

Messung der Vorspannkkräfte von Nieten
in Altbrücken

Entwicklung der Messtechnik

T 2709

T 2709

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG-HARBURG
STAHLBAU UND HOLZBAU

Heft 6

Forschungsbericht

**Messung der Vorspannkkräfte von Nieten in
Altbrücken**

Entwicklung der Meßtechnik

G. Valtinat und I. Hadrych

Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin

Hamburg 1995

1. Einführung

Die Messung der Vorspannkraften in Schrauben und Nieten erfolgt heute zum Teil mit der Technik der implantierten Dehnungsmeßstreifen (DMS). Diese Technik wurde von uns in Versuchsserien an Stahlbauverbindungen mit HV-Schrauben angewendet. Es stellte sich heraus, daß sie gelegentlich bei länger andauernden Messungen (Zeitstandmessungen) mit dem Nachteil des Kriechens behaftet ist. Damit werden die Ergebnisse aus Langzeitmessungen verfälscht. Der Vorspannkraftabfall kann aus verschiedenen Einflüssen herrühren, z. B. daraus, daß

- die vorgespannte HV-Schraube kriecht oder
- der Stahlblock, gegen den vorgespannt wird, kriecht oder
- der DMS kriecht oder
- der Kleber, mit dem der DMS aufgeklebt ist, kriecht.

Es wird vermutet, daß bei den implantierten DMS die Messungen durch die Kriecheffekte der DMS überlagert werden.

Um diese Vorspannkraft-Meßtechnik zu verbessern, sollte das Versuchsprogramm mit Dauerstanduntersuchungen an Versuchsstücken mit implantierten DMS und weiteren Meßinstrumentierungen, von welchen man das Kriechverhalten ziemlich gut bzw. genau kennt, durchgeführt werden. Aus den Differenzen der Meßwerte kann auf das Kriechverhalten der implantierten DMS geschlossen werden.

Mit dieser Meßmethode lassen sich auch geringe Vorspannkraften von Nieten an stählernen Altbrücken ermitteln. Dies ermöglicht einen besseren Zugang zur Restnutzungsdauer solcher Bauwerke.

2. Ziel der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen ist das Austesten der Meßtechnik zur Messung von Vorspannkraften in Schrauben und Nieten mit implantierten DMS, die quantitative Ermittlung bzw. die Korrektur der mit Kriecheffekten behafteten Meßdaten.

3. Versuchsablaufplan, Messungen, Unterbrechungen, Ausfälle

3.1 Versuchsablaufplan

Der Arbeitsplan sah vor, daß an 10 HV-Schrauben M 24 x 110 DIN 6914 (Schrauben Nr. 1 - 10) und an 1 HV-Schraube M 24 x 200 DIN 6914 (Schraube Nr. 13) die Implantierung von DMS mit Warmaushärtung des Klebers in meinem Labor erfolgt (vergleiche Bild 1, Anlage 1). Gleichzeitig wurden an diesen HV-Schrauben außen auf dem Schaft in der Nähe des Schraubenkopfes auf vorbereitete Flächen je zwei flache x-y-DMS aufgeklebt und ausgehärtet, deren Kriecheigenschaften nur ungefähr bekannt sind (siehe Bild 2, Anlage 2). Diese beiden DMS wurden zusammengeschaltet.

Die 10 HV-Schrauben M 24 x 110 Nr. 1 - 10 wurden jeweils gegen einen 74 mm hohen, runden, gehärteten Stahlblock mit dem Durchmesser von 80 mm planmäßig mit

Vorspannkraften nach DIN 18800 Teil 7 verspannt. Unter dem Kopf und unter der Mutter wurde je 1 Unterlegscheibe nach DIN 6916 eingebaut.

Die 1 HV-Schraube M 24 x 200 Nr. 13 wurde nicht gegen einen Stahlblock, sondern gegen zwei Kraftmeßdosen (KMD) planmäßig mit Vorspannkraften nach DIN 18800 Teil 7 verspannt. Eine der beiden KMD entstammte einem Eigenbau für Schrauben-Anziehversuche, die andere wurde von der Firma Hottinger/Baldwin-Meßtechnik, Darmstadt, geliefert. Unter dem Kopf und unter der Mutter befanden sich je 1 Unterlegscheibe nach DIN 6916. Eine Kugelkalotte unter der Mutter sicherte die zentrische Vorspannkrafteinleitung (s. Bild 3, Anlage 3).

Die HV-Schrauben wurden in einen Dauerstandprüfstand eingebaut und entgegen der ursprünglichen Absicht nicht nur über wenige Wochen, sondern über 15 Monate unter der Vorspannkraft gehalten und gemessen. Der Dauerprüfstand befand sich in einer Klimakammer unter konstant gehaltener Temperatur von 20° C, eine Schreibeinrichtung schrieb den Temperaturverlauf kontinuierlich mit.

3.2 Messungen

Die Meßablesungen erfolgten direkt nach dem Anziehen alle 2 Minuten, danach innerhalb der ersten 24 Stunden alle 10 Minuten, danach bis zu 170 Stunden alle 30 Minuten und danach alle 12 Stunden bis zum Ende des Versuches.

Durch automatische Registrierung der Meßwerte der implantierten DMS, der außen auf den Schaft aufgebrachten DMS und der beiden KMD auf der Meßanlage UPM 100 und einem Rechner Typ HP Vectra konnte der Verlauf aller Meßwerte festgestellt und gegeneinander verglichen werden. Die Idee war, hieraus den Kriecheffekt der implantierten DMS festzustellen.

3.3 Unterbrechungen

Dadurch, daß im Arbeitsbereich nicht eine ausreichende Anzahl von Meßanlagen zur Verfügung stand, war es zu Zwischenzeitpunkten erforderlich, die Meßanlage abzuklemmen und die Steckerkontakte zu lösen. Die durch diesen Vorgang entstandenen Meßwertverschiebungen sollten dadurch eliminiert werden, daß die Meßwertabweichungen zwischen den beiden Meßwerten vor dem Abklemmen und nach dem Wiederanschließen allen nachfolgenden Meßwerten überlagert werden.

3.4 Stromausfall

Zu einigen Zwischenzeitpunkten fiel leider der Strom in der Technischen Universität aus. In dieser Zeit konnte die Klimakammer nicht ihre voreingestellte Temperatur halten, sondern es wurde auf den Temperaturschrieben ein Temperaturanstieg verzeichnet. Darüber hinaus fielen bei Stromausfall auch die Meßanlage und der nachgeschaltete Rechner aus, der allerdings die bis dahin gesammelten Daten aufbewahrte. Diese Geräte mußten dann wieder neu eingerichtet werden.

4. Bezeichnungen

Die eindeutige Zuordnung der einzelnen HV-Schrauben zu den Meßstellen und Kanälen geht aus der folgenden Tabelle 1 hervor.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Schrauben-Nummern, Meßstellen und Kanalnummern

Kanal-Nummer	Schrauben-nummer	DMS-Schaltung	Bemerkungen
0	1	1/4-Brücke	Implantierter DMS
1	2	1/4-Brücke	Implantierter DMS
2	3	1/4-Brücke	Implantierter DMS
3	4	1/4-Brücke	Implantierter DMS
4	5	1/4-Brücke	Implantierter DMS
5	6	1/4-Brücke	Implantierter DMS
6	7	1/4-Brücke	Implantierter DMS
7	8	1/4-Brücke	Implantierter DMS
8	9	1/4-Brücke	Implantierter DMS
9	10	1/4-Brücke	Implantierter DMS
10	1	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
11	2	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
12	3	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
13	4	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
14	5	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
15	6	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
16	7	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
17	8	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
18	9	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
19	10	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
--	11	1/4-Brücke	Kompensations-DMS für die Kanäle Nr. 00 bis 09 der Schrauben Nr. 1 bis 10
20	11	4/4-Brücke	leer mitgemessen, da keine Belastung auf Schraube Nr. 11
--	12	1/4-Brücke	Kompensations-DMS für den Kanal Nr. 30 der Schraube Nr. 13
21	12	4/4-Brücke	leer mitgemessen, da keine Belastung auf Schrauben Nr. 12
22	13 lang	4/4-Brücke	2 DMS auf Schaft
23	13 lang	KMD M 24	Kraftmeßdose, Eigenbau, (blau)
24	13 lang	KMD-500	Firma Hottinger/Baldwin
30	13 lang	1/4-Brücke	Implantierter DMS

Die implantierten DMS waren mit dem Verteilerkasten 1 verdrahtet, ferner über einen 72poligen Stecker mit der Meßanlage UPM 100 und dem Rechner verbunden. Die jeweils beiden DMS auf dem Schaft wurden zusammengedrahtet und über Einzelschlüsse mit Steckerverbindung mit dem Verteilerkasten 2 und sodann über einen 72poligen Stecker mit der Meßanlage UPM 100 und dem Rechner verbunden. Die Druckmeßdosen wurden über ein Steckbrett mit der UPM 100 und dem Rechner verbunden.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Vorbemerkungen

In den folgenden Unterabschnitten werden die Meßdaten so bearbeitet, daß jeweils eine gemittelte Trendlinie für den Kriechabfall der Vorspannkraft bei den verschiedenen Meßinstrumentierungen entwickelt wird. Durch Vergleich dieser Trendlinien kann eine Aussage gewonnen werden, aus welchem Einfluß der Kriechabfall bei den implantierten DMS resultiert.

5.2 Originalschriebe der Meßdaten

Die Originalschriebe aller Meßdaten der Kanäle 00 bis 19, 22 bis 24 und 30 sind in den Bildern 4 bis 27, Anlagen 4 bis 27 dargestellt. Auf der Ordinate ist jeweils die Vorspannkraft, auf der Abszisse sind die Monate aufgetragen. Für diese Diagramme wurde die Ordinateneinteilung von 0 kN bis 250 kN gewählt; es kann hieraus ersehen werden, daß die Schwankungen sehr gering sind.

5.3 Spreizung der Originalschriebe im aktuellen Vorspannkraftbereich

Um diese Schwankungen deutlicher zu machen, wurde in den Bildern 28 bis 37, Anlage 28 bis 37 die Ordinate (Vorspannkraft) auseinandergezogen. Zusammengehörige Verläufe sind soweit wie möglich in einem Bild zusammengefaßt. Die Bilder 33 und 34 stellen dabei die nicht weiter verwendeten Meßergebnisse der beiden unbelasteten Schrauben (Kanäle 20 und 21, Kompensations-DMS) dar. Man erkennt die nervösen Schwankungen bei so feiner Auflösung.

5.4 Kondensierung der Meßdaten

Für die weitere Bearbeitung wurde eine Kondensierung der Daten so vorgenommen, daß die vom 15. des Vormonats bis zum 14. des betrachteten Monate angefallenen Daten zu einem Mittelwert für den betreffenden Monatsanfang zusammengefaßt wurden. Diese Mittelwerte wurden alle mit dem gleichen Gewicht 1 behaftet. Damit konnten die zu Beginn der Versuche mit sehr kleinem Zeitabstand registrierten, sehr zahlreichen Meßdaten gegenüber den später nur noch mit 12 Stunden Abstand gemessenen Daten kein Übergewicht bekommen. Die Meßdaten der ersten 15 Tage wurden ebenfalls zu einem Mittelwert zusammengefaßt und bei der Abszisse 0,25 Monate eingetragen, dieser Wert wurde ebenfalls mit dem Gewicht 1 behaftet.

5.5 Bereinigung einzelner Meßdaten

Für die Kanäle 00 bis 06, 23 und 24 führte auch diese Mittelwert- und Gewichtsbildung nicht zu befriedigenden Verläufen. Die Bilder 38 bis 46, Anlagen 38 bis 46 zeigen, daß sich durch die vorgenannten Unterbrechungen bzw. Stromausfälle zwischen den Monaten 2 bis ca. 9 Unregelmäßigkeiten ergeben haben, die nicht einen Kriechabfall sondern eine Vorspannkraftsteigerung suggerieren, das kann nicht sein. Deshalb mußten die Kurvenverläufe für die letzten Monate abgesenkt und die Verläufe in dem Zwischenbereich interpoliert werden. Dies erfolgte so, daß die sich für den Anfangsbereich (vom 0,25. bis zum 2. Monat) ergebende Trendlinie bis zur Abszisse 2,0 Monate geführt und die sich für den Endbereich (vom 8. bzw. 9. bis zum 12. bzw. 15. Monat) ergebende Trendlinie bis zur Abszisse 2,0 Monate extrapoliert wurden; letztere Trendlinie wurde dann bei 2,0 Monaten auf die Ordinate der erstgenannten Trendlinie abgesenkt. Mit diesem Absenkmaß wurden auch alle dann folgenden Mittelwerte dieses Versuchsstückes behaftet. Diese Verfahrensweise wurde nach langen und intensiven Überlegungen über die Einflüsse der vorgenannten Unterbrechungen und der Stromausfälle gewählt, wir sind der Ansicht, daß sie gerechtfertigt ist, verhehlen aber dennoch nicht, daß gewisse Unsicherheiten verbleiben.

Bei den Kanälen 23 und 24 wurde das gleiche Verfahren angewendet, doch lagen hier Meßpunkte für die Monate 5 - 15 bzw. 6 - 15 vor.

5.6 Kondensierte Mittelwerte und Trendlinien der einzelnen Meßdaten über den gesamten Meßzeitraum von 15 Monaten

Die Bilder 47 bis 70, Anlagen 47 bis 70 zeigen die kondensierten und für einige Meßkanäle gemäß Abschnitt 5.5 bereinigten Mittelwerte sowie die dazugehörigen Trendlinien der Verläufe für die Vorspannkraften. Ob diese Verläufe nun echter Vorspannkraftabfall, verursacht durch Kriechen der Schrauben oder durch Kriechen des verspannten Stahlblockes, sind oder ob diese Verläufe aus Kriechen der DMS und/oder des Klebers herrühren, kann aus diesen Diagrammen noch nicht unmittelbar festgestellt werden.

Die Bilder 47 bis 56, Anlagen 47 bis 56 enthalten die vorgenannten Daten für die Kanäle 00 bis 09, d. h. für die 10 implantierten DMS, die eigentlichen Untersuchungsobjekte. Die Bilder 57 bis 66, Anlagen 57 bis 66 enthalten die vorgenannten Daten für die Kanäle 10 bis 19, d. h. für die 2 x 10 außen auf den Schaft aufgebrachten flachen DMS.

Das Bild 67, Anlage 67 enthält die Meßdaten für den Kanal 30, d. h. für den in der langen Schraube Nr. 13 implantierter DMS, diese Schraube wurde ja gegen KMD verspannt. Das Bild 68, Anlage 68 enthält die Meßdaten für den Kanal 22, d. h. für die beiden außen auf dem Schaft der langen Schraube Nr. 13 aufgebrachten DMS. Das Bild 69, Anlage 69 enthält die Meßdaten für den Kanal 23, d. h. für die in der langen Schraube Nr. 13 verspannte KMD aus Eigenbau. Das Bild 70, Anlage 70 enthält die Meßdaten für den Kanal 24, d. h. für die in der langen Schraube Nr. 13 verspannte Hottinger-KMD.

5.7 Gemittelte Trendlinien für die Meßdaten der 10 untersuchten Schrauben

Auf den Bildern 47 bis 56, Anlagen 47 bis 56 sind die Mittelwerte der Meßdaten für die implantierten DMS und die zugehörigen Trendlinien mit ihrem mathematischen Ausdruck für jede einzelne Schraube dargestellt, auf den Bildern 57 bis 66, Anlagen 57 bis 66 sind die entsprechenden Mittelwerte der Meßdaten für die außen auf den Schaft aufgebrachten DMS und die zugehörigen Trendlinien mit ihrem mathematischen Ausdruck für jede einzelne Schraube dargestellt. Diese Daten werden wie folgt weiterverarbeitet: Es wird für jeden Verlauf der Anfangsvorspannkraftwert als Bezugswert ermittelt, sämtliche Ordinaten werden dann auf diesen Wert bezogen. Dieser Bezug muß durchgeführt werden, um die Verläufe trotz der verschiedenen Anfangsvorspannkraft der einzelnen Schrauben miteinander vergleichen und bearbeiten zu können. Die sich daraus ergebenden, bezogenen, gemittelten Trendlinien sind in den Bildern 71 und 72, Anlagen 71 und 72 dargestellt. Die Tabelle 2 enthält die Zahlenwerte zu diesen Bildern.

Bei der Mittelung der Trendlinien für die 10 Schrauben wurde allerdings der implantierte DMS der Schraube Nr. 2 (Kanal 1) nicht berücksichtigt, da der implantierte DMS dieser Schraube im Vergleich zu den anderen 9 Schrauben einen ungewöhnlich starken Abfall der Vorspannkraft zeigt. So fällt die Vorspannkraft für den implantierten DMS der Schraube 2 von $F_V=226,610$ kN für $t=0$ auf $F_V=155,362$ kN für $t=15$ Monate (siehe Bild 48, Anlage 48), während der Vorspannkraftabfall der übrigen 9 implantierten DMS nur einen Bruchteil dieses Wertes ausmacht.

Aus obigem Vorgehen ergeben sich nun die folgenden auf die Anfangswerte der Vorspannkraft $F_{V,0}$ bezogenen Trendlinien im $F_V/F_{V,0}$ -Zeit-Diagramm (t ist in Monaten einzusetzen):

- Hottinger-Kraftmeßdose (Kanal 24, Schraube 13):

$$f_1 = F_{V1}/F_{V,0} = -0,003443 \ln(t) + 0,986629$$

- Kraftmeßdose Eigenbau (Kanal 23, Schraube 13):

$$f_2 = F_{V2}/F_{V,0} = -0,004599 \ln(t) + 0,984356$$

- äußere DMS (Kanal 22, Schraube 13):

$$f_3 = F_{V3}/F_{V,0} = -0,006194 \ln(t) + 0,979857$$

- Implantierter DMS (Kanal 30, Schraube 13):

$$f_4 = F_{V4}/F_{V,0} = -0,004963 \ln(t) + 0,991069$$

- äußere DMS (Kanäle 10 bis 19, Schrauben 1 - 10):

$$f_5 = F_{V5}/F_{V,0} = -0,006906 \ln(t) + 0,976661$$

- Implantierte DMS (Kanäle 00 und 02 - 09, Schrauben 1 und 3 - 10):

$$f_6 = F_{V6}/F_{V,0} = -0,005341 \ln(t) + 0,983994$$

Tabelle 2: Anfangswerte der Vorspannkraft

Kanal- Nummer	Schrauben- nummer	Bemerkungen	Anfangswerte der Vorspannkraft in kN	
0	1	Implantierter DMS	226,770	
1	2	Implantierter DMS	226,610 *	
2	3	Implantierter DMS	224,610	Mittelwert
3	4	Implantierter DMS	227,300	224,417 kN
4	5	Implantierter DMS	222,820	
5	6	Implantierter DMS	221,300	Standard- abweichung
6	7	Implantierter DMS	226,260	2,519 kN
7	8	Implantierter DMS	222,490	
8	9	Implantierter DMS	221,160	
9	10	Implantierter DMS	227,040	
30	13	Implantierter DMS	222,130	
10	1	2 DMS auf Schaft	217,808	
11	2	2 DMS auf Schaft	222,969	
12	3	2 DMS auf Schaft	218,209	Mittelwert
13	4	2 DMS auf Schaft	225,685	222,686 kN
14	5	2 DMS auf Schaft	221,747	
15	6	2 DMS auf Schaft	222,322	Standard- abweichung
16	7	2 DMS auf Schaft	228,989	3,641 kN
17	8	2 DMS auf Schaft	220,811	
18	9	2 DMS auf Schaft	221,179	
19	10	2 DMS auf Schaft	227,140	
22	13	2 DMS auf Schaft	218,383	
23	13 lang	Eigenbau-KMD	208,480	
24	13 lang	Hottinger-KMD	222,420	
30	13 lang	Implantierter DMS	222,130	

* Anmerkung: Kanal zur Mittelung der Trendlinien und zur Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

Die entsprechenden Trendlinien bzw. die gemittelten Trendlinien im F_V [kN]-Zeit-Diagramm lauten (t ist in Monaten einzusetzen):

- Hottinger-Kraftmeßdose (Kanal 24, Schraube 13):

$$F_{V1} = -0,7658 \ln(t) + 219,45$$

- Kraftmeßdose Eigenbau (Kanal 23, Schraube 13):

$$F_{V2} = -0,9588 \ln(t) + 205,21$$

- äußere DMS (Kanal 22, Schraube 13):

$$F_{V3} = -1,3520 \ln(t) + 213,98$$

- Implantierter DMS (Kanal 30, Schraube 13):

$$F_{V4} = -1,1025 \ln(t) + 220,14$$

- äußere DMS (Kanäle 10 bis 19, Schrauben 1 - 10):

$$F_{V5} = -1,5372 \ln(t) + 217,48$$

- Implantierte DMS (Kanäle 00 und 02 - 09, Schrauben 1 und 3 - 10):

$$F_{V6} = -1,3102 \ln(t) + 220,59$$

5.8 Ermittlung der verschiedenen Kriecheffekte

Der Meßwertverlauf soll nachfolgend für die Meßstellen:

- Hottinger-KMD (Kanal 24),
- die außen auf den Schaft aufgebrauchten DMS (Kanäle 22 und 10 bis 19) und
- die implantierten DMS (Kanäle 30 und 00 bis 09)

aufgelistet werden; für die außen auf den Schaft aufgebrauchten DMS und für die implantierten DMS bei den Schrauben 1 bis 10 heißt das: Mittelwerte aus 10 (bzw. 9) Versuchsstücken, für die anderen Kanäle heißt das: Einzelwerte.

Die Tabelle 3 zeigt die aus den Meßwertverläufen berechneten Vorspannkraft nach 5 Minuten, nach 2 Stunden, nach 1, 12, 120 und 360 Monaten. Die Tabelle 4 zeigt das Verhältnis aktuelle Vorspannkraft bezogen auf die 5 Minuten nach dem Anziehen verbliebene Vorspannkraft; die Tabelle 5 zeigt das Verhältnis aktuelle Vorspannkraft bezogen auf die 2 Stunden nach dem Anziehen verbliebene Vorspannkraft. Daraus geht hervor, daß der wesentliche Vorspannkraftabfall in den ersten Stunden nach dem Anziehen vorstatten geht.

Die Werte der Hottinger-KMD werden als Basis genommen, weil bei diesem Meßgerät keine Kriecheffekte auftreten. Daher enthalten die gemessenen Vorspannkraft die wirklichen Kraftreduktionen aus dem Kriechnachlassen der Schraube und/oder des Stahlblockes. Sämtliche anderen Werte werden auf diese bezogen. Werden kleinere F_V -Werte als diejenigen in der Hottinger-Meßdose festgestellt, so sind die darin enthaltenen größeren Kraftreduktionen auf Kriecheffekte der DMS bzw. des Klebers zurückzuführen.

Tabelle 3: Verlauf der Vorspannkräfte in kN aus den Trendlinien

	Meßstelle	Vorspannkräfte in kN nach der angegebenen Zeit					
		5 Min	2 Std	1 M	12 M	120 M	360 M
1	Hottinger-KMD (24)	226,402	223,968	219,450	217,547	215,784	214,942
2	Eigenbau KMD (23)	213,914	210,867	205,210	202,827	200,620	199,566
3	aufgebr. DMS (22)	226,260	221,961	213,980	210,619	207,504	206,018
4	Implant. DMS (30)	230,148	226,645	220,140	217,400	214,862	213,651
5	aufgebr. DMS(10-19)	231,435	226,549	217,480	213,660	210,121	208,432
6	Implant. DMS (0,2-9)	232,484	228,320	220,590	217,334	214,317	212,878

Tabelle 4 Verlauf der bezogenen Vorspannkräfte aus den Trendlinien, dargestellt als Verhältnis Schraubenkraft zu einem Zeitpunkt t zur Schraubenkraft zum Zeitpunkt t = 5 Minuten

	Meßstelle	auf den 5 Min-Wert bezogene Vorspannkräfte nach der Zeit von			
		1 Monat	12 Monate	120 Monate	360 Monate
1	Hottinger-KMD (24)	0,969	0,961	0,953	0,949
2	Eigenbau KMD (23)	0,959	0,948	0,938	0,933
3	aufgebr. DMS (22)	0,946	0,931	0,917	0,911
4	Implant. DMS (30)	0,957	0,945	0,934	0,928
5	aufgebr. DMS(10-19)	0,940	0,923	0,908	0,901
6	Implant. DMS (0,2-9)	0,949	0,935	0,922	0,916

Anmerkung: Die Zeile 1, multipliziert mit 100, zeigt die wahren Vorspannkräfte in % bezogen auf F_{V1} nach 5 Minuten

Tabelle 5: Verlauf der bezogenen Vorspannkkräfte aus den Trendlinien, dargestellt als Verhältnis Schraubenkraft zu einem Zeitpunkt t zur Schraubenkraft zum Zeitpunkt $t = 2$ Stunden

Meßstelle	auf den 2 Std-Wert bezogene Vorspannkkräfte nach der Zeit von	1 Monat	12 Monate	120 Monate	360 Monate
1 Hottinger-KMD (24)		0,980	0,971	0,963	0,960
2 Eigenbau KMD (23)		0,973	0,962	0,951	0,946
3 aufgebr. DMS (22)		0,964	0,949	0,935	0,928
4 Implant. DMS (30)		0,971	0,959	0,948	0,943
5 aufgebr. DMS(10-19)		0,960	0,943	0,927	0,920
6 Implant. DMS (0,2-9)		0,966	0,952	0,939	0,932

Anmerkung: Die Zeile 1, multipliziert mit 100, zeigt die wahren Vorspannkkräfte in % bezogen auf F_{V1} nach 2 Stunden

Sämtliche zuvor erläuterten Trendlinien f_1 bis f_6 sind im Bild 73, Anlage 73 als bezogene Werte zusammengestellt. Da der Verlauf f_4 (implantierter DMS bei Schraube 13) oberhalb der Werte aus der als kriechstabil eingestufteten Hottinger-Meßdose liegt, erscheint dieser Verlauf unsicher, er wird deshalb nicht weiter beachtet.

Der Kriechabfall resultiert aus zwei Anteilen:

- K1-Anteil: Schrauben/Stahlblock-Kriechen
- K2-Anteil: DMS/Kleber-Kriechen

Das Verfahrensmodell zur Ermittlung der Kriecheigenschaft (K2-Anteil) der implantierten DMS sieht folgendermaßen aus:

- Bei den 10 Schrauben kommt man von dem mit K1-Anteil- und K2-Anteil-behafteten Verlauf f_5 der aufgeklebten DMS zu ihrem nur noch K1-Anteil-behafteten Verlauf, in dem zu ersterem der K2-Anteil $f_1 - f_3$ für die Schraube 13 addiert wird.
- Der K2-Anteil der implantierten DMS bei den 10 Schrauben ergibt sich dann aus der Differenz $[f_5 + (f_1 - f_3)] - f_6$. Hierbei ist $[f_5 + (f_1 - f_3)]$ der nur K1-Anteil-behaftete Vorspannkraftverlauf der 10 Schrauben und f_6 der K1-Anteil- und K2-Anteil-behaftete Verlauf bei den implantierten DMS.

K2-Anteil der aufgebrauchten DMS bei Schraube 13:

$$f_1 - f_3 = 0,002751 \ln(t) + 0,006772$$

K2-Anteil der Eigenbau-KMD bei Schraube 13:

$$f_1 - f_2 = 0,001156 \ln(t) + 0,002273$$

Wahrer, nur K1-Anteil-behafteter Vorspannkraftverlauf bei den 10 Versuchsschrauben:

$$f_5 + (f_1 - f_3) = -0,004155 \ln(t) + 0,983433$$

K2-Anteil = Kriecheinfluß der implantierten DMS/des Klebers bei den 10 Versuchsschrauben:

$$[f_5 + (f_1 - f_3)] - f_6 = 0,001186 \ln(t) - 0,000561$$

Der sich ergebende K2-Anteil = Kriecheinfluß der implantierten DMS/des Klebers ist in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: K2-Anteil = Kriecheinfluß zum Zeitpunkt t der implantierten DMS/des Klebers in % bezogen auf den Anfangswert der Vorspannkraft

Meßstelle	Kriecheinfluß nach			
	1 Monat	12 Monaten	120 Monaten	360 Monaten
Implantierte DMS	(-0,06)	0,24	0,51	0,64

Obwohl die einzelnen Beiträge sich auf verschiedene Anfangswerte der einzelnen Schrauben beziehen, darf der K2-Anteil der implantierten DMS mit den %-Sätzen der Tabelle 6 berechnet werden.

6. Zusammenfassung

Zwecks gesicherter Feststellung der Vorspannkkräfte von Nieten und Schrauben in Altbrücken muß der Kriecheinfluß der benutzten implantierten DMS bzw. ihres Klebers bekannt sein.

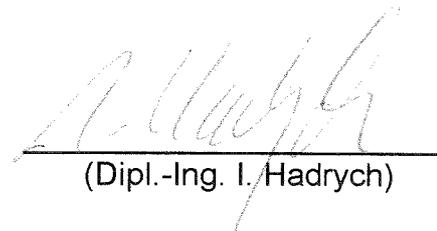
In einer Serie mit 11 Testschrauben und Vergleichsinstrumentierungen konnten die einzelnen Kriechanteile ermittelt werden. Dabei wurde davon ausgegangen, daß die Hottinger-Kraftmeßdose selbst nicht kriecht, mit ihr gemessene Vorspannkkräfte und Vorspannkraftverluste die wahren Werte sind.

Langzeitmessungen reagieren immer besonders empfindlich auf Strom- und Temperaturschwankungen, so auch bei den hier durchgeführten Versuchen über 15 Monate. Daher mußten verschiedene Bereinigungen, Mittelwertbildungen und Gewichtungen sowie auch Eliminierungen von Fehlmessungen bis zum Erhalt der endgültigen Lösung durchgeführt werden. Als Ergebnis kann mitgeteilt werden, daß der K2-Anteil der implantierten DMS deutlich unter 1% bleibt.

Hamburg, den 18.12.1995



(Prof. Dr.-Ing. G. Valtinat)



(Dipl.-Ing. I. Hadrych)

HV M 24 x 110

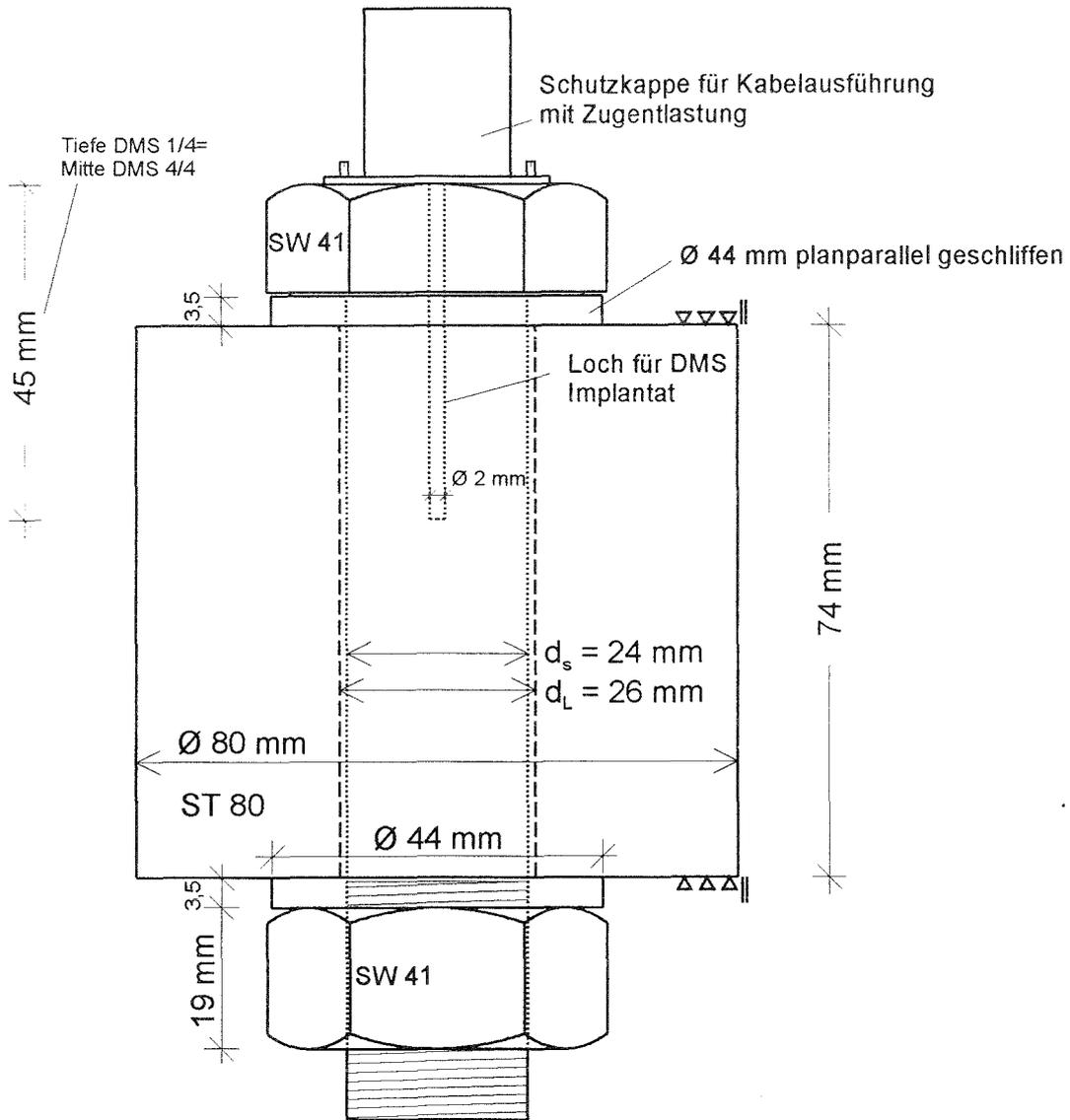


Bild 1: Gegen Stahlblock verspannte HV-Schraube M 24x110 DIN 6914 (Schrauben Nr.1 bis Nr. 10)

HV M 24 x 110

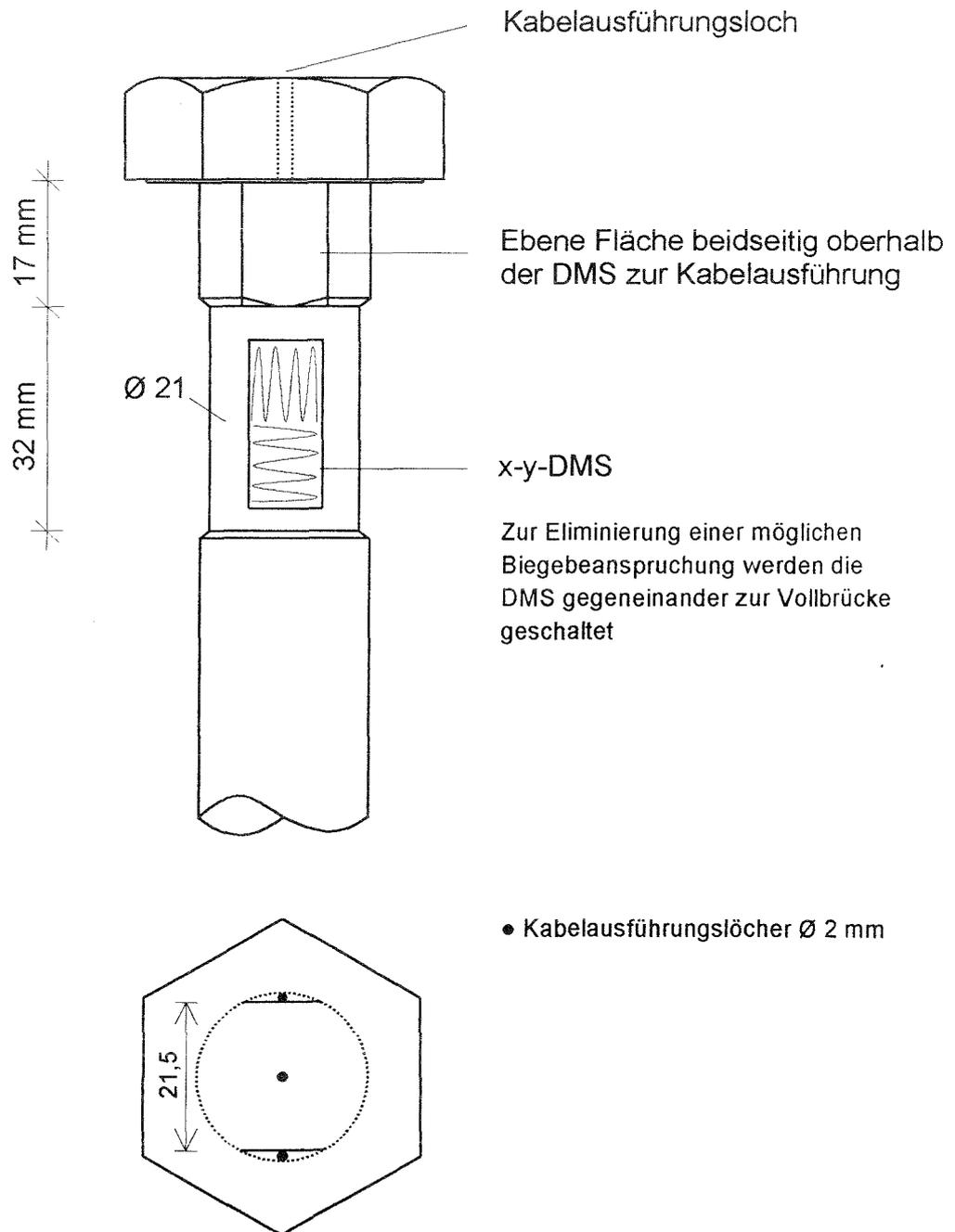


Bild 2: HV-Schraube M 24x110 DIN 6914 mit seitlich aufgebracht DMS (Schrauben Nr.1 bis Nr. 10)

