



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7610

Computertomographische Untersuchungen und Druckversuche an Robinienrundholz

H. J. Blaß, M. Frese
F. Brüchert
M. Diaz-Baptista
U. H. Sauter

H. J. Blaß, M. Frese, F. Brüchert, M. Diaz-Baptista, U. H. Sauter

**Computertomographische Untersuchungen und Druckversuche
an Robinienrundholz**

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7610

Computertomographische Untersuchungen und Druckversuche an Robinienrundholz

von

H. J. Blaß und M. Frese¹

F. Brüchert, M. Diaz-Baptista und U. H. Sauter²

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen

² Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA),
Abteilung Waldnutzung

Report-Nr. KIT-SR 7610

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2012
Print on Demand

ISSN 1869-9669

Inhalt

1	Vorbemerkung	1
2	Material	3
3	Methoden und Ergebnisse	5
3.1	Computertomographische Untersuchung	5
3.1.1	CT-Daten	5
3.1.2	Numerisch ermittelte Querschnittswerte	5
3.2	Druckversuche an Robinien-Stammabschnitten	6
3.2.1	Tragfähigkeitsermittlung	6
3.2.2	Querschnittswerte, physikalische und mechanische Kennwerte	7
4	Schlussfolgerungen	9
4.1	Allgemeines	9
4.2	Tragfähigkeitsbestimmende Kenngrößen	9
4.2.1	Durchmesser des Ersatz-Kreisquerschnitts	9
4.2.2	Drucksteifigkeit	10
4.3	Tragfähigkeitsvorhersage	13
4.4	Weiterer Untersuchungsbedarf	13
	Anlagen	15

1 Vorbemerkung

Dieser Bericht enthält die Untersuchungsergebnisse einer experimentellen Studie, die vom Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) gemeinsam durchgeführt wurde. Sie wurde von beiden Partnern aus eigenen Mitteln finanziert.

Der anfänglichen Projektidee lag der Gedanke zugrunde, ob natürlich gewachsenes Robinienrundholz aufgrund seiner ausgezeichneten Dauerhaftigkeit für frei bewitterte Fachwerkträger eingesetzt werden kann. Zur konkreten Umsetzung der Projektidee war es erforderlich, zunächst aus Sicht der Forstwirtschaft, geeignetes Robinienrundholz zu benennen und zu beschaffen. An natürlich gewachsenen Stammabschnitten, die aus ingenieurtechnischer Sicht Anforderungen an tragende Bauteile erfüllen könnten, sollten dann Druckversuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit und Versuche, die Verbindungstechnik betreffend, durchgeführt werden.

Während der Durchführung des Projekts zwischen Herbst 2008 und Winter 2010 hat sich die Untersuchung auf die Ermittlung der geometrischen Eigenschaften von natürlich gewachsenen Robinienstammabschnitten und deren Drucktragfähigkeit konzentriert. Ausschlaggebend dafür war, dass die Möglichkeit genutzt wurde, die Robinienstammabschnitte mit dem neu in Betrieb genommenen Computertomographen (CT) der FVA zu untersuchen. Mit den CT-Daten wurden dann mechanisch relevante geometrische Kennwerte ermittelt und dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass mit der numerisch berechneten Querschnittsfläche der Stammabschnitte und der in Versuchen ermittelten Drucksteifigkeit die Drucktragfähigkeit von natürlich gewachsenen Stammabschnitten außergewöhnlich gut abschätzbar ist. Das kann ein Anstoß werden, fachübergreifende Grundlagen zu schaffen für ein auf CT-Technologie und mechanischer Vorbelastung basierendes maschinelles Sortierverfahren für Druckbauteile, die in tragenden Konstruktionen Verwendung finden sollen.

2 Material

Das Robinienholz für die Untersuchung wurde im Winter 2008 dem Staatswald der Unteren Forstbehörde Emmendingen¹ entnommen. Kennzeichnend für die entnommenen Stämme war eine z. T. ausgeprägte Schiefstellung (Bild 2-1). Die Bäume hatten ein Alter von etwa 35 Jahren. Das Langholz (Bild A-1) wurde für die weitere Untersuchung in einzelne Stammabschnitte aufgeteilt (Bild A-2). Die Erdstämme erhielten den Index 1, der darauf folgende Abschnitt den Index 2 usw. Es wurden bis zu vier Stammabschnitte aus einem Langholz gewonnen (Bild 2-2). Das Untersuchungsmaterial umfasste schließlich 63 Stammabschnitte. Es wurden alle Abschnitte computertomographisch an der FVA untersucht; 29 davon wurden in Druckversuchen am KIT geprüft.



