Temperaturabhängigkeit bei Blendenmessungen

Kann man Kalibrierdaten gemessen bei niedrigen Temperaturen auf hohen Temperaturen extrapolieren?

Peter Lau
SP Technical Research Institute of Sweden

7. Internationale EMATEM-Sommerschule

Kloster Seeon, 14. -16. 9. 2011

Disposition

- Problemstellung Rückführbarkeit.
- Verschiedene Einflüsse der Temperatur.
- Teilziel der EMRP-Projektes Power Plant Efficiency.
- Was bedeutet Durchflussmessung an Blenden.
- Messergebnisse für den Durchflusskoeffizienten.
- Anpassung einer einfachen Gleichung als Funktion der Reynoldszahl.
- Erweiterung nach höheren Temperaturen über die Reynoldszahl.
- Prognose für erwartete Messergebnisse bei 220 ° in Berlin.
- Erster Test der Qualität einer solchen Extrapolation.

Was ist das Problem?

- Alle Durchflussmessgeräte sind temperaturabhängig.
- Die Relation Ausgangssignal – zu Eingangssignal ist nicht eindeutig.
- Unterscheidet sich die Einsatztemperatur stark von der Kalibriertemperatur ist die Rückführbarkeit gefährdet.
- Bei Anwendungen im Kraftwerkbereich mit Wassertemperaturen zwischen 200 ℃ und über 300 ℃ und Durchflüssen >6 00 kg/s erreicht man Kalibriertemperaturen von etwa 38 ℃ (i n Reynoldszahlen ausgedrückt $6*10^6$ verglichen mit $25*10^6$ in Kraftwerken).

Was tun?

Annahme:

Das Messgerät verändert sich nicht ganz unerwartet mit der Temperatur.

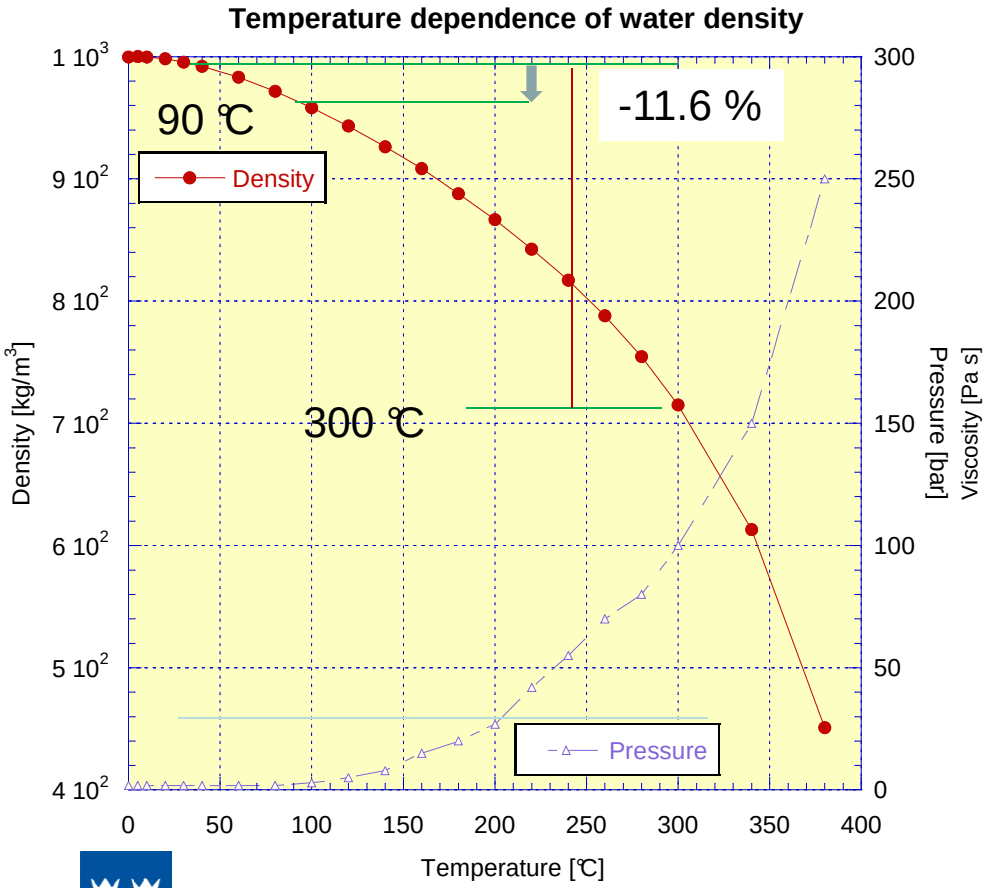
- Kann man nicht einfach die Kalibrierdaten beibehalten und einfach die Messunsicherheit entsprechend erhöhen?
- Sinnvoll – aber man muss trotzdem die Vergrößerung der Unsicherheit irgendwie experimentell bestimmen.
- Besser – die Temperatur als Einflussgröße in dem Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal direkt mit aufzunehmen.

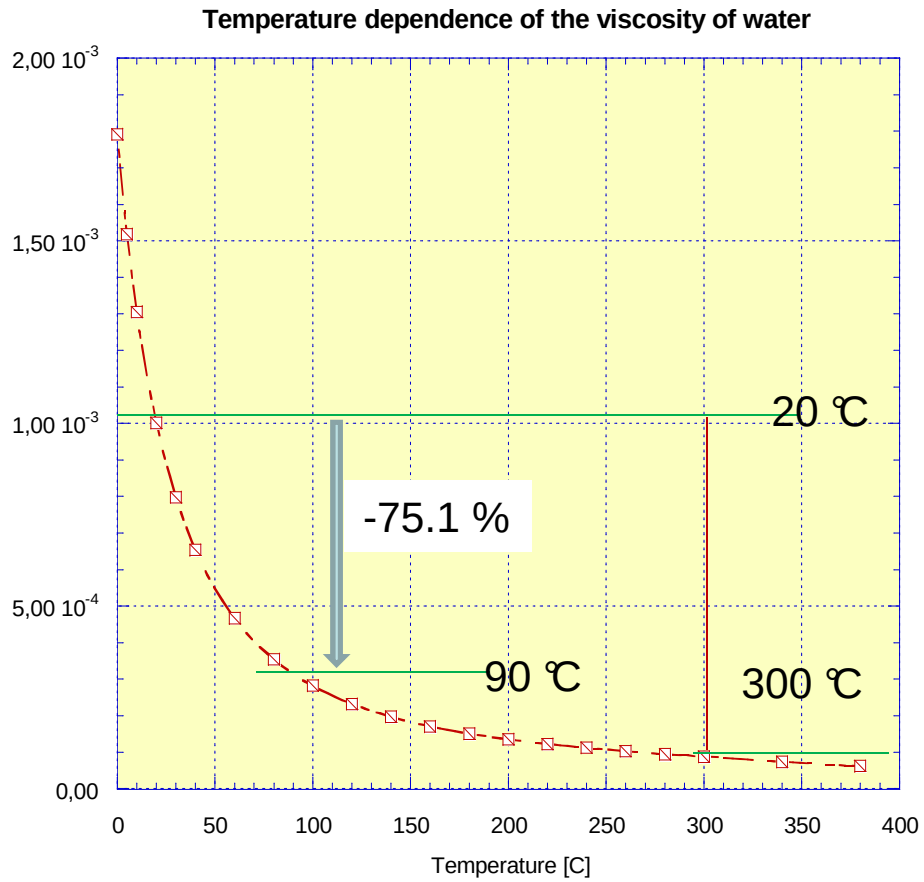
  (*Was Hersteller ja bereits weitgehend ausgezeichnet machen*)

Was bewirkt eine Erhöhung der Temperatur?