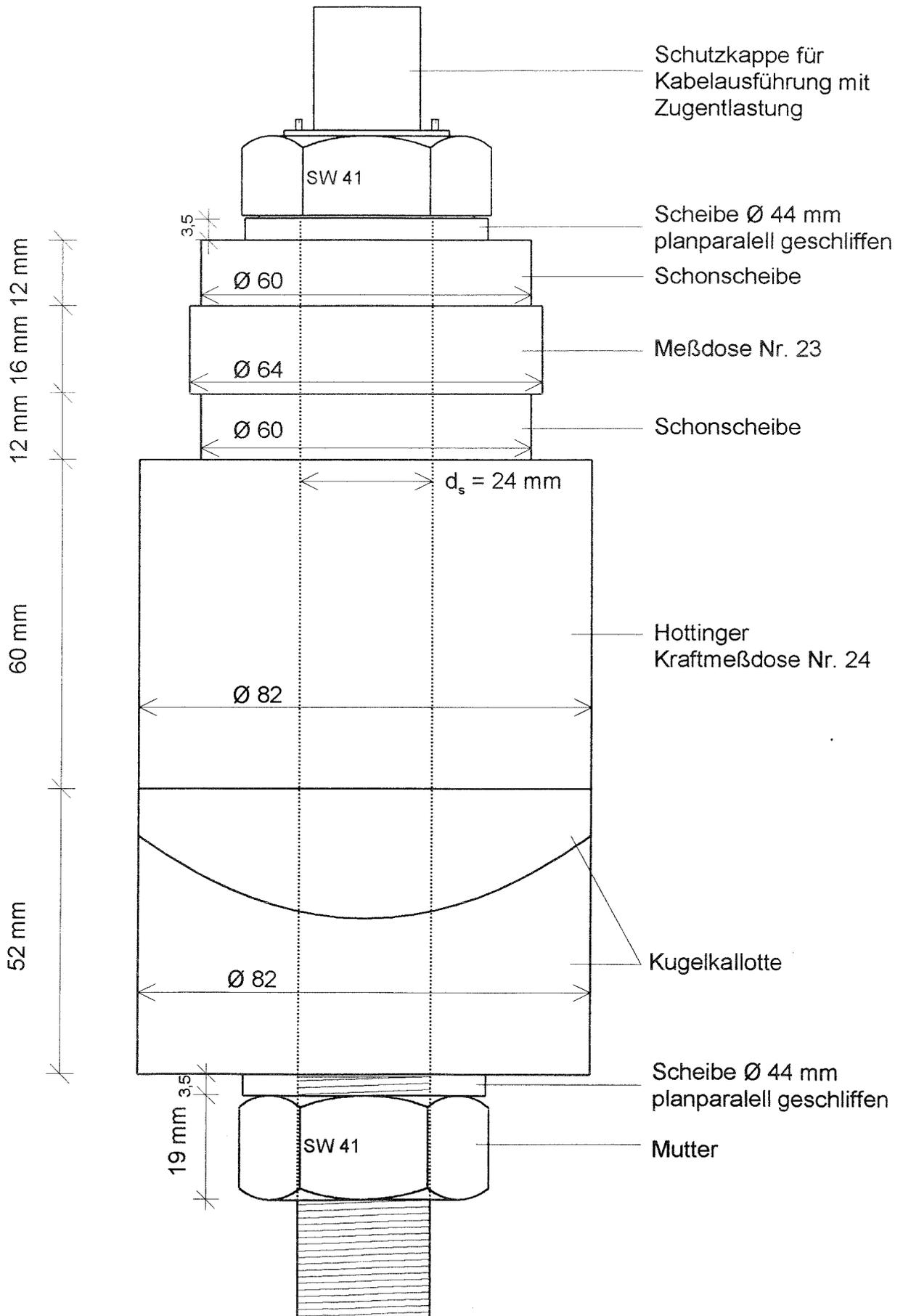


Bild 3: Gegen Kraftmeßdosen verspannte HV-Schraube M 24x200 DIN 6914 (Schraube Nr.13)

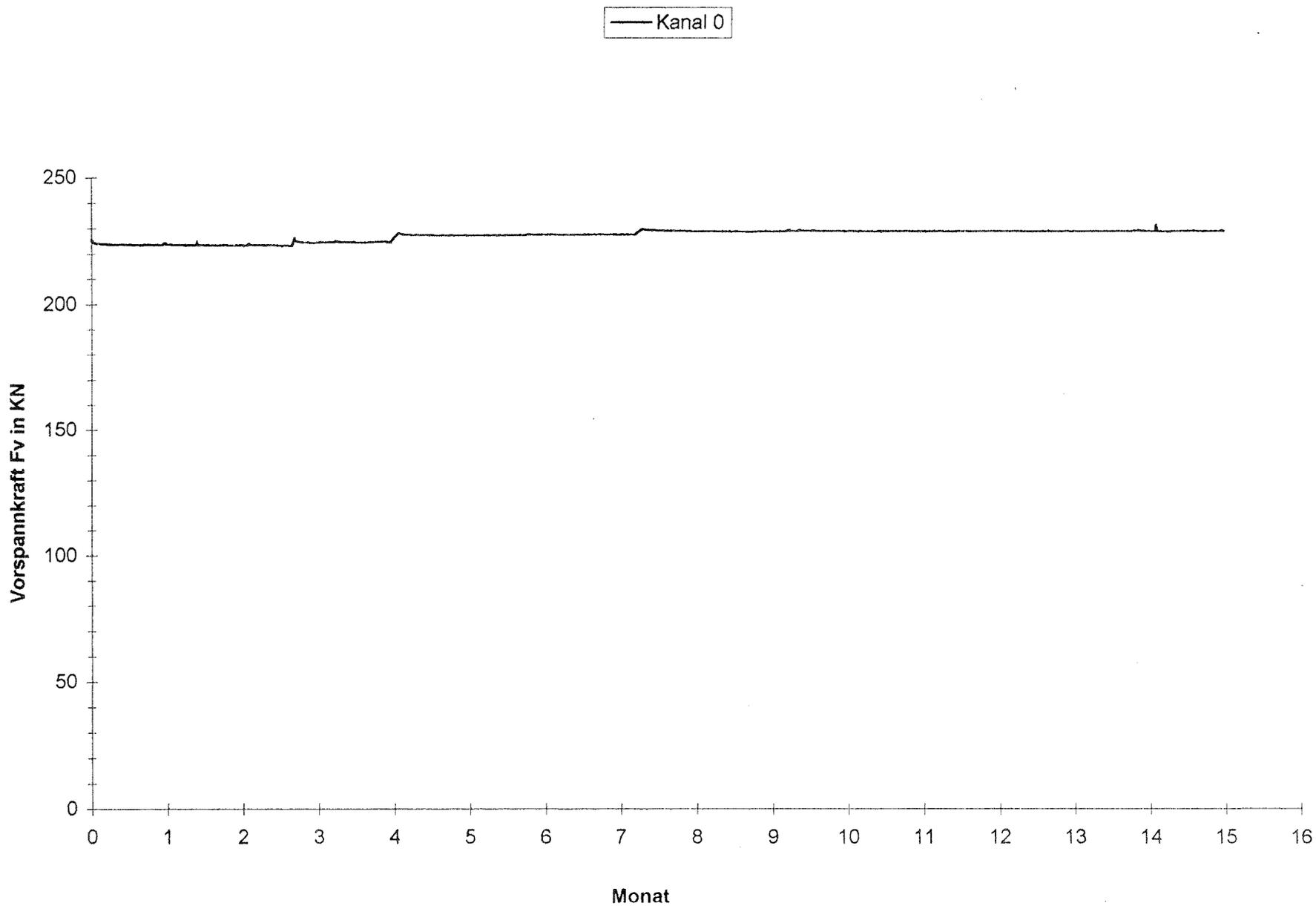


Bild 4: Aus den Meßwerten für Kanal 00 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf (Zuordnung siehe Tabelle 1)

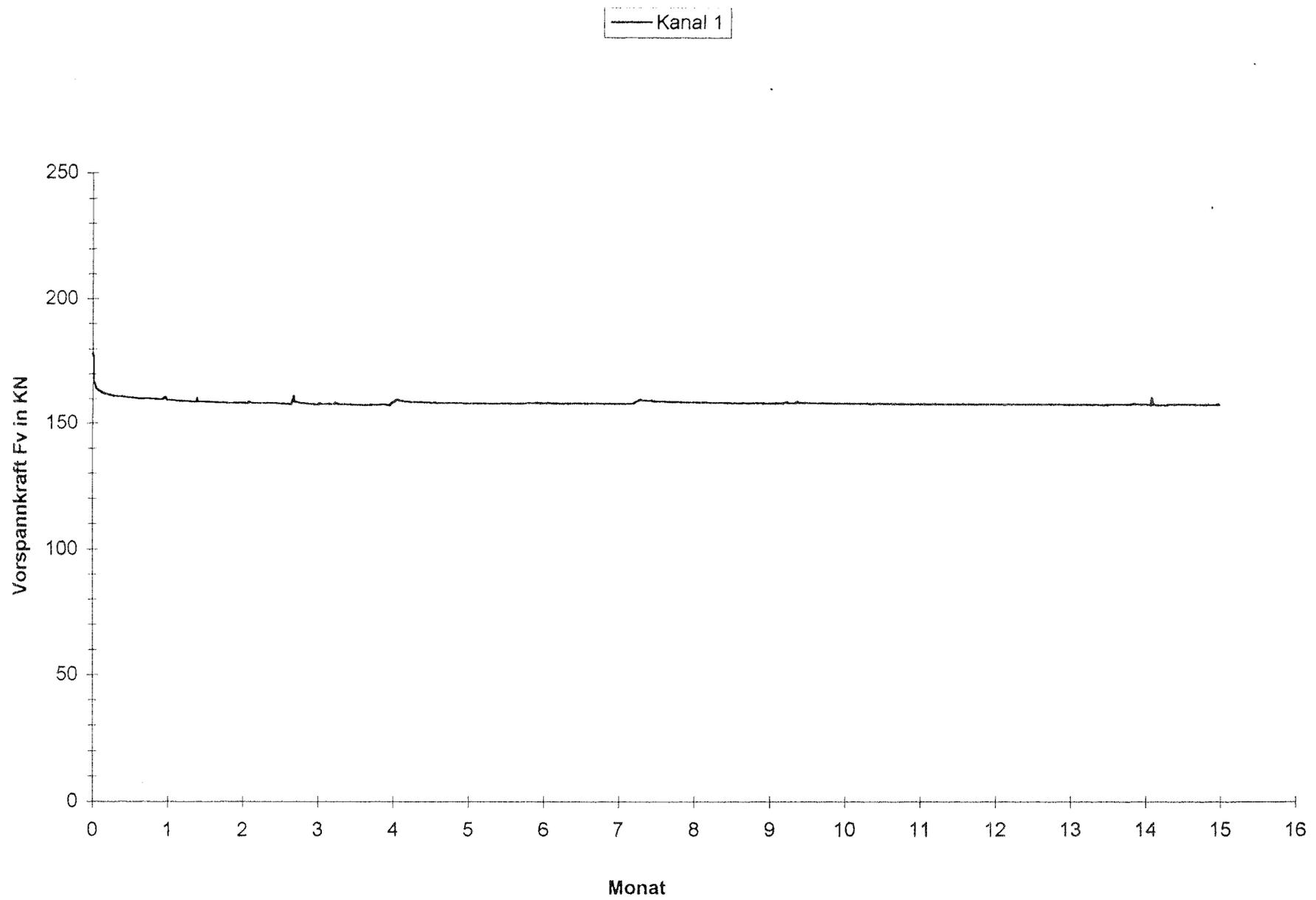


Bild 5: Aus den Meßwerten für Kanal 01 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

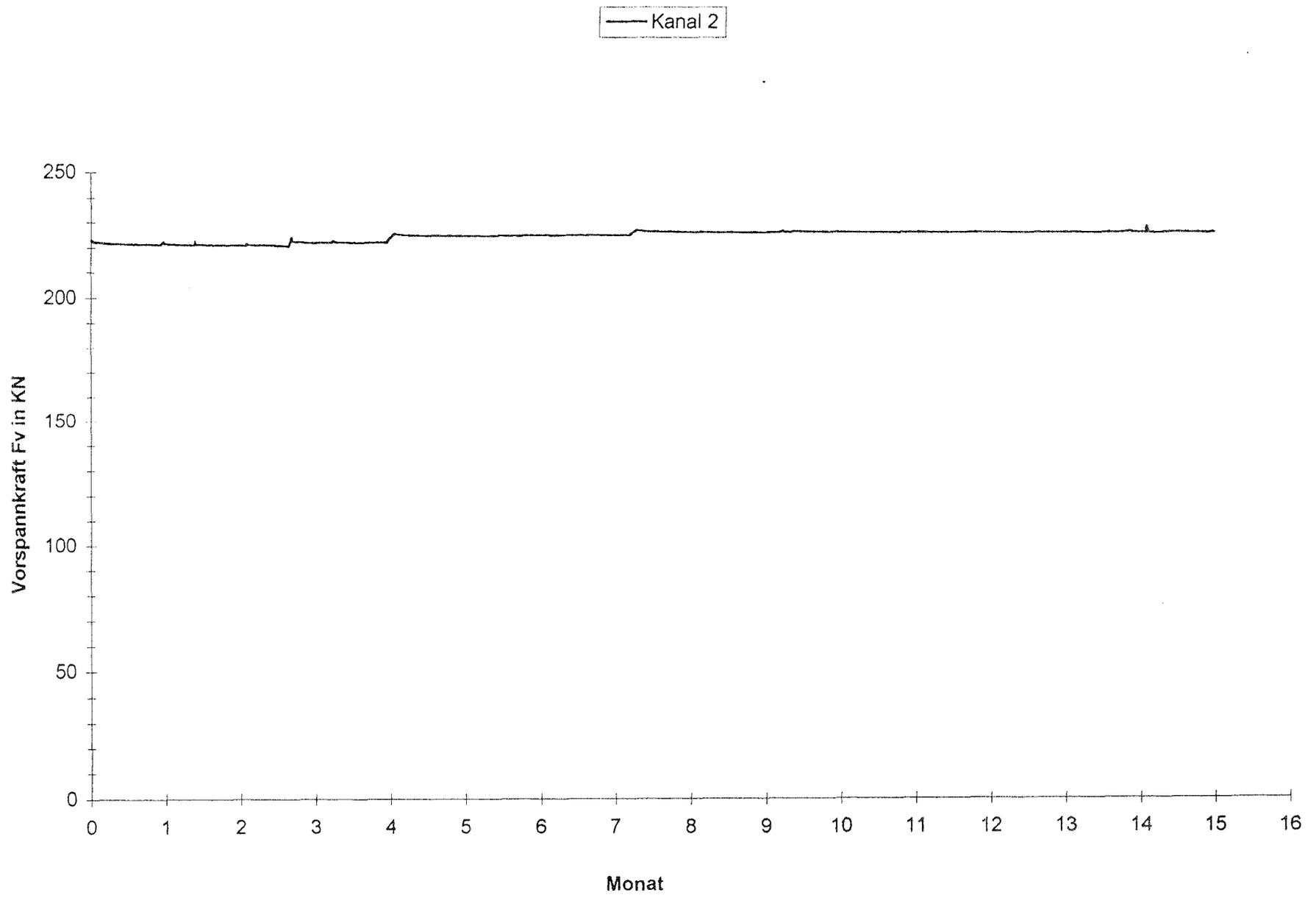
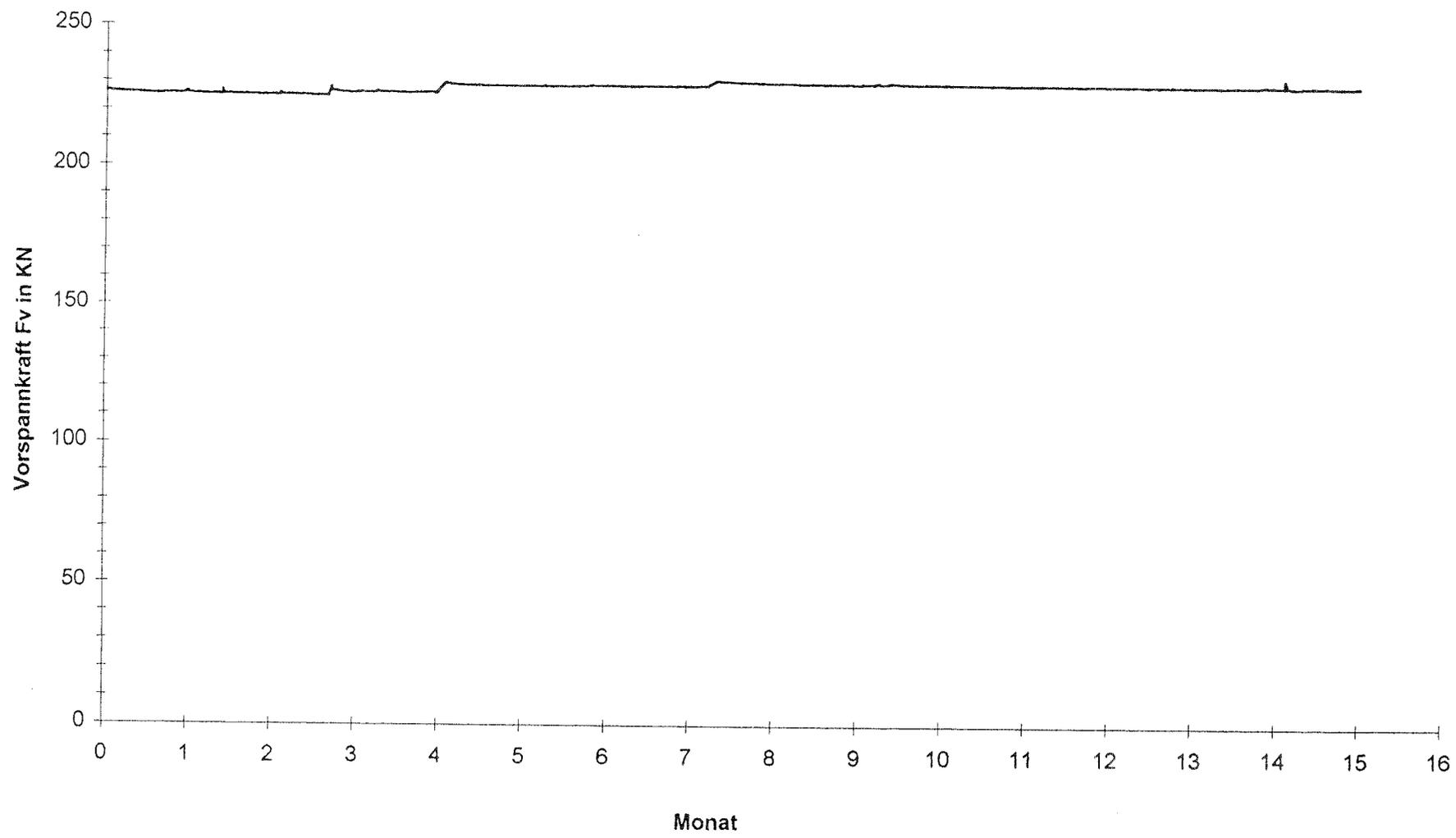


Bild 6: Aus den Meßwerten für Kanal 02 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf (Zuordnung siehe Tabelle 1)

Kanal 3



Anlage 7

Bild 7: Aus den Meßwerten für Kanal 03 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf (Zuordnung siehe Tabelle 1)

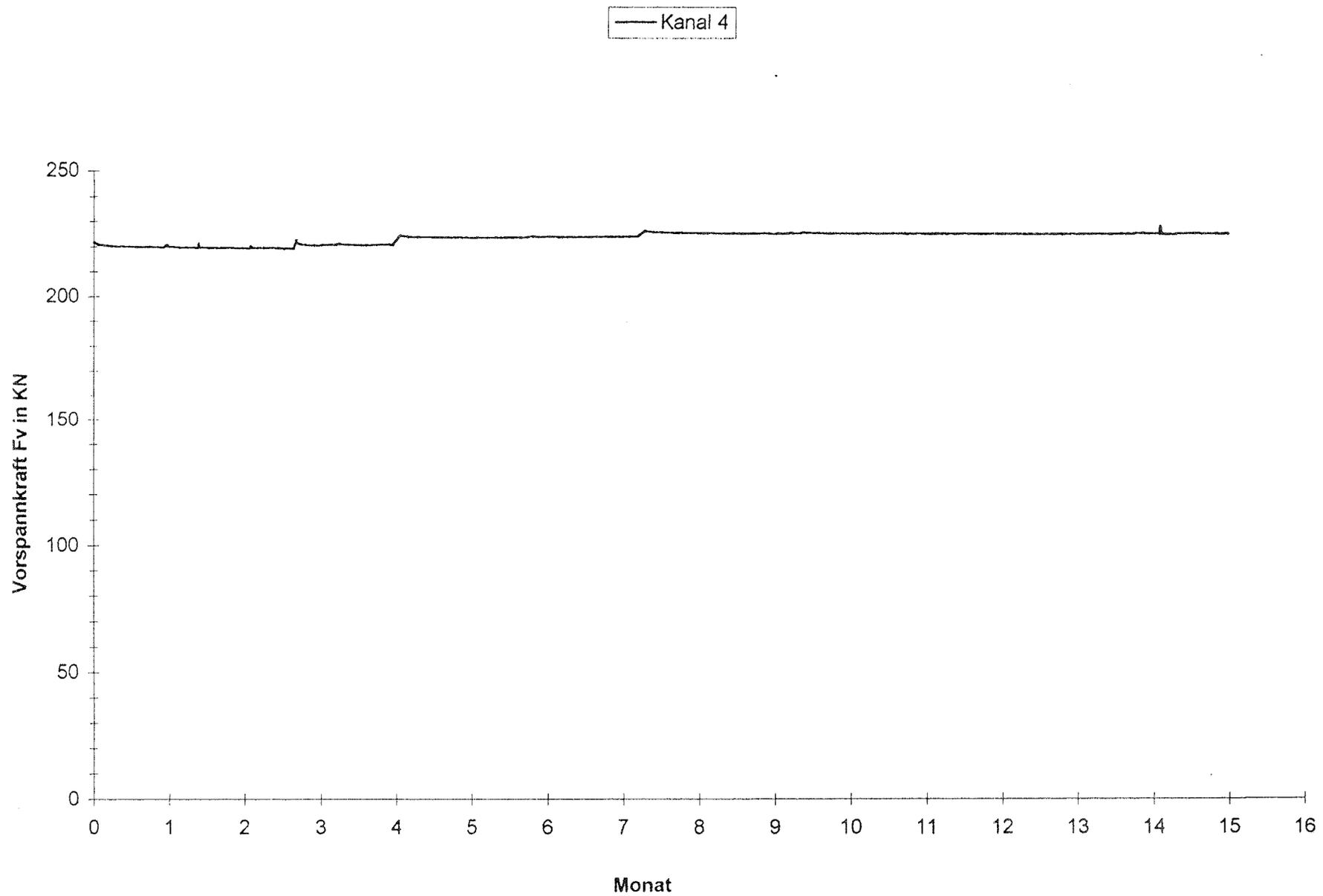


Bild 8: Aus den Meßwerten für Kanal 04 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

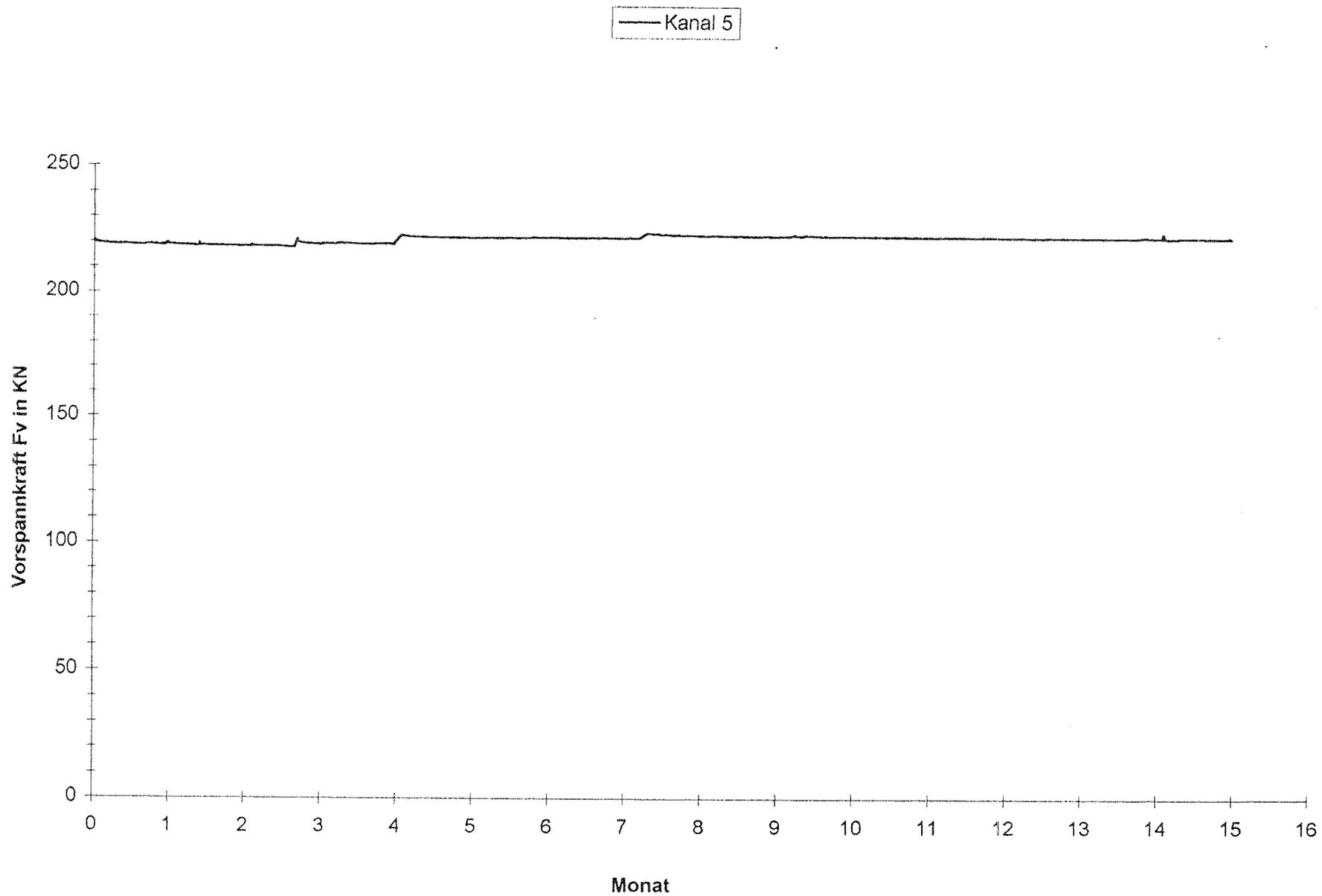


Bild 9: Aus den Meßwerten für Kanal 05 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

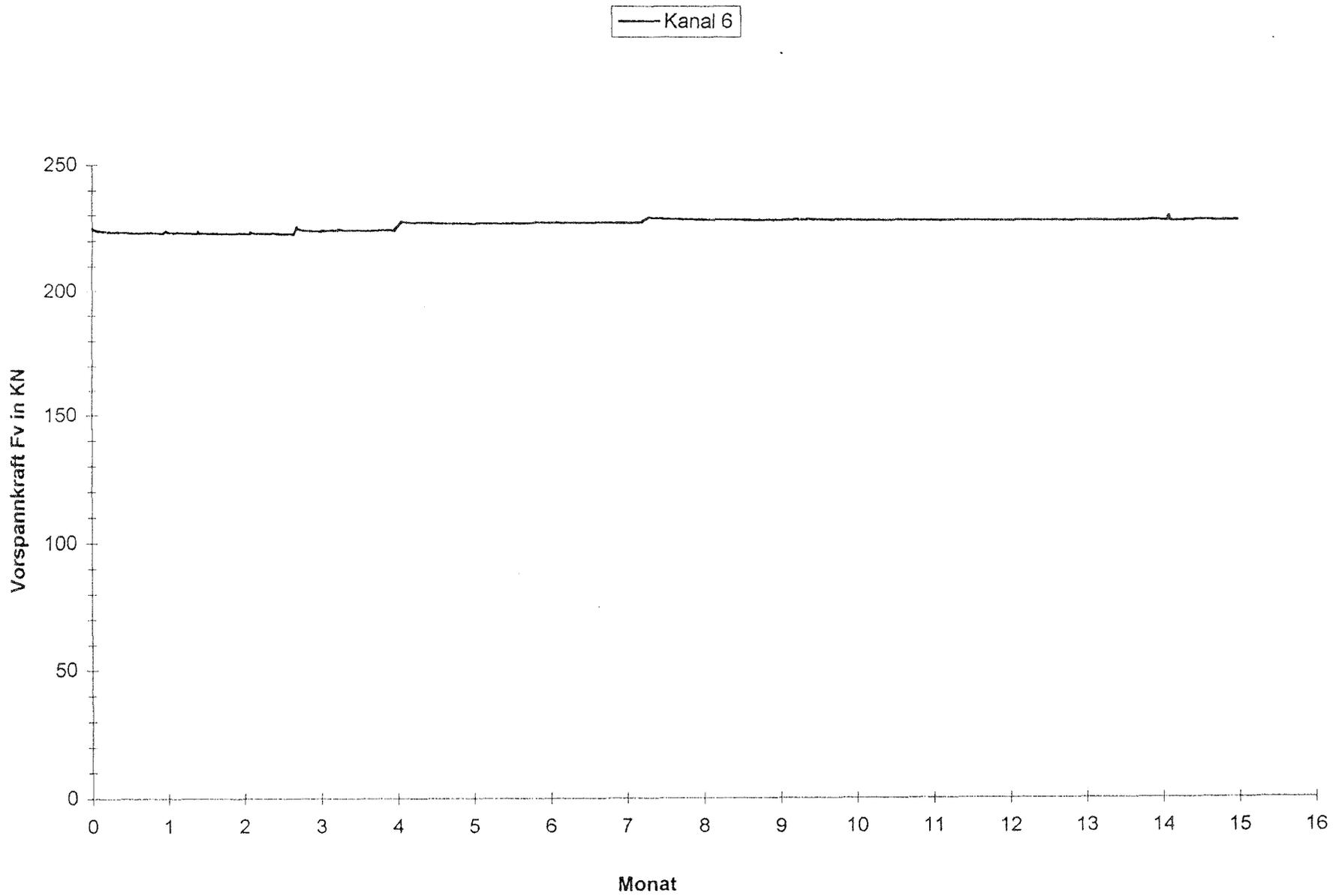


Bild 10: Aus den Meßwerten für Kanal 06 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

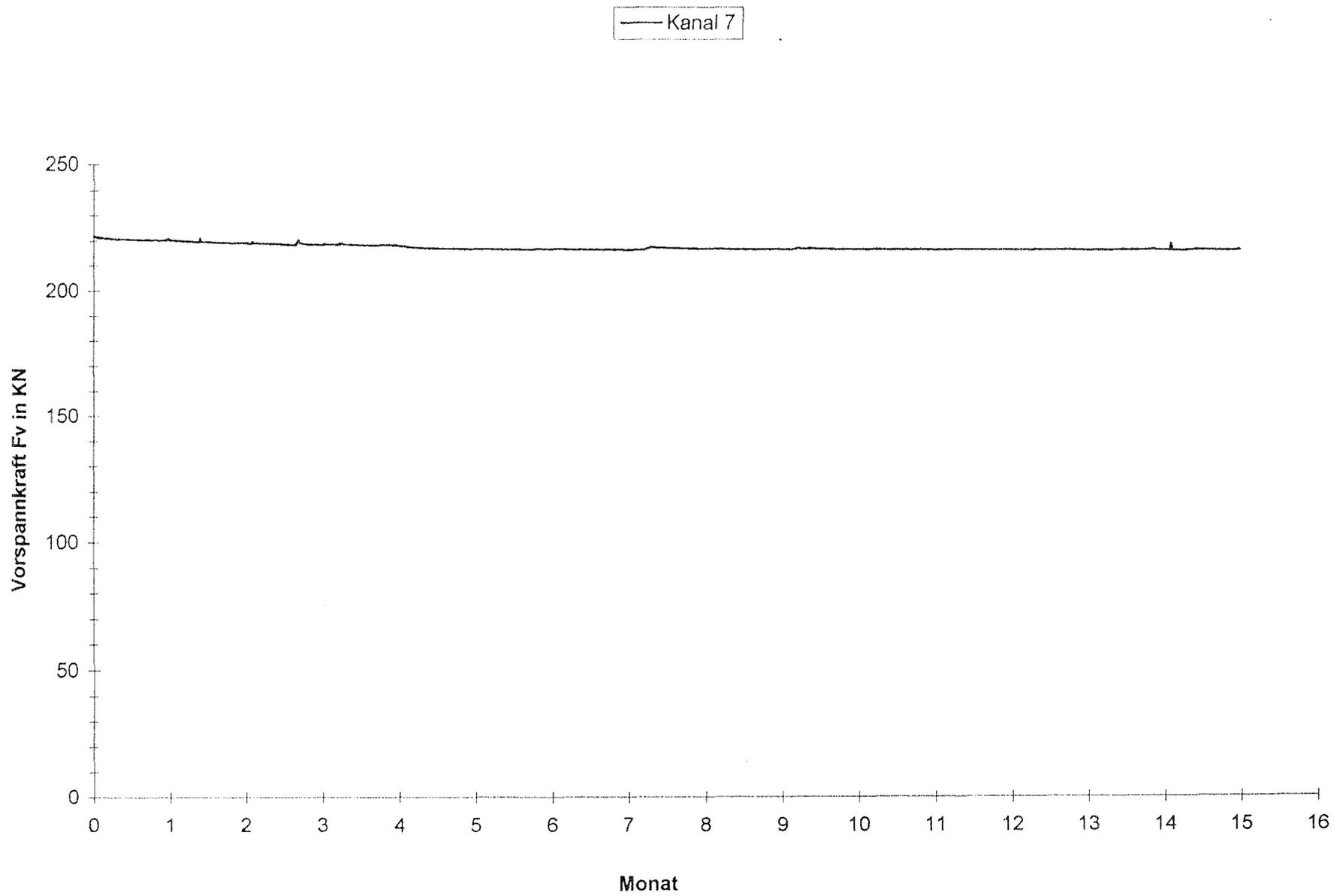


Bild 11: Aus den Meßwerten für Kanal 07 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

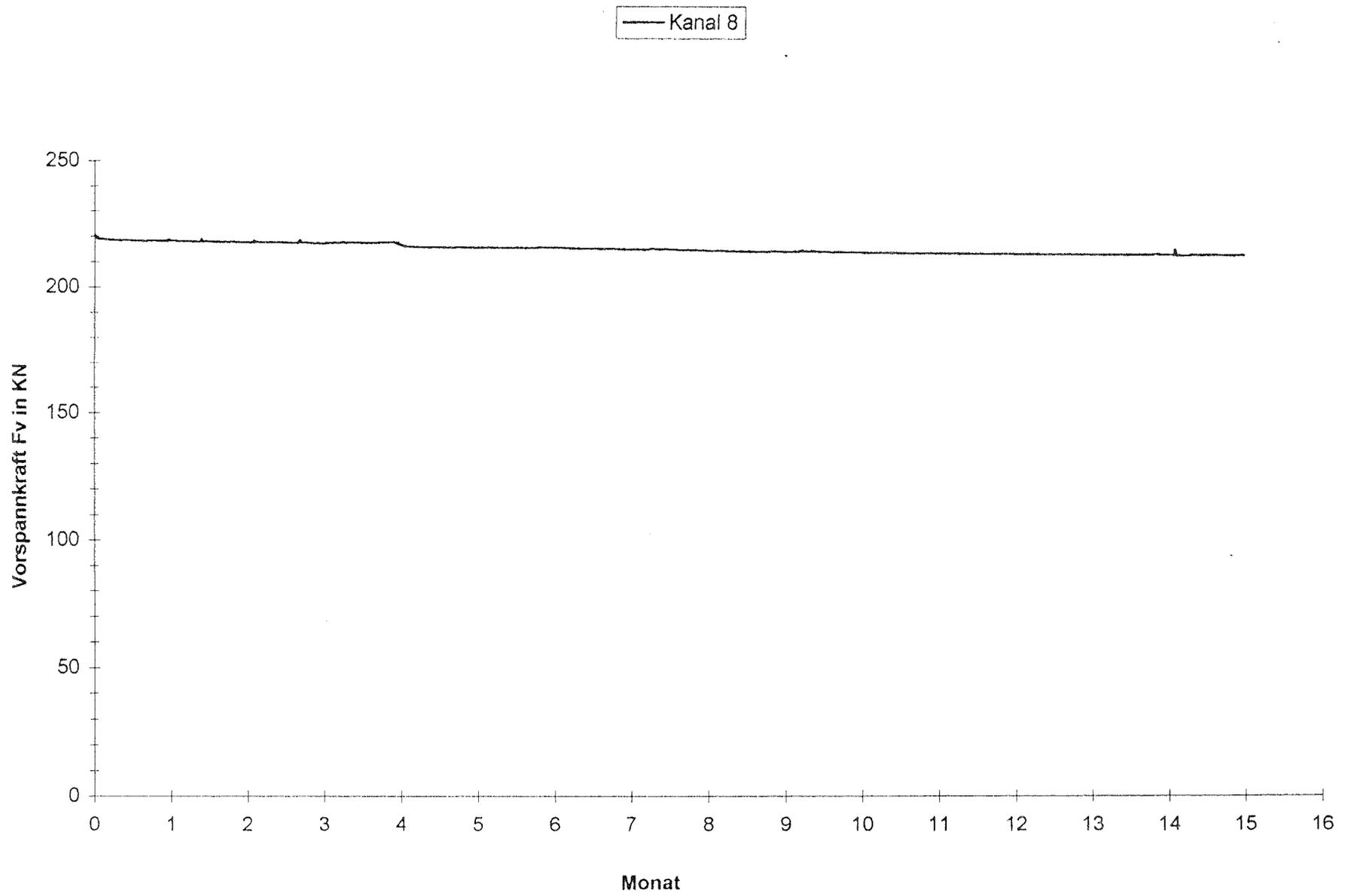


Bild 12: Aus den Meßwerten für Kanal 08 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