Bild 2-1 Ausgewählte Robinienstämme (KA-Markierung) im Staatswald der Unteren Forstbehörde Emmendingen

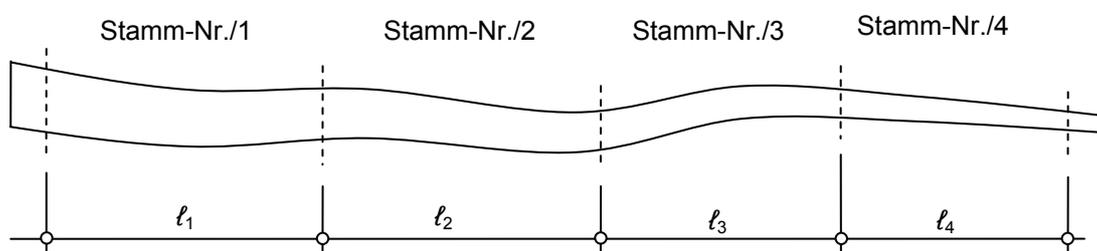


Bild 2-2 Aufteilung des Robinienlangholzes in bis zu 4 einzelne Stammabschnitte, Bezeichnung der Stammabschnitte

¹ Der Forstdirektion des Regierungspräsidiums Freiburg wird für die kostenlose Bereitstellung des Versuchsholzes gedankt

3 Methoden und Ergebnisse

3.1 Computertomographische Untersuchung

3.1.1 CT-Daten

Die CT-Untersuchung lieferte kartesische Koordinaten von Punkten, mit denen der Umriss des Kambiums bzw. der Fläche der tragenden Holzsubstanz (Kern- und Splintholz) einer beliebigen Querschnittsebene darstellbar ist. Entlang der Achse der Stammabschnitte (Länge = l_1 , l_2 , l_3 und ggf. l_4) wurde alle 4,96 mm eine Querschnittsebene durchstrahlt. Bild 3-1 zeigt beispielhaft die zwei Umrisse am Zopf- und Stockende des Abschnitts 13/1.

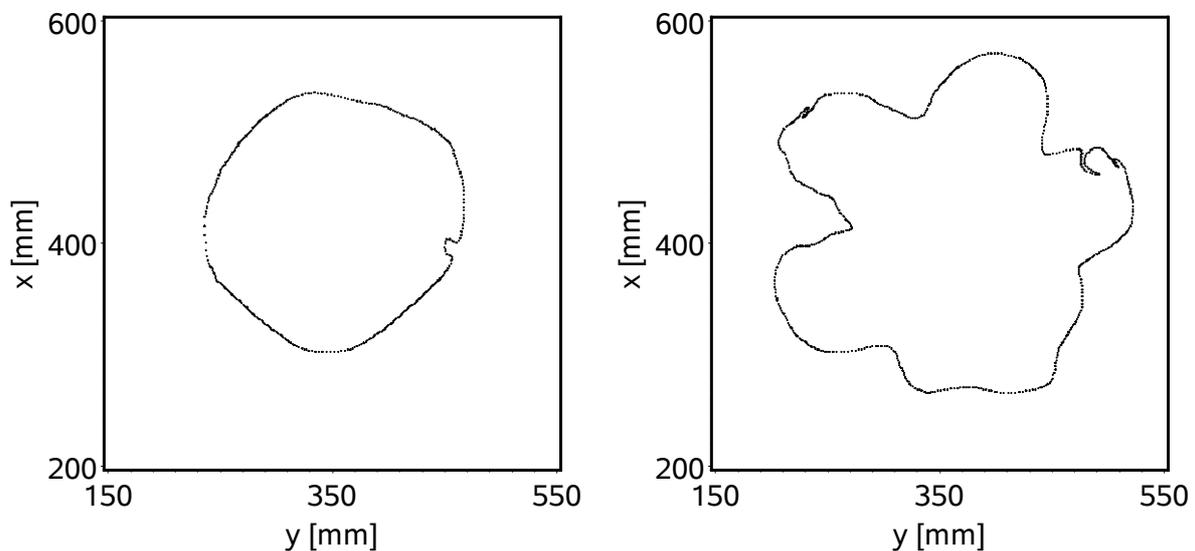


Bild 3-1 CT-Daten: Umrisse der tragenden Holzsubstanz, Stammabschnitt 13/1, Zopfende (links) und Stockende (rechts)

