzes zu berücksichtigen.

Als Erstes ist zur Ermittlung des von dem Behälter auf die Entnahmestelle ausgeübten statischen Druckes $\mathbf{P_{stat}}$ (in Meter Wassersäule oder bar, *alle Drücke sind in der gleichen Einheit auszudrücken*) die Höhenlage des Hydranten zu nivellieren.

Die erste Messserie besteht aus mindestens 5 Messungen des dynamischen Druckes am Hydranten. Im Weiteren wird sich zeigen, dass es wichtig ist diese Messungen in einem Zeitraum durchzuführen, *in dem der Verbrauch im Netz konstant bleibt*:

- $\mathbf{P_0'}$ für Q = 0 m^3/h oder l/s, *alle Durchflüsse sind in der gleichen Einheit auszudrücken*
- $\mathbf{P_1}$ für $Q = Q_1$
- $\mathbf{P_2}$ für $Q = Q_2$
- $\mathbf{P_3}$ für $Q = Q_3$
- …………………..
- $\mathbf{P_0''}$ für Q = 0 m^3/h oder l/s

Die Betriebsdrücke P_0' et P_0'', die ohne Wasserentnahme am Hydranten gemessen wurden, geben Auskunft über die während dieser Kampagne durch Einzelverbräuche verursachten Druckverluste im Netz. Andererseits ermöglichen die Werte P_1 bis P_h die Ermittlung der durch die Wasserentnahme am Hydranten verursachten *zusätzlichen* Druckverluste im Netz.

Da das Versorgungsnetz sich wie ein äquivalenter Rohrstrang mit einer quadratischen Beziehung zwischen dem Durchfluss und den daraus resultierenden Druckverlusten verhält, wird mit diesen Messungen eine Parabel ermittelt, die die Beziehung zwischen dem dynamischen Druck am Hydranten und der entnommenen Wassermenge beschreibt (Abb. 3 der nächsten Seite):

(1) $P = C - A \cdot Q^2 - B \cdot Q$

mit : • $C = P_0 = (P_0' + P_0'') \div 2$

• A und B zwei Parameter, die durch die Methode der kleinsten Quadrate ermittelt werden *[Algebra]*

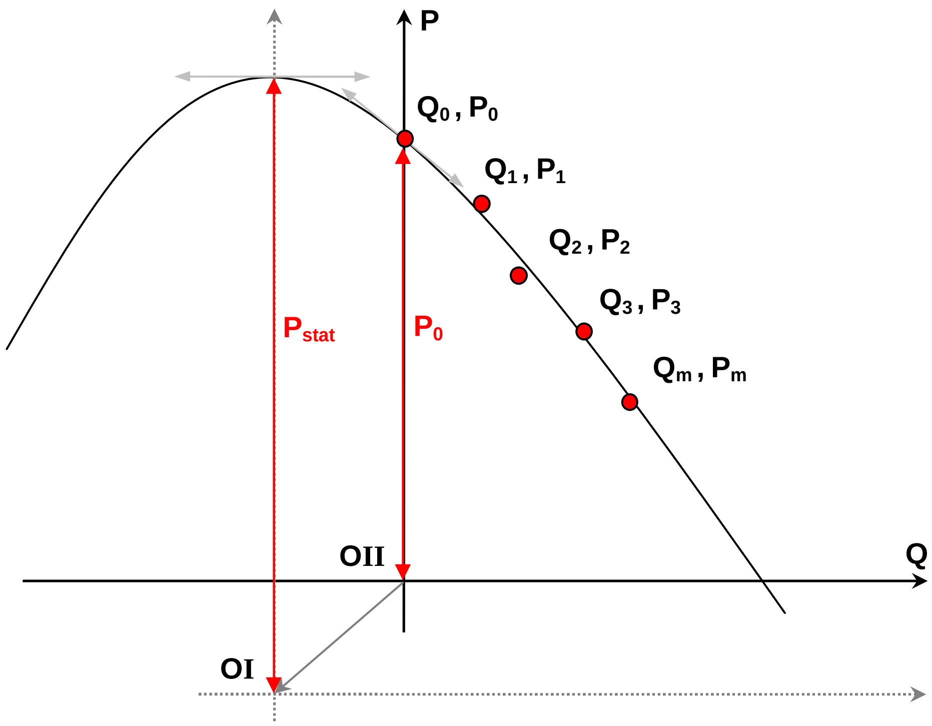


Abb. 3

Die theoretische Entwicklung dieses Gedankenganges führt zu folgenden Eigenschaften:

- A ist eine *Konstante,* die von den hydraulischen Merkmalen des Netzes auf dem Zustrom zur Wasserentnahmestelle (Paramater d_n, l_n, k_n der verschiedenen Stränge) bestimmt wird, unabhängig des Einzelverbrauchs im Netz. Jegliche Änderung dieses Systems (Änderung der Fließwege im Netz, Wahl einer anderen Wasserentnahmestelle) ändert den Wert des Parameters A und macht die auf der vorliegenden Berechnung basierenden Schlussfolgerungen ungültig. Die Algebra zeigt übrigens, dass der Parameter A die Form der darstellenden Kurve des Polynoms bedingt, die dann für das gegebene System Netz/Hydrant unveränderlich bleibt.

- B ist eine *lineare* Funktion der durch die verschiedenen Stränge zur Wasserentnahmestelle durchgeleiteten Wassermengen. Der Parameter B verändert sich in Abhängigkeit der im Netz herrschenden Bedingungen der Einzelverbräuche.

- C entspricht dem dynamischen Druck an der Wasserstelle, ohne dass Wasser hierüber entnommen wird.

Entsprechend der theoretischen Beweisführung kann vereinfacht geschrieben werden, dass:

$$P = \underbrace{P_{stat} - \Sigma(c_n \cdot Q_n^2)}_{C} - \underbrace{f(c_n)}_{A = c_i} \cdot Q^2 - \underbrace{2 \cdot f(c_n \cdot Q_n)}_{B} \cdot Q$$

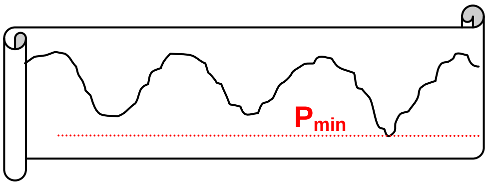
Das Element $\Sigma(c_n \cdot Q_n^2)$ steht für die Summe der Druckverluste im Zustrom zur Wasserentnahmestelle (Abb. 1). Die Differenz $P_{stat} - \Sigma(c_n \cdot Q_n^2)$ ergibt somit den dynamischen Druck an dieser Wasserentnahmestelle.

Daraus resultiert ebenfalls, dass übertragen auf den Fall des Nullverbrauchs im Netz (Fall « Nacht »), das Polynom *(1)* sich wie folgt ergibt (B, lineare Funktion der Durchflüsse Q_n, ist gleich null):

$$P = P_{stat} - c_i \cdot Q^2$$

Wie in Abbildung 3 der vorhergehenden Seite dargestellt findet lediglich ein Übertrag des Polynoms (1) von dem Koordinatensystem mit Ursprung OII in das auf dem Ursprung OI basierende System statt, mit einer unveränderlichen Form der Kurve, da A konstant ist.

In der Folge wird die Messkampagne mit einem auf der Wasserentnahmestelle montierten Druckaufnehmer durch eine Langzeitmessung vervollständigt. Diese Messungen ermöglichen die Ermittlung des minimalen dynamischen Druckes $\mathbf{P_{min}}$ an der Entnahmestelle zum Zeitpunkt der größten Spitzenverbräuche im Netz:



Der Tag der größten Spitzenverbräuche entspricht der folgenden Parabel:

$$P' = C' - A' \cdot Q^2 - B' \cdot Q$$

mit :
- C' gleich dem dynamischen Druck an der Wasserentnahmestelle = P_{min}
- A' = A, da dieser Parameter eine von dem Verbrauch im Netz unabhängige Konstante ist
- B' = **?**

Zur Ermittlung des Wertes des Parameters B' gehen wir davon aus, dass zum Zeitpunkt der größten Spitzenverbräuche die prozentuale Verteilung der einzelnen Verbräuche im Netz gleich der ist, die während der ersten Messkampagne herrschte. Diese Hypothese wird üblicherweise für die hydraulische Berechnung der Versorgungsnetze angewendet. So kann nachgewiesen werden, dass die durch die verschiedenen Stränge durchgeleiteten Wassermengen Q_n ebenfalls proportional gestiegen sind, d.h. dass $Q_n' = k \cdot Q_n$. Aus der Tatsache, dass der Parameter B eine lineare Funktion der durch die verschiedenen Stränge zur Wasserentnahmestelle durchgeleiteten Wassermengen ist, ergibt sich:

(2) • $B' = k \cdot B$

Die theoretische Entwicklung diese Gedankenganges zeigt, dass der Koeffizient k eine Funktion von P_{stat}, P_0 und P_{min} ist. Nämlich:

(3) $k^2 = (P_{stat} - P_{min}) \div (P_{stat} - P_0)$

Man stellt fest, dass wenn der Wert P_0 sich dem Wert P_{stat} nähert k unendlich wird. Die Erfahrung zeigt, dass die Nenner, deren Wert sich Null annähern, die aus solchen Berechnungen gezogenen Schlussfolgerungen sehr ungenau bzw. ungültig machen. Hieraus resultiert die Anweisung Zeiträume mit hohen Einzelverbräuchen und somit mit hohen Druckverlusten zur Durchführung der Messkampagne der Kurzzeit-Messungen zu nutzen.