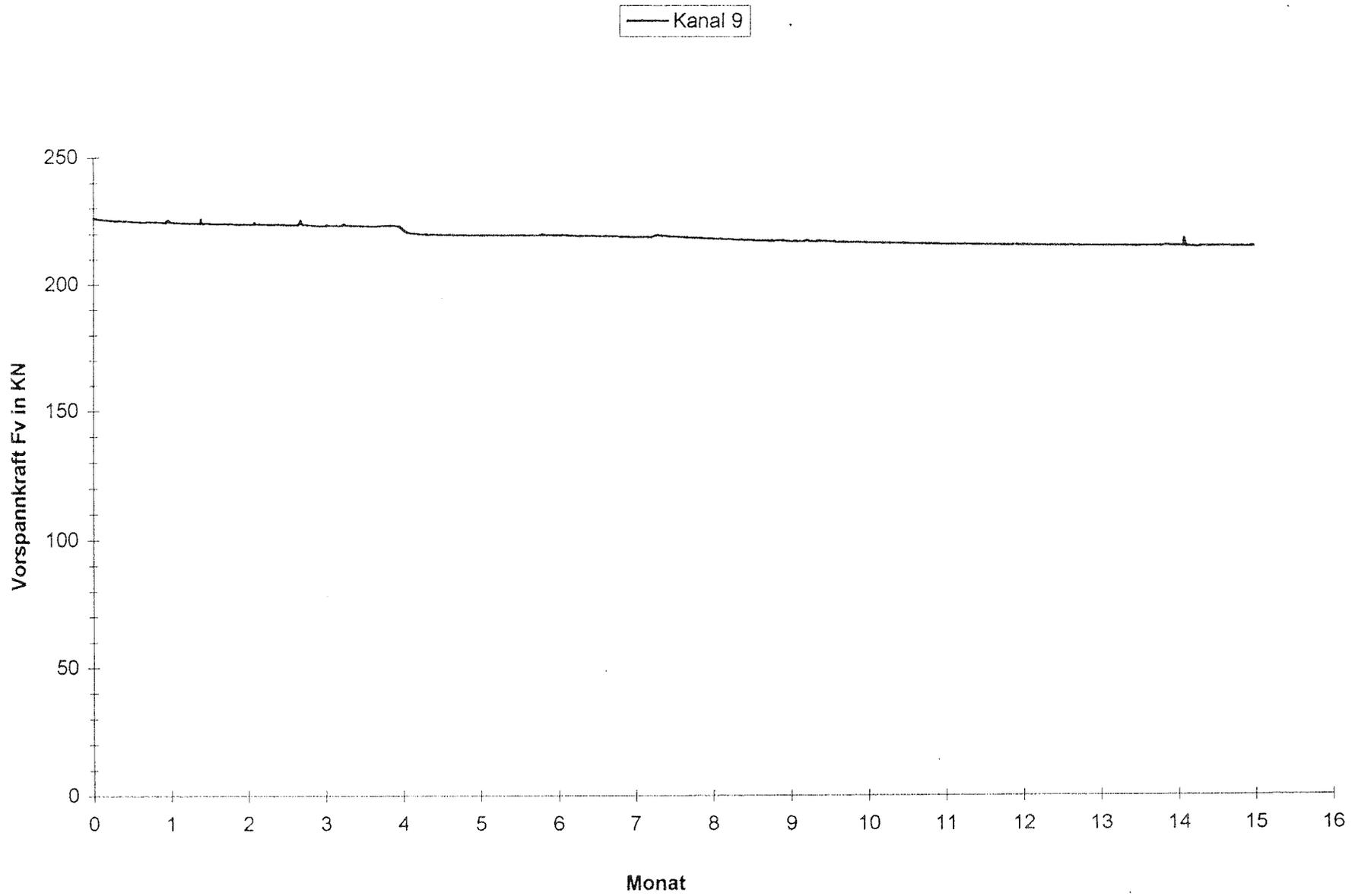


Bild 13: Aus den Meßwerten für Kanal 09 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

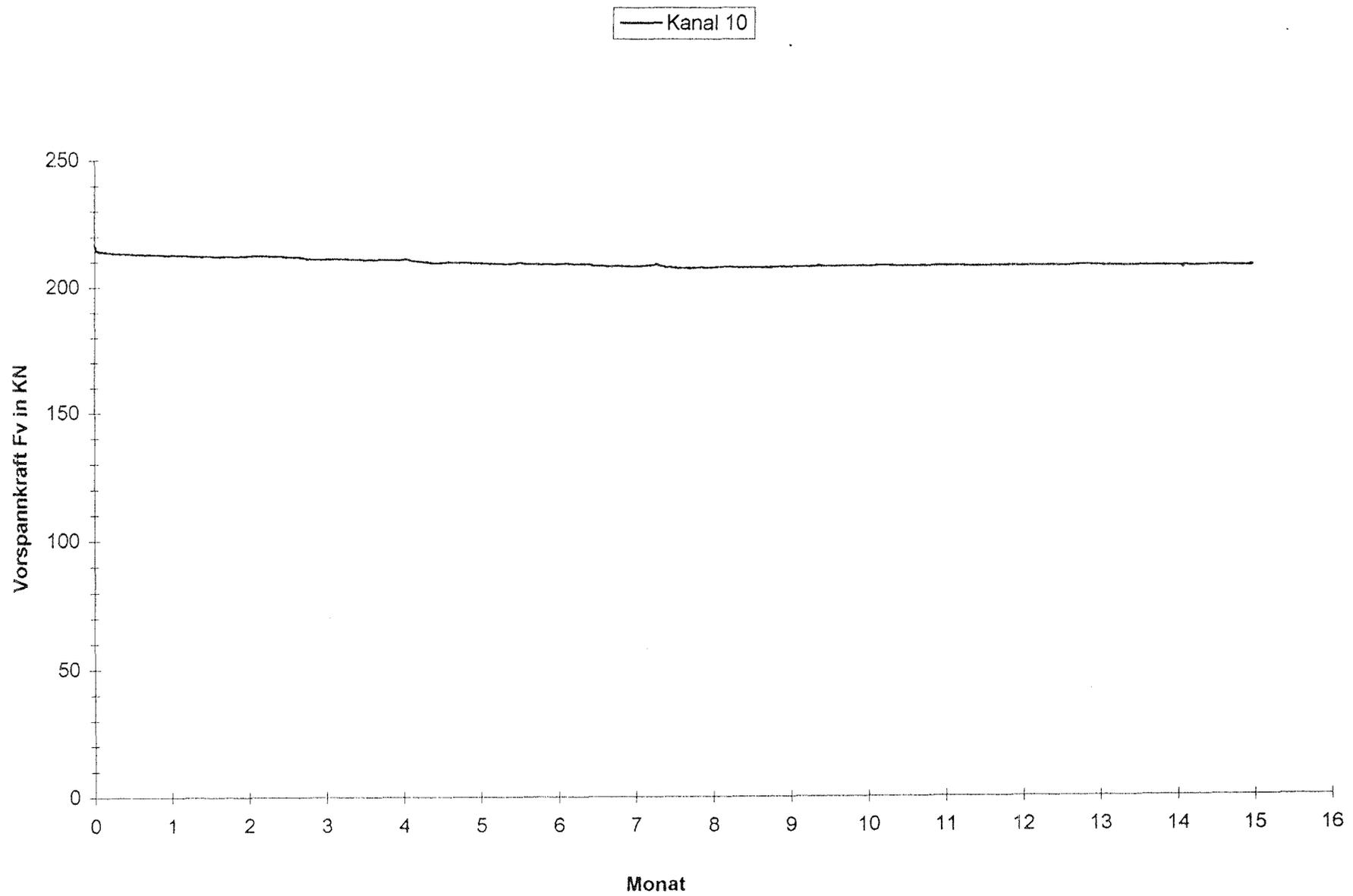


Bild 14: Aus den Meßwerten für Kanal 10 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

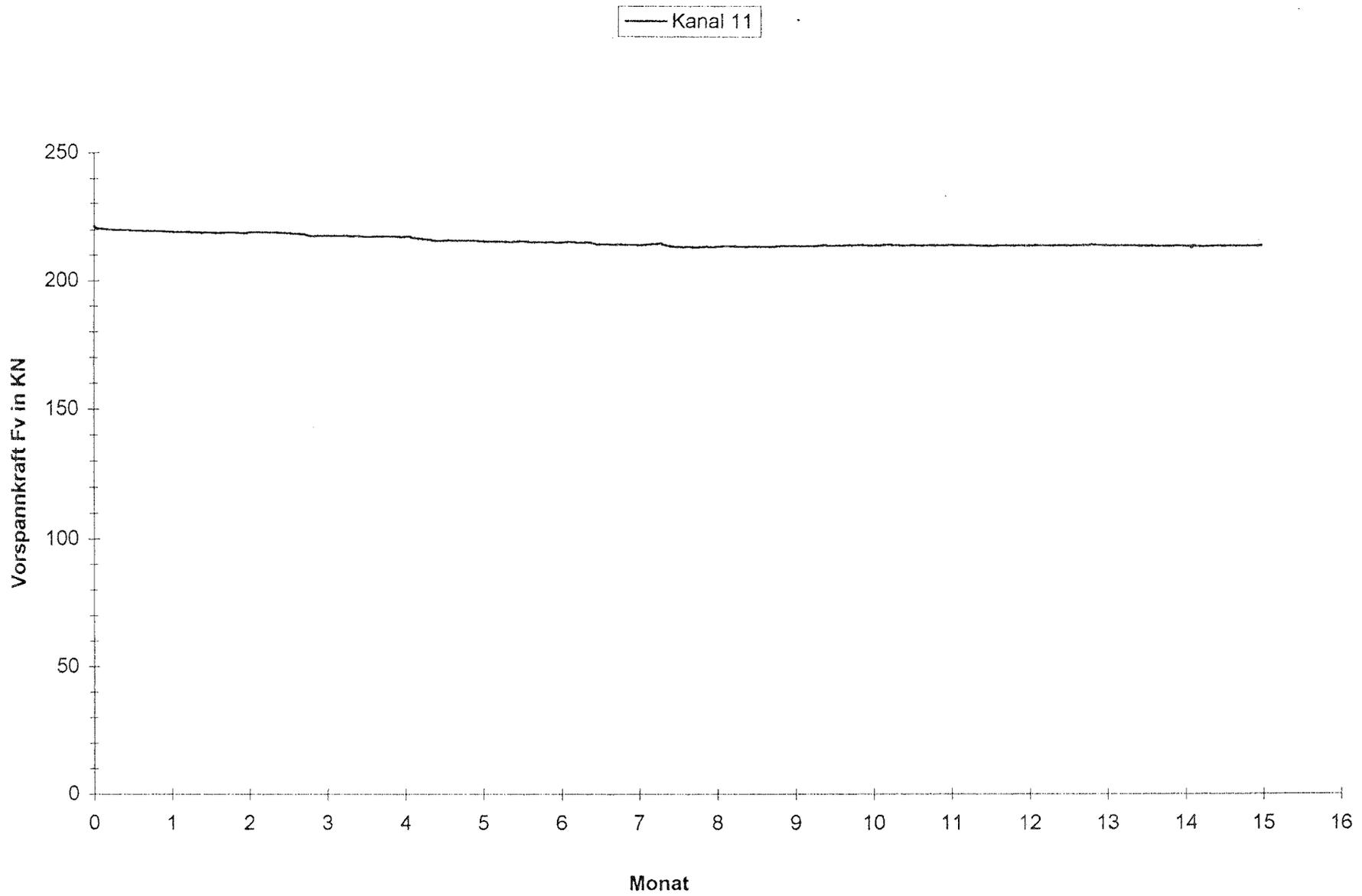


Bild 15: Aus den Meßwerten für Kanal 11 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

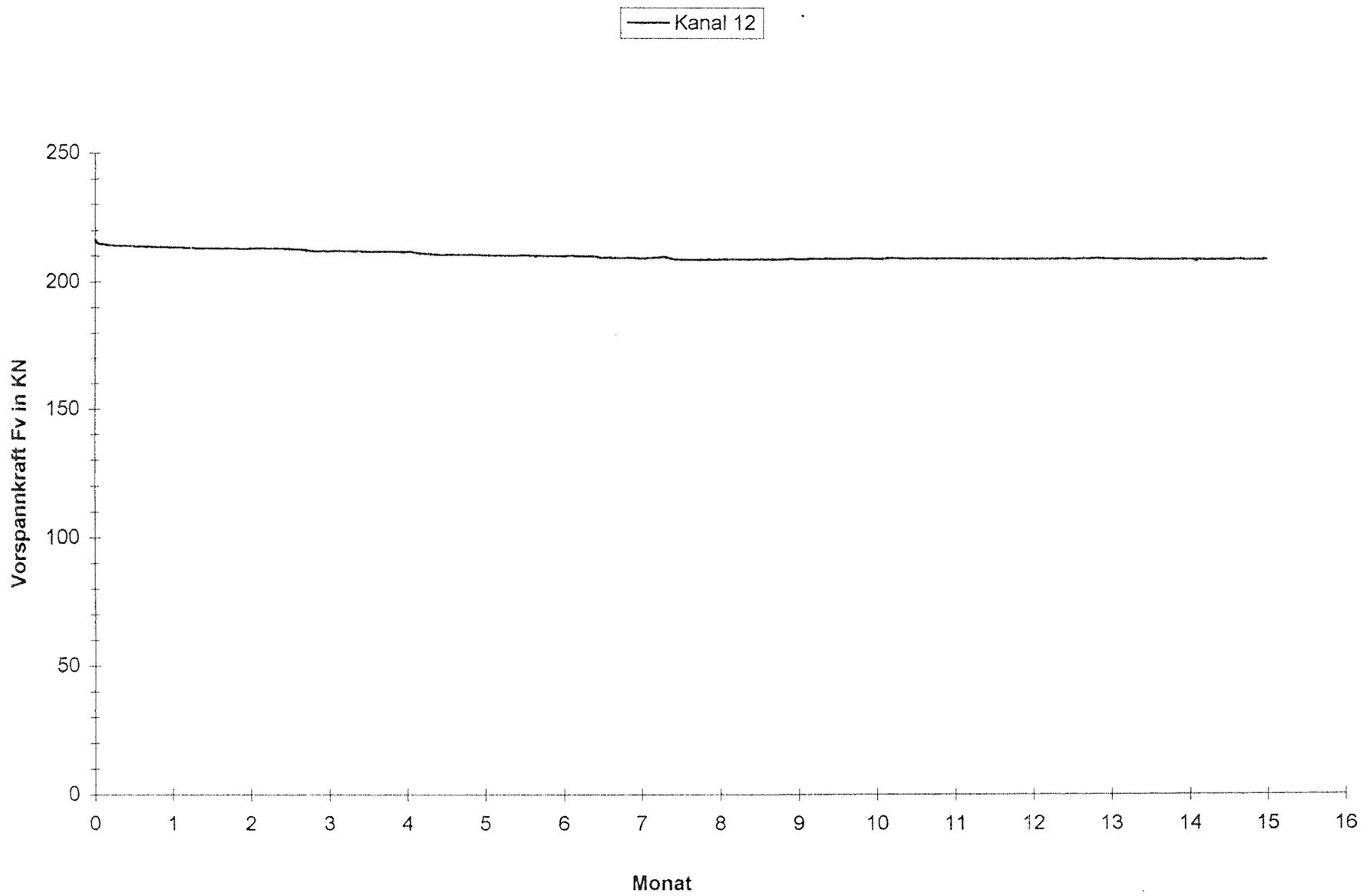


Bild 16: Aus den Meßwerten für Kanal 12 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

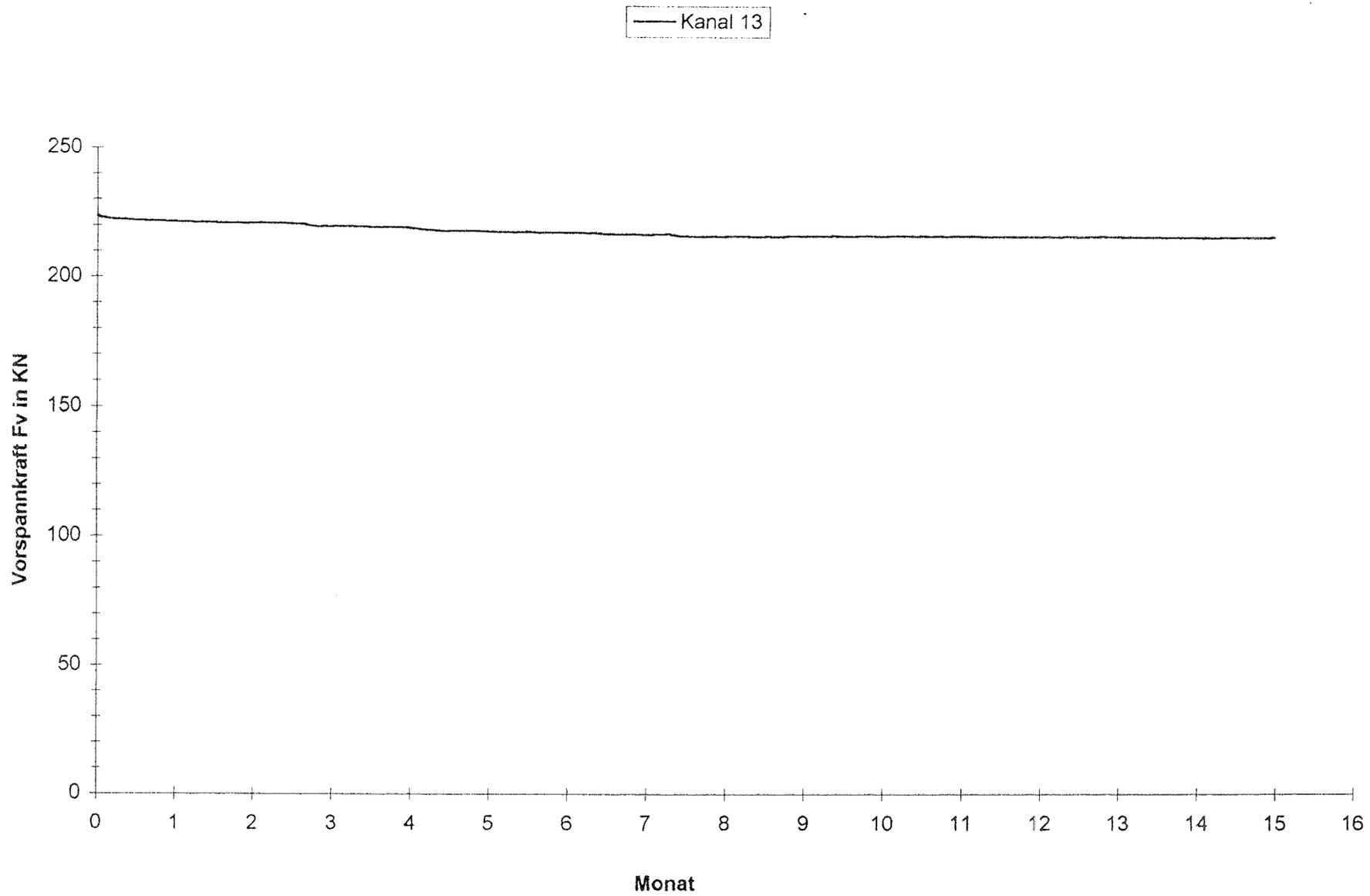


Bild 17: Aus den Meßwerten für Kanal 13 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

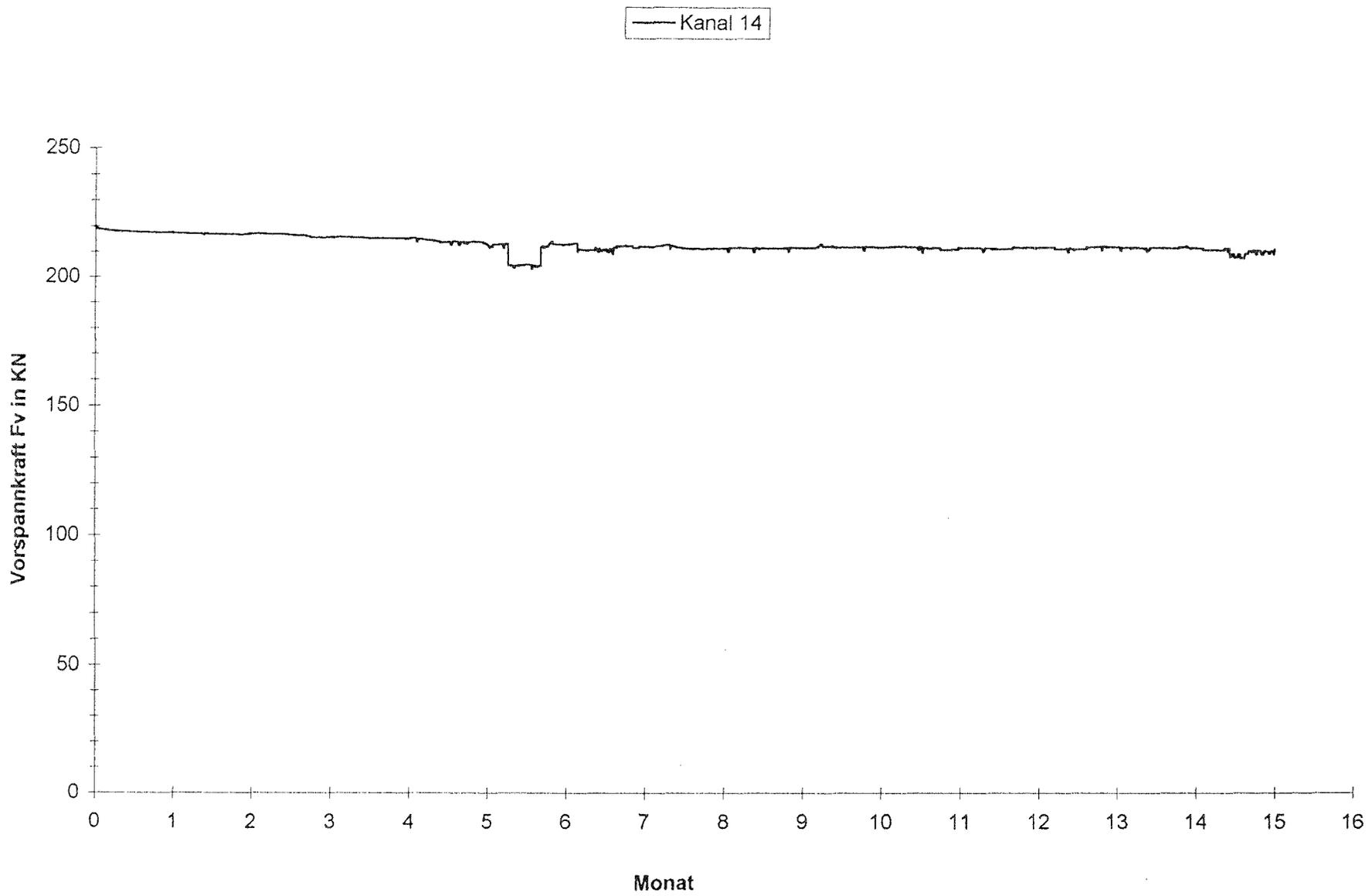


Bild 18: Aus den Meßwerten für Kanal 14 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

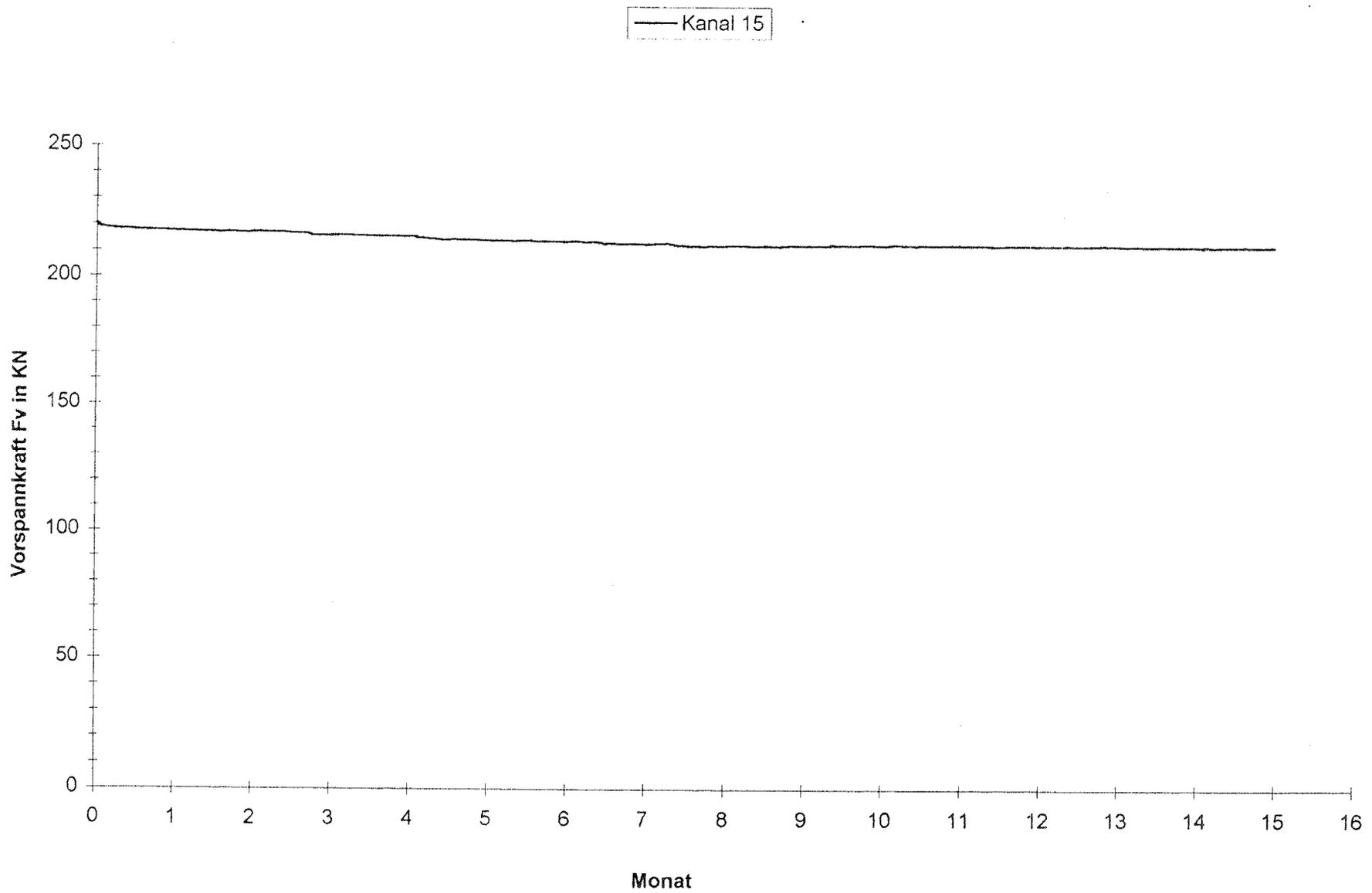


Bild 19: Aus den Meßwerten für Kanal 15 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

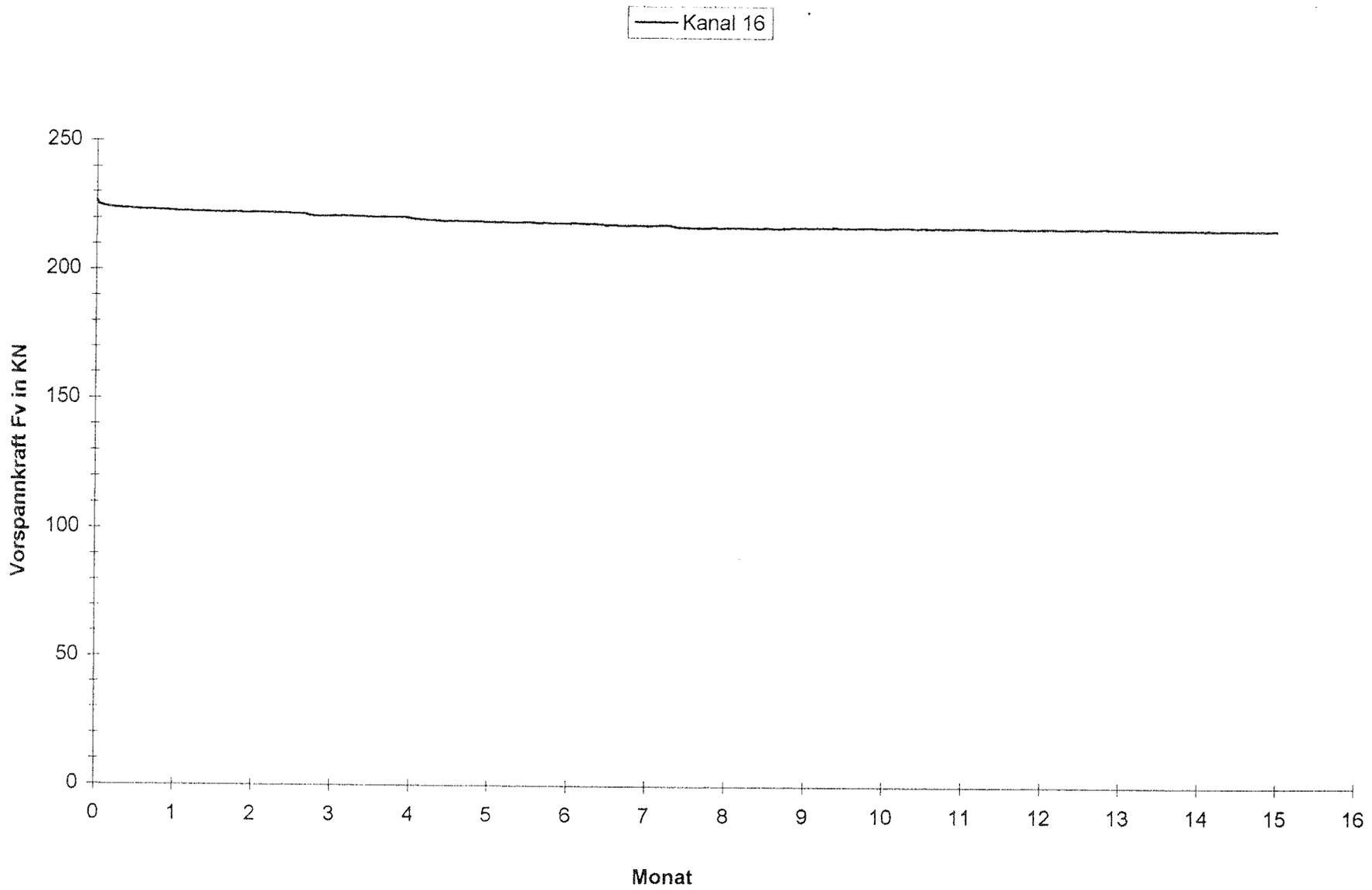


Bild 20: Aus den Meßwerten für Kanal 16 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

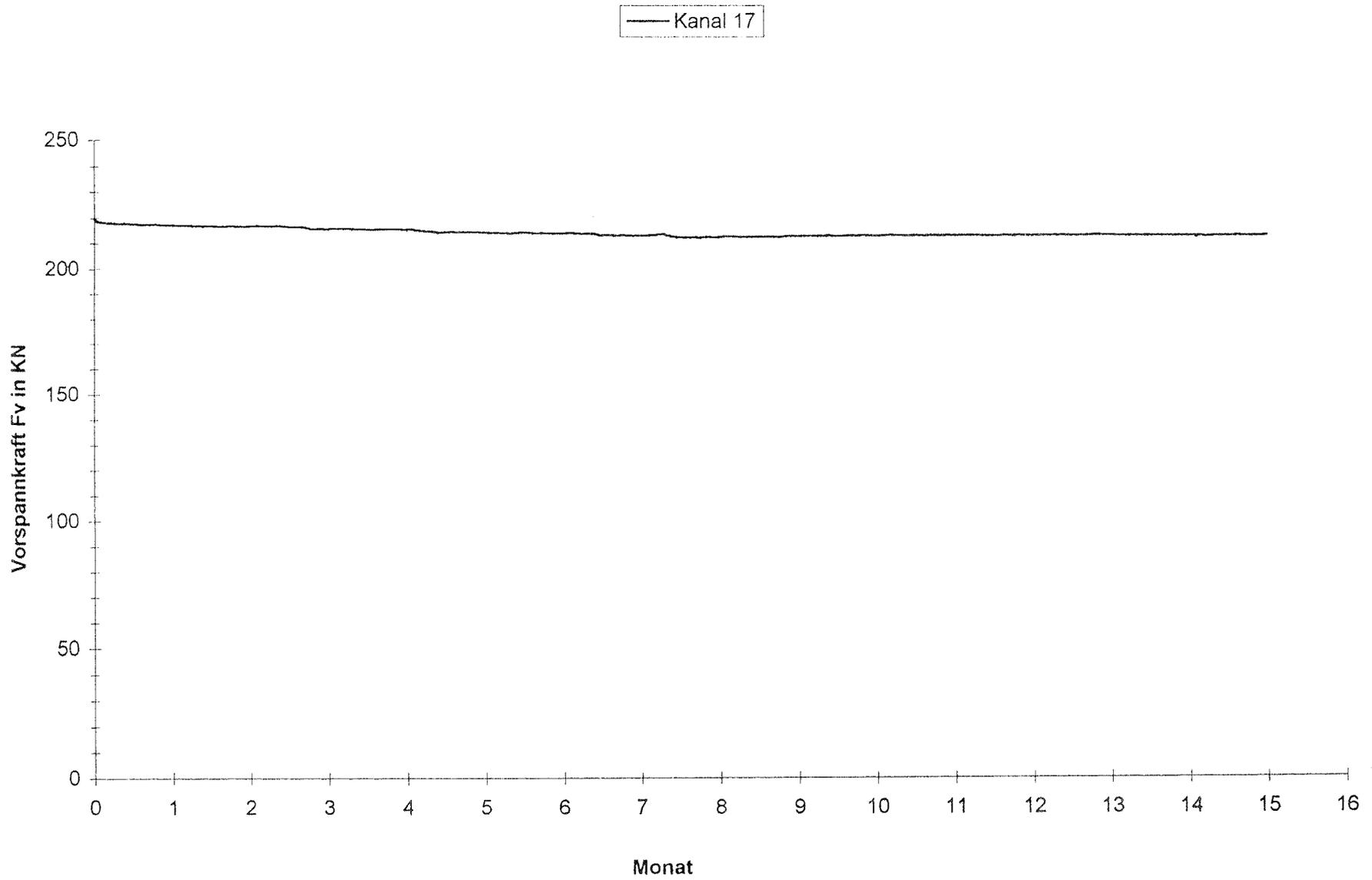


Bild 21: Aus den Meßwerten für Kanal 17 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

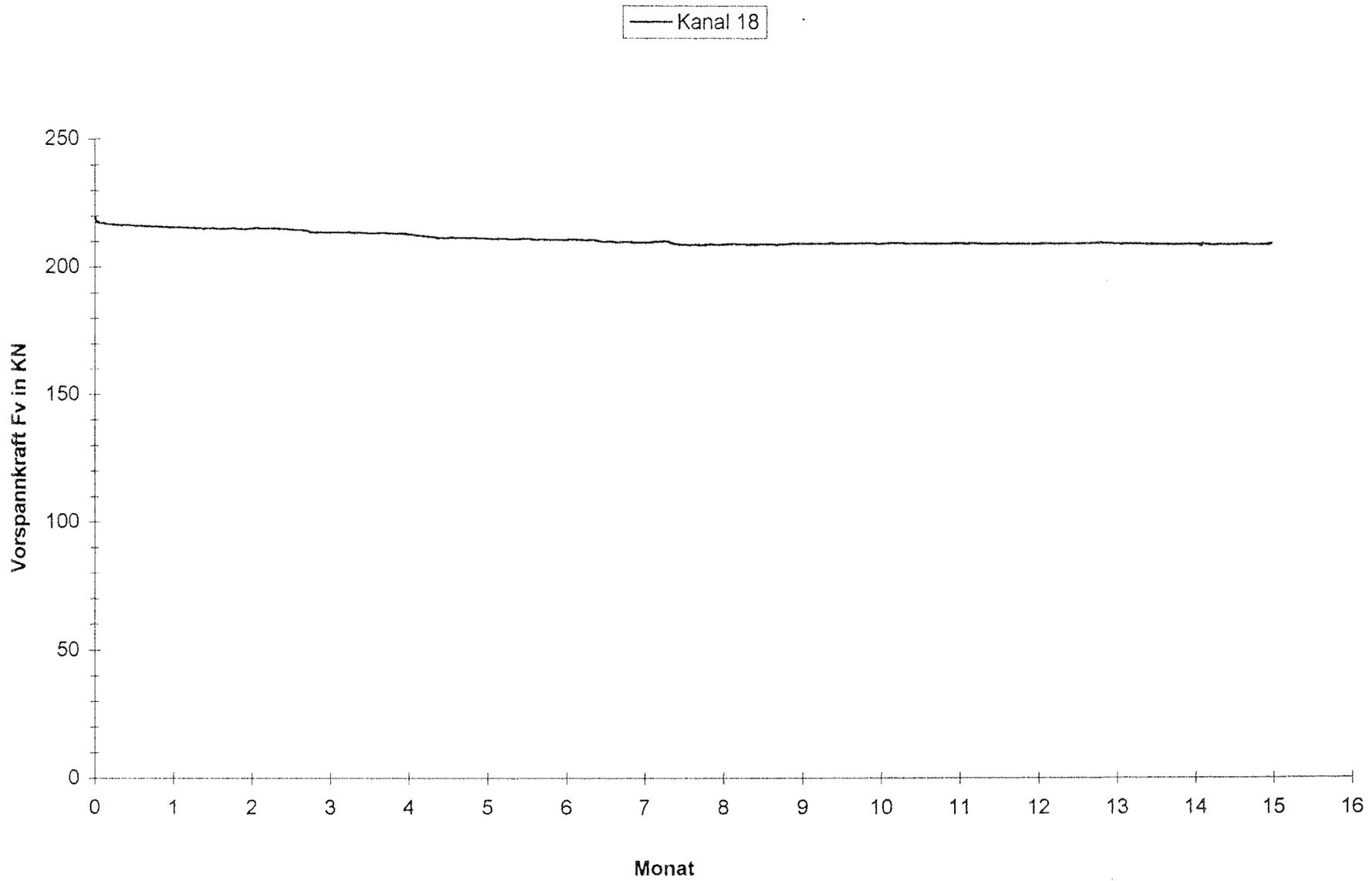


Bild 22: Aus den Meßwerten für Kanal 18 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