- Rohrausweitung lässt sich relativ leicht voraussagen.
- Änderungen von Materialeigenschaften wie z.B. Elastizitätsmodul für Druckerweiterung oder Schallausbreitungsgeschwindigkeit für Ultraschallzähler sind im Allgemeinen auch gut bekannt.
- Schwieriger wird es wenn sich Spulen und deren Magnetfeld ändern (speziell wenn dies nicht ganz reversibel geschehen sollte).
- Noch wichtiger aber ist der Einfluss der Temperaturerhöhung auf das Medium – Wasser.
- Schwieriger zu bestimmen sind nicht die geänderten Medieneigen-schaften an sich, sondern deren Bedeutung auf das dynamische Verhalten und die Wechselwirkung mit dem Messgerät.
- Reicht die Kenntnis der aktuellen Reynoldszahl um $Sign_{aus} = f(Sign_{ein})$ zu bestimmen?
- Muss man die temperaturinduzierte Profiländerung mit einbeziehen?

Änderung in Dichte und Viskosität mit steigender T.





SP Technical Research Institute of Sweden

EMRP-projekt – Power Plant Efficiency

Bestimmung der Temperaturabhängigkeit von 4 verschiedenen Messprinzipien.

Fragen:

- Wie ändert sich der „K-faktor“ wenn die Temperatur innerhalb bestimmter Grenzen steigt?
- Ist diese Änderung eindeutig, vielleicht sogar monoton?
- Kann diese Kenntnis auch zur Extrapolation zu bedeutend höheren Temperaturen genutzt werden?
- Wie geht man praktisch vor?
- Sieht dies recht unterschiedlich aus für verschiedene Messprinzipien?
- Kann man diese Fragen generell beantworten oder gelten experimentell gemachte Erfahrungen nur für den untersuchten Zähler?

SP – Blenden (als ein Vertreter für Diffdruck-zähler)

- Generell gilt $q_m = K \cdot \sqrt{\Delta p}$ d.h. der Massendurchfluss ist proportional zu der Wurzel des gemessenen Druckfalls. Wie verändert sich der Wert von K mit der Temperatur?

- Nach ISO-5167 und ASME/ASI MFC-3M gilt für Blenden, Düsen und Venturis:

temperaturabhängig

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \underbrace{\varepsilon}_{\substack{1 \\ \text{für Flüssigkeiten}}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1}$$

qm: Massendurchflussrate
Δp: gemessener Druckfall
d: Blendendurchmesser
β: d/D (D: Rohrdurchmesser)
C: Durchflusskoeffizient

Messvoraussetzungen:
D = 100 mm
d = 50 mm
$\beta = 0{,}5$

Hauptfrage: Wie sieht C als Funktion von T aus? Kann C=f(T) extrapoliert werden?

Kalibrierung der Blende bei mehreren Temperaturen

gemessene Daten

berechnete Daten

$$C = \frac{q_m \cdot 4 \cdot \sqrt{1-\beta^4}}{\varepsilon \cdot \pi \cdot d^2(T) \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1(T)}}$$

Der Durchflusskoeffizient ist nicht direkt sondern indirekt von T abhängig, lässt sich aber für bekannte Versuchsbedingungen auch berechnen!

$$C = F_{RHG}(\beta, Re_D)$$

$$Re_D = \frac{4 \cdot qm}{\pi \cdot \mu(T) \cdot D(T)}$$

Dischargekoefficient für Blenden - C

Mit optimalen Voraussetzungen lässt sich **C** nach ISO und ASME mit einer Unsicherheit von 0,5 – 0,75 % berechnen!

$$C = \frac{\text{wirklicher Durchfluß}}{\text{theoretischer Durchfluß}}$$

Reader-Harris Gallagher Gleichung:

Re_D Pipe Reynoldszahl

$$C = 0{,}5961 + 0{,}0261 \cdot \beta^2 - 0{,}216 \cdot \beta^8 + 0{,}000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0{,}7}$$

$$+ \left(0{,}0188 + 0{,}0063 \cdot \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0{,}8}\right) \cdot \beta^{3{,}5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0{,}3}$$

$$+ \left(0{,}043 + 0{,}080 \cdot e^{-10L1} - 0{,}123 \cdot e^{-7L1}\right) \cdot \left(1 - 0{,}11 \cdot \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D}\right)^{0{,}8}\right) \cdot \frac{\beta^4}{1-\beta^4}$$

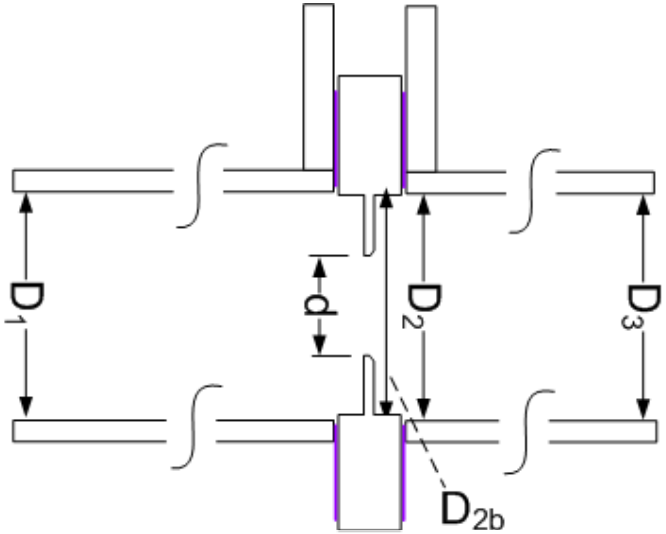
$$- 0{,}031 \cdot \left(\frac{2 \cdot L2}{1-\beta} - 0{,}8 \cdot \left(\frac{2 \cdot L2}{1-\beta}\right)^{1{,}1}\right) \cdot \beta^{1{,}3}$$

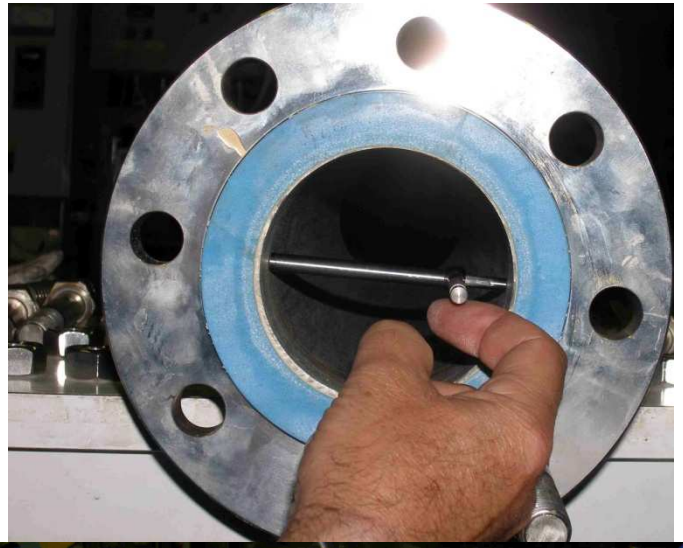
Daten bezüglich Rohr, Blende und Medium

Plus Abstand von Druckmesspunkt stromaufwärts

Abstand von Druckmesspunkt stromabwärts

Blendengrößen – nominell und gemessen





nominell		Uppmätt	
d	51,13	d	51,126
		D1	101,84
D	102,26	D2	102,26
β	0,5	D3	102,28
		D2b	103,49

Wie wird die Massendurchfluβrate q_m bestimmt ?