3.1.2 Numerisch ermittelte Querschnittswerte

In Bild A-3 bis Bild A-31 sind für die 29 in Druckversuchen geprüften Stammabschnitte der Verlauf der Querschnittsfläche der tragenden Holzsubstanz (in mm^2 , oben) und die Verläufe der beiden entsprechenden Schwerpunktkoordinaten (in mm, Mitte und unten) jeweils über der gesamten Länge der einzelnen Stammabschnitte dargestellt. In den Diagrammen liegt das Stockende bei der Längskoordinate 0. Die Querschnittsfläche wurde als Fläche eines Polygonzugs numerisch berechnet, der die einzelnen Datenpunkte der CT-Untersuchung miteinander verbindet (vgl. Bild 3-1), ebenso die beiden Koordinaten des Flächenschwerpunkts. Diese drei Diagramme stellen die beiden wichtigsten geometrischen Größen bzw. geometrischen Imperfektionen dar, die für die Drucktragfähigkeit eines natürlich gewachsenen Stammabschnitts kennzeichnend sind. Da die Querschnittsfläche der Stammabschnitte mit nur

wenigen Ausnahmen einem Kreis gleicht (s. Bild A-37), können daraus alle relevanten, mechanischen Flächenwerte abgeleitet werden.

3.2 Druckversuche an Robinien-Stammabschnitten

3.2.1 Tragfähigkeitsermittlung

Während die CT-Untersuchung an der ursprünglichen Länge der Stammabschnitte ($l = l_1, l_2, l_3$ und ggf. l_4) durchgeführt wurde, war vor der Druckprüfung an allen Enden (Stock und Zopf) der 29 Prüfkörper ein weiterer Sägeschnitt erforderlich. Es mussten stockseitig vor allem Faulstellen und spannrückige Enden (vgl. Bild 3-1, rechts) entfernt und generell weitgehend rechtwinklig zur Stabsehne ausgerichtete Stirnflächen geschaffen werden. Dadurch verringerte sich die Ausgangslänge l der einzelnen Stammabschnitte auf die effektiv prüfbare Länge l_{eff} (Bild 3-2). In den Diagrammen in Bild A-3 bis Bild A-31 liegt diese effektive Länge jeweils zwischen den roten, vertikalen Referenzlinien. Bei den Stammabschnitten 4/1 und 24/3 wurden beispielsweise an den Stockenden bis zu 1450 mm lange Stücke wegen offensichtlicher Risse oder Fäule abgetrennt. Diese Schäden zeigten sich auch später durch auffällige Unregelmäßigkeiten (starke Sprünge) in der Darstellung der Querschnittsfläche der beiden Stammabschnitte (s. Bild A-6 bzw. Bild A-26). An allen vorbereiteten Prüfkörpern wurden kurz vor der Druckprüfung die Frequenz der Längsschwingung und die Masse (einschließlich Borke) ermittelt. Diese Werte dienen später der Berechnung der Brutorohdichte ρ_{brutto} und des dynamischen Elastizitätsmoduls E_{dyn} . Auf den Stirnflächen wurden Kopf- und Fußplatten mit selbstbohrenden Schrauben verankert (Bild A-32). Die Platten waren jeweils mit einer Kalotte versehen (Bild A-33). Der Druckversuch entsprach damit dem Euler-Fall-II mit beidseitig gelenkiger Lagerung (Bild A-34 und Bild A-35). Die Prüfkörper wurden senkrecht geprüft (Bild 3-3) und mit einer Geschwindigkeit von 3 mm/min belastet. Die Belastung wurde durch hydraulisches Anheben der unteren Basis aufgebracht. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem die Höchstlast F_{max} erreicht worden war bzw. sich eine augenscheinlich kritische Verdrehung der Kalotten in den Lagerschalen eingestellt hatte, die dann aus Sicherheitsgründen einen Abbruch des Versuchs erforderte.