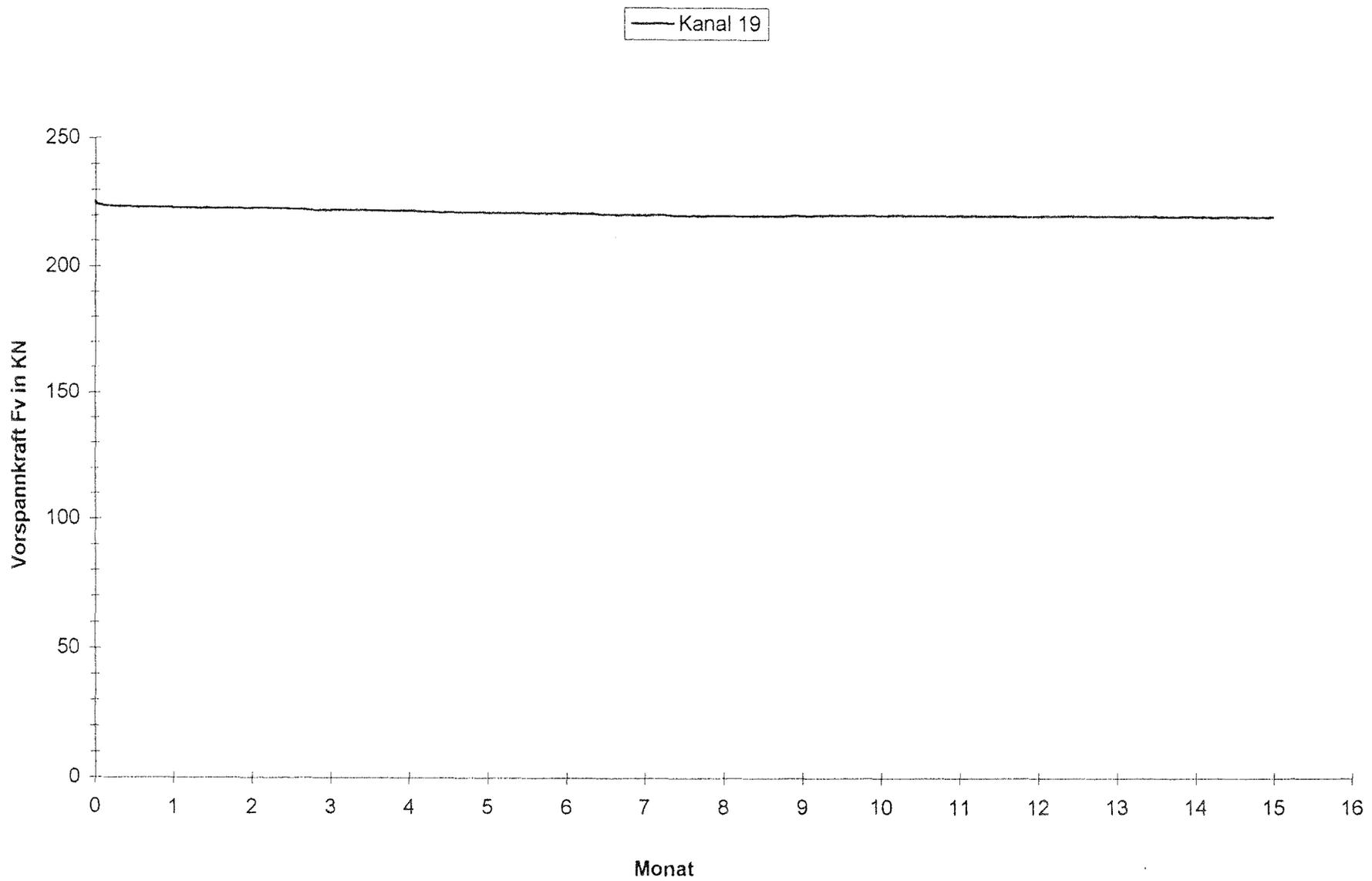


Bild 23: Aus den Meßwerten für Kanal 19 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

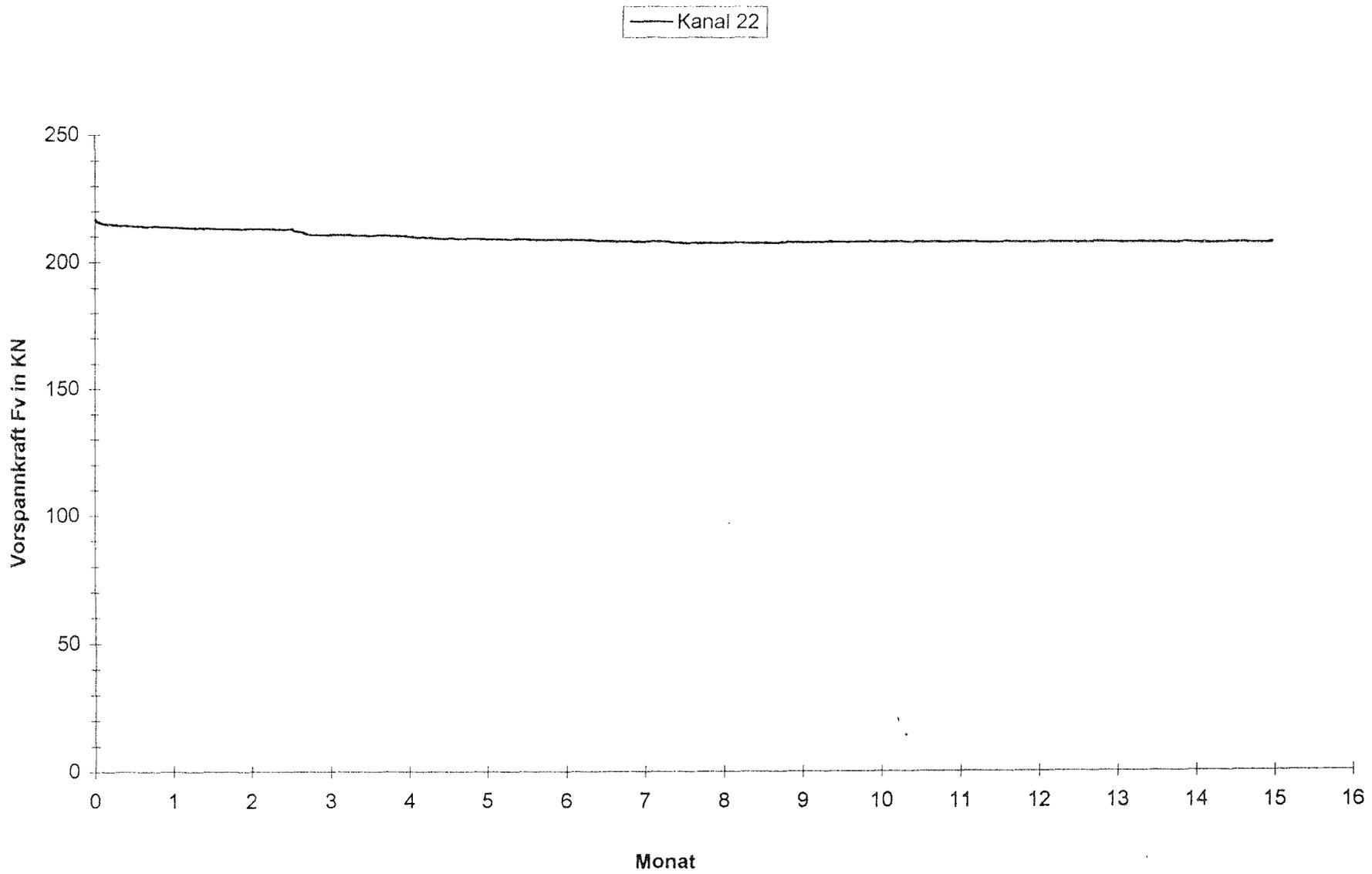


Bild 24: Aus den Meßwerten für Kanal 22 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

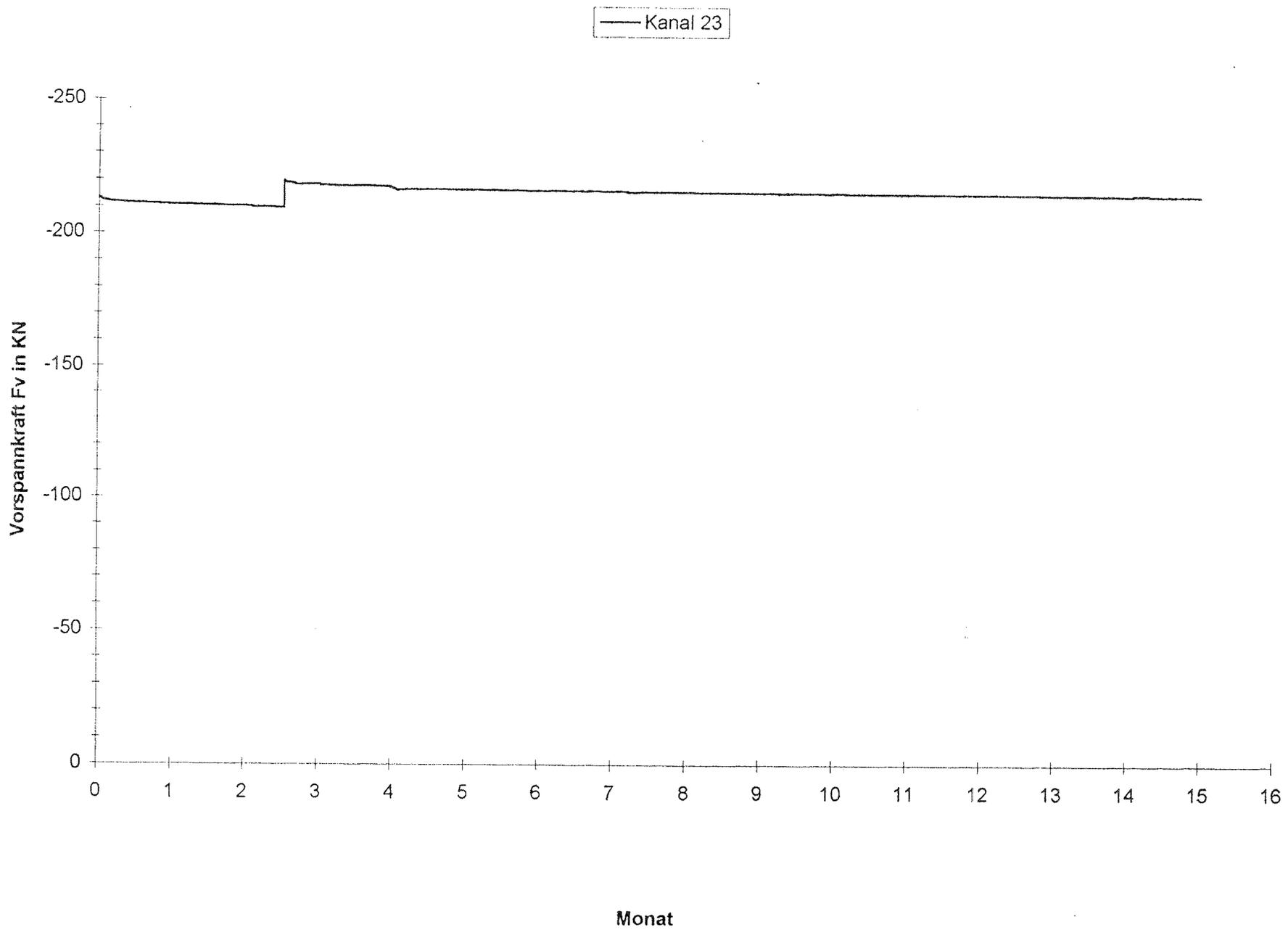


Bild 25: Aus den Meßwerten für Kanal 23 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

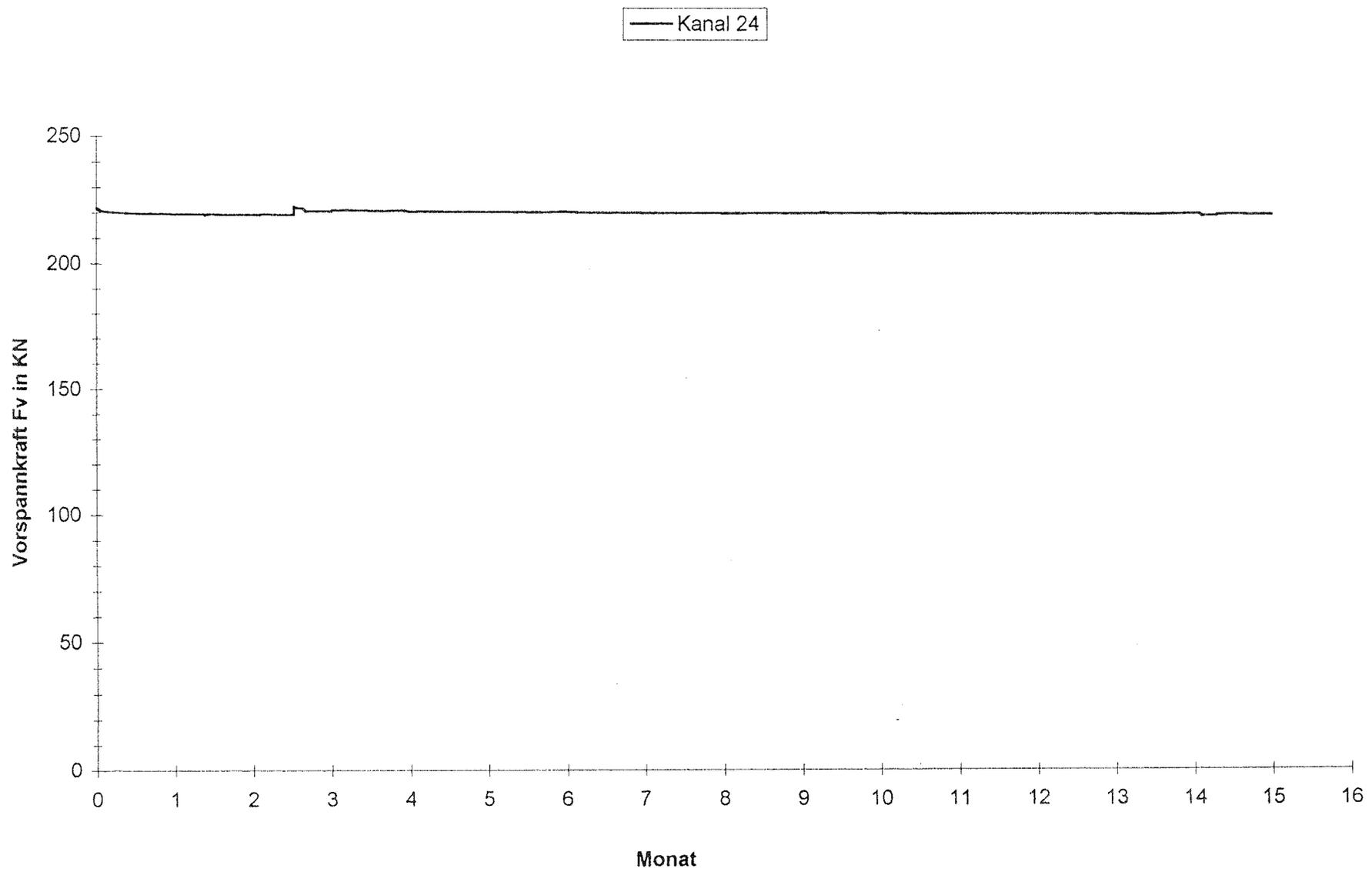


Bild 26: Aus den Meßwerten für Kanal 24 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf
(Zuordnung siehe Tabelle 1)

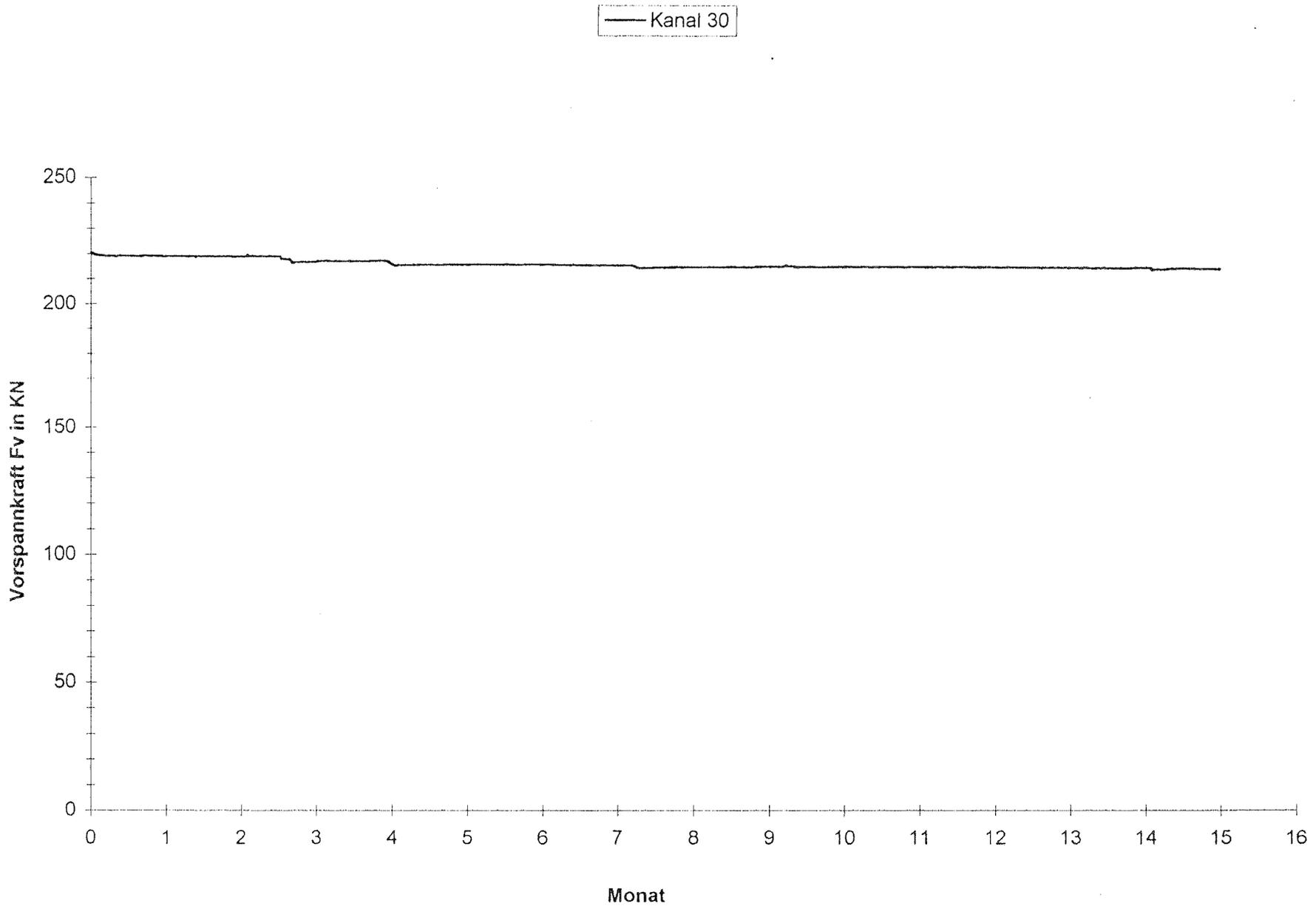


Bild 27: Aus den Meßwerten für Kanal 30 ermittelter Vorspannkraft-Zeit-Verlauf (Zuordnung siehe Tabelle 1)

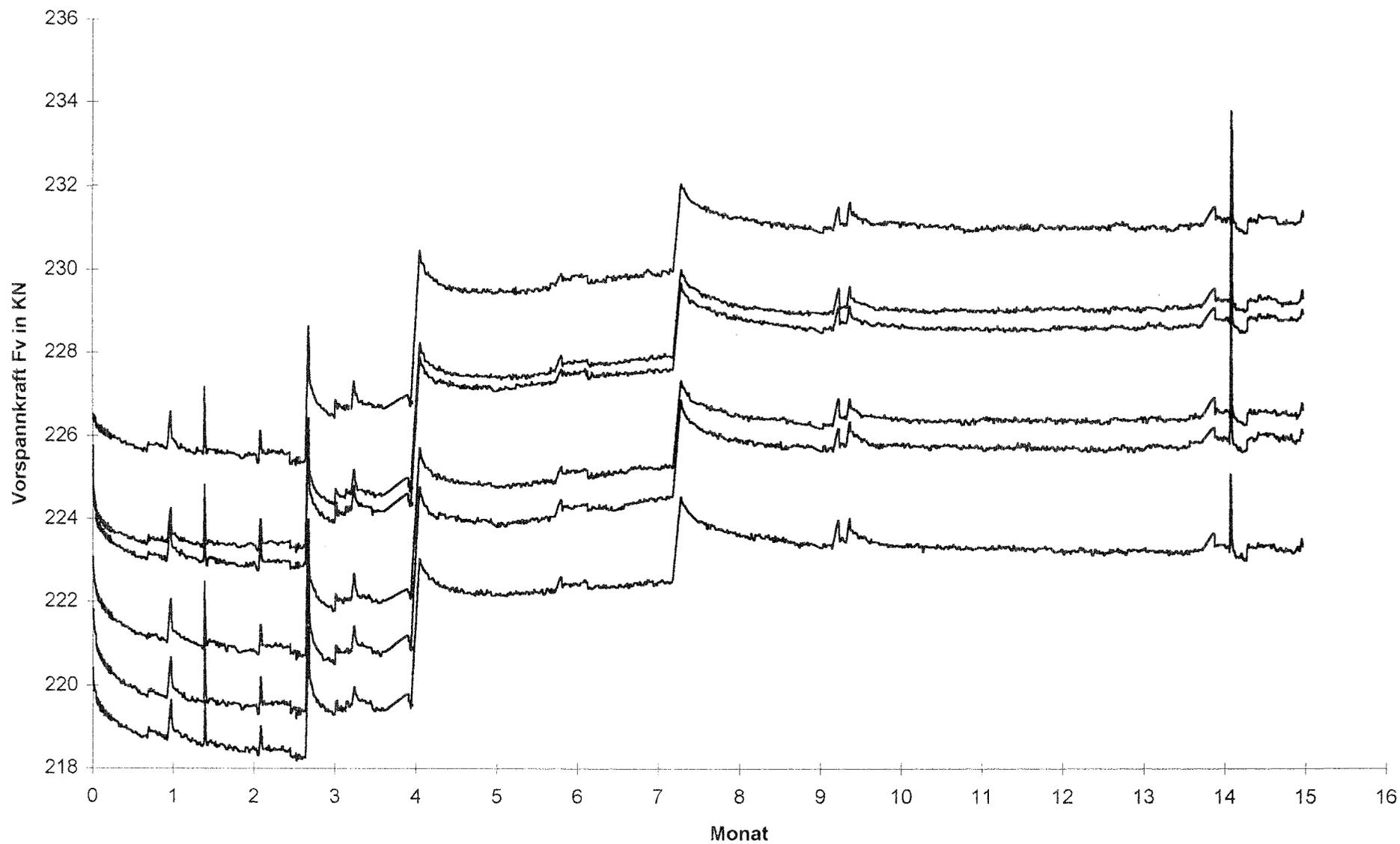


Bild 28: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für die Kanäle 00, 02 bis 06 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

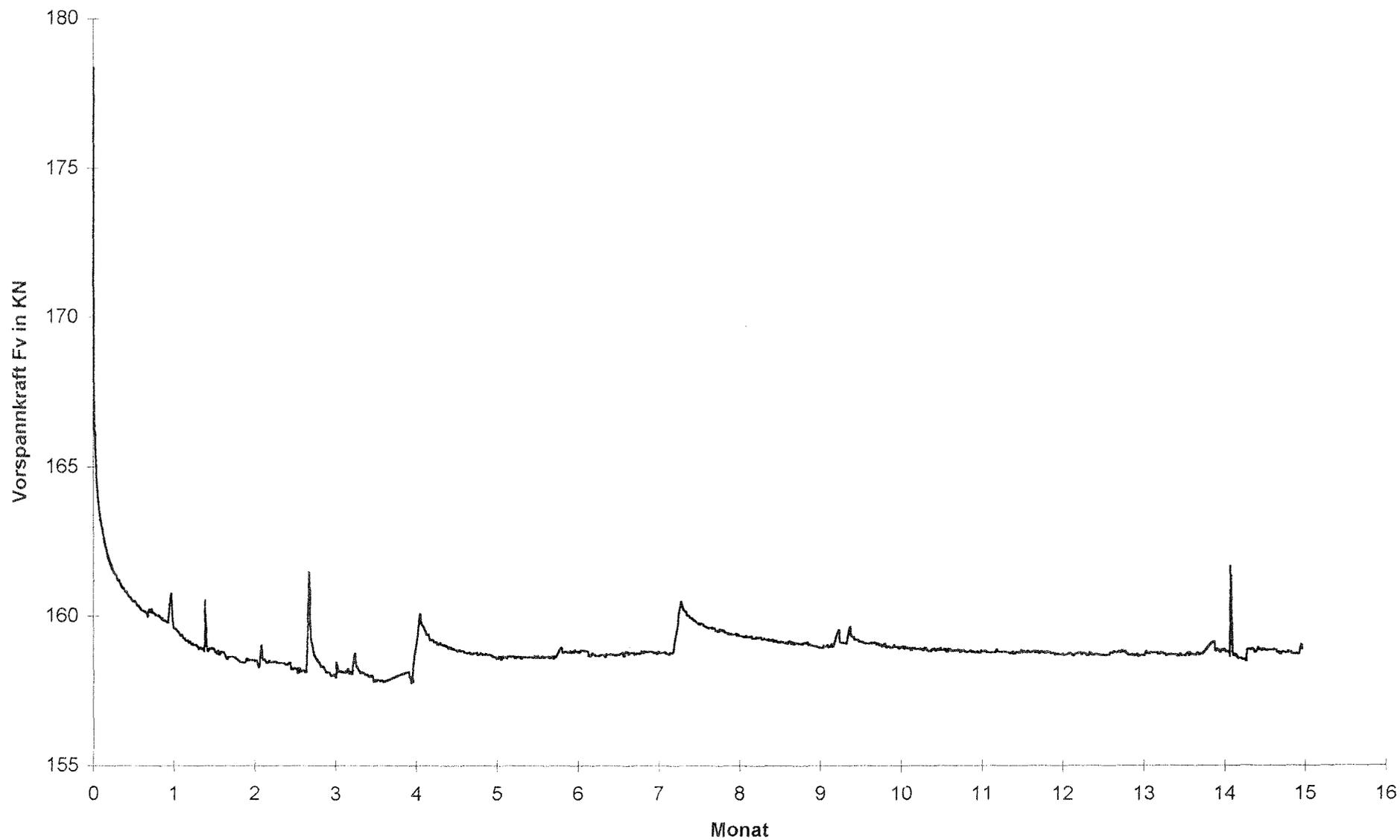


Bild 29: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für Kanal 01 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

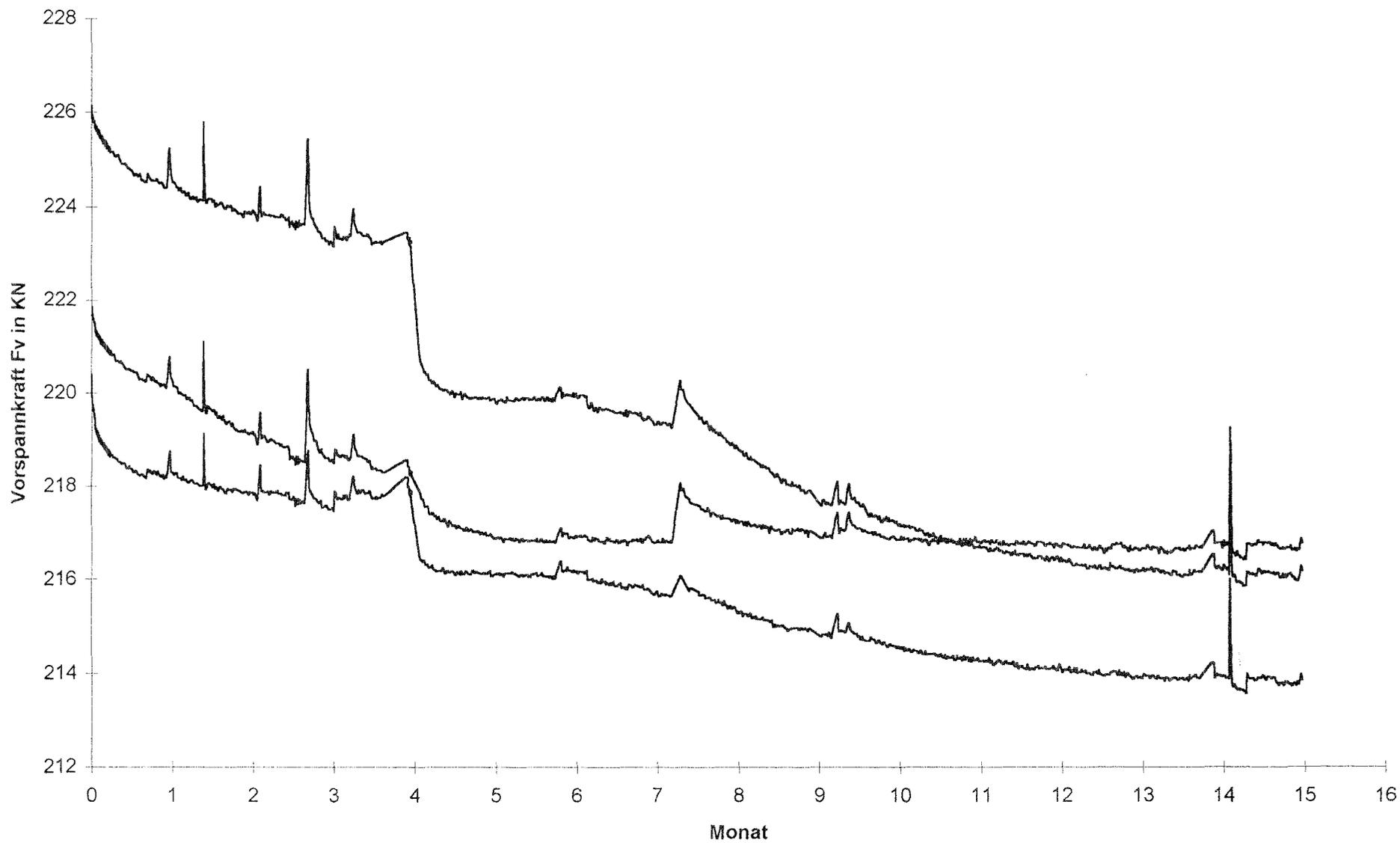


Bild 30: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für die Kanäle 07 bis 09 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

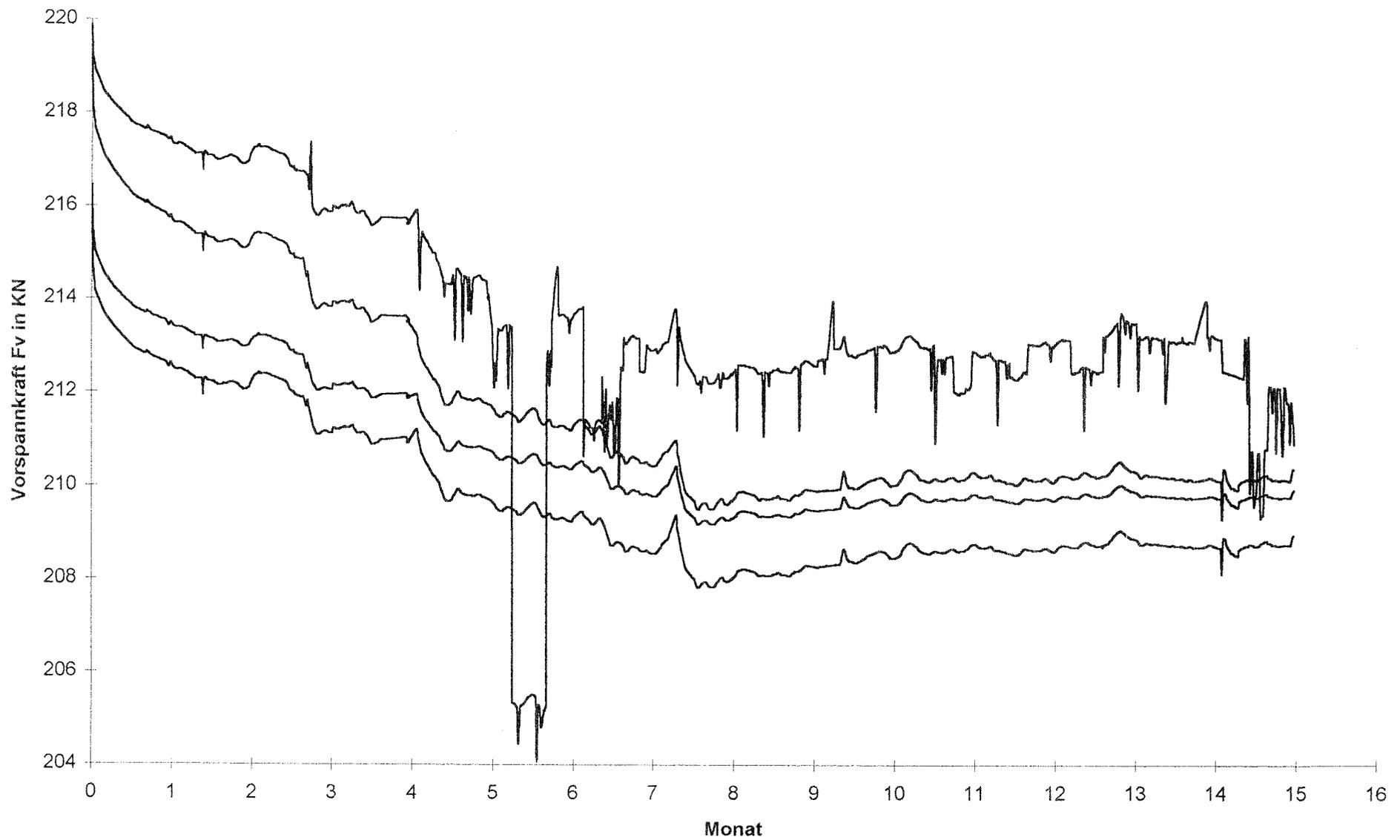


Bild 31: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für die Kanäle 10, 12, 14, 18 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

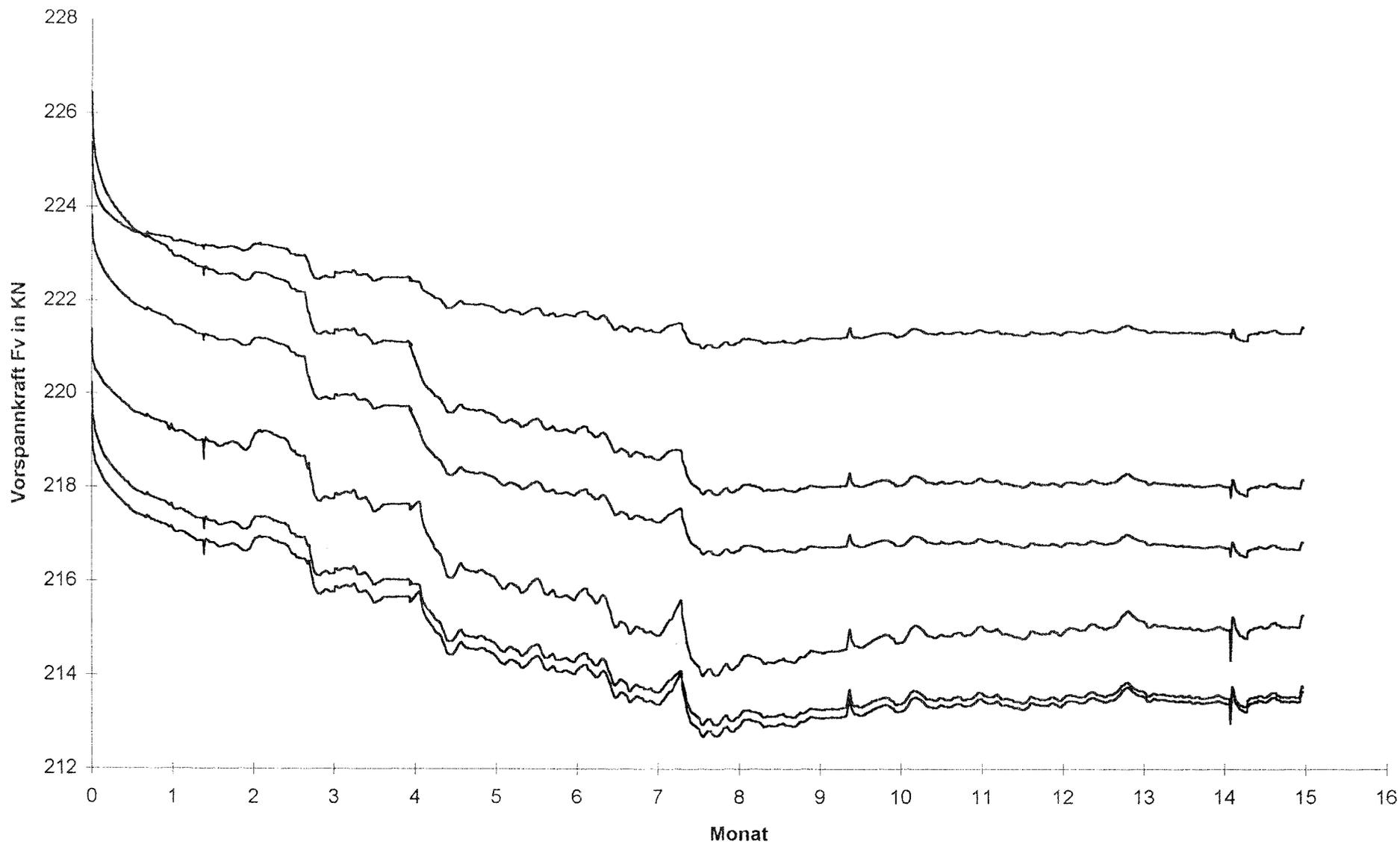


Bild 32: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für die Kanäle 11, 13, 15 bis 17, 19 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