- Man misst die aktuelle Druckdifferenz Δ**p**
- Man misst die Medientemperatur **T**
- Mit T findet sich aktuelle Dichte ρ_1**(T)** und Blendendurchmesser d^2**(T)**
- Das Durchmesserverhältnis **β** ist meist konstant
- Man berechnet q_m nach der Grundformel

$$q_m = C\left(\beta, Re_D\left(q_m, \mu 1(T), D(T)\right)\right)\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2(T) \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1(T)}$$

- Gebraucht wird der aktuelle, temperaturabhängige Wert von C
- Dazu braucht man zuerst Re_D
- Für Re_D muss man die aktuelle Viskosität **μ(T)**, den aktuellen Rohrdurchmesser **D(T)**, aber auch den aktuellen Massendurchfluss q_m kennen

→ Ein iteratives Verfahren

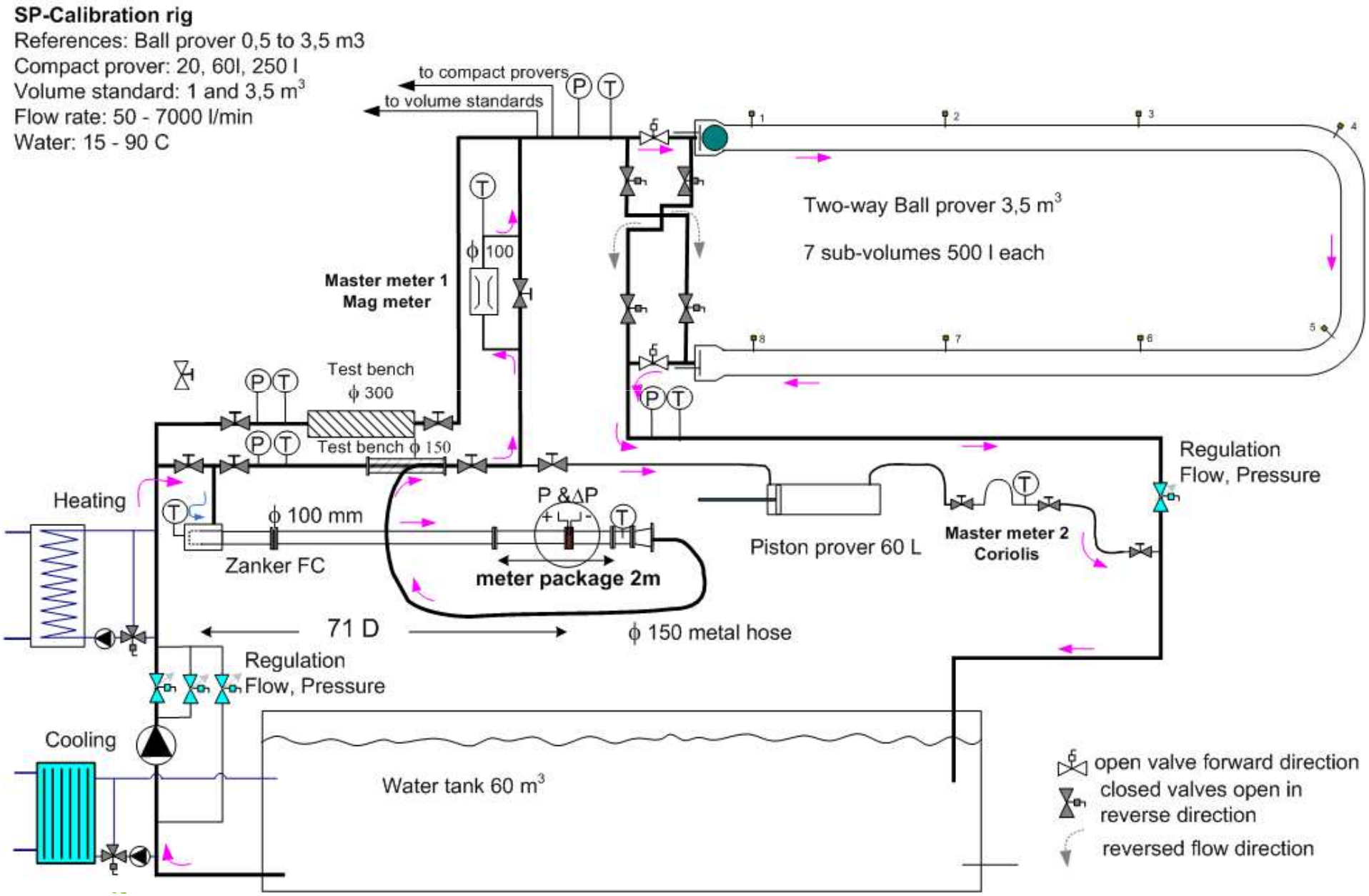
Messungen auf einen Blick

- Temperaturen 20, 30, 50, 70 und 85 ℃
- Durchflussraten von 49 zu 2100 L/min
- Zwei Master Meter (und zugehörige Normale)

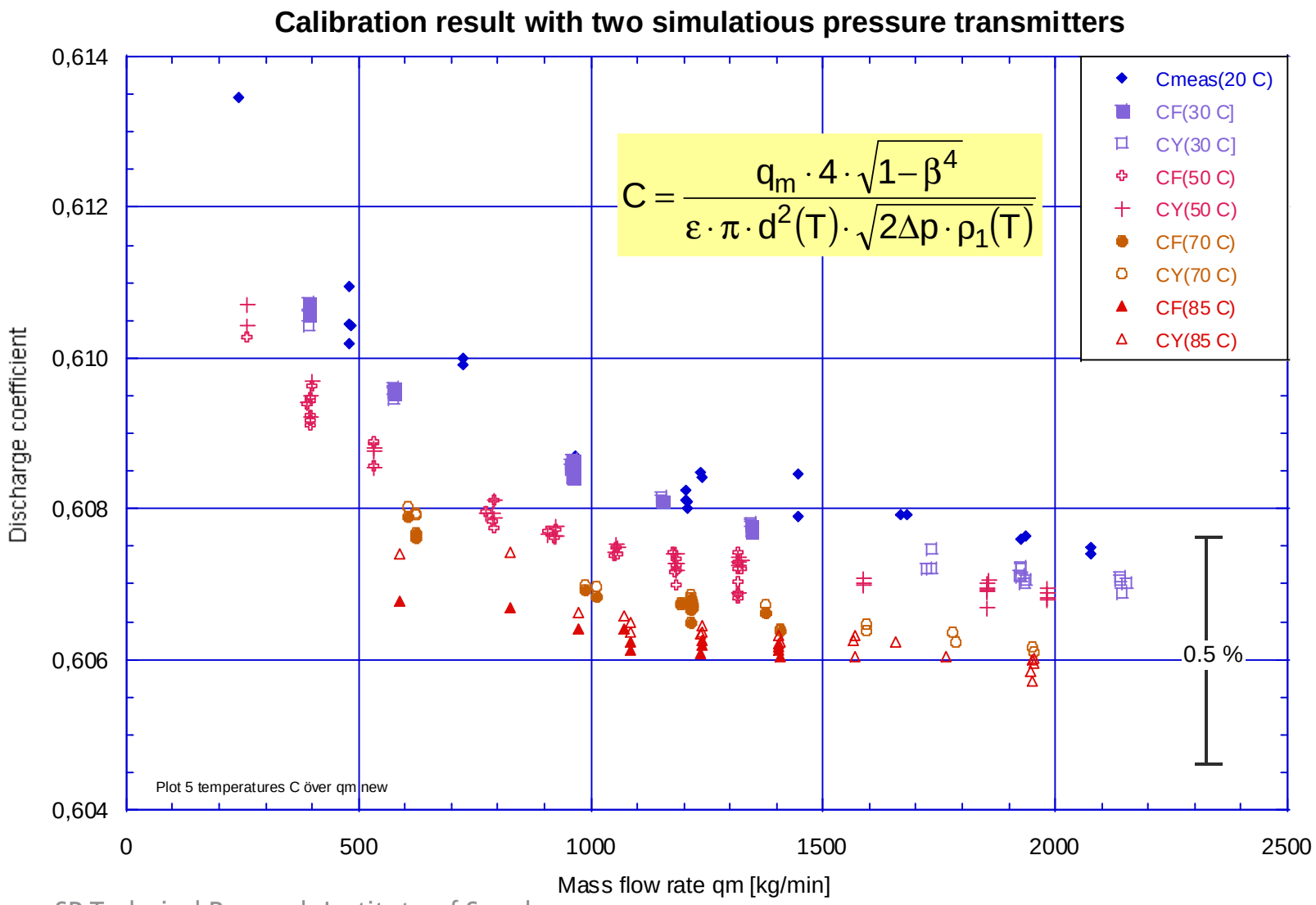
  Endress&Hauser MAG-meter (Ball prover mit 3500 L – high flow)