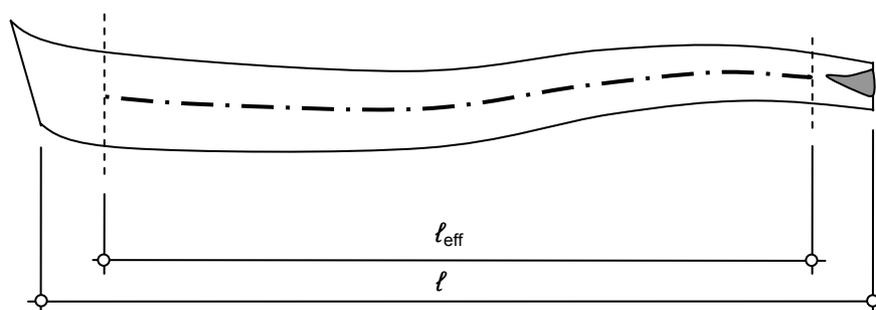


Bild 3-2 Festlegen der effektiven Stablänge l_{eff} für den Robinien-Druckstab

Die Lastverformungskurven der 29 Druckversuche sind in Bild A-36 dargestellt. Sie zeigen die Druckkraft F über der Stabsehnungsverkürzung u . Beide Werte wurden von der Prüfmaschine aufgezeichnet. Die Höchstwerte sind nachfolgend in Tabelle 4-1 zusammengestellt.



Bild 3-3 600-t-Prüfmaschine mit eingebautem Robiniendruckstab

3.2.2 Querschnittswerte, physikalische und mechanische Kennwerte

Direkt nach der Druckprüfung wurden aus den Prüfkörpern drei Referenzproben entnommen (Bild 3-4): eine 50 mm dicke Stammscheibe aus dem Bereich der Stabmitte für die Ermittlung der Holzfeuchte u ; zwei 300 mm lange Zylinder zur händischen Messung der Durchmesser (u. a. für Plausibilitätskontrollen) und für die fotografische Dokumentation von Hirnflächen (Bild A-37). Die Holzfeuchteproben wurden entrindet und bis zur Gewichtskonstanz gedarrt. An den 300-mm-Proben wurden an beiden Stirnseiten jeweils der minimale und maximale Durchmesser gemessen und ein Mittelwert für die Referenzprobe am Zopf- (d_z) und Stockende (d_s) berechnet. Mit den

Mittelwerten, der effektiven Länge l_{eff} bzw. dem Schwerpunktabstand l_s zwischen den beiden 300-mm-Proben wurden die Brutorohdichte, die Abholzigkeit (konische Erstreckung) und der dynamische Elastizitätsmodul rechnerisch abgeschätzt. Die vorbezeichneten Werte sind in Tabelle A-1 zusammengestellt.