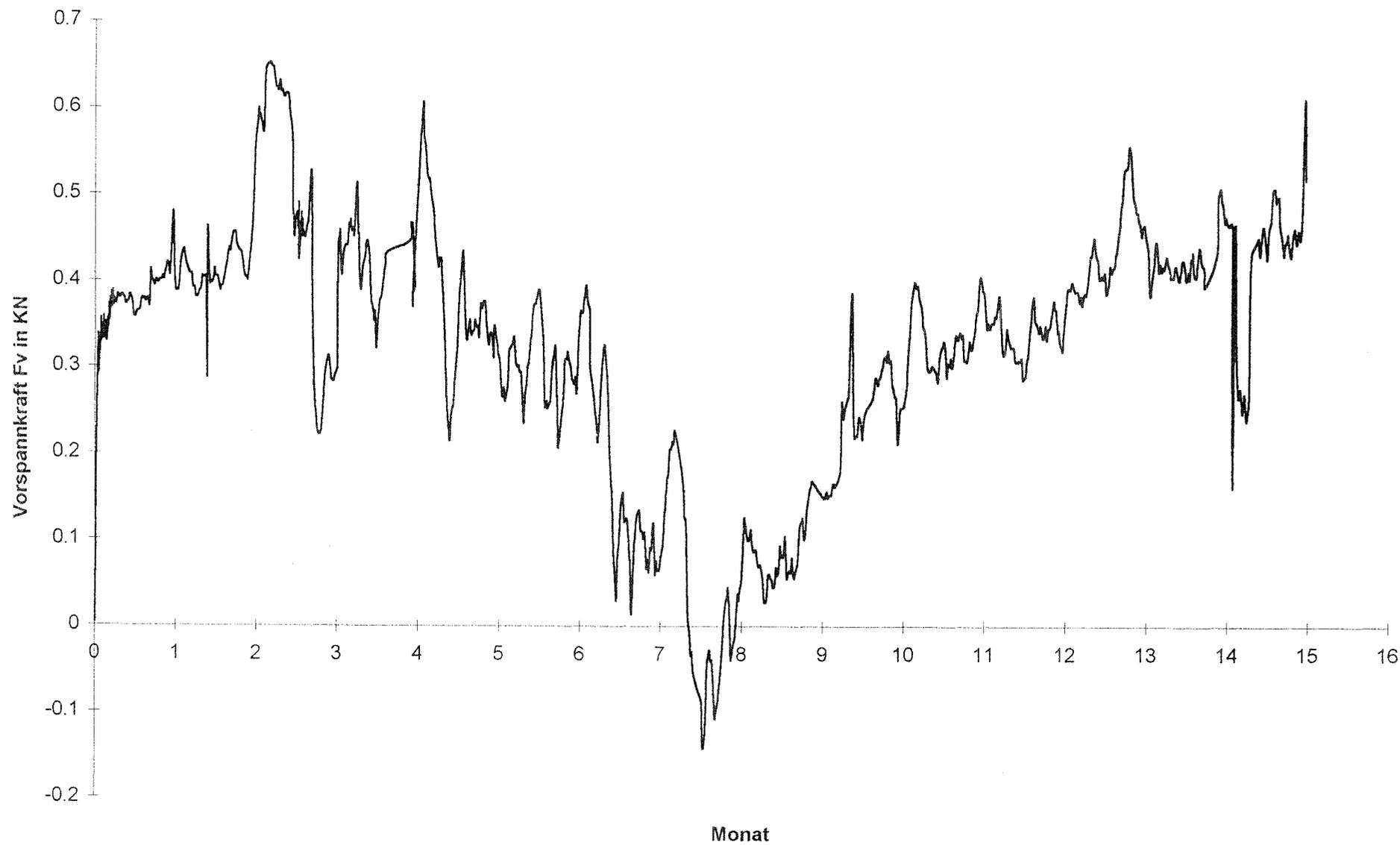


Bild 33: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für den Kanal 20 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

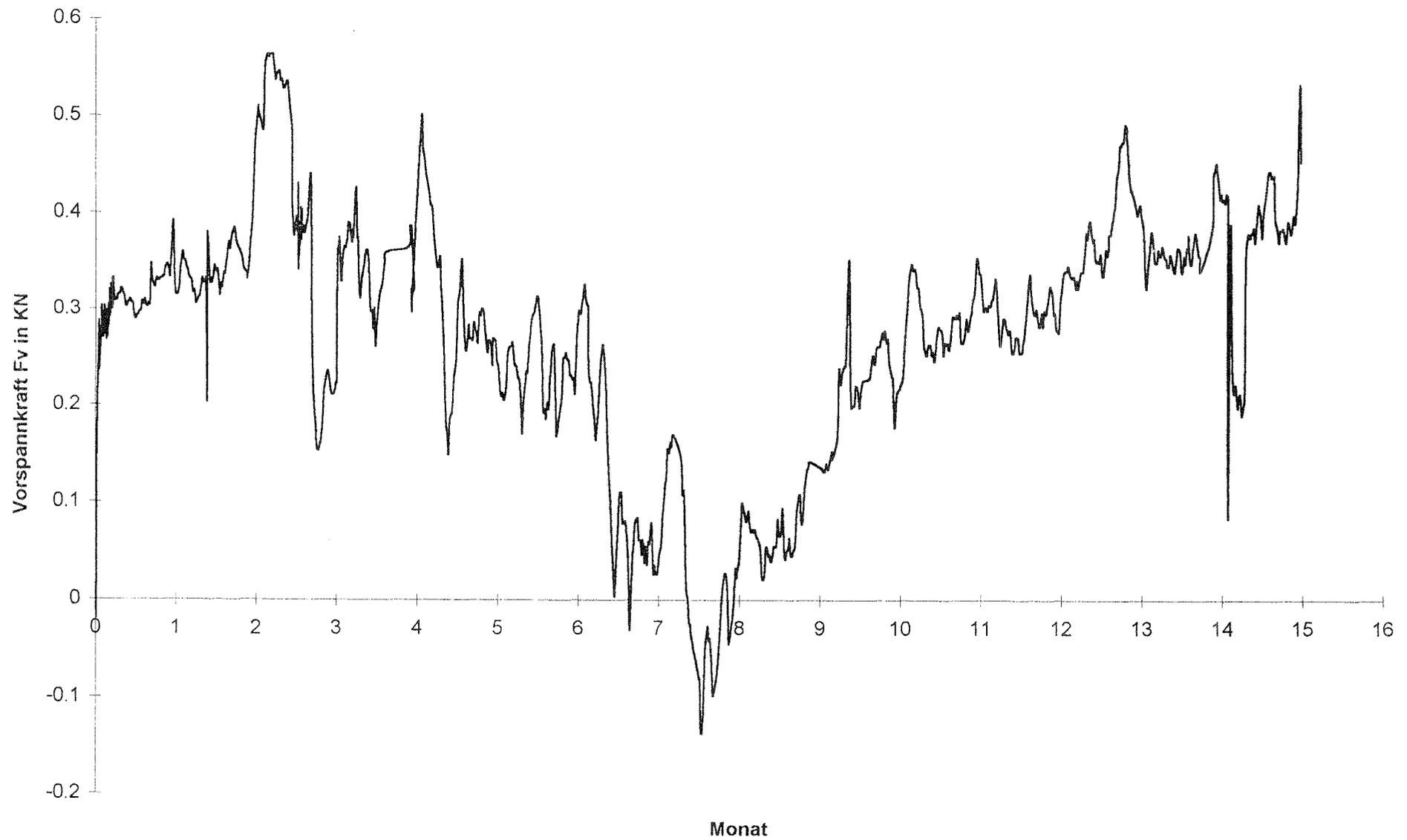


Bild 34: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für den Kanal 21 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

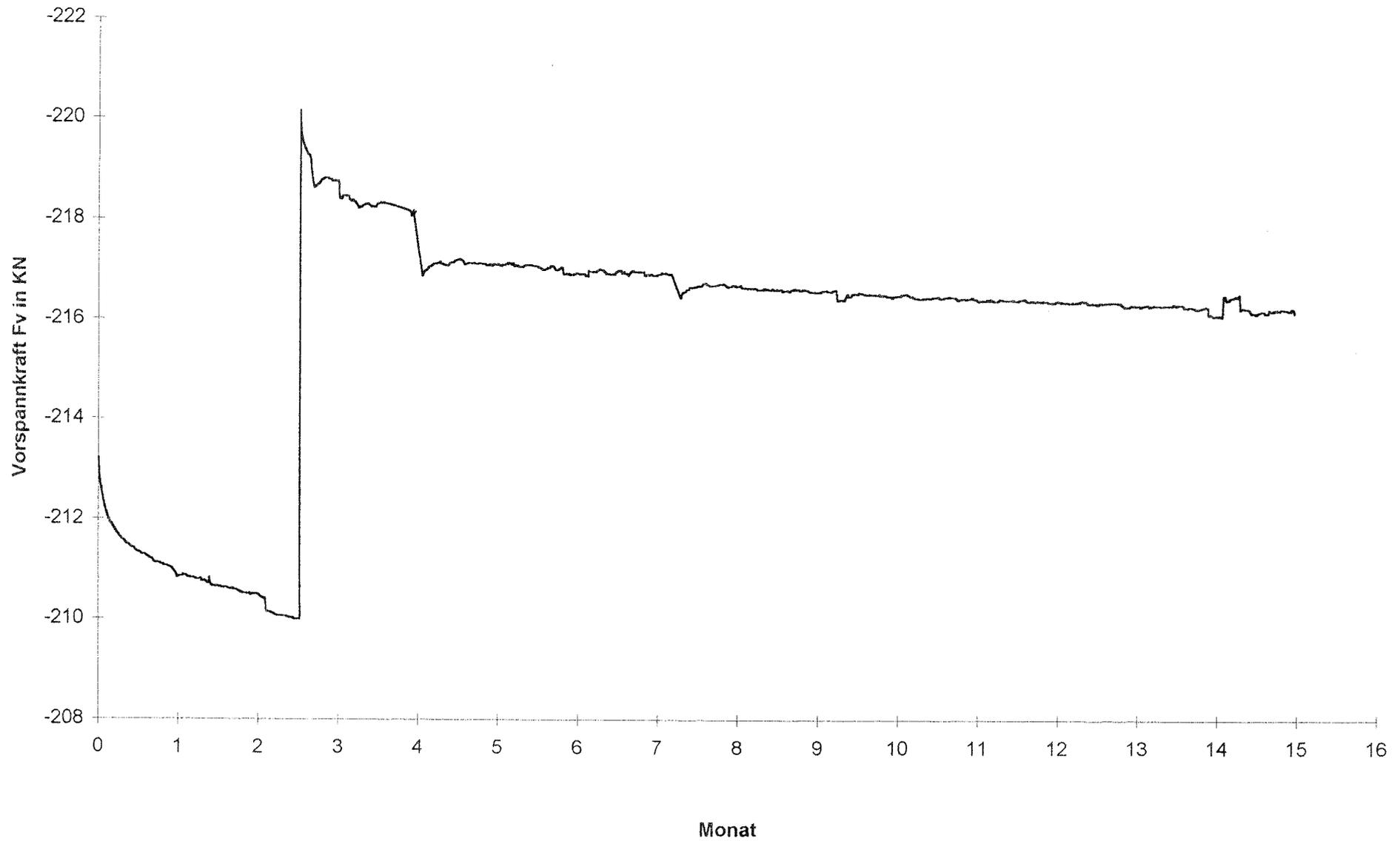


Bild 35: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für den Kanal 23 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

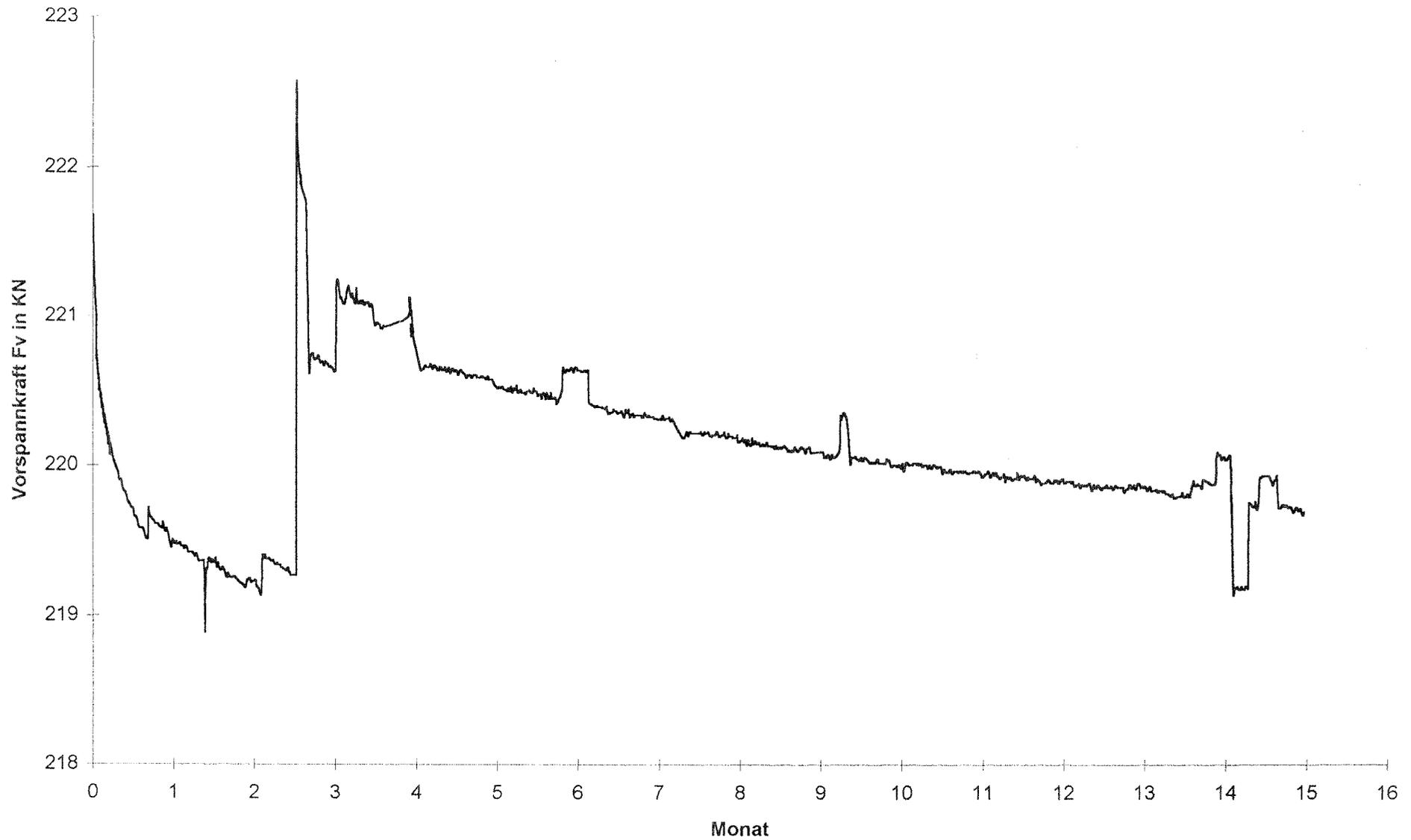


Bild 36: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für den Kanal 24 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

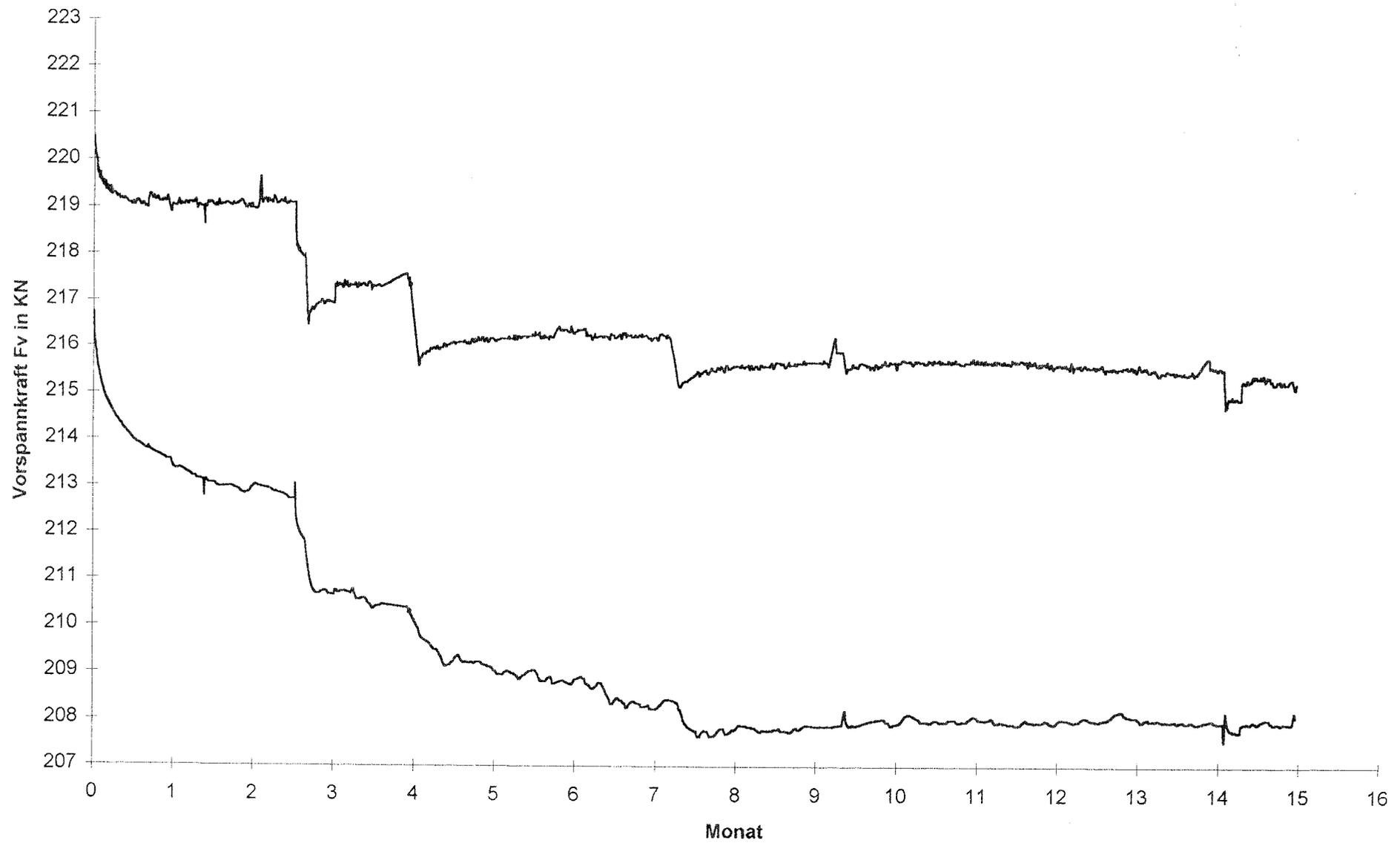


Bild 37: Im maßgebenden Bereich gespreizter Verlauf des aus den Meßwerten ermittelten Vorspannkraft-Zeit-Verlaufs für die Kanäle 22 und 30 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

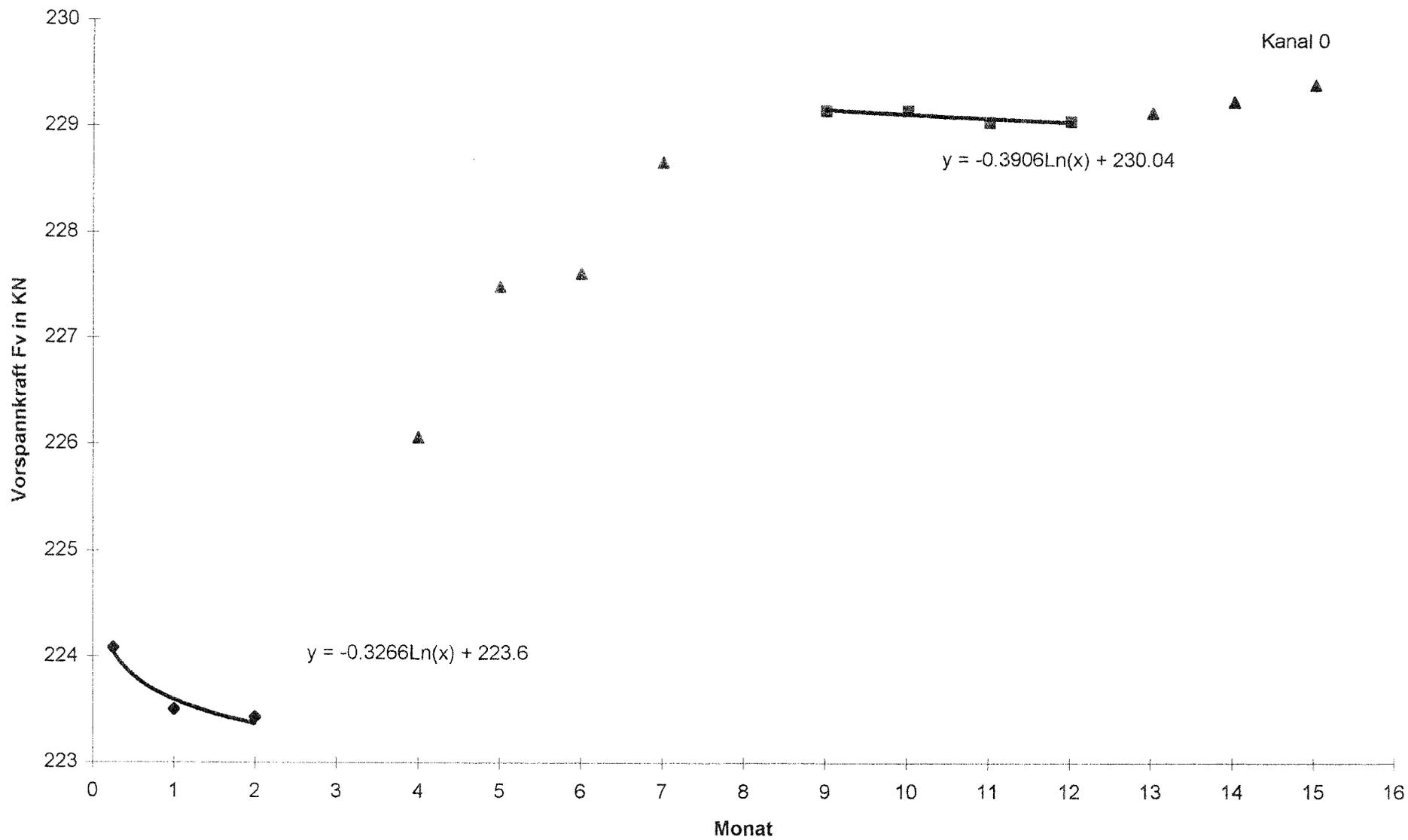


Bild 38: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 00 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

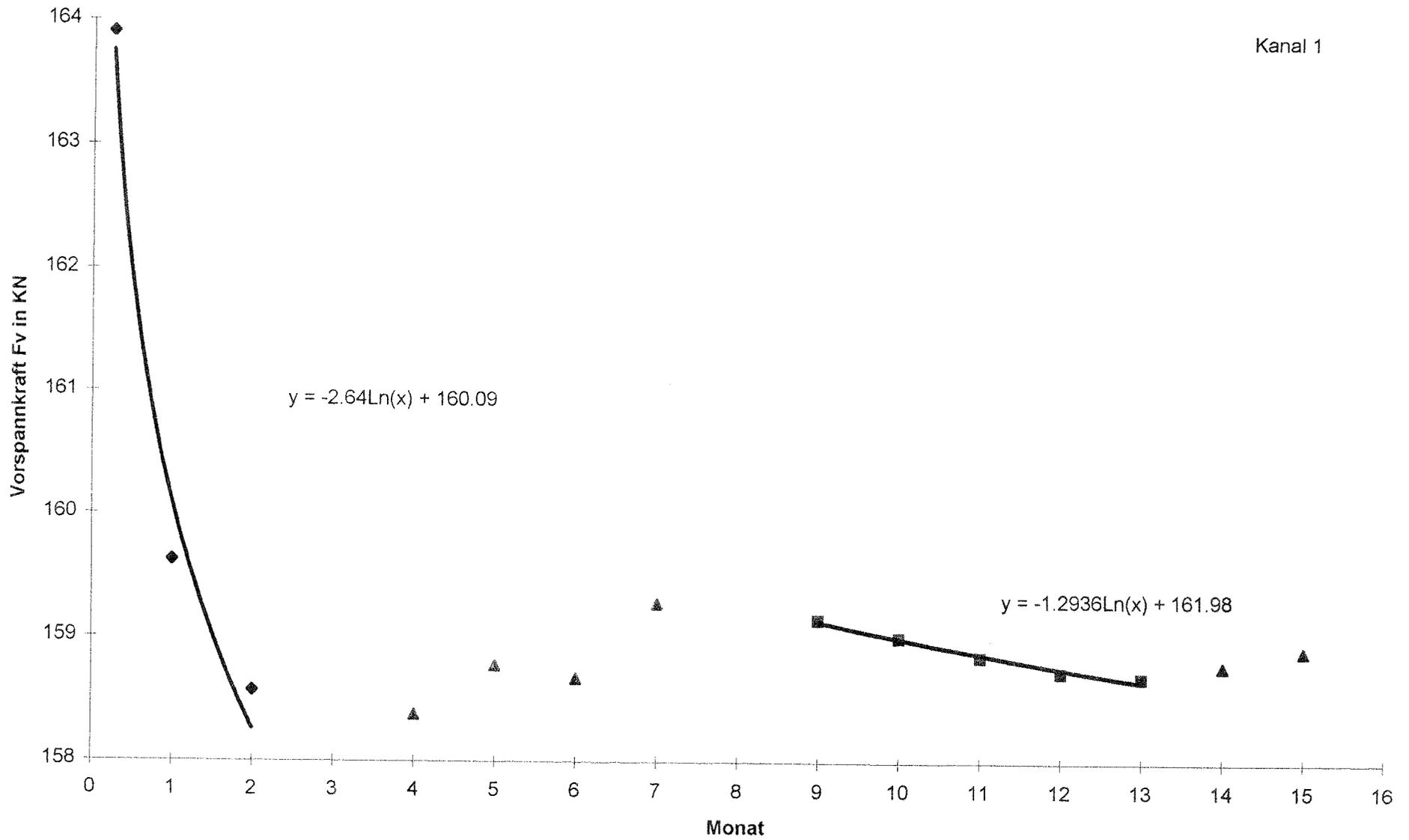


Bild 39: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 01 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

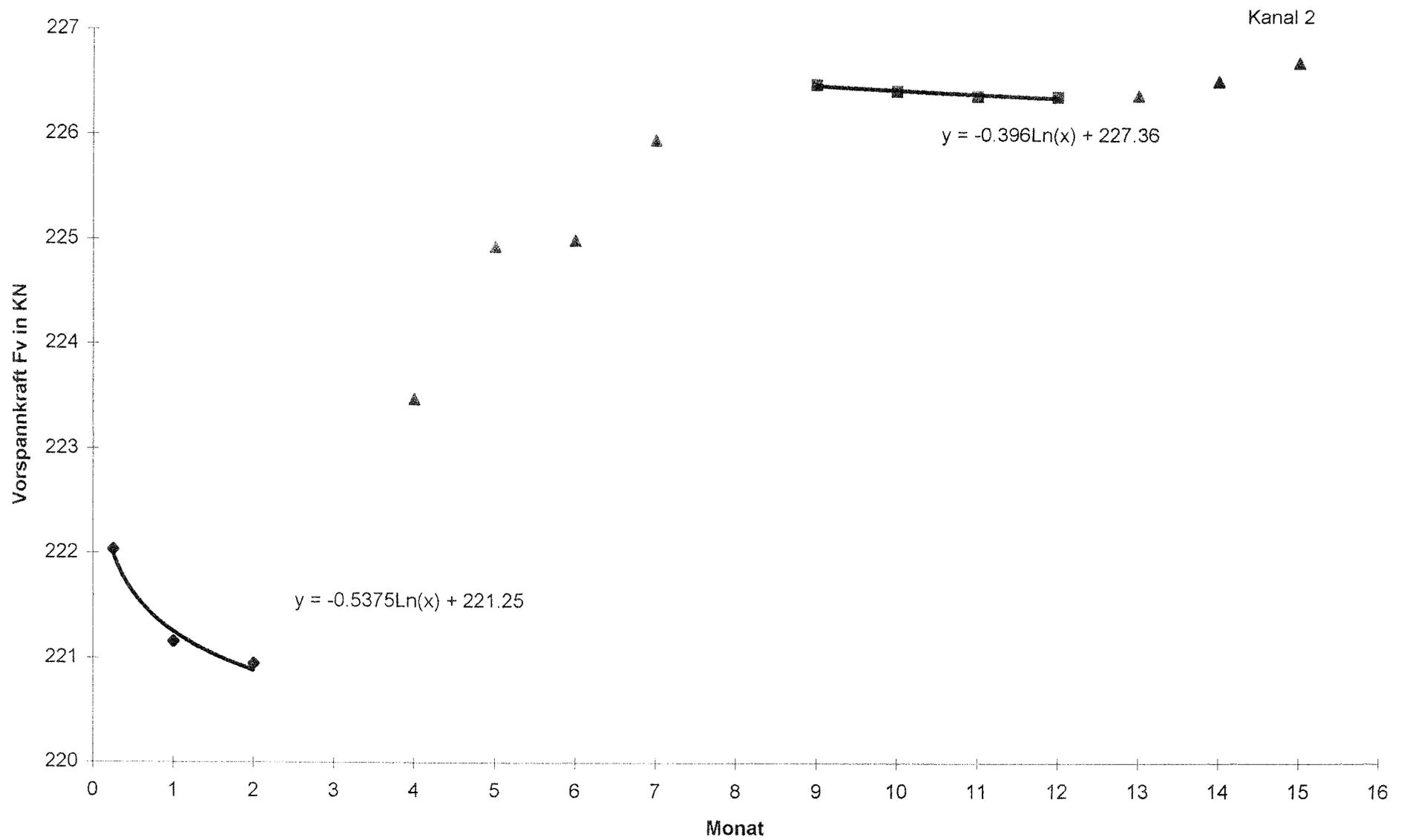


Bild 40: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 02 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

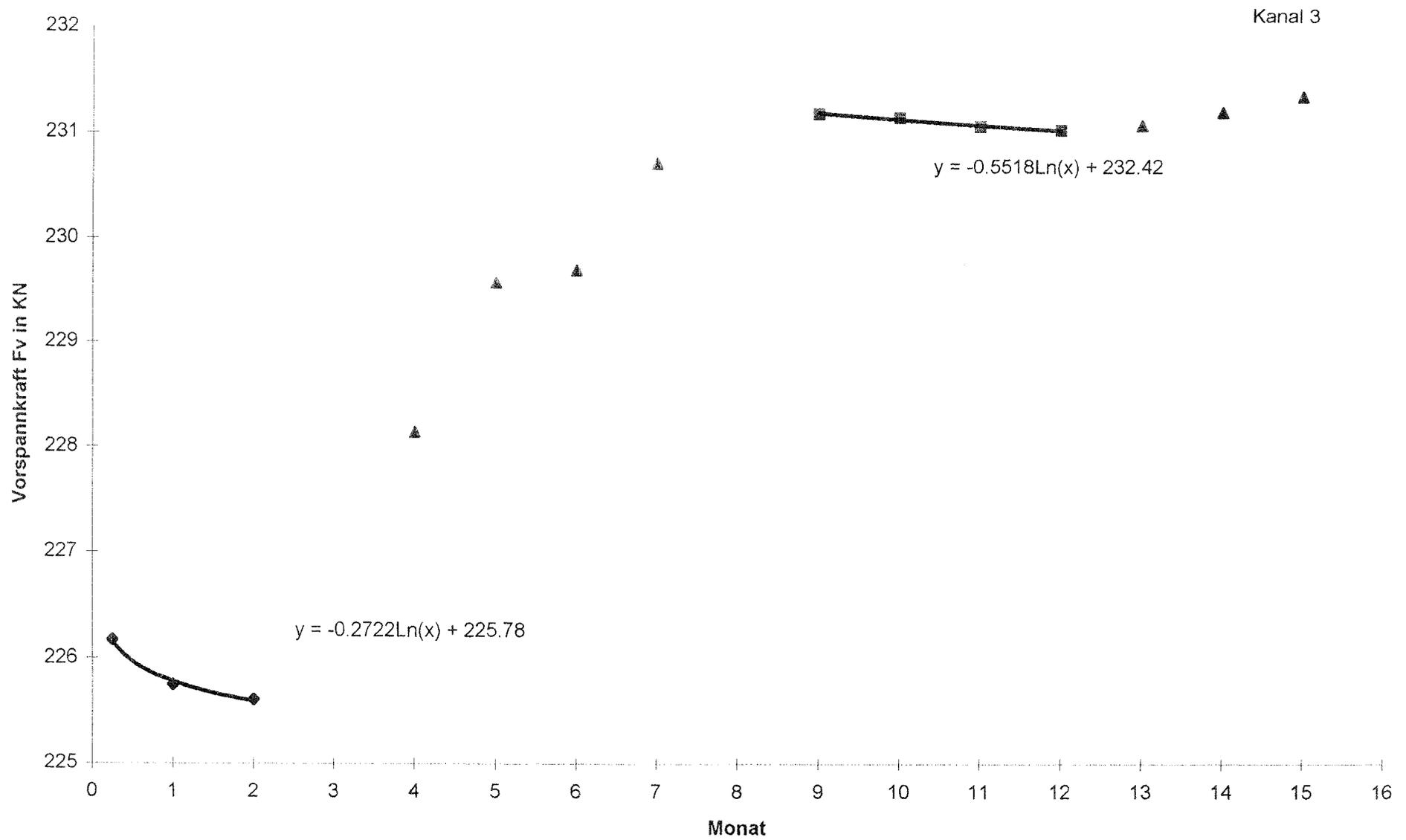


Bild 41: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 03 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

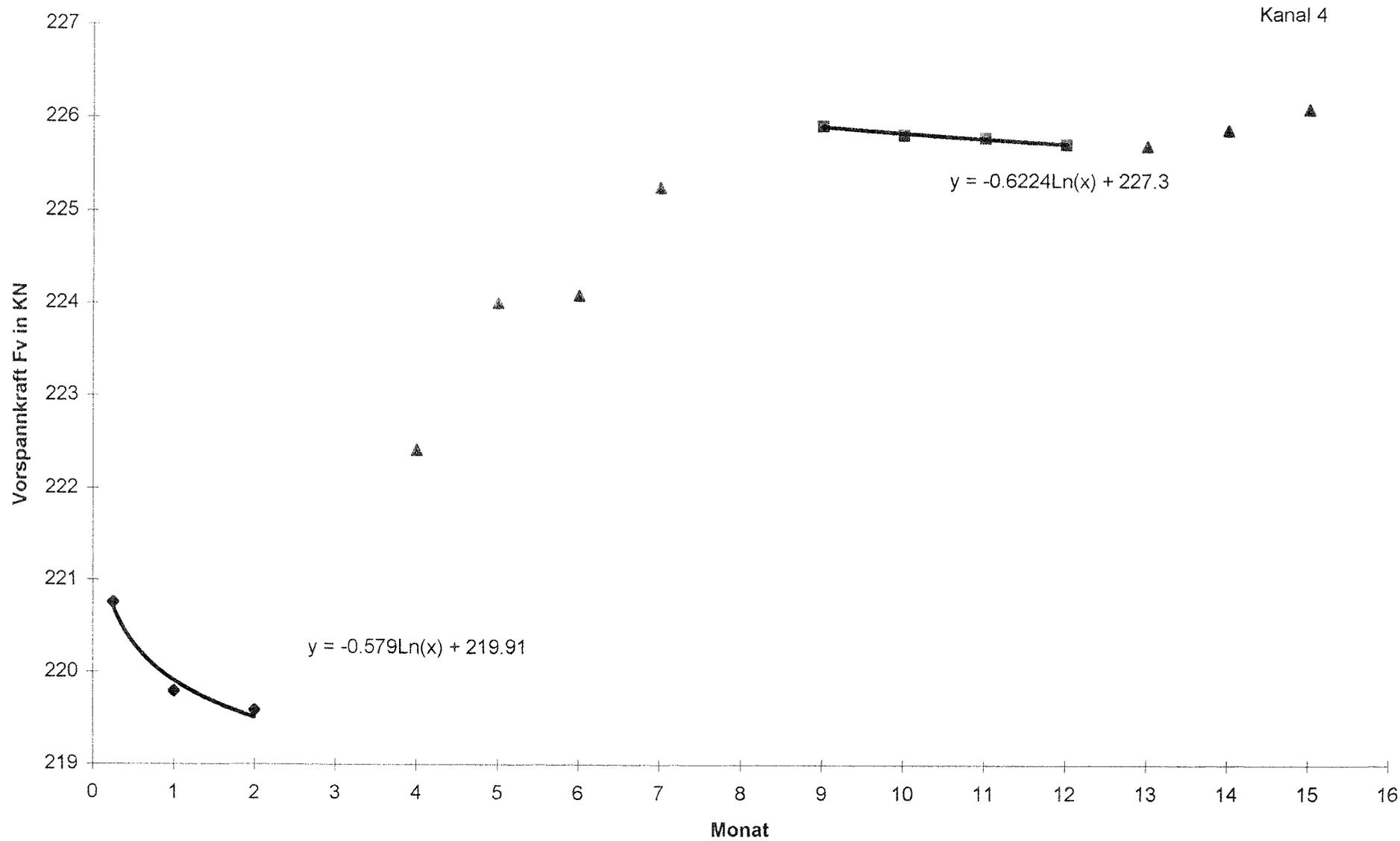


Bild 42: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 04 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

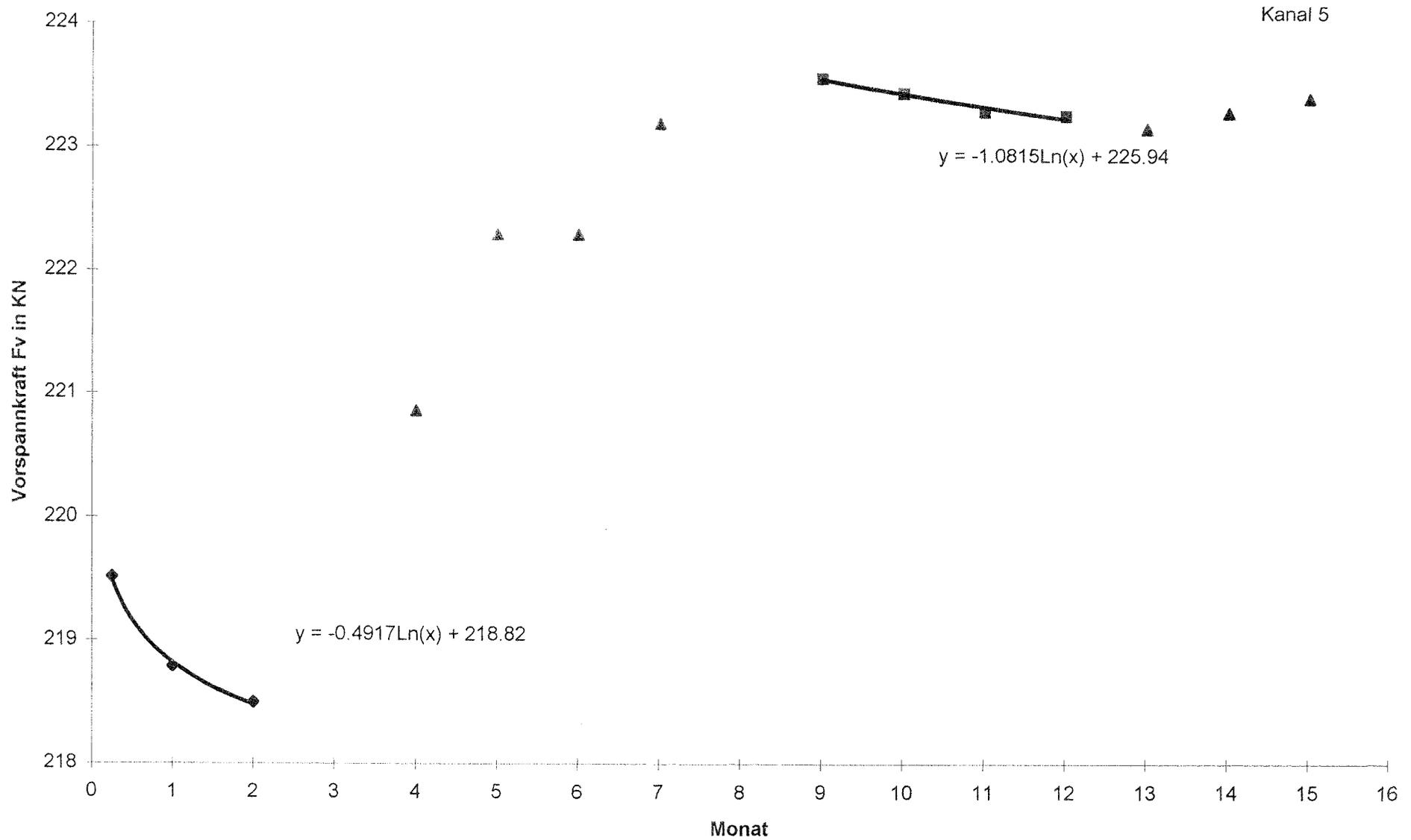


Bild 43: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 05 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