  CMF 200 Coriolis meter (Pisten prover 60 L – low flow)
- Drei Difftrucksensoren(100, 200, 500 kPa range)
- Zwei oder mehr Messserien a 10 Teilmessungen pro Messpunkt
- Anzeige von C von meistens zwei Drucksensoren über die Reynoldszahl

Zwei Mastermeter kalibriert gegen 2 Durchflußnormale



C bei 5 Temperaturen als Funktion des Durchflusses

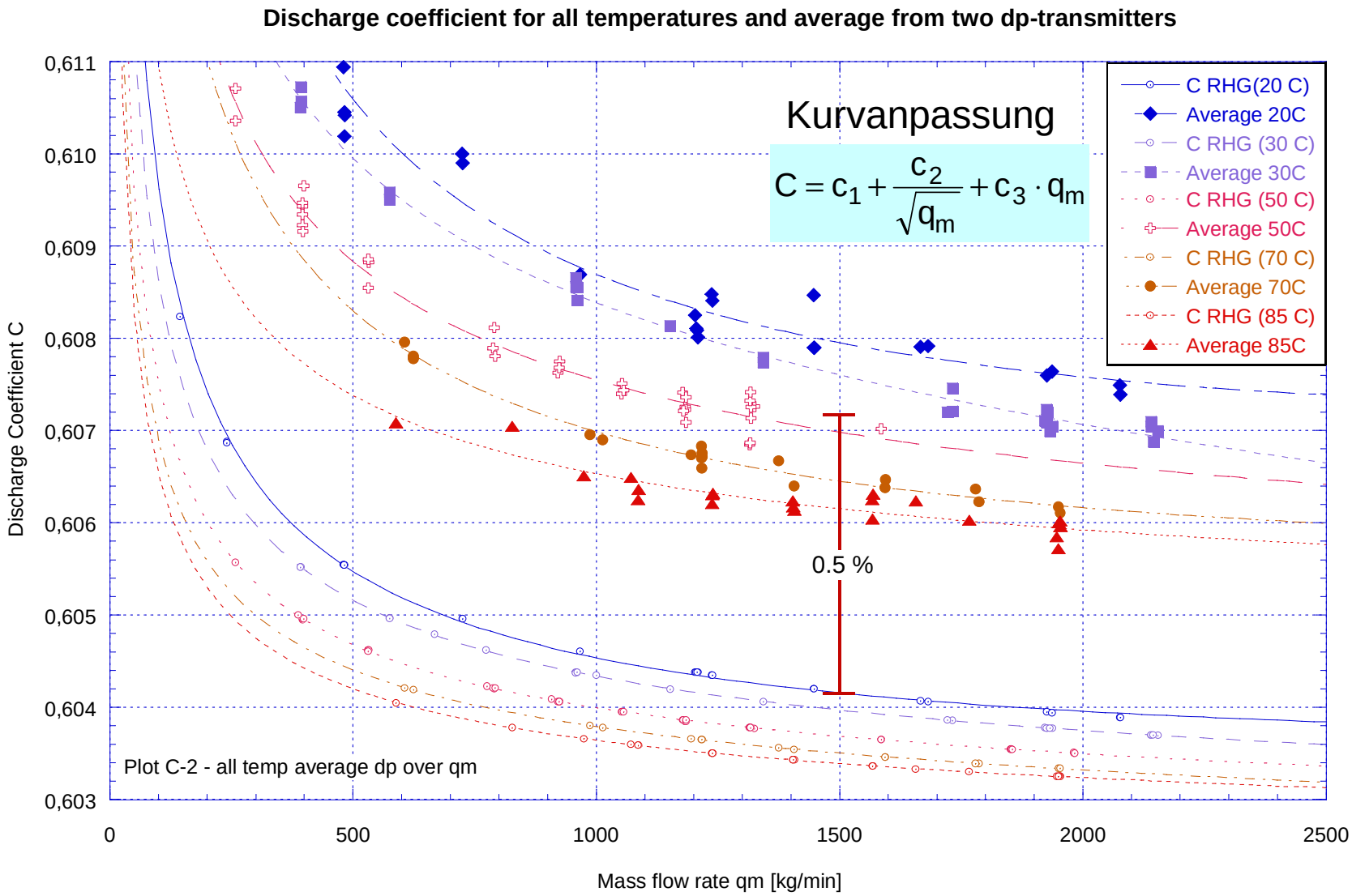


$$C = \frac{q_m \cdot 4 \cdot \sqrt{1-\beta^4}}{\varepsilon \cdot \pi \cdot d^2(T) \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1(T)}}$$

SP Technical Research Institute of Sweden

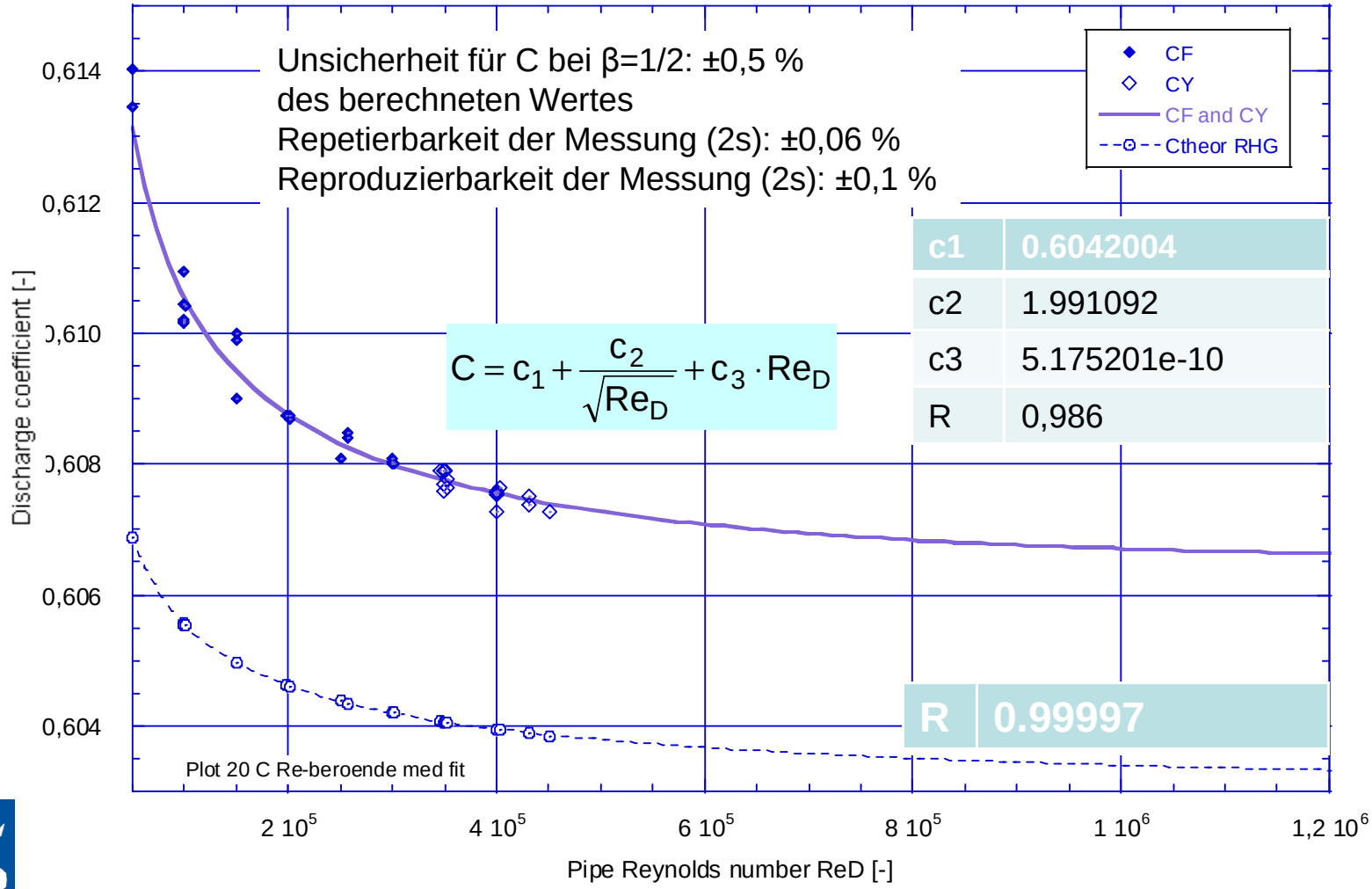
Ziel war nicht C bei gleichem qm sondern bei relativ runden ReD-Zahlen zu bestimmen