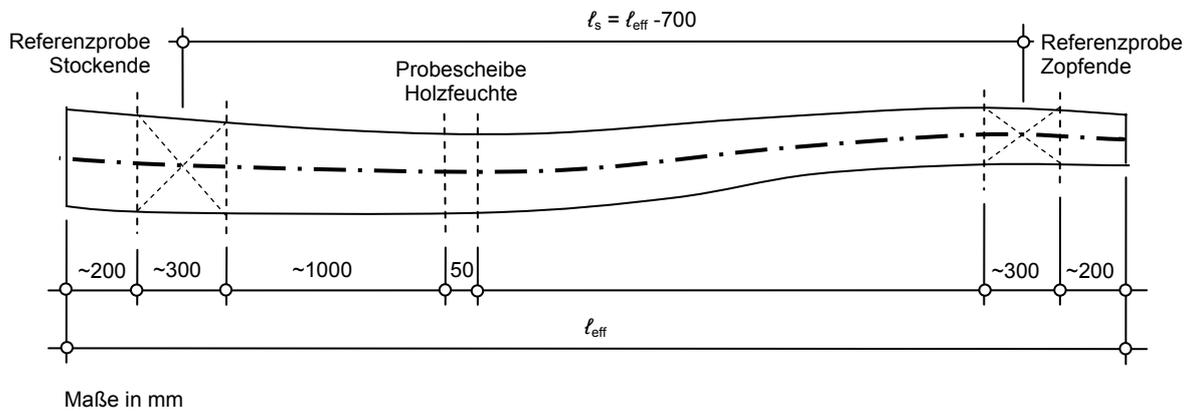


Bild 3-4 Entnahmestellen der Referenzproben

4 Schlussfolgerungen

4.1 Allgemeines

Aus ingenieurtechnischer Sicht bilden die Ergebnisse der CT-Untersuchung und diejenigen der Druckversuche eine gemeinsame Grundlage für eine Tragfähigkeitsvorhersage der Druckstäbe. Es wird daher nachfolgend die Überlegung vorgestellt, dass mit aus CT-Daten ermittelten Querschnittswerten (Querschnittsfläche bzw. Durchmesser eines Ersatz-Kreisquerschnitts) und der im Versuch ermittelten Drucksteifigkeit, dem Verhältnis aus Druckkraft und Stabsehnenverkürzung, eine Tragfähigkeitsvorhersage getroffen werden kann. Das eröffnet die Möglichkeit, nicht nur Robinienrundholz, sondern allgemein natürlich gewachsene Rundhölzer hinsichtlich ihrer Drucktragfähigkeit im Sinne einer maschinellen Festigkeitssortierung zu klassifizieren und damit für tragende Zwecke nutzbar zu machen. Ein solches Verfahren wäre unabhängig von den heute verwendeten Berechnungsverfahren für Druckstäbe, dem Ersatzstabverfahren oder der Berechnung nach Theorie II. Ordnung. Alle die Drucktragfähigkeit bestimmenden Größen (Abmessungen, Auflagerbedingungen, Baustoffeigenschaften, geometrische und strukturelle Imperfektionen), die bei den heute verwendeten Berechnungsansätzen teilweise über Annahmen abgedeckt sind, werden in diesem Verfahren integral erfasst. Ein Tragfähigkeitsnachweis im herkömmlichen Sinne wäre dann bei Druckgliedern, die nach einem solchen Verfahren klassifiziert wurden, entbehrlich.

4.2 Tragfähigkeitsbestimmende Kenngrößen

4.2.1 Durchmesser des Ersatz-Kreisquerschnitts

Bei den untersuchten Stammabschnitten liegen die Verhältnisse Durchmesser Stockende (d_s) zu Zopfende (d_z) weitgehend unter 1,20 (vgl. Tabelle A-1). Die untersuchten Stammabschnitte sind damit nur geringfügig „konisch“. Konische Stäbe mit einem Verhältnis zwischen End- (d_e) und Anfangsdurchmesser (d_a) kleiner 1,20 (mit $d_e > d_a$) besitzen nahezu die gleiche Knicklast wie kreiszylindrische Stäbe, deren Durchmesser dem mittleren Durchmesser des entsprechenden konischen Stabes entspricht. Für die Tragfähigkeit der untersuchten Stammabschnitte ist daher ein Ersatz-Kreisquerschnitt bzw. -Durchmesser charakteristisch, der im Bereich der Stabmitte wirksam ist. Bei den untersuchten Stammabschnitten ist die Querschnittsfläche der tragenden Holzsubstanz weder konstant noch hängt sie linear von der Stablänge ab und ist lokal Schwankungen unterworfen, z.B. wegen wuchsbedingter Verdickungen. Daher wurde der als mechanisch wirksam angenommene Durchmesser eines Ersatz-Kreisquerschnitts (als $d_{ct,3}$ bezeichnet) anhand der Querschnittsflächen-Verläufe (Bild A-3 bis Bild A-31, oben) als Durchschnittswert im mittleren Drittel der Stablänge festgelegt und numerisch ermittelt. Dabei wurde stets berücksichtigt, dass das mittlere Drittel nur Teil der effektiven Stablänge ist und die Auswertung der Quer-

schnittsfläche nicht für die gesamte computertomographisch untersuchte Stablänge erfolgen darf. Die Bezeichnung $d_{ct,3}$ kennzeichnet somit die Ermittlung auf Grundlage der CT-Daten und eine Einschränkung auf das mittlere Drittel der effektiven Stablänge. Die Werte sind in Tabelle 4-1 im Vergleich mit den von Hand gemessenen Werten d (Mittelwert der Referenzproben mit d_s und d_z am Stock- bzw. am Zopfende) zusammengestellt.