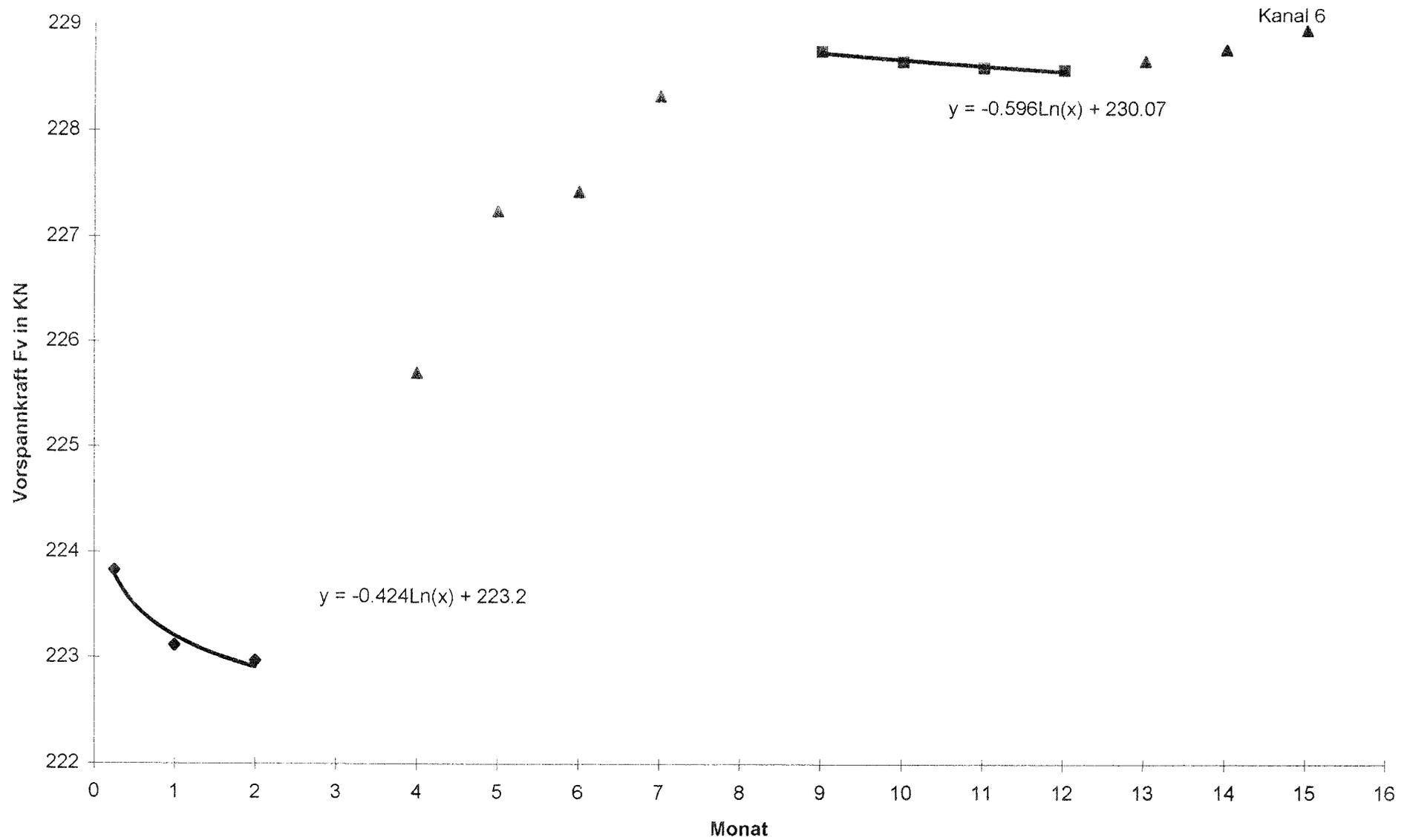


Bild 44: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 06 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

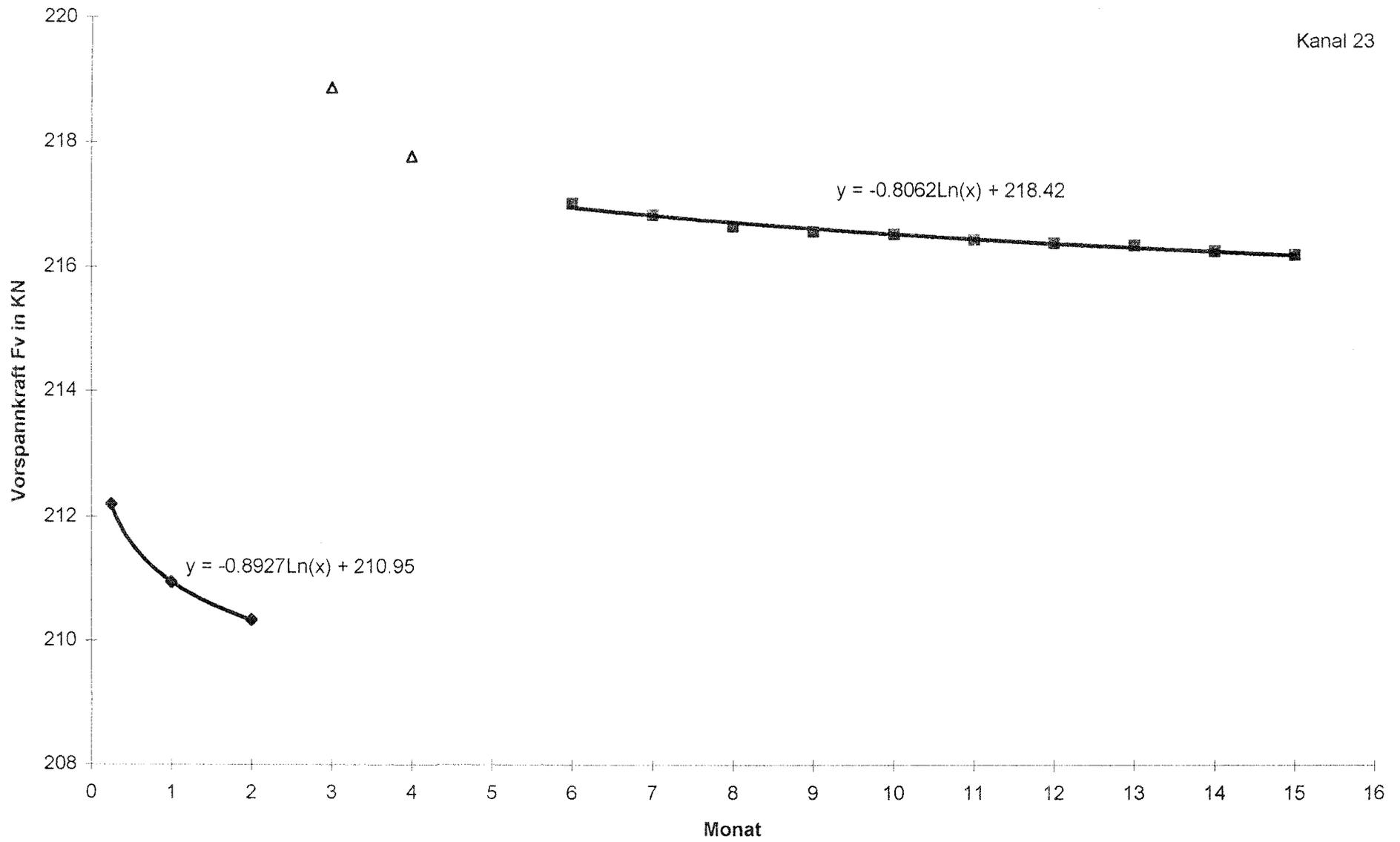


Bild 45: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 23 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

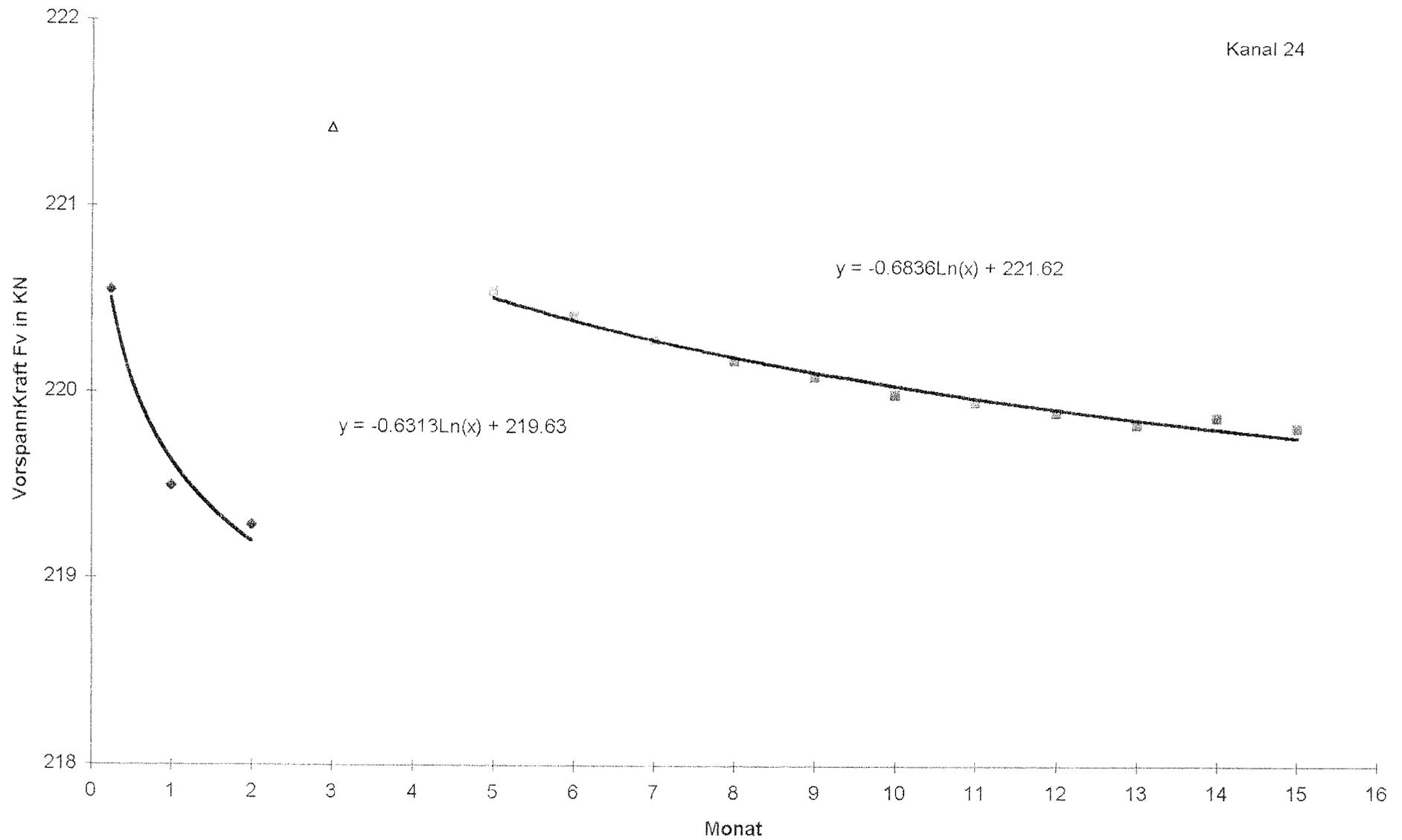


Bild 46: Auf die Monatsenden kondensierte Meßwertdaten für Kanal 24 (Zuordnung siehe Tabelle I)

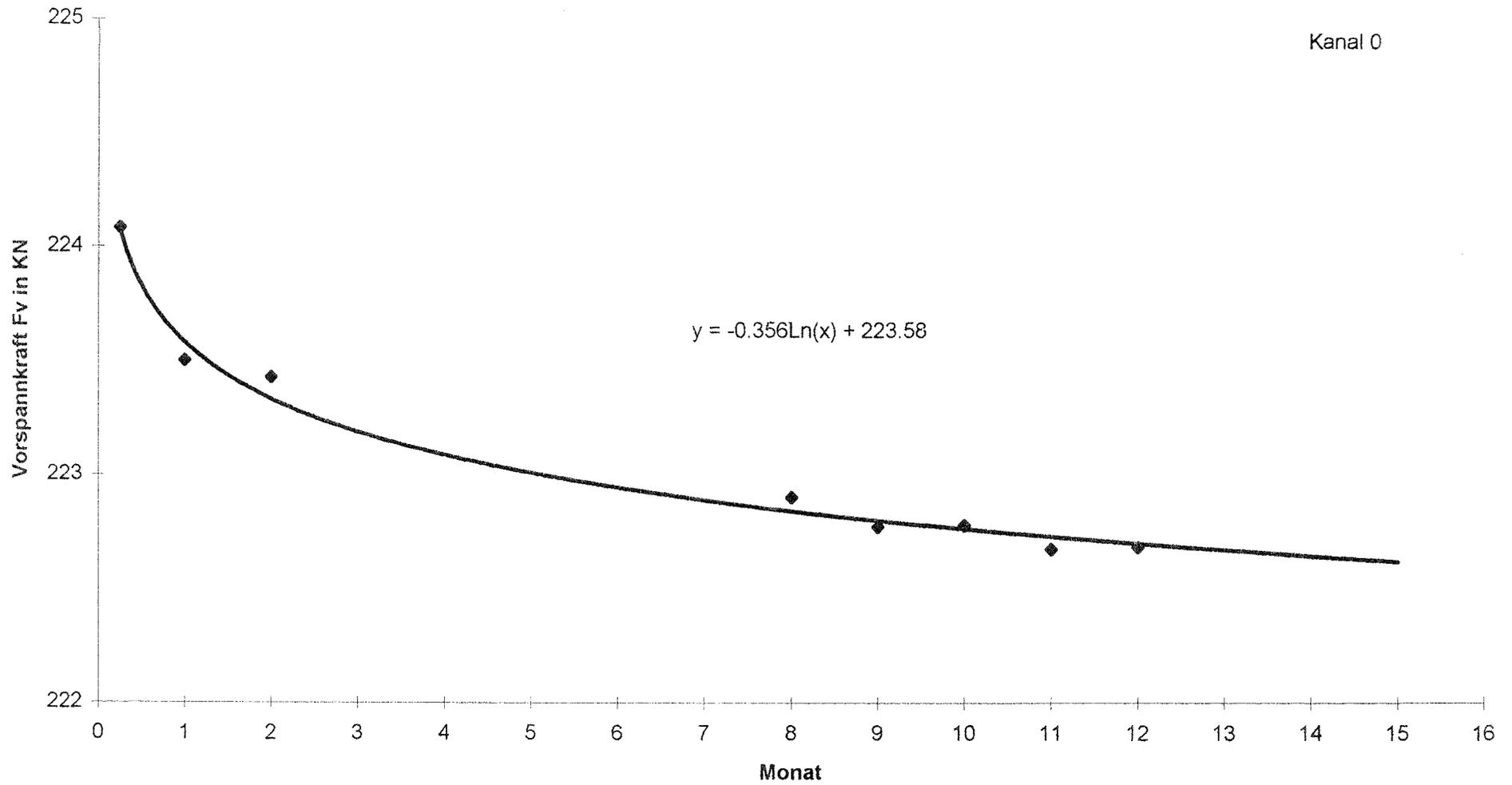


Bild 47: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 00 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

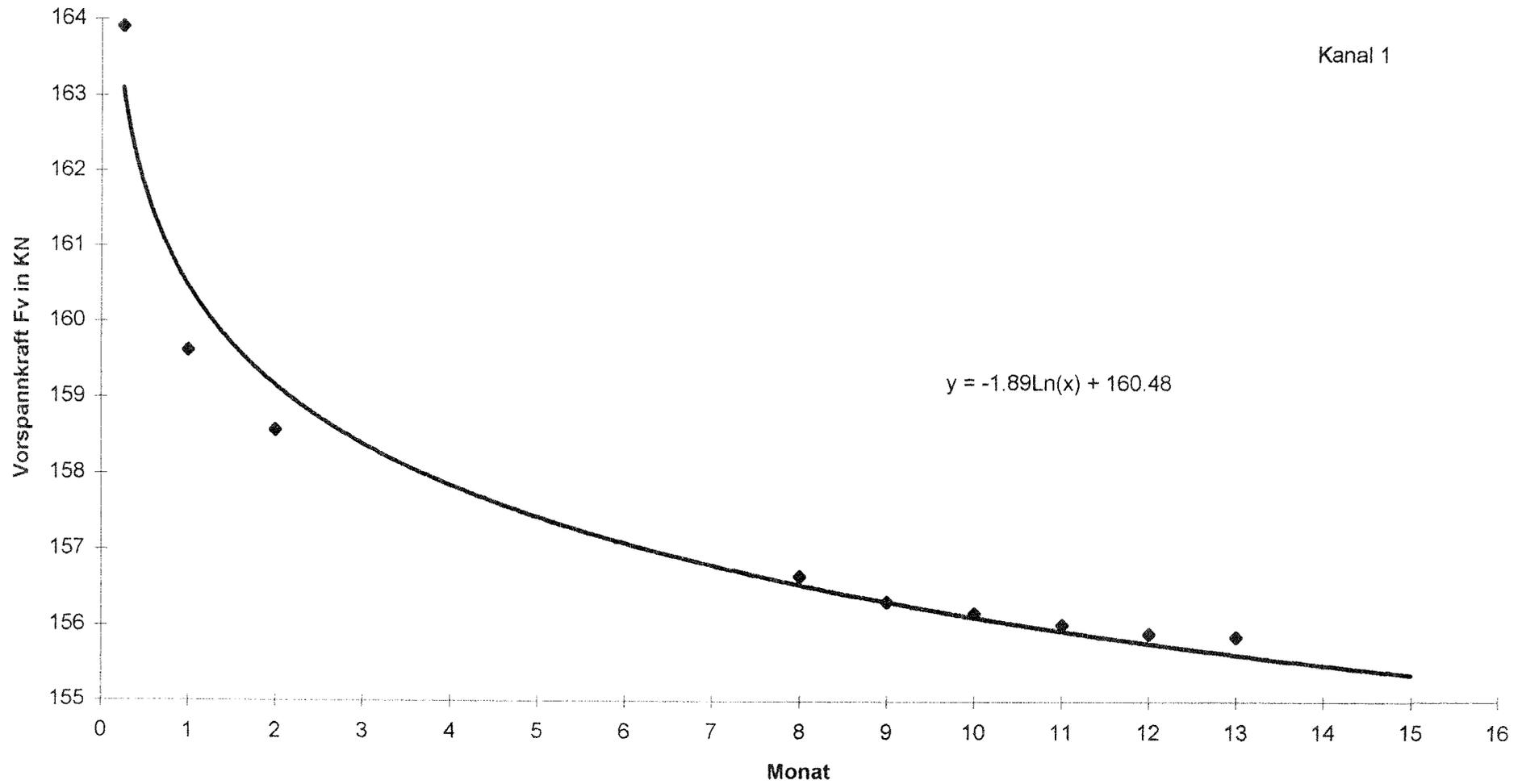


Bild 48: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 01 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

Kanal 2

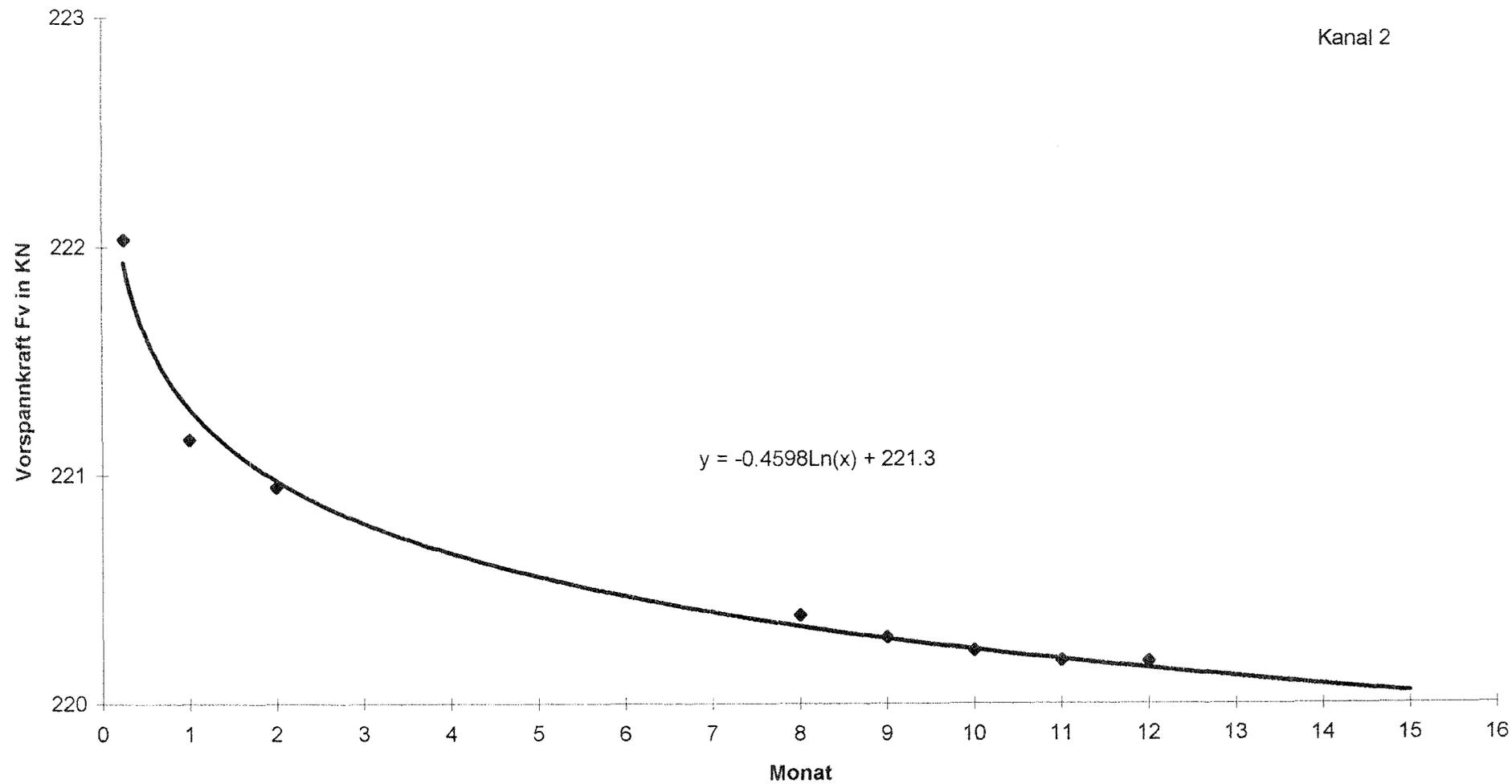


Bild 49: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 02 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

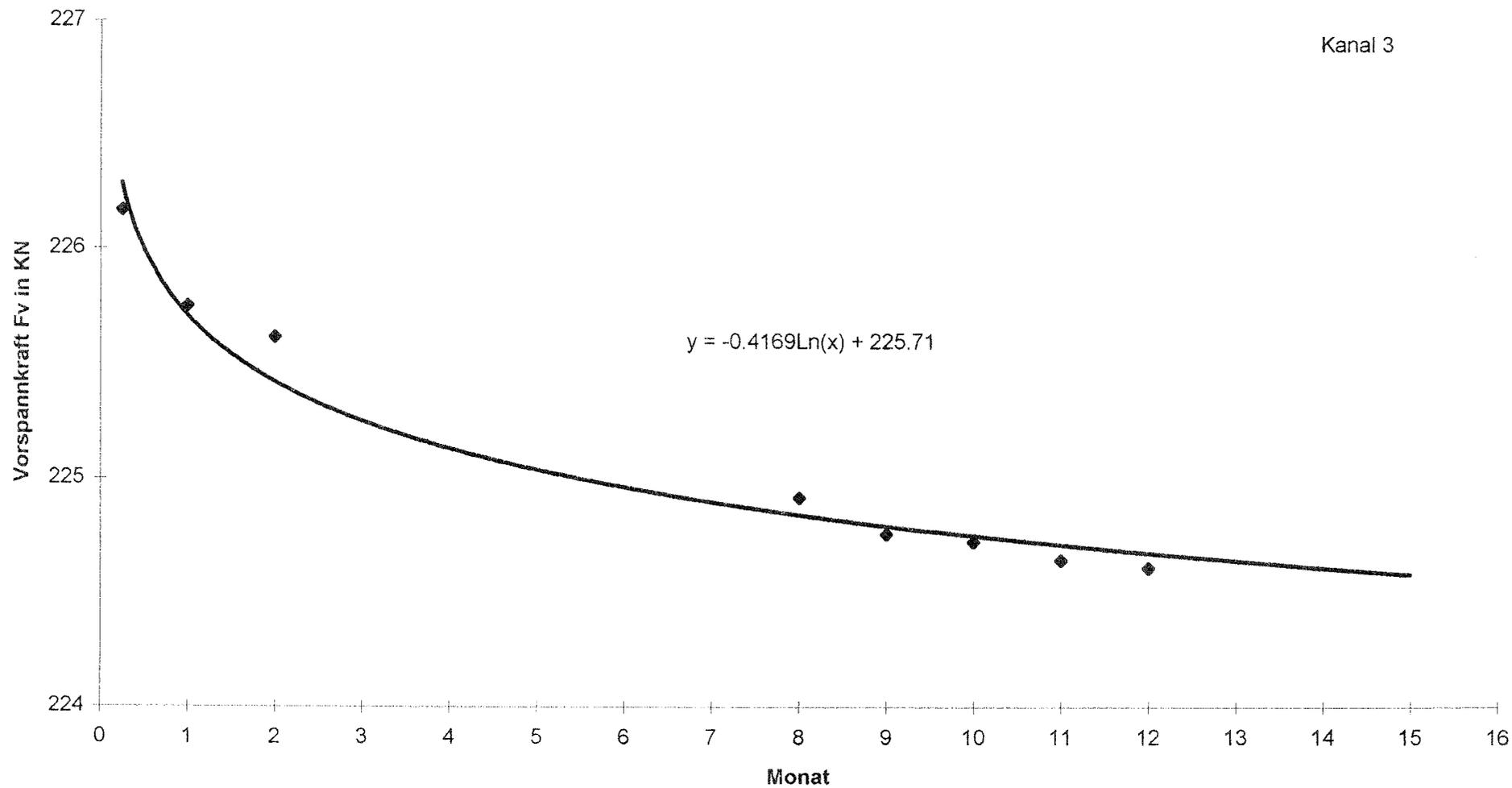


Bild 50: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 03 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

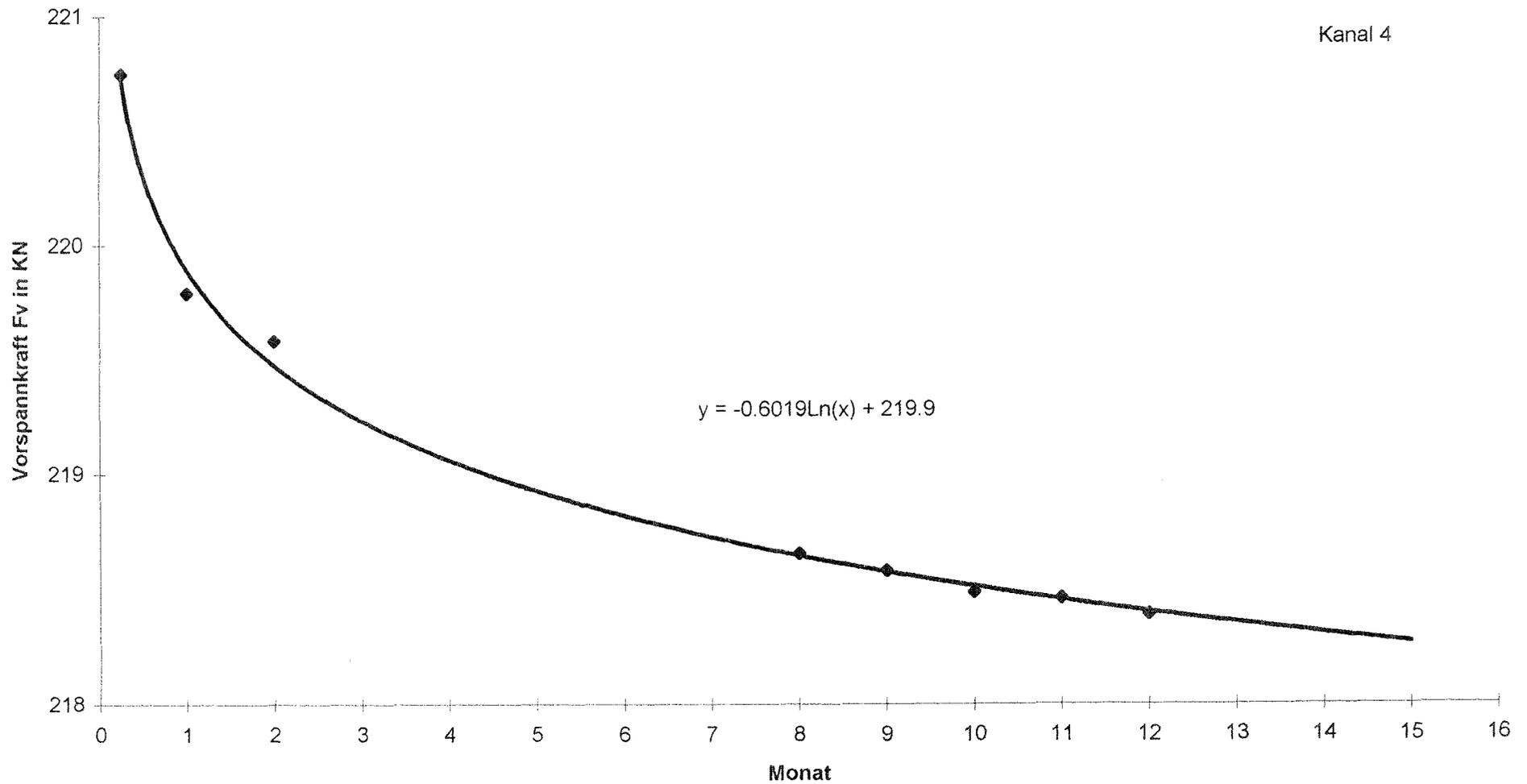


Bild 51: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 04 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

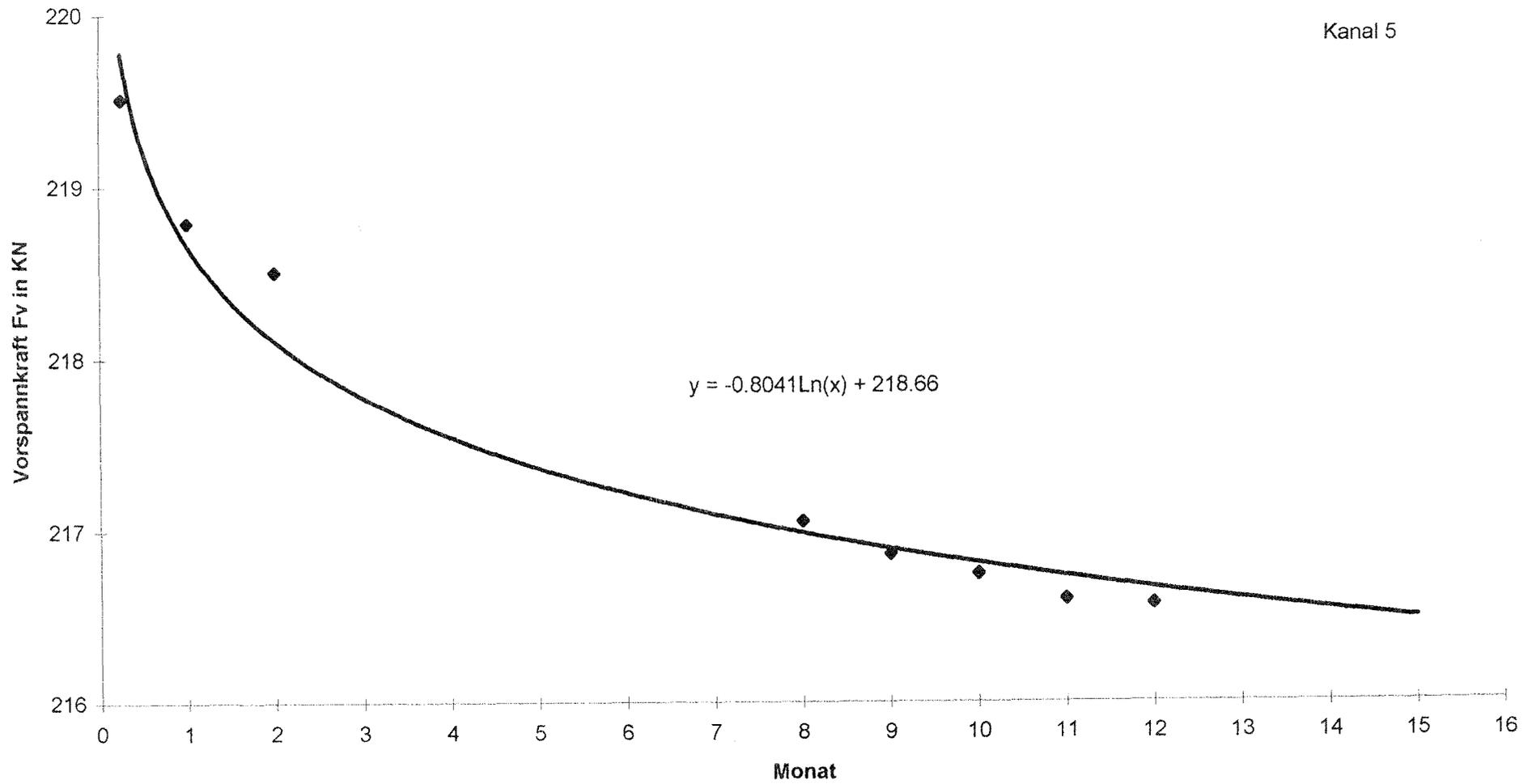


Bild 52: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 05 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

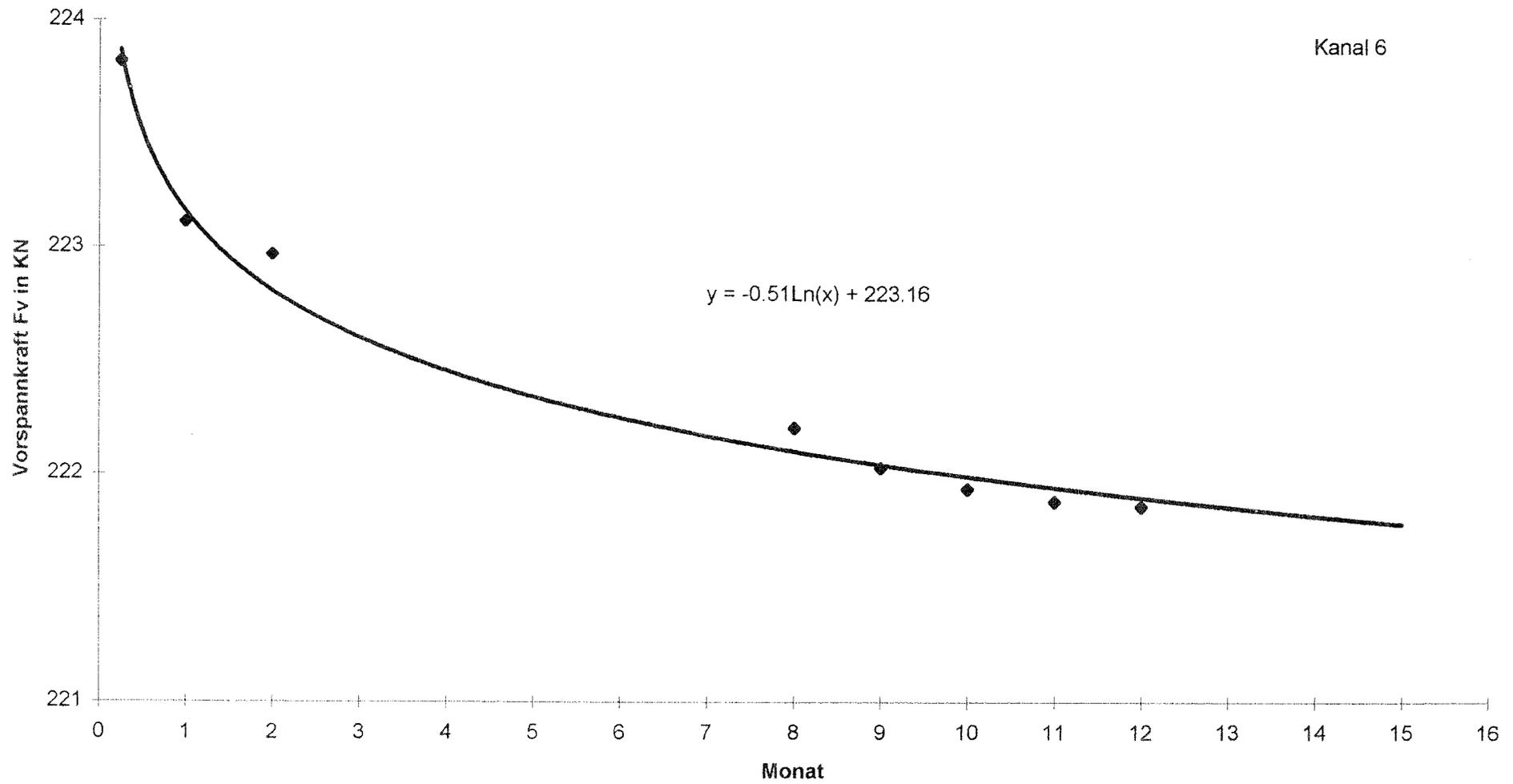


Bild 53: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 06 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