Letztlich wird die Berechnung der verfügbaren Löschwassermenge mit z. B. einem Mindestdruck von 15 mWS (1,50 bar) an der Wasserentnahmestelle durch die Auflösung der nachfolgenden Gleichung des 2. Grades möglich:

$$\boxed{- A \cdot Q^2 - B \cdot \sqrt{(P_{stat} - P_{min}) \div (P_{stat} - P_0)} \cdot Q + P_{min} = 15}$$

Wie Abbildung 4 zeigt bewegt sich der Ursprung OII auf einer vektoriellen Kurve $[k \cdot x_{k=1}, k^2 \cdot y_{k=1}]$, deren Form durch die prozentuale *(als konstant angenommene)* Verteilung der unterschiedlichen einzelnen Verbräuche im Netz bestimmt ist. Jede maßgebliche Änderung dieser Verteilung (Anschluss oder Verlagerung eines Großverbrauchers) wird die auf dieser Berechnung basierenden Schlussfolgerungen ungültig machen.

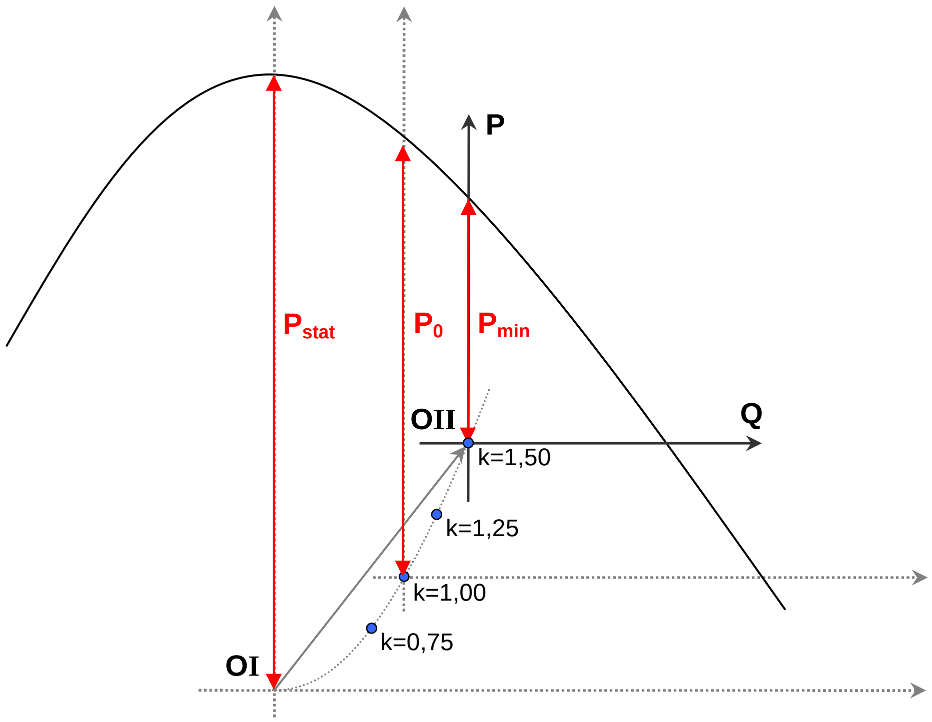
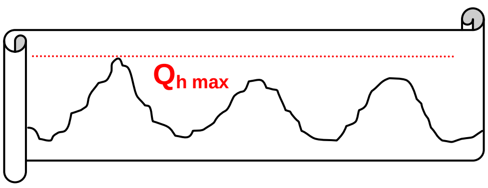


Abb. 4

Alternativ zur Langzeitmessung kann der Koeffizient k auch auf der Basis der am Ausgang des Behälters gemessenen Durchflüsse ermittelt werden. In der Tat kann unter Berücksichtigung der Logik, die zu Formel *(2)* führt Folgendes geschrieben werden:

(4) $k = Q_{h\,max} \div Q_h$

mit :
- Q_h gleich dem stündlichen Verbrauch im Netz *während der Messkampagne des dynamischen Druckes*
- Q_{hmax} gleich dem größten stündlichen am Behälterausgang gemessenen Verbrauch im Verteilernetz



Erneut wird die Berechnung der verfügbaren Löschwassermenge durch die Auflösung der nachfolgenden Gleichung des 2. Grades möglich, wobei $P_{min} = P_{stat} - k^2 \cdot (P_{stat} - P_0)$:

$$\boxed{- A \cdot Q^2 - B \cdot (Q_{h\,max} \div Q_h) \cdot Q + P_{min} = 15}$$

Da die Messungen Q_h und Q_{hmax} am Anfang des Versorgungsnetzes erfolgen, und nicht an der Wasserentnahmestelle um die es in dieser Berechnung geht, berücksichtigen diese nicht die stochastische Langzeit-Verteilung der unterschiedlichen Einzelverbräuche im Netz. Somit ist die Formel *(4) eine ungenauere Beschreibung* der außergewöhnlichen Spitzenverbräuche als die Formel *(3)*, die aus der in situ Langzeit-Messkampagne entstand.

Hingegen ermöglicht dieser Ansatz *eine überschlagsmäßige Abschätzung* der zukünftigen Verfügbarkeit an Löschwasser bei steigendem Verbrauch $Q_{h\ max\ futur}$, vorausgesetzt dass die Verteilung der unterschiedlichen Einzelverbräuche nicht erheblich von dem ursprünglichen Gesamtbild abweicht.

Weitere Anwendungsmöglichkeit:

Die vorliegende Berechnungsmethode kann ebenfalls zur Ermittlung der Auswirkungen der zukünftigen Anbindung eines großen Einzelverbrauchers (z.B. eines neuen Wohngebietes) auf den Betriebsdruck in einer bestimmten Ortslage des Versorgungsnetzes angewandt werden. Die Wasserentnahme, welche den zukünftigen Verbraucher simuliert, erfolgt an einem Hydranten in unmittelbarer Nähe des Anschlusspunktes. Die Druckmessungen werden an einem Hydranten des betrachteten Versorgungsgebietes durchgeführt.

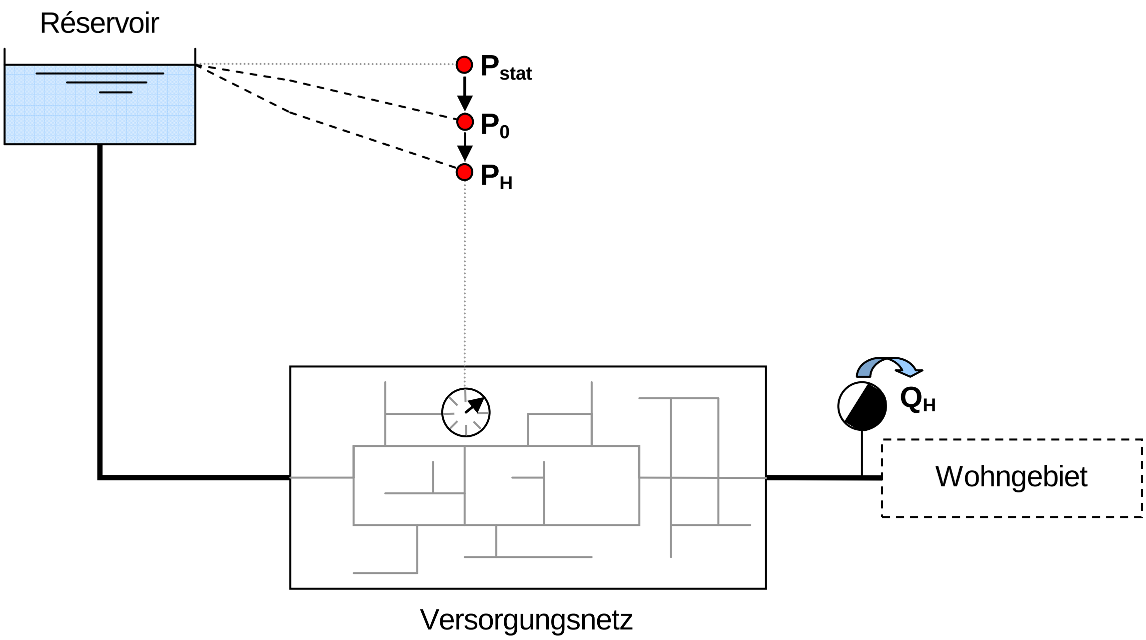


Abb. 5

Somit kann der zukünftige Betriebsdruck P_{serv} für verschiedene Verbräuche Q_H durch die Berechnung der folgenden Formel ermittelt werden:

$$\boxed{- A \cdot Q_H^2 - B \cdot \sqrt{(P_{stat} - P_{min}) \div (P_{stat} - P_0)} \cdot Q_H + P_{min} = P_{serv}}$$