C bei 5 Temperaturen experimentell und berechnet



SP Technical Research Institute of Sweden

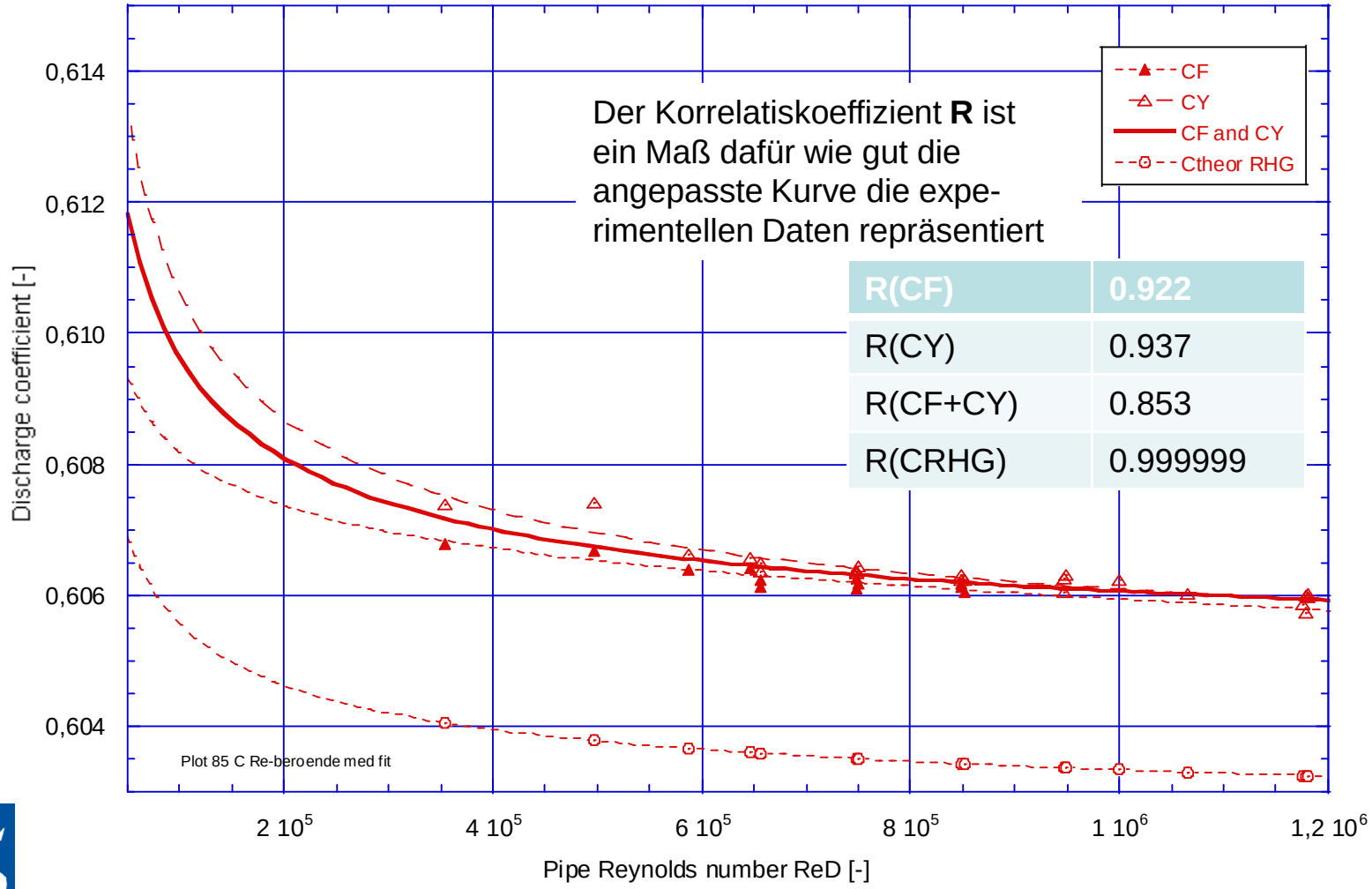
Anpassung bei 20 ℃ mit einfacher Modellgleichung



Resultat und Anpassung bei 85 °C

Typische Streuungen Mastermeter E&H DN100 (10 * 30 s)

s(CF)=0,046 %
s(CY)=0,032 %



Der Korrelatiskoeffizient **R** ist ein Maß dafür wie gut die angepasste Kurve die experimentellen Daten repräsentiert

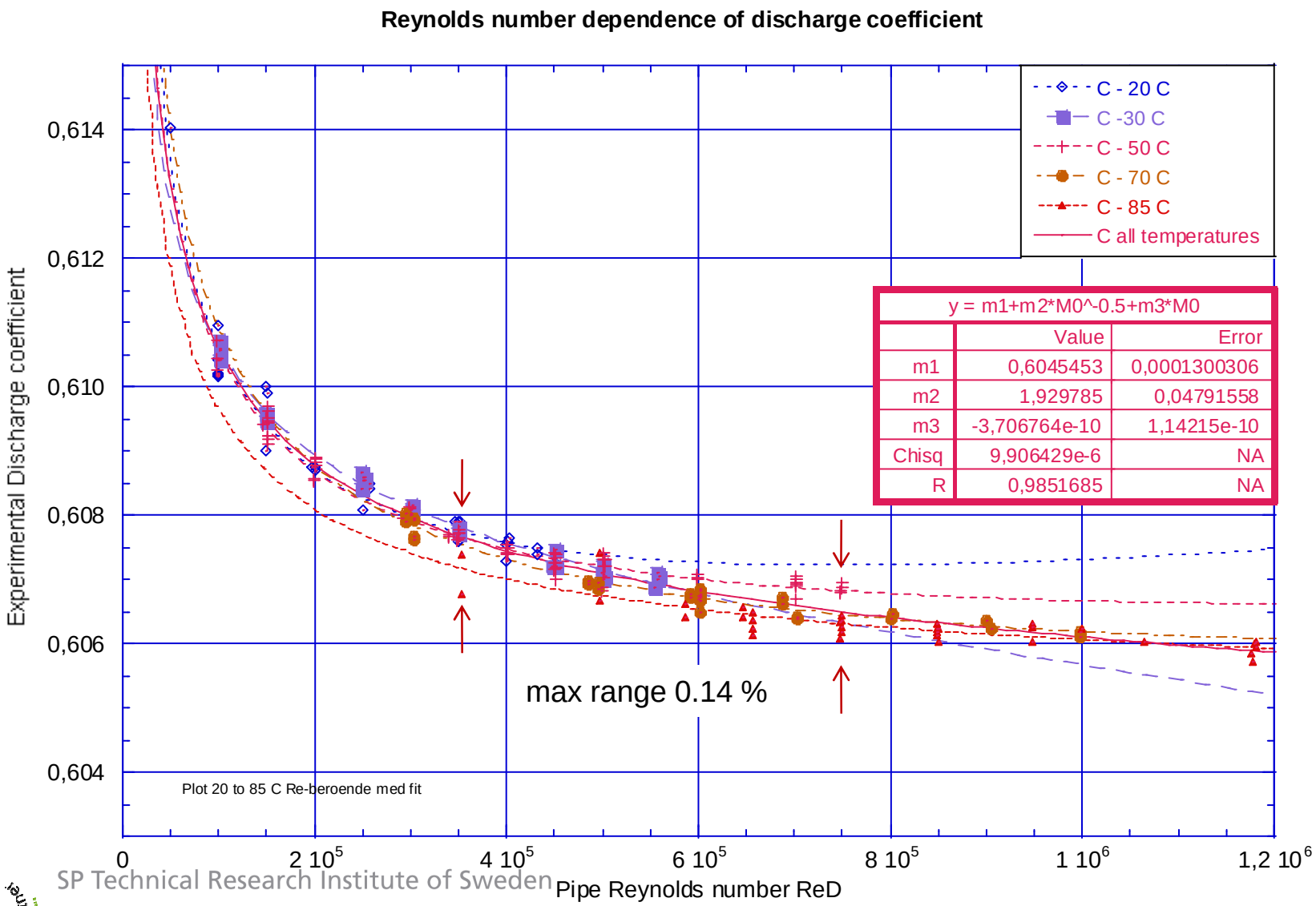
R(CF)	0.922
R(CY)	0.937
R(CF+CY)	0.853
R(CRHG)	0.999999