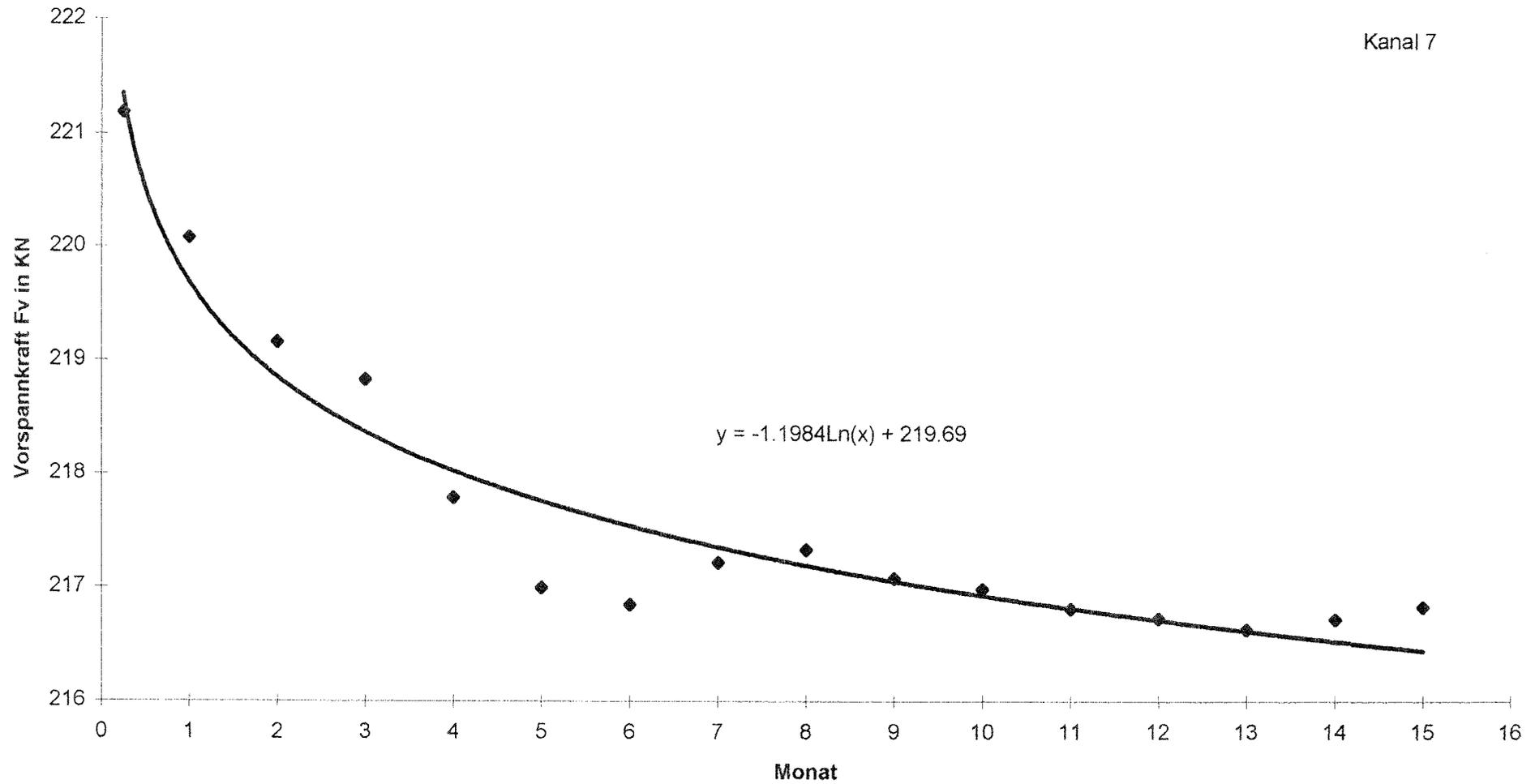


Bild 54: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 07 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

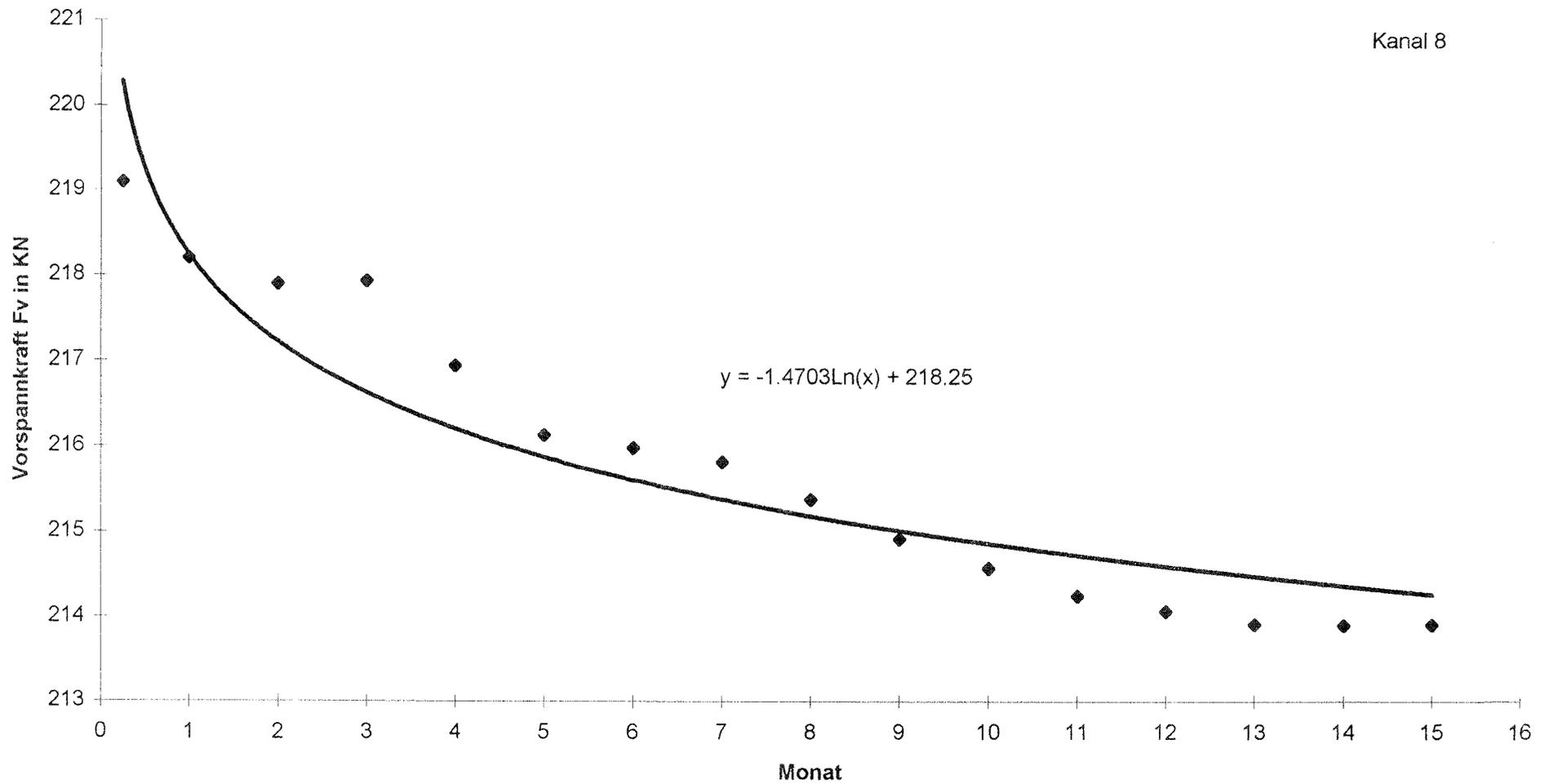


Bild 55: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 08 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

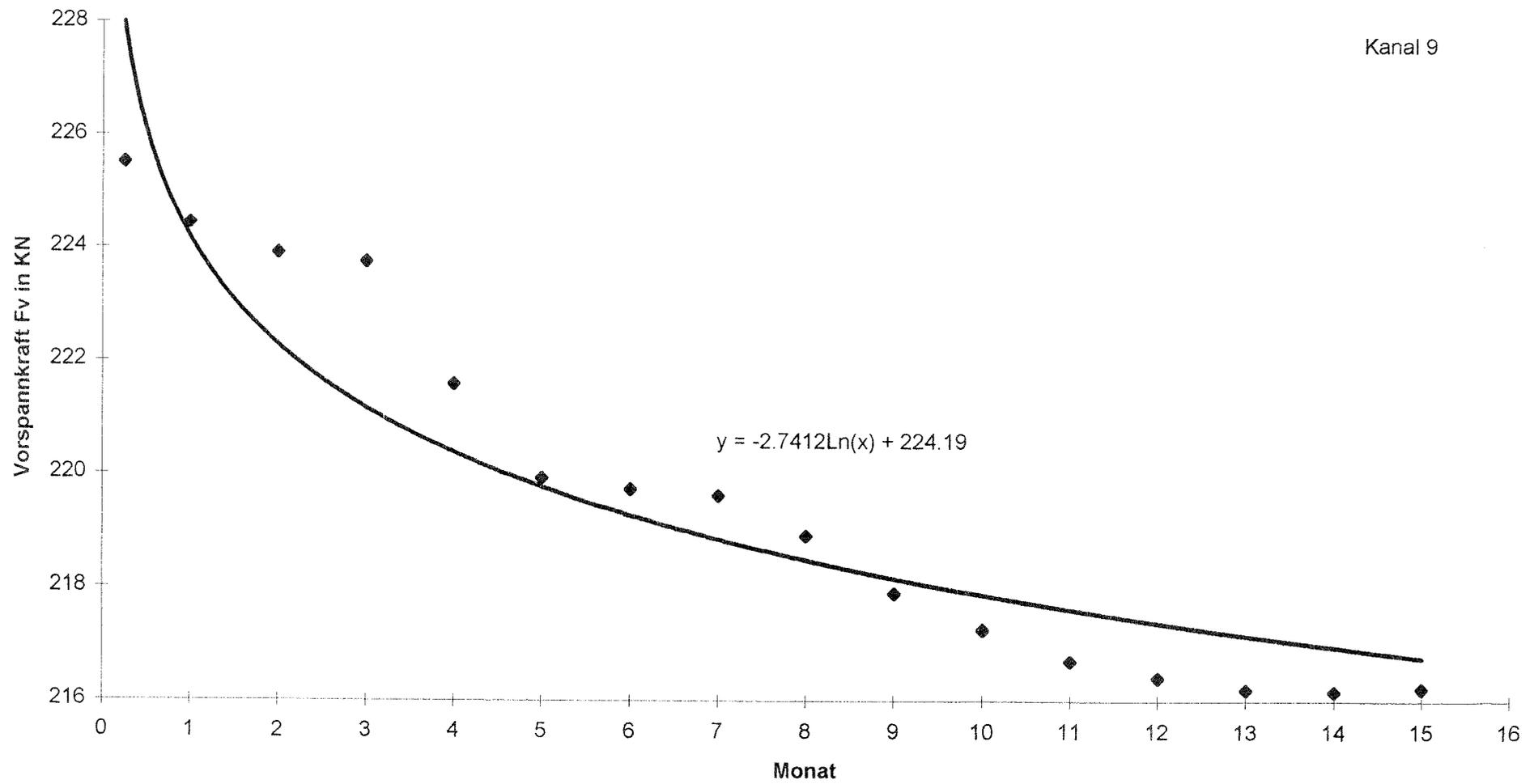


Bild 56: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 09 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

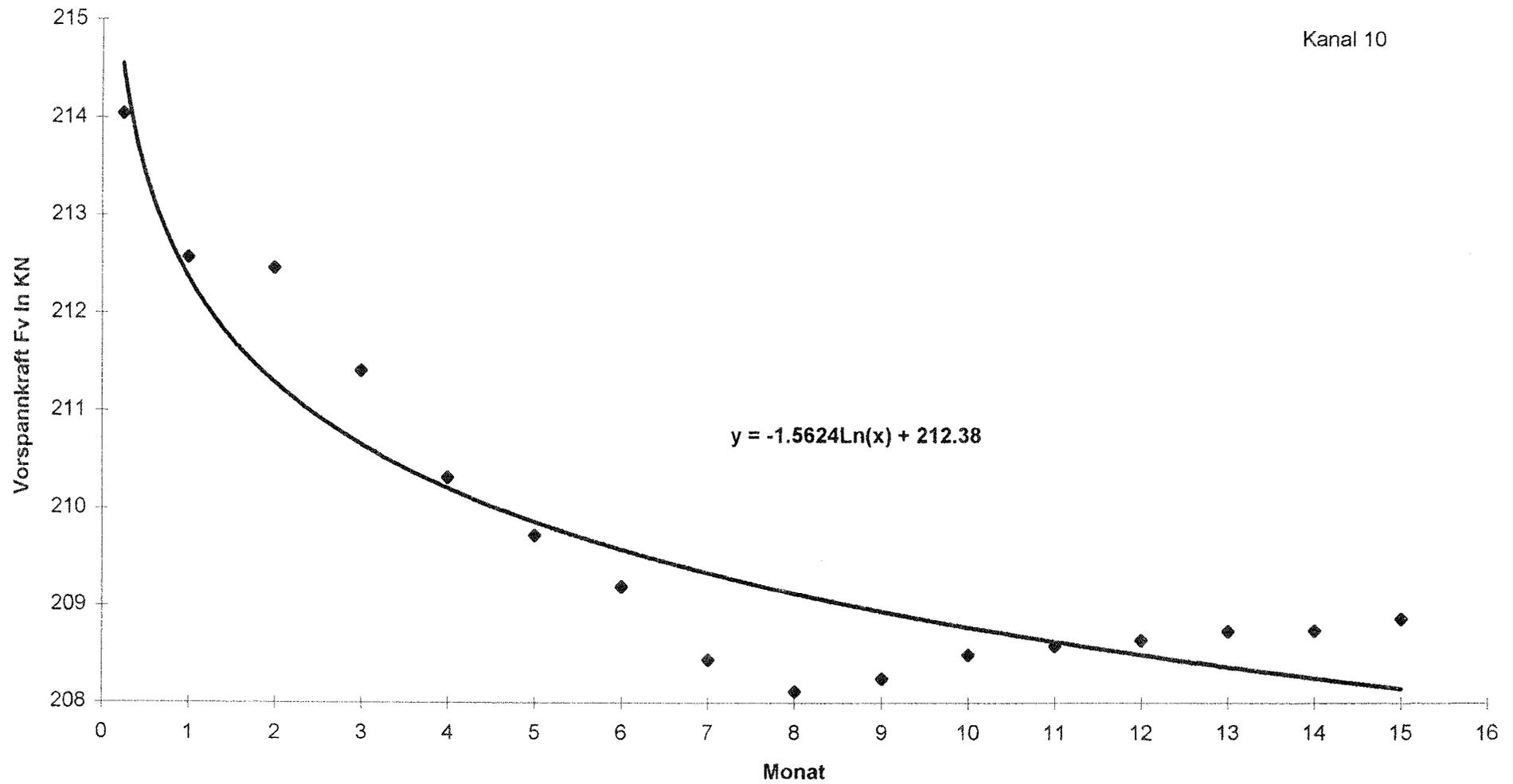


Bild 57: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 10 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

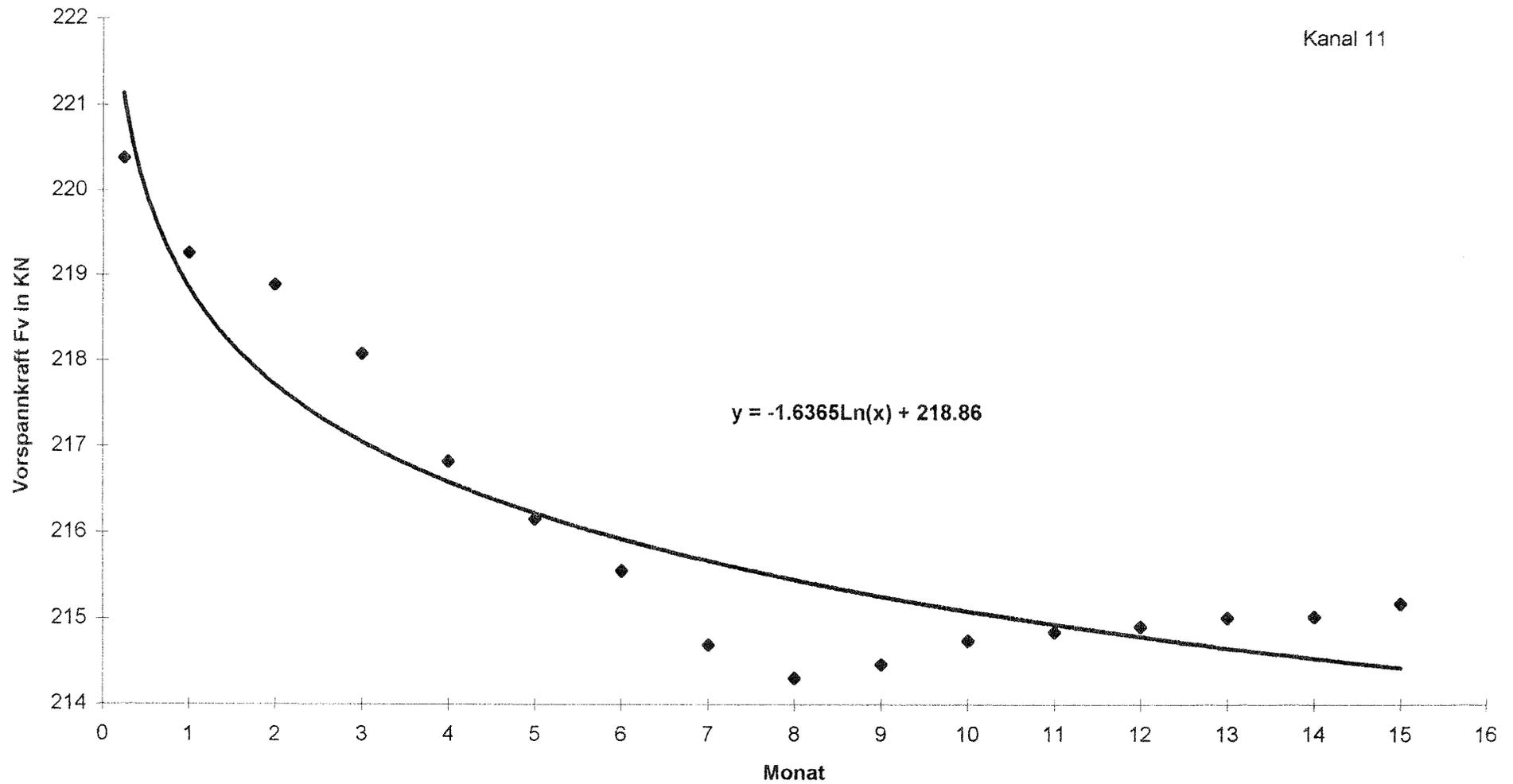


Bild 58: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 11 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

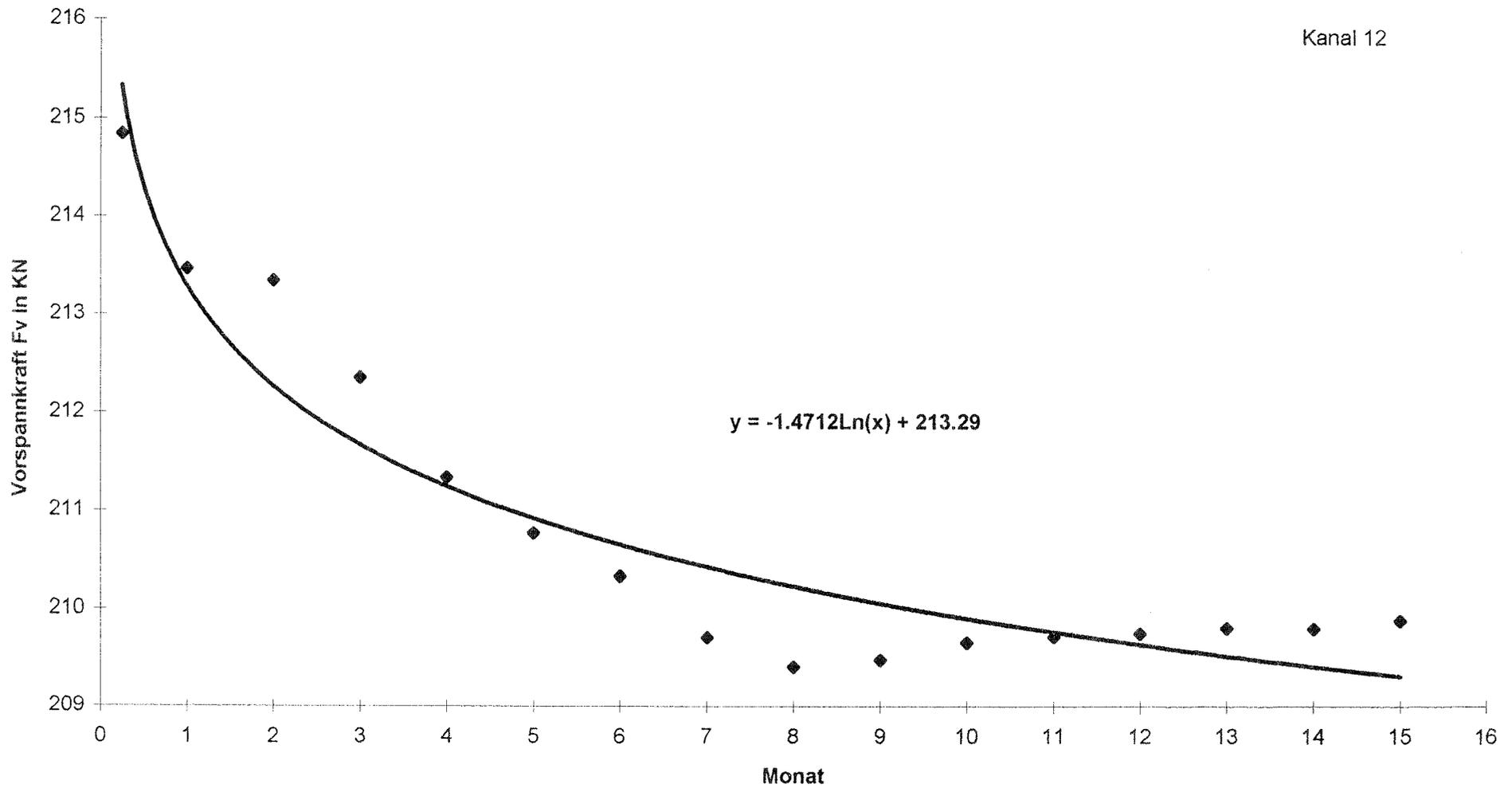


Bild 59: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 12 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

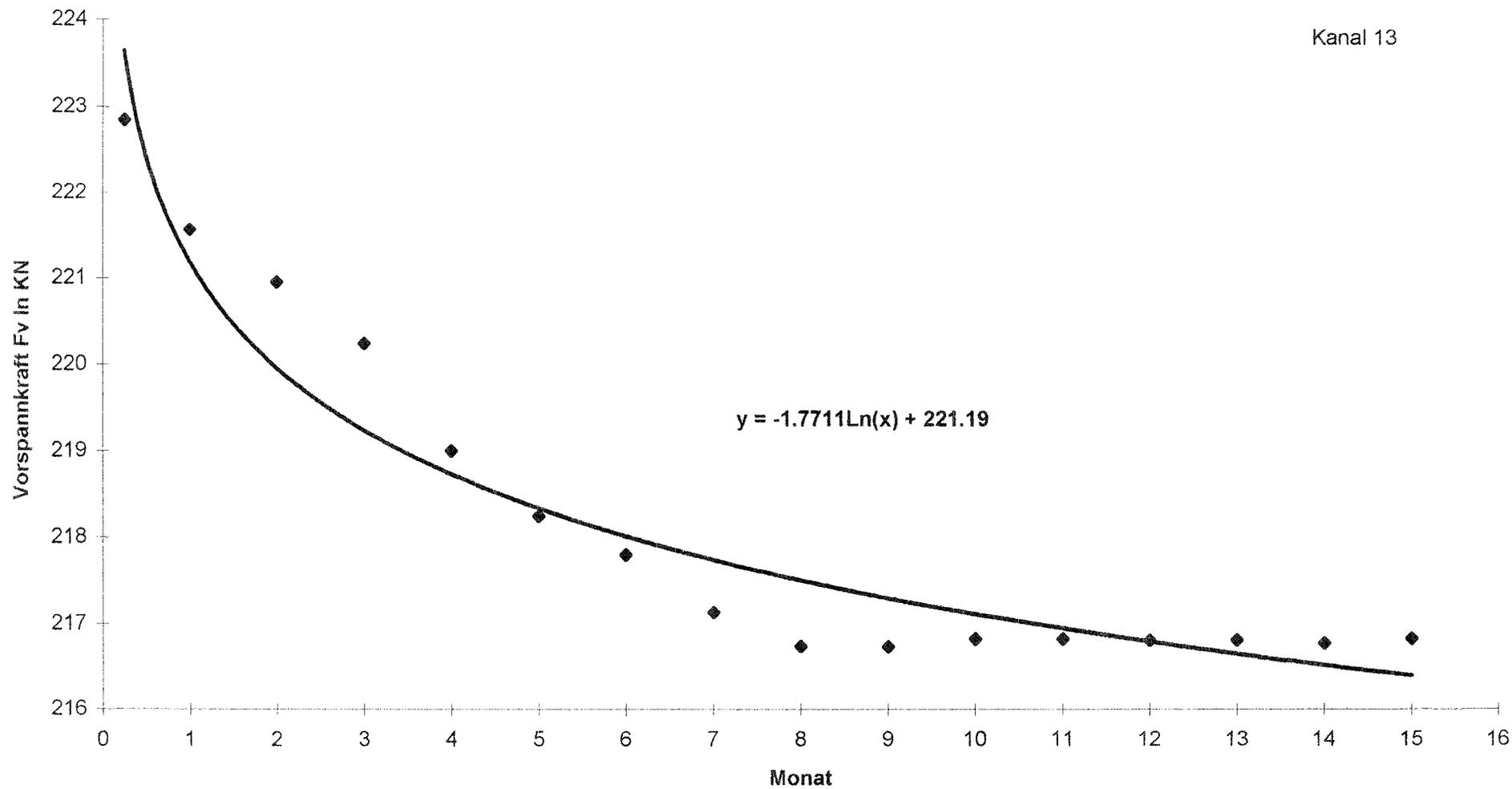


Bild 60: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 13 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

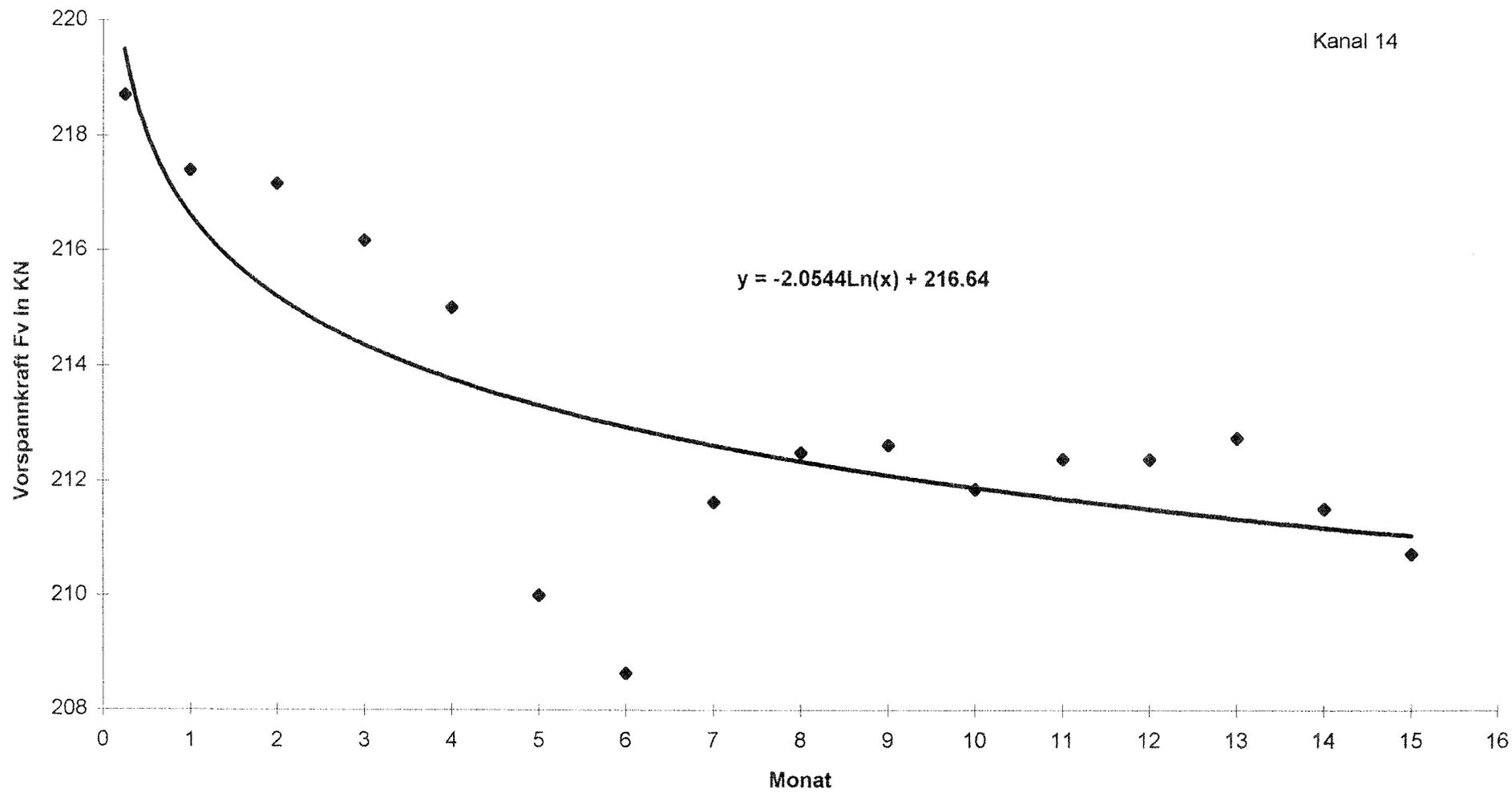
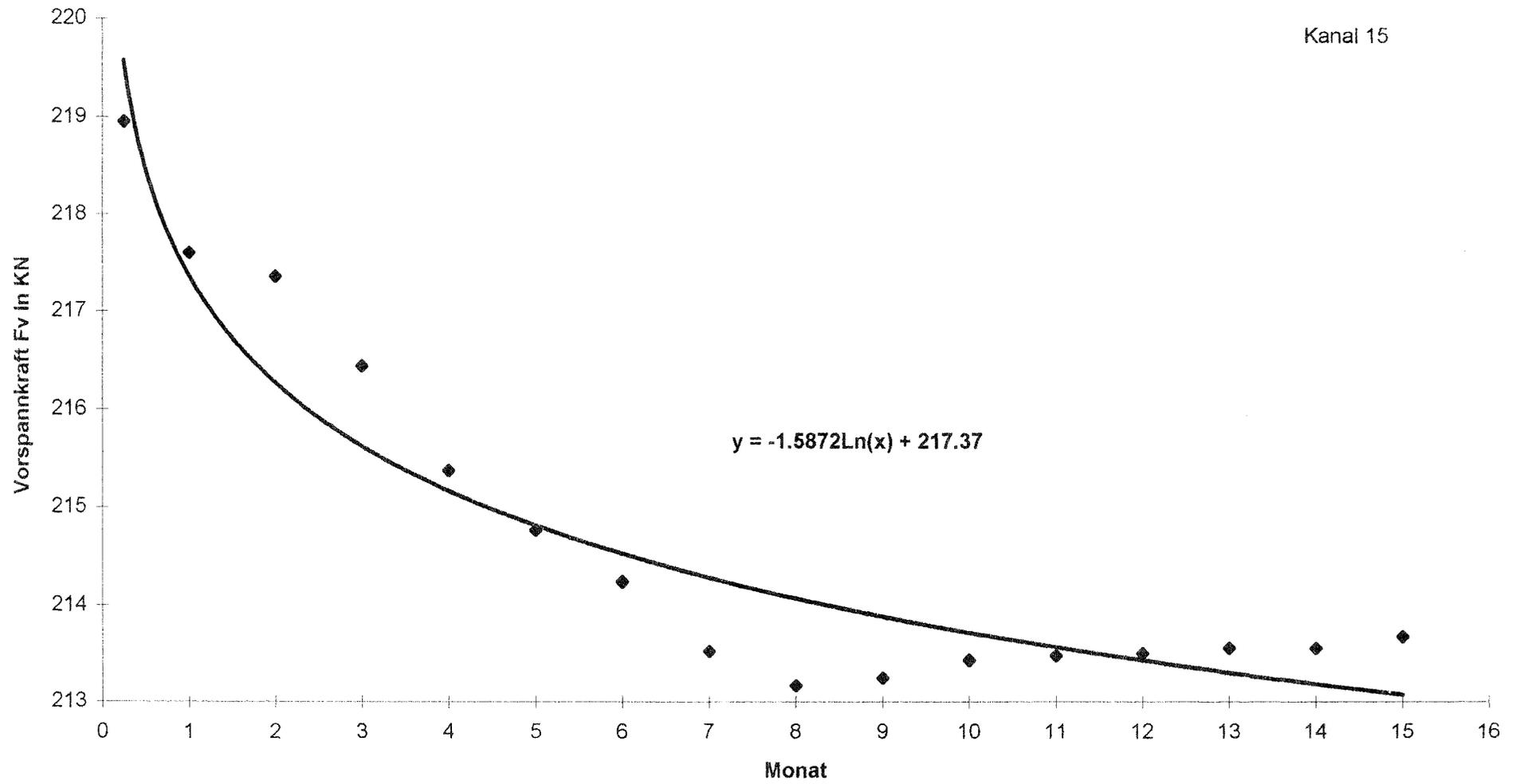


Bild 61: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 14 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

Kanal 15



Anlage 62

Bild 62: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 15 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

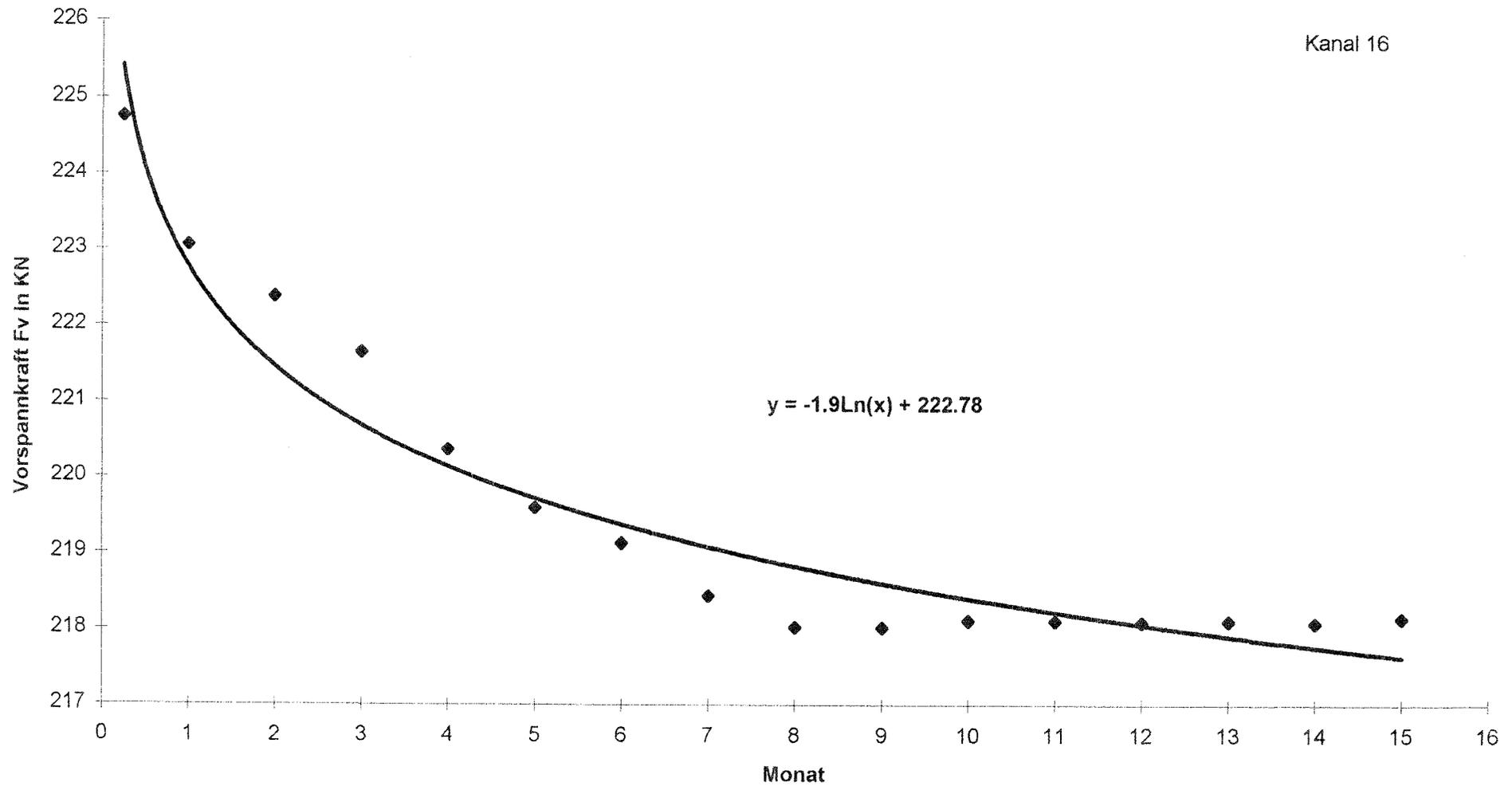


Bild 63: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 16 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