Abschließende Bemerkungen:

Das am Hydranten während der Messkampagne entnommene Wasser addiert sich mit den bereits von den Einzelverbrauchern erfolgten Entnahmen und bedingt somit *zusätzliche* Druckverluste im Netz. Daraus folgt, dass die Neigung der Näherungskurve am Kreuzungspunkt mit der Ordinatenachse (P) zwingend negativ ist. Denn der Wert der Neigung des Polynoms an diesem Punkt ergibt sich zu $\delta P / \delta Q = -2 \cdot A \cdot Q - B = -B < 0$ für $Q = 0$ (siehe nachfolgende Abb. 6).

Wogegen die Formel $P = c - a \cdot Q^{1.85}$ *[Hazen-Williams]*, die oft in den angelsächsischen Ländern zur Beschreibung des Verhaltens der Bewässerungs- und Löschwassernetze verwendet wird, und manchmal zur Berechnung des Restdruckes in den Versorgungsnetzen Verwendung findet, eine Null-Neigung am Kreuzungspunkt mit der Ordinatenachse aufweist (Abb. 5). Denn $\delta P / \delta Q = -1.85 \cdot a \cdot Q^{0.85} = 0$ für $Q = 0$.

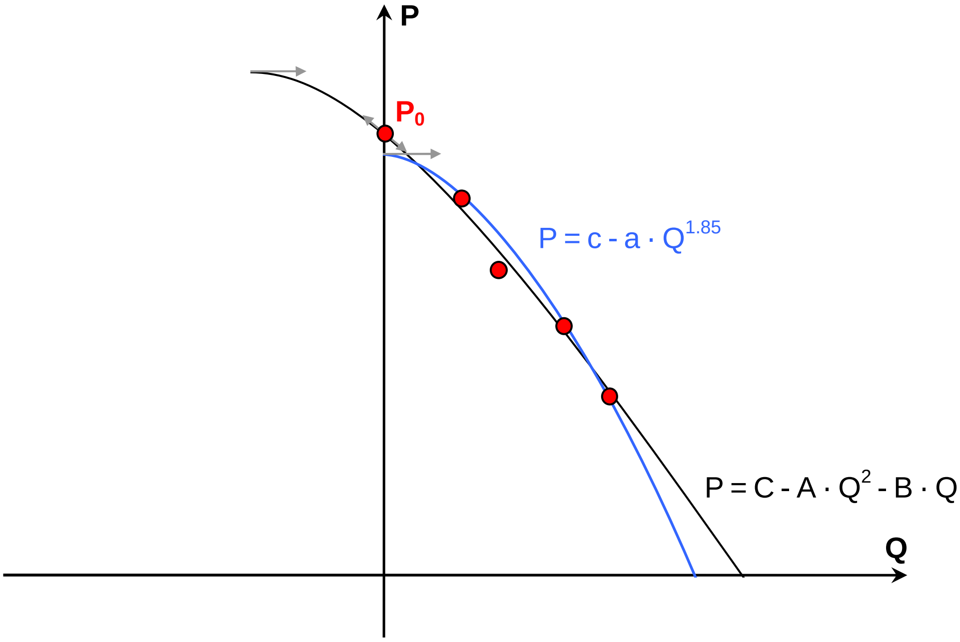


Abb. 6

Abschließend bildet das Näherungspolynom das beste Werkzeug zur Beschreibung der Eigenschaften der gemessenen Daten. Wie in diesen technischen Erläuterungen vorgebracht hat das Polynom außerdem den Vorteil auf den Spitzenverbrauch im Netz übertragbar zu sein.

Anzumerken ist ebenfalls, dass die vorliegenden Erläuterungen von der Theorie der verzweigten Netzen abgeleitet wurden. Ihre Anwendung auf vermaschte Netze bzw. auf Netze, die gleichzeitig von zwei Behältern versorgt werden wurde durch die computergestützte Simulation von realen und fiktiven Netzen bestätigt.

Philippe Colbach
pcolbach@best.lu

Luxemburg, den 25. Juni 2007
(Stand: 23. Oktober 2015)