SP Technical Research Institute of Sweden

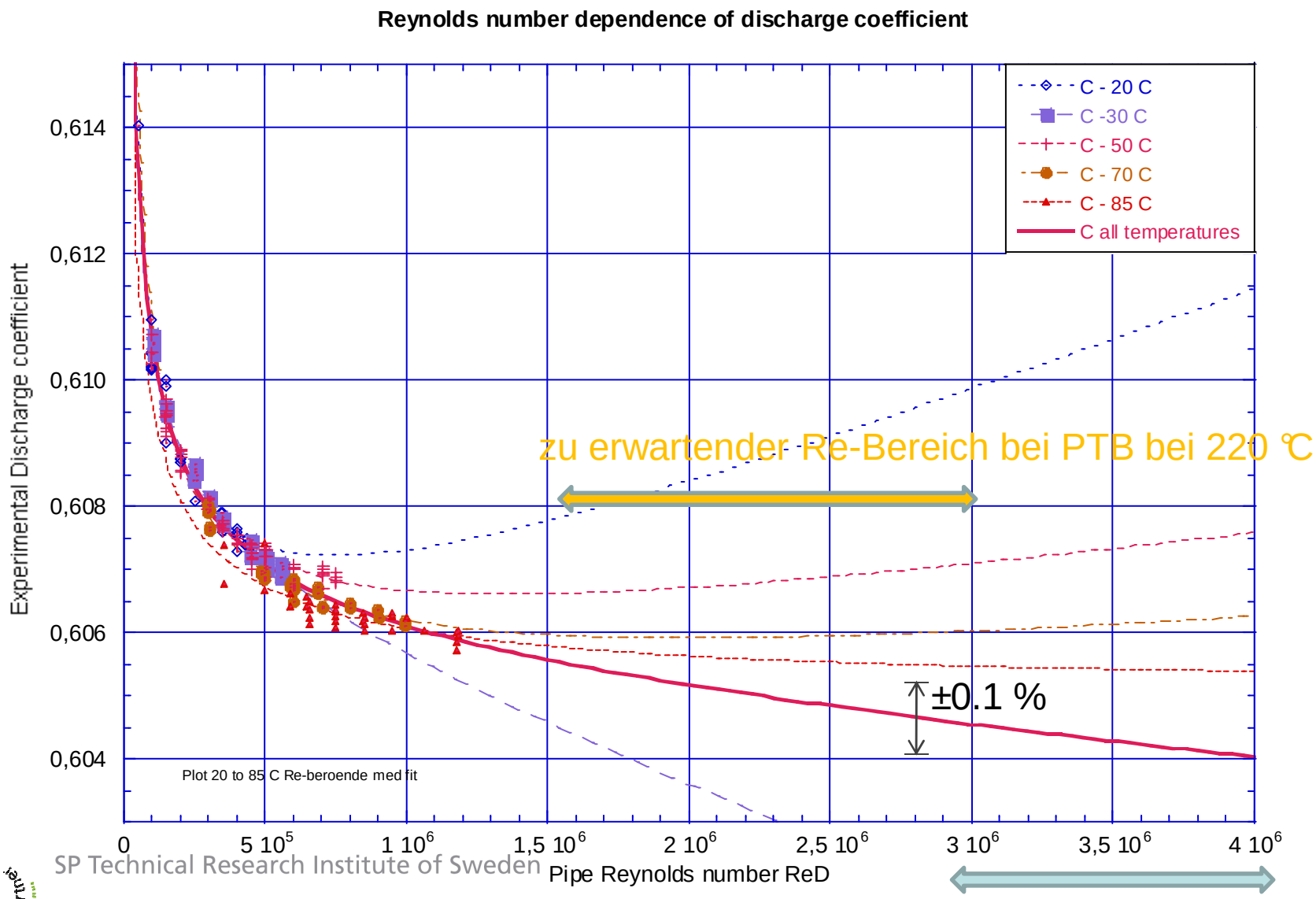
Kal ballprover (4 * 145 s)

s(CF)=0,012 %
s(CY)=0,009 %

Alle Resultate von 20 bis 85 ℃ mit Anpassung



Extrapolation zu höheren Reynoldszahlen (T)



Re-Bereich bei 300℃/180 bar

C-Extrapolation auf 220 °C und Berechnung von qm

$$q_m = C\left(\beta, Re_D\left(q_m, \mu 1(T), D(T)\right)\right)\frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2(T) \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1(T)}$$