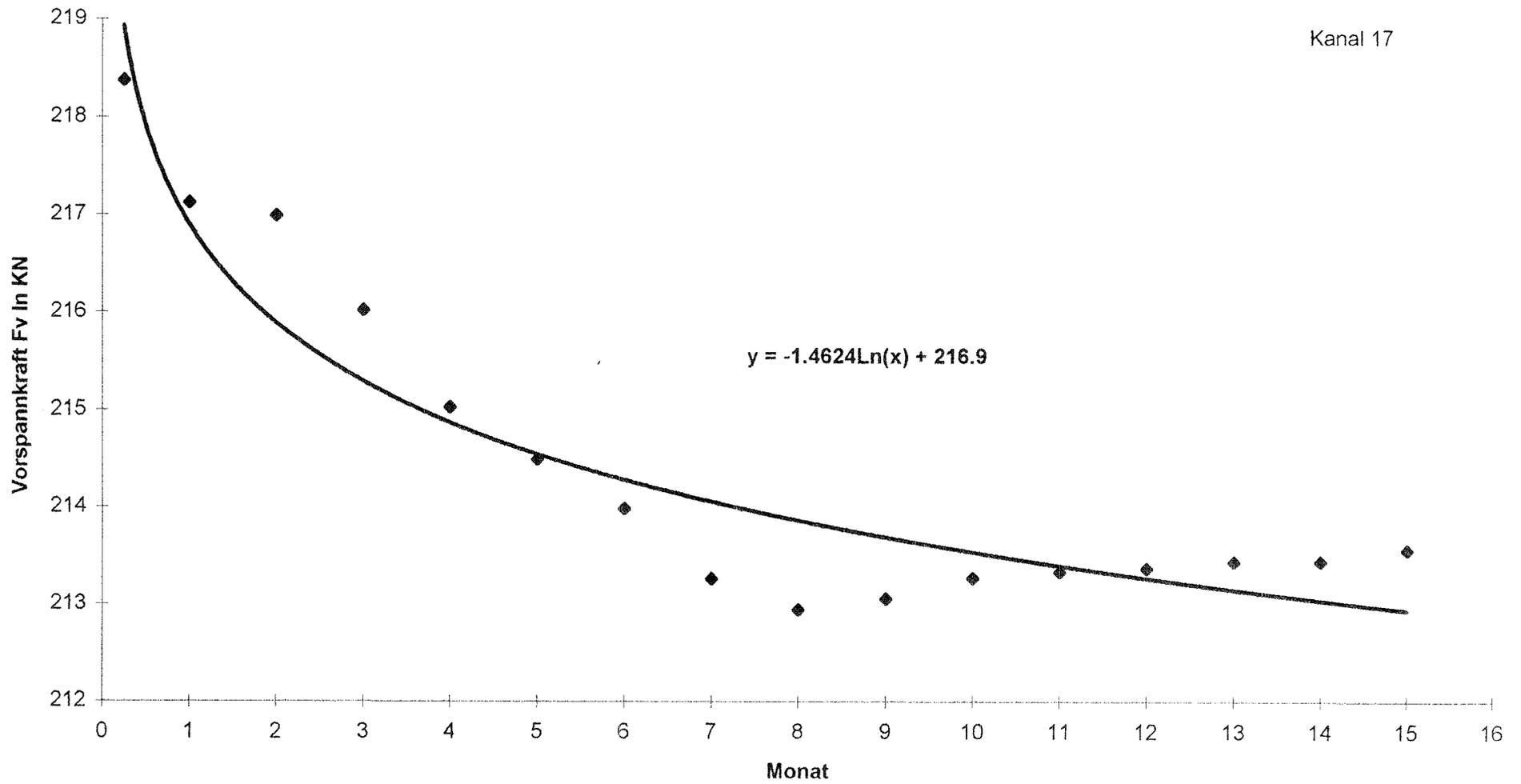


Bild 64: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 17 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

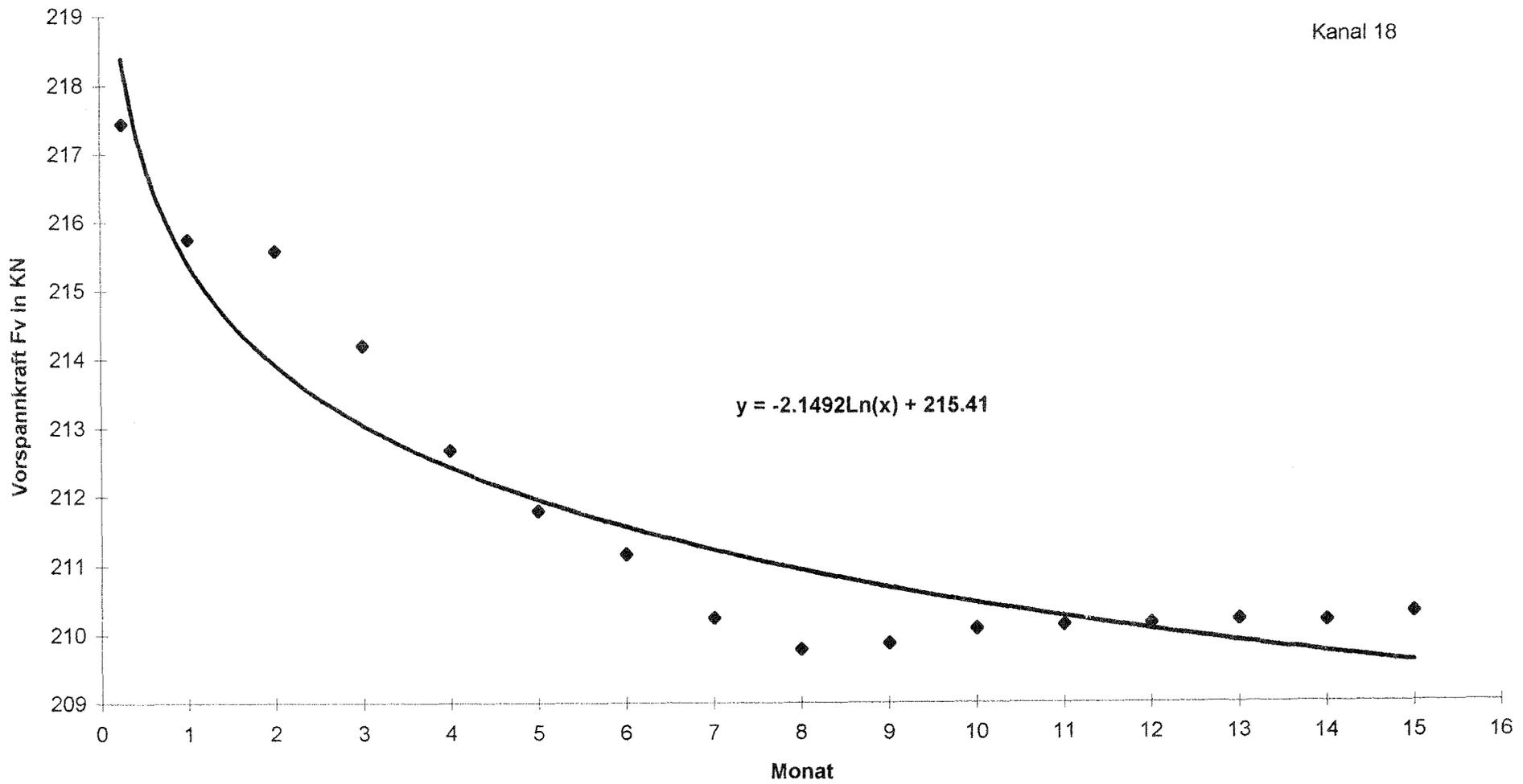


Bild 65: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 18 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

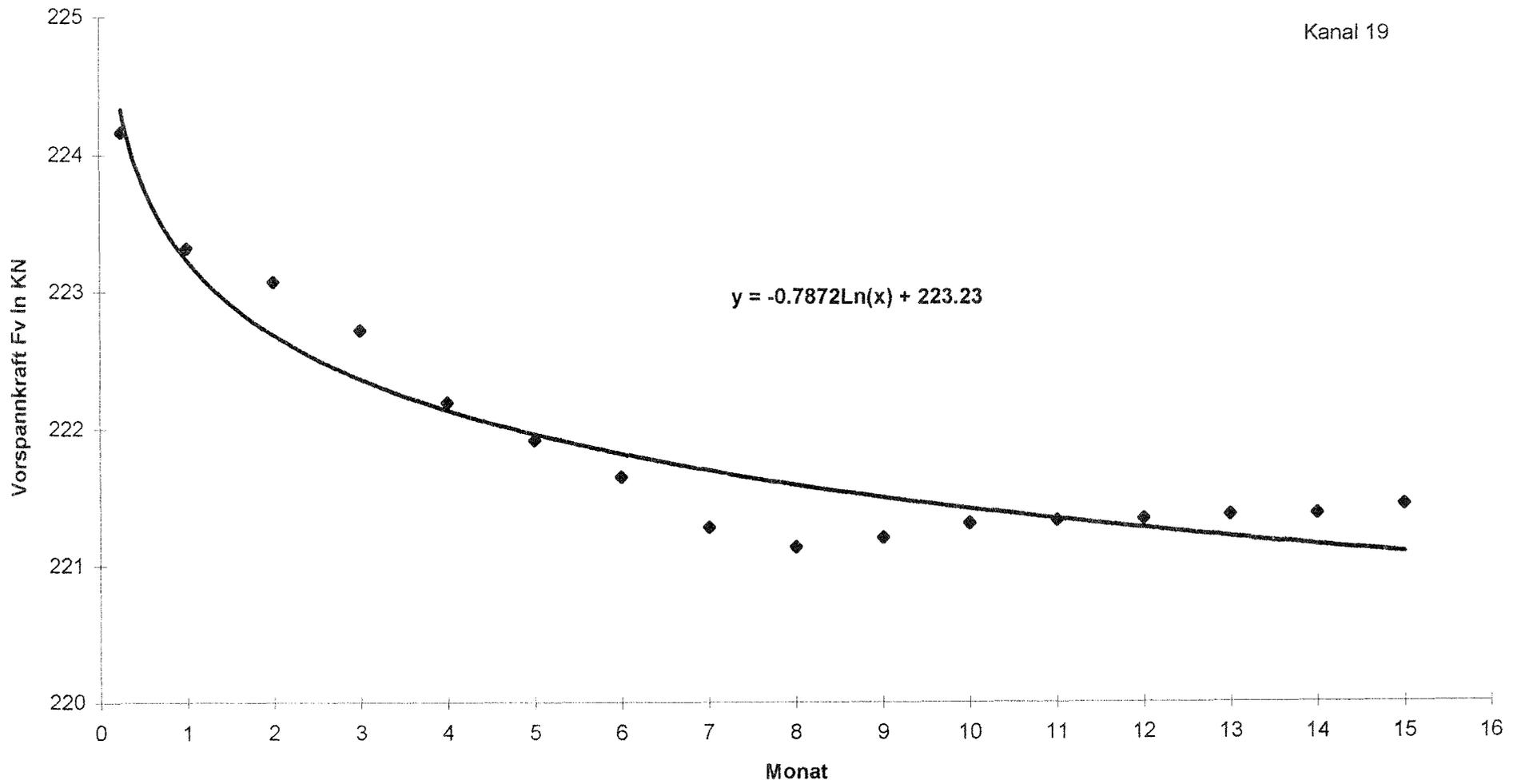


Bild 66: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 19 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

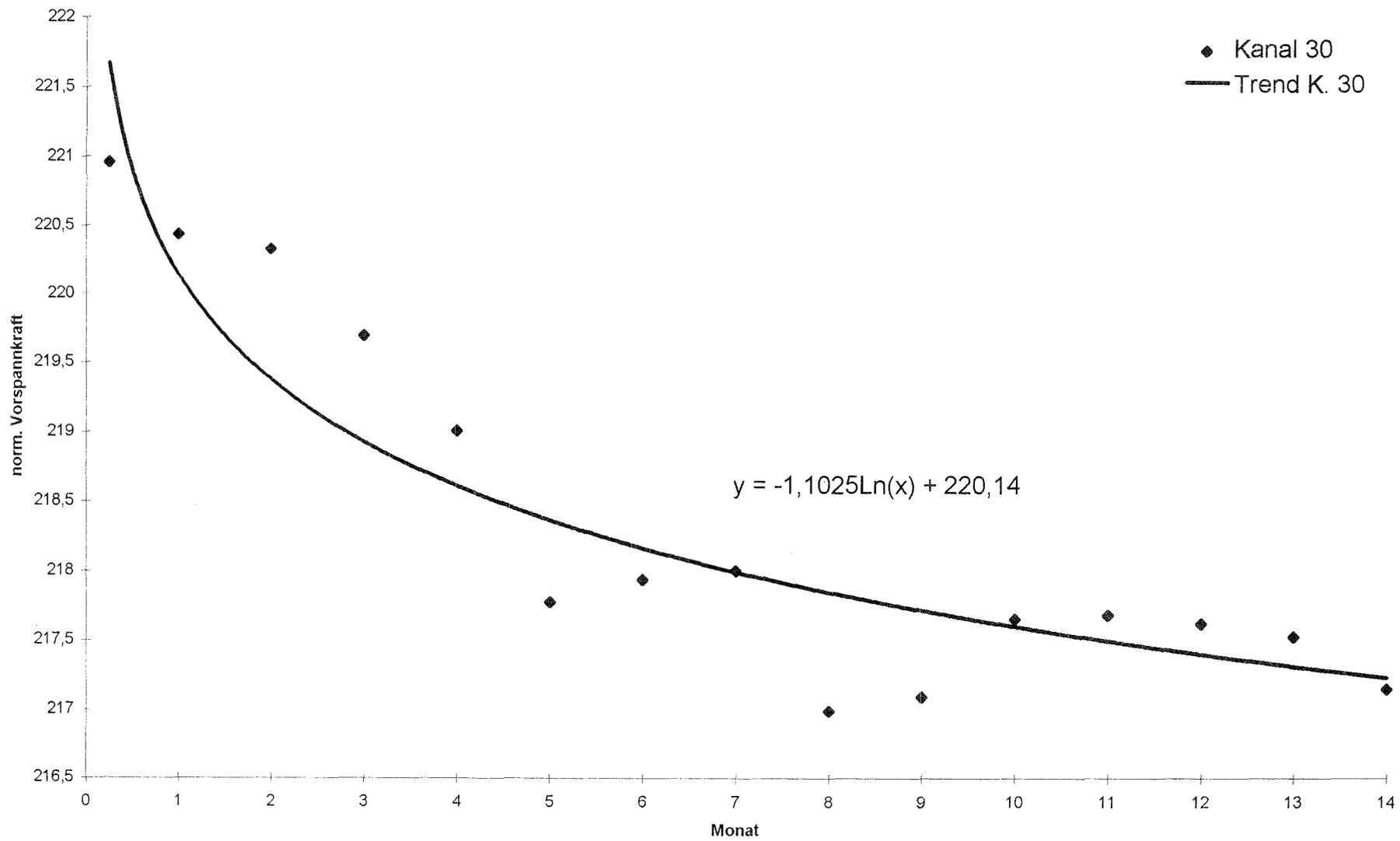


Bild 67: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 30 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

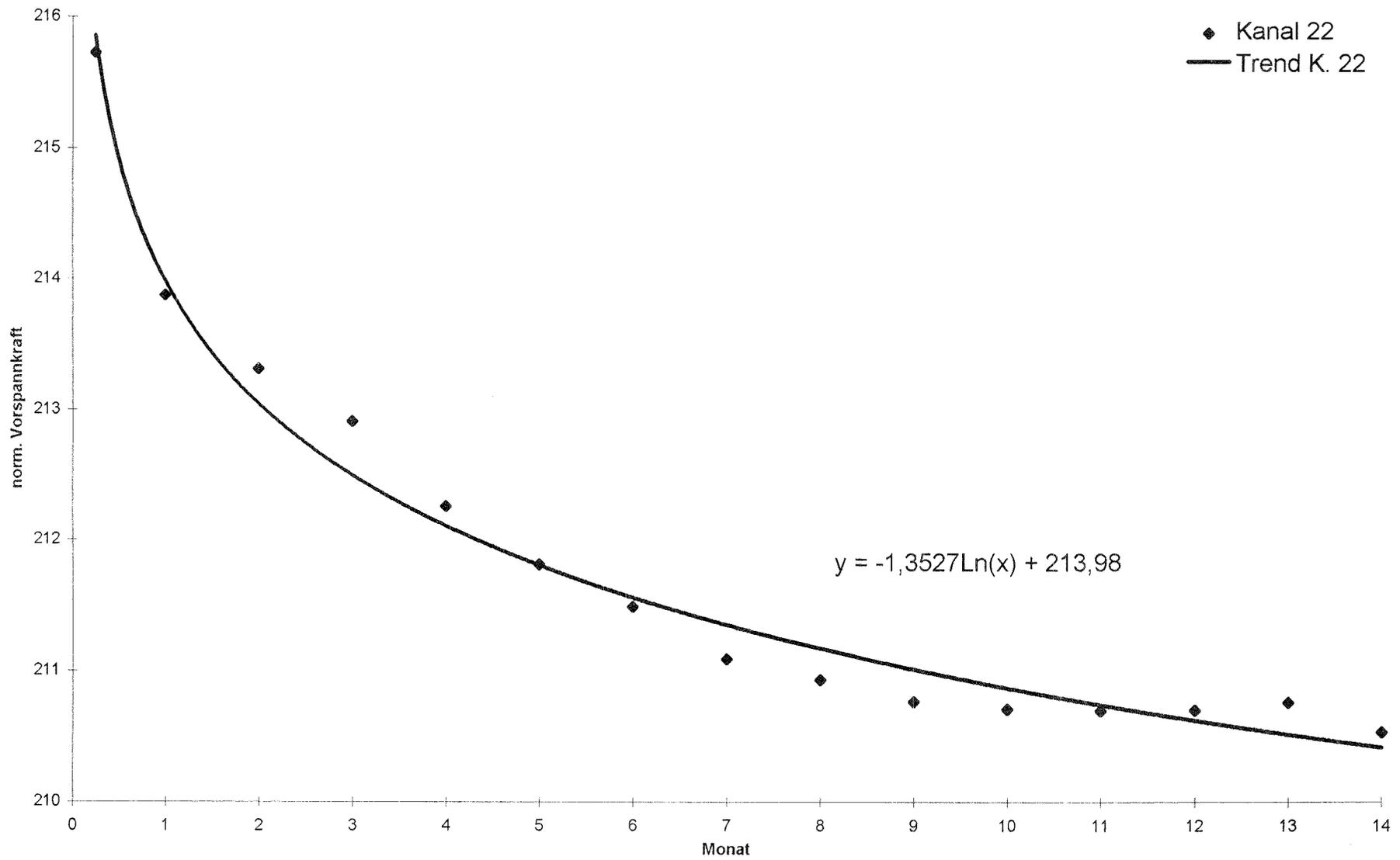


Bild 68: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 22 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

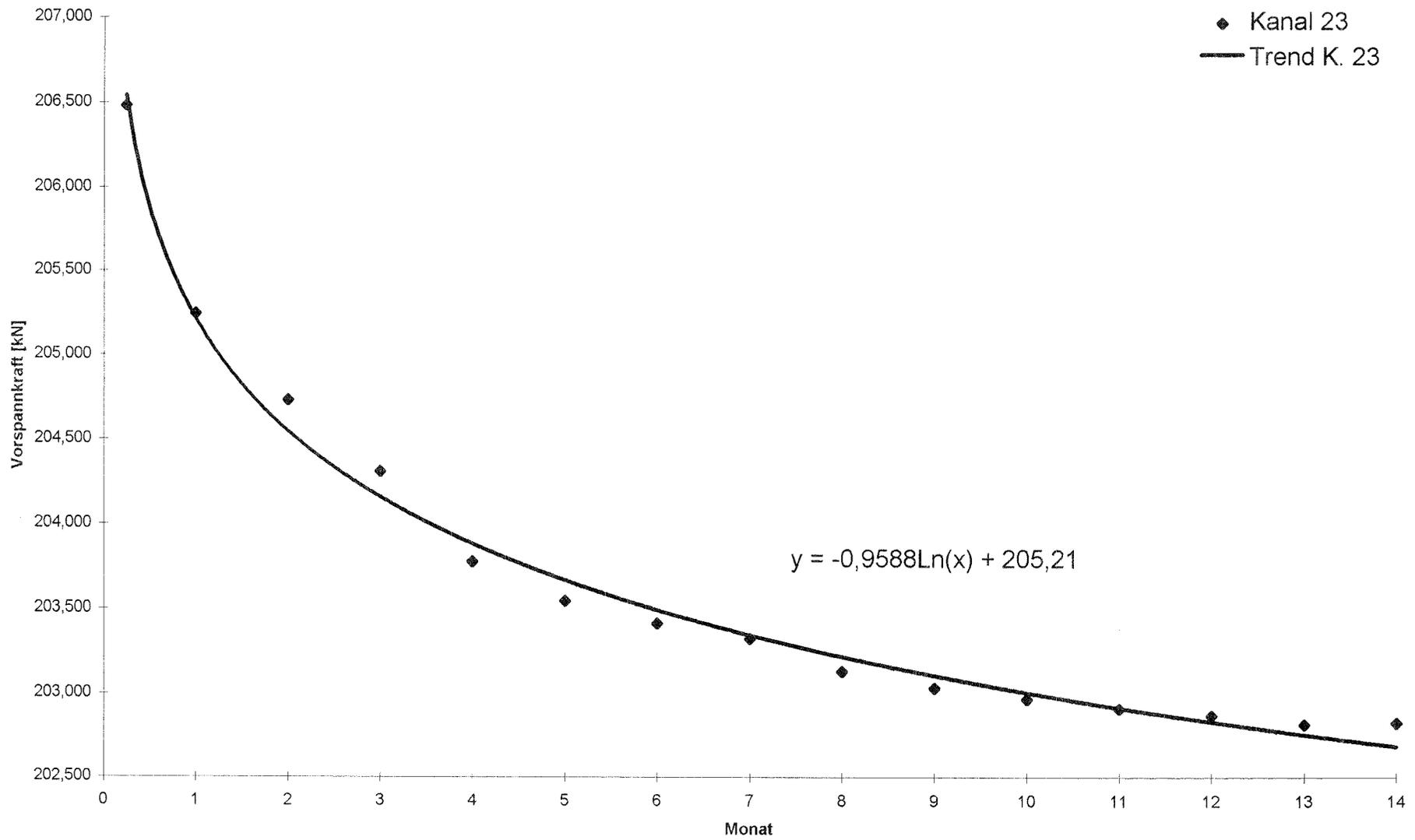


Bild 69: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 23 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

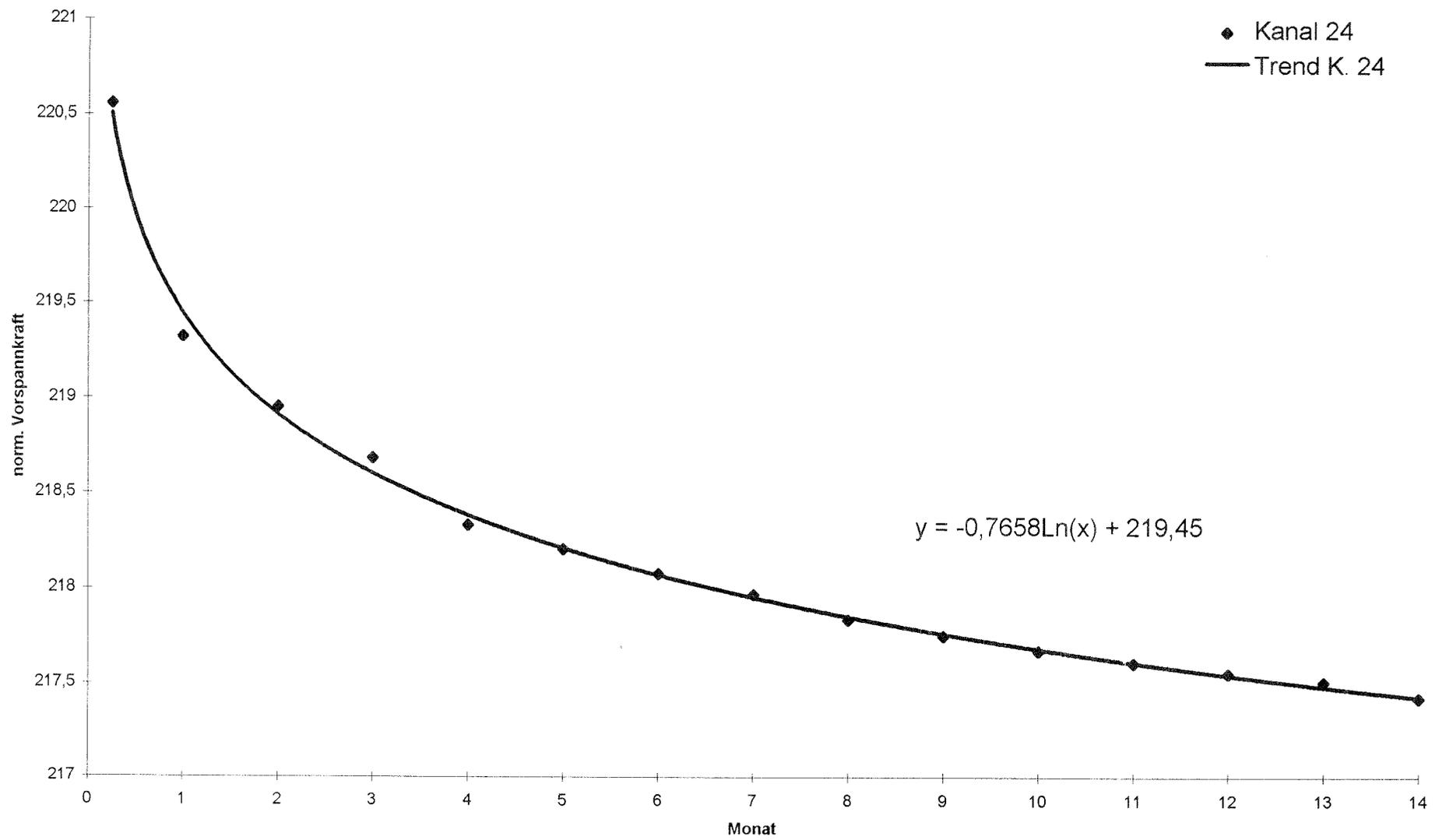


Bild 70: Auf die Monatsenden kondensierte und bereinigte Meßwerte sowie dazugehörige Trendlinie für Kanal 24 (Zuordnung siehe Tabelle 1)

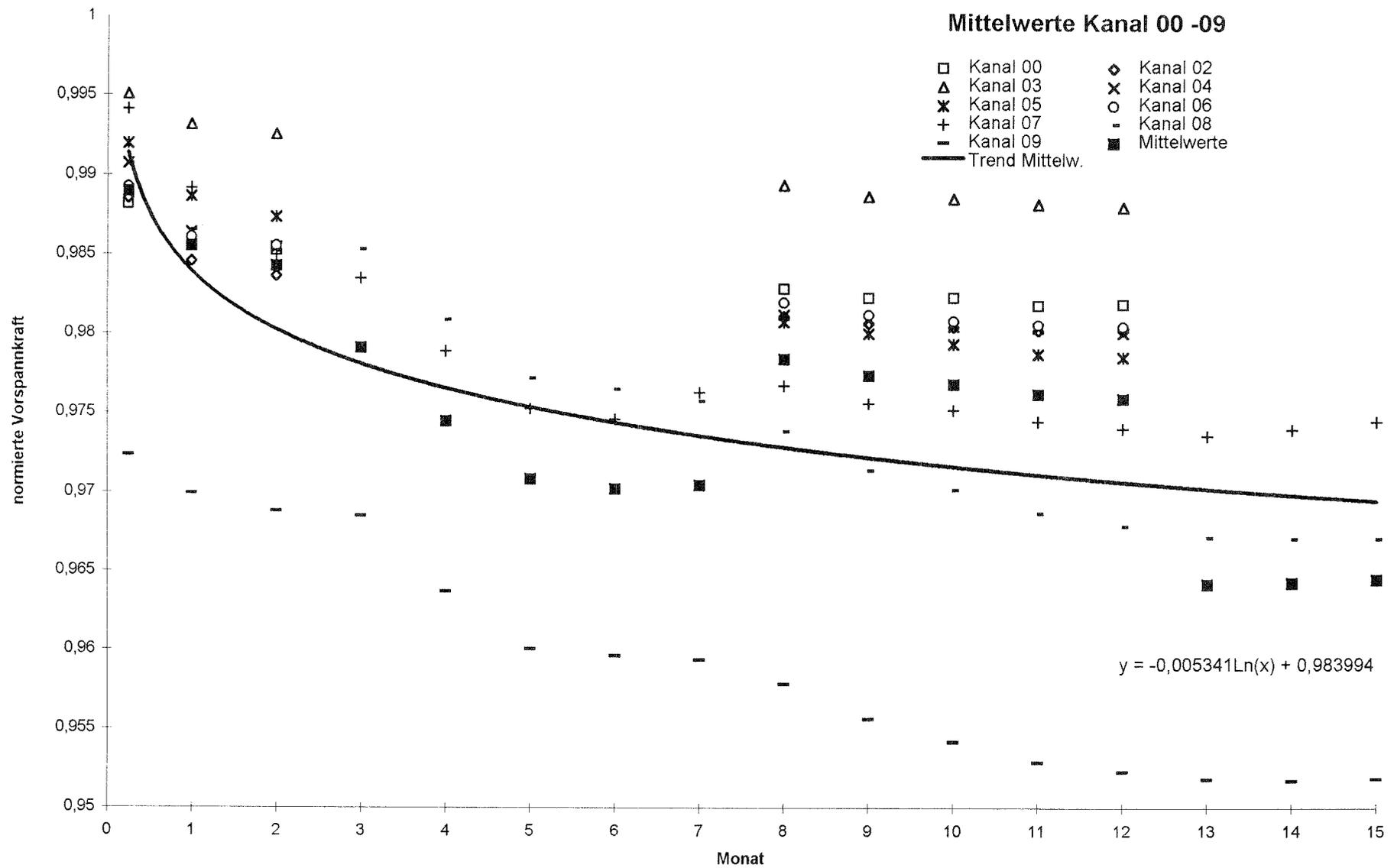


Bild 71: Bezogene, gemittelte Trendlinie (bezogene Vorspannkraft-Zeit-Verlauf) für die Kanäle 00 und 02 - 09 (implantierte DMS der Schrauben 1 und 3 - 10), Bezugswert ist der Anfangswert der Vorspannkraft $F_{V,0}$

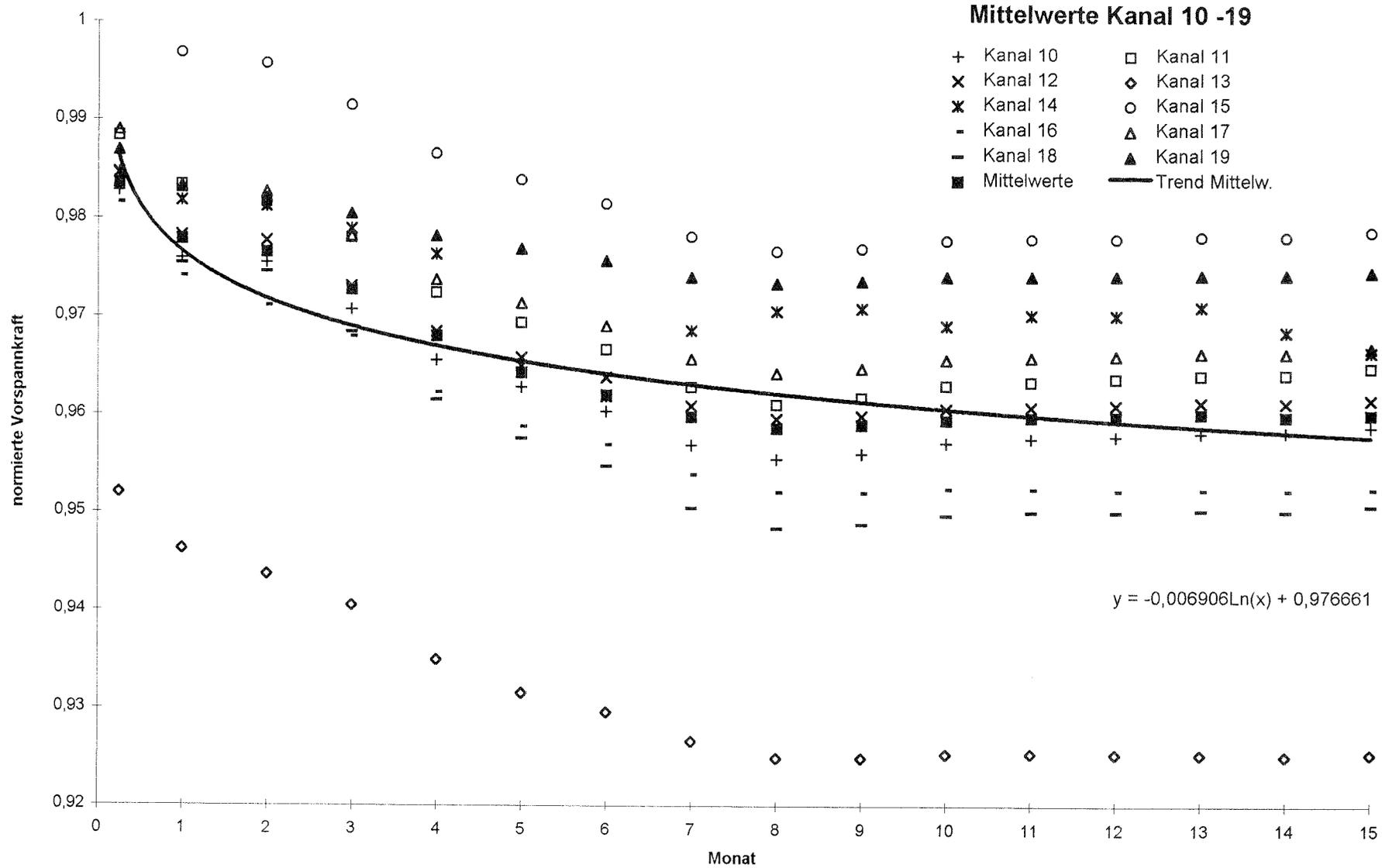


Bild 72: Bezogene, gemittelte Trendlinie (bezogene Vorspannkraft-Zeit-Verlauf) für die Kanäle 10 - 19 (implantierte DMS der Schrauben 1 - 10), Bezugswert ist der Anfangswert der Vorspannkraft $F_{V,0}$

Kanal 22-24, 30, 00-19 (ohne 01)

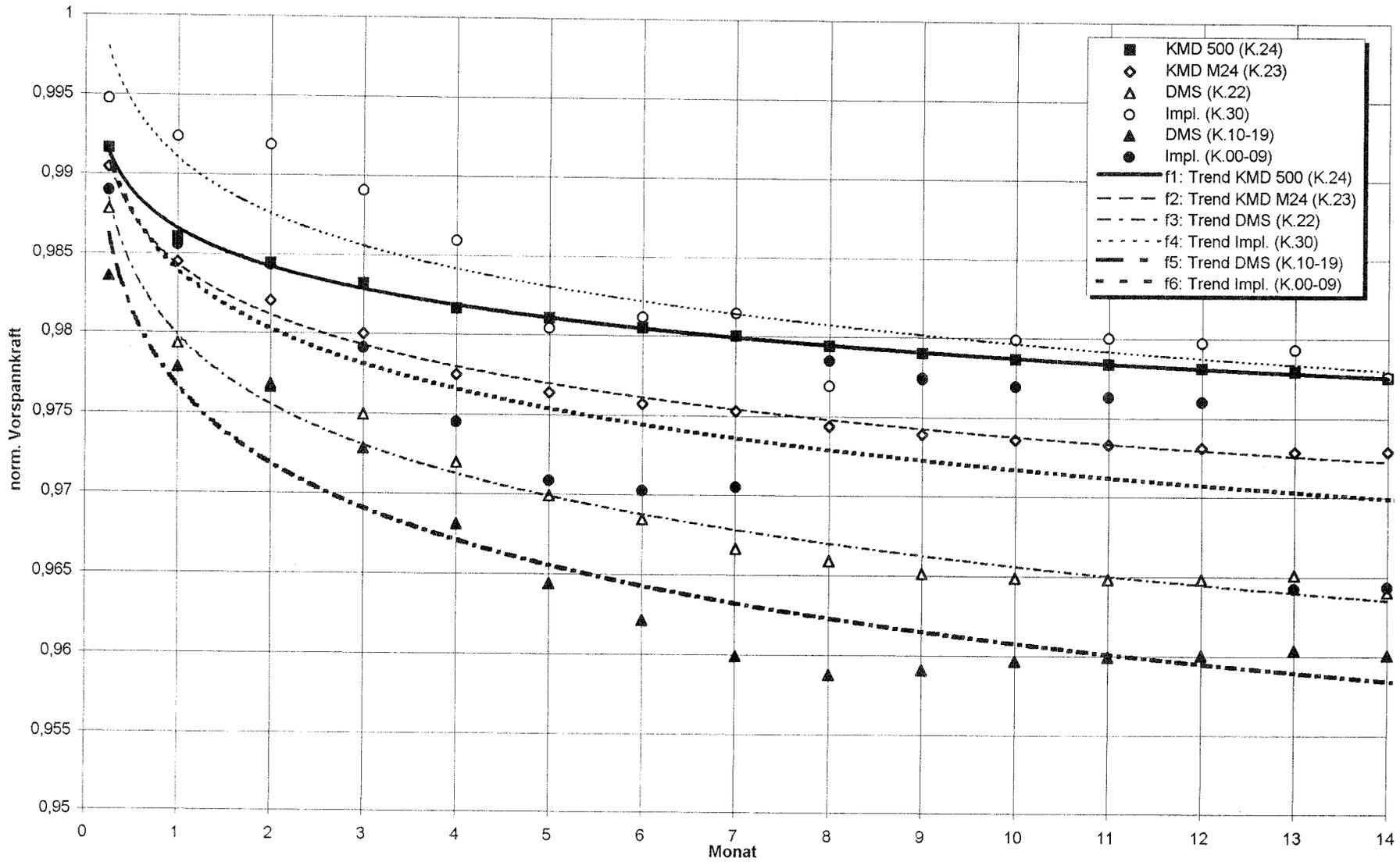


Bild 73: Bezogene Trendlinien für die Kanäle 22 - 24 und 30 sowie bezogene, gemittelte Trendlinien der Kanäle 00, 02 - 09 und 10 - 19, Bezugswert ist der Anfangswert der Vorspannkraft $F_{V,0}$