erwartet vorgegebene Messwerte

$$Re_D = \frac{4 \cdot qm}{\pi \cdot \mu(T) \cdot D(T)}$$

$$C = c_1 + \frac{c_2}{\sqrt{Re_D}} + c_3 \cdot Re_D$$

c_1, c_2, c_3 von Anpassung an 5 Temperaturen

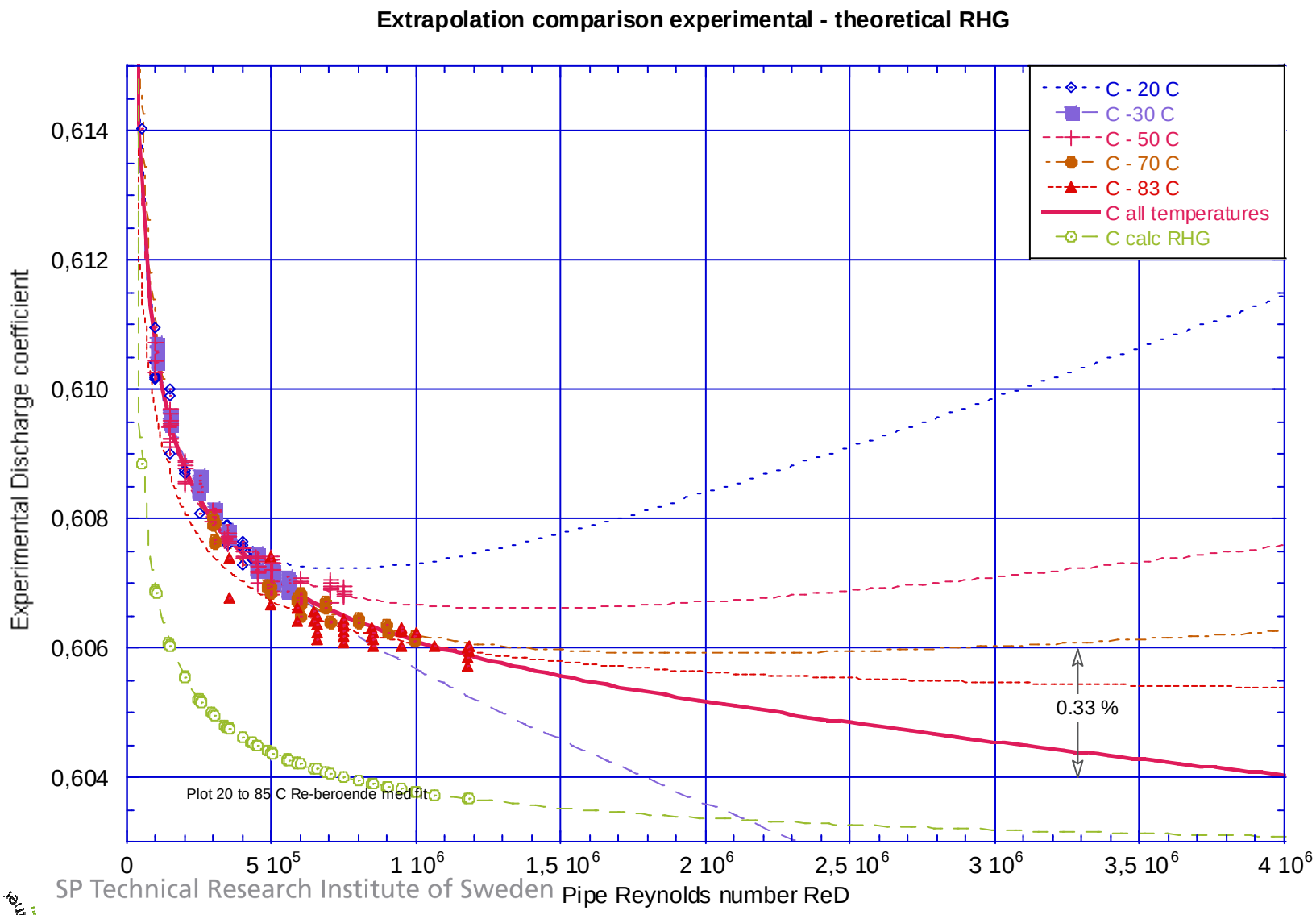
Prediction for temperature 220 C and pressure 40 bar (viskosity, density och diameter) **20-to-85 C fit**

ΔP	$C_{guessed}$	$qm_{guessed}$	Re_{calc1}	C_{calc1}	qm_{calc1}	Re_{calc2}	C_{calc2}	qm_{calc2}
30	0,6	546,2	926314	0,606207	551,87	935896	0,606193	551,85
50	0,6	705,2	1195866	0,6058667	712,06	1207559	0,605854	712,04
70	0,6	834,4	1414967	0,6056431	842,20	1428275	0,605631	842,19
100	0,6	997,2	1691209	0,6054023	1006,23	1706437	0,605390	1006,21
130	0,6	1137,0	1928275	0,6052202	1146,93	1945052	0,605208	1146,91
160	0,6	1261,4	2139229	0,6050717	1272,09	2157312	0,605060	1272,07
200	0,6	1410,3	2391731	0,6049066	1421,85	2411290	0,604894	1421,82
240	0,6	1544,9	2620010	0,6047663	1557,20	2640823	0,604754	1557,17
270	0,6	1638,6	2778941	0,6046728	1651,41	2800583	0,604660	1651,37
300	0,6	1727,3	2929261	0,604587	1740,49	2951655	0,604574	1740,45
330	0,6	1811,6	3072234	0,6045075	1825,20	3095314	0,604495	1825,16

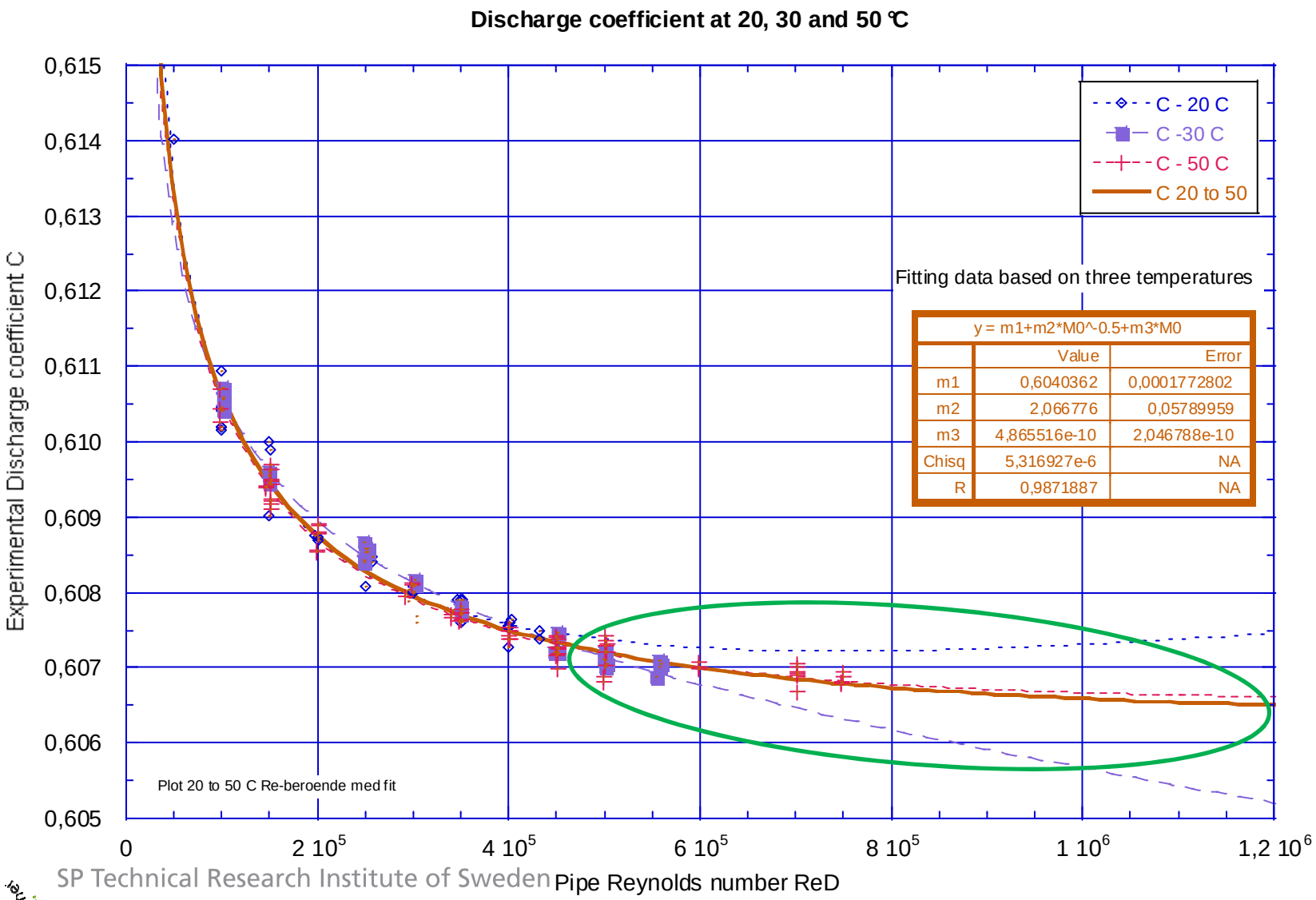
0,75 % → 0,002 % →

Wie gut fällt die Extrapolation aus ?

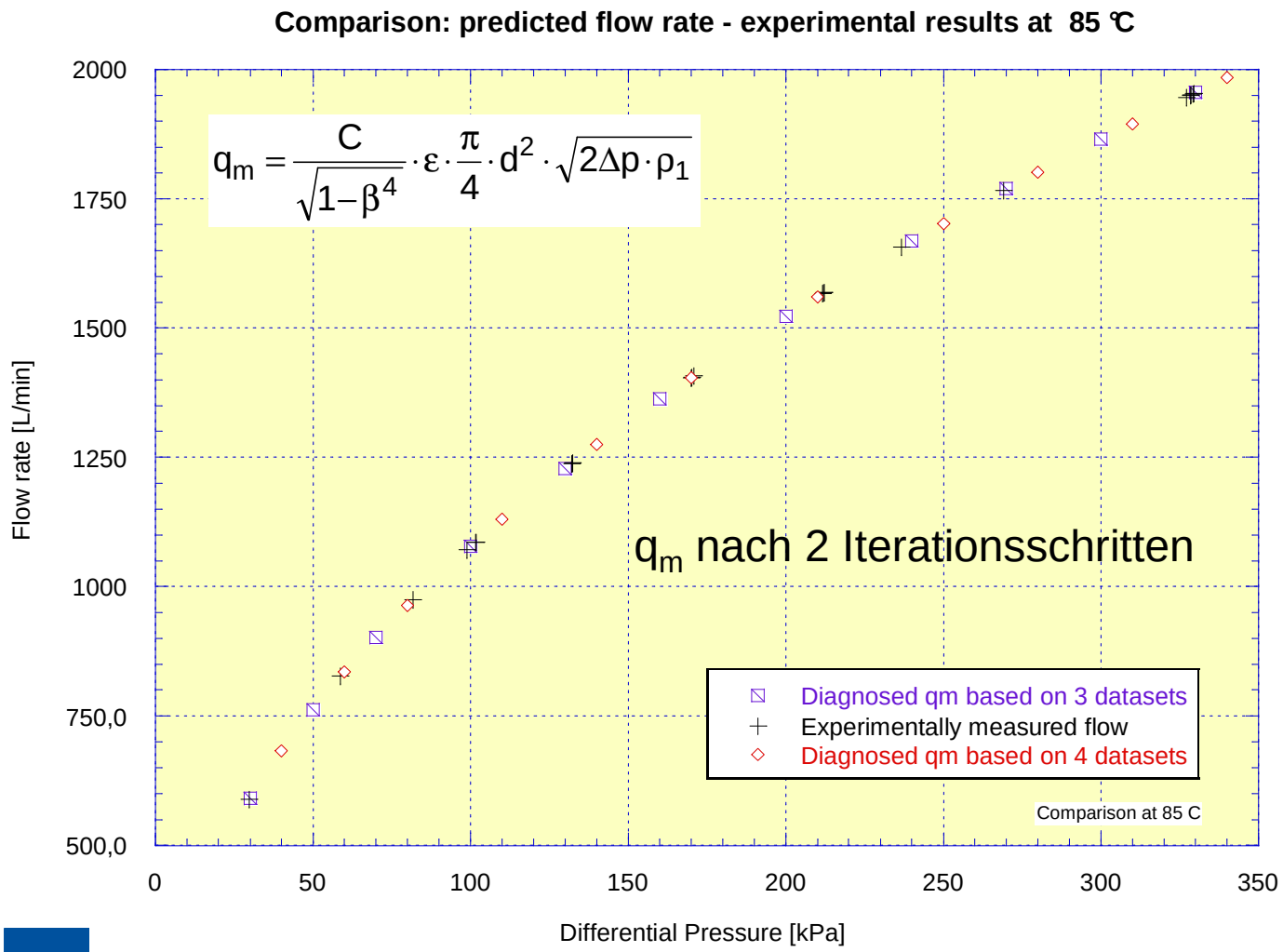
Wie verhalten sich die experimentelle und theoreische Extrapolation zueinander?



Wie gut ist die Prognose für die Ergebnisse bei 85 ℃?



Test: Temperature extrapolation mit 20 - 50 auf 85 °C



Typische Wurzel-funktion zwischen Differenzdruck Δp und Durchflussrate qm
Konsequenz von Bernoulli's Gesetz.

Berechnete Punkte bei ebenen, experi-mentelle Punkte bei unebenen Druckwerten.

$$q_m = C\left(\beta, Re_D\left(q_m, \mu 1(T), D(T)\right)\right) \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2(T) \cdot \sqrt{2\Delta p \cdot \rho_1(T)}$$

Vergleich Prognose – Experiment für 85 ℃ in Zahlen

Die Prognose wird besser wenn die Extrapolation auf einer Anpassung mit 4 Datenserien (10, 30,50 und 70 ℃) basiert anstelle von 3. Die durchschnittliche Abweichung von den experimentellen Werten entspricht 0.004 resp. 0.047 %. (Streuung doch bedeutend größer.) Die Abweichung wächst mit dem Durchfluss und sicher auch mit der Temperaturerhöhung.

Δp	qm calc. 3 data sets	qm meas. at predict. temp	qm calc. 4 data sets	Δqm abs 3 data sets	Δqm abs 4 data sets	Δqm rel 3 data sets	Δqm rel 4 data sets
[kPa]	[L/min]	[L/min]	[L/min]	[L/min]	[L/min]	[%]	[%]
29,74	588,51	**588,42**	588,50	0,09	0,08	0,015	0,014
58,75	826,54	**827,09**	826,45	-0,54	-0,63	-0,066	-0,077
81,74	974,64	**974,27**	974,46	0,37	0,19	0,038	0,019
98,83	1071,52	**1071,12**	1071,29	0,40	0,17	0,038	0,015
101,66	1086,75	**1086,01**	1086,49	0,74	0,48	0,068	0,044
101,72	1087,06	**1086,53**	1086,80	0,53	0,27	0,049	0,025
132,10	1238,54	**1237,83**	1238,14	0,71	0,32	0,057	0,025
132,25	1239,25	**1238,64**	1238,87	0,61	0,23	0,049	0,019
132,40	1239,95	**1239,49**	1239,55	0,46	0,07	0,037	0,005
169,93	1404,53	**1403,98**	1403,96	0,55	-0,02	0,039	-0,001
170,15	1405,43	**1404,66**	1404,87	0,77	0,21	0,055	0,015
170,81	1408,15	**1407,38**	1407,58	0,77	0,19	0,054	0,014
211,72	1567,54	**1566,93**	1566,77	0,61	-0,17	0,039	-0,011
212,04	1568,73	**1567,57**	1567,97	1,15	0,39	0,074	0,025
212,17	1569,23	**1568,79**	1568,45	0,44	-0,34	0,028	-0,022
236,75	1657,55	**1657,08**	1656,65	0,47	-0,43	0,028	-0,026
269,23	1767,48	**1766,53**	1766,42	0,95	-0,11	0,054	-0,006
327,09	1948,04	**1946,43**	1946,67	1,61	0,24	0,083	0,013
328,39	1951,91	**1949,88**	1950,54	2,03	0,66	0,104	0,034
328,51	1952,28	**1951,13**	1950,90	1,15	-0,22	0,059	-0,011
329,19	1954,30	**1953,22**	1952,92	1,08	-0,30	0,055	-0,015
329,49	1955,19	**1953,90**	1953,81	1,29	-0,09	0,066	-0,005
	Average deviation from experiment			0,738	0,055	0,047	0,004
		Standard deviation		0,530	0,316	0,032	0,026

SP Technical