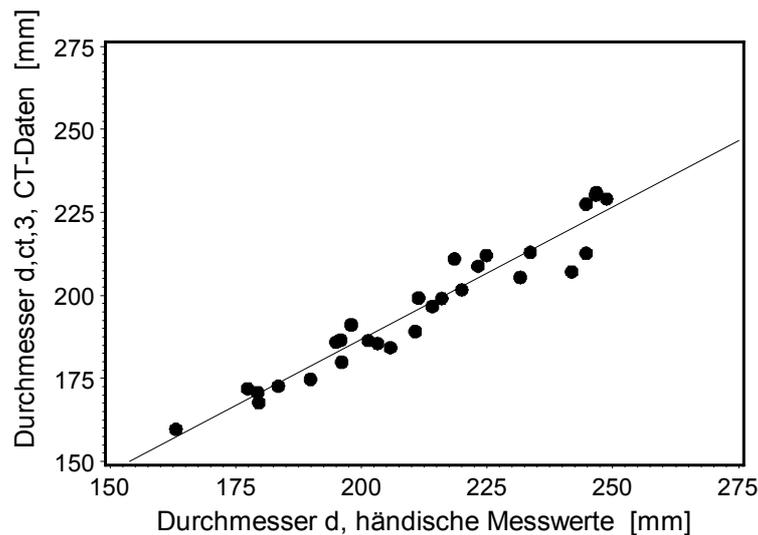


Bild 4-1 Vergleich der Durchmesser, CT-Daten und Referenzproben

Bild 4-1 zeigt, dass die CT-Daten durchweg niedrigere Werte liefern als die händisch ermittelten Messwerte. Ein Grund dafür ist der charakteristische Verlauf, einer Wurzelfunktion ähnlich, der Querschnittsfläche entlang der Stammachse vor allem bei den dicken Erdstämmen mit dem Index 1 (s. Bild A-3, Bild A-8, Bild A-10, Bild A-11, Bild A-15, Bild A-16 usw.). Die Gegenüberstellung in Bild 4-1 ist damit eine wichtige Plausibilitätskontrolle, die die Richtigkeit der numerisch ermittelten Durchmesser unabhängig stützt.

4.2.2 Drucksteifigkeit

Die nachstehenden Vorüberlegungen beziehen sich zunächst auf einen Druckstab, dessen spannungslose Vorkrümmung lediglich einer Sinushalbwellen gleich. Für die Stabsehnverkürzung Δu aus reiner Längsverformung gilt

$$\Delta u = \frac{F \ell}{EA} \quad (1)$$

Zwischen einer Stabsehnverkürzung und der Biegeverformung (Ausbiegung in Stabmitte, Sinushalbwellen mit Pfeilhöhe f) besteht die geometrische Beziehung

$$\Delta u = \frac{\pi^2 \cdot f^2}{4\ell}. \quad (2)$$

Für kleine Verhältnisse F/F_{Ki} kann mit (2) und dem Vergrößerungsfaktor α nach Umformung für die Stabsehnenverkürzung in Abhängigkeit von der spannungslosen Vorkrümmung mit Pfeilhöhe f_1 näherungsweise geschrieben werden:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{F}{F_{Ki}}} \approx 1 + \frac{F}{F_{Ki}}$$

$$\Delta u = \frac{f_1^2 \pi^2}{4\ell} \left(2 \frac{F}{F_{Ki}} + \frac{F^2}{F_{Ki}^2} \right). \quad (3)$$

Damit ist Drucksteifigkeit

$$k = \frac{F}{\Delta u}$$

gemeinsam abhängig von der Längs- und Biegeverformung. Das gilt dann auch sinngemäß für einen beliebig spannungslos vorgekrümmten Druckstab bzw. einen natürlich gewachsenen axial gedrückten Stammabschnitt. Die Drucksteifigkeit kennzeichnet also den Widerstand, den ein solcher Druckstab dem Zusammendrücken und Ausknicken entgegensetzt. Für Verhältnisse $F/F_{Ki} \ll 1$ ist das quadratische Glied in Gleichung (3) im Vergleich mit den linearen Termen in Gleichung (1) und (3) verhältnismäßig klein, so dass die Drucksteifigkeit für kleine Verhältnisse F/F_{Ki} scheinbar konstant ist und damit einen weitgehend eindeutigen Systemkennwert darstellt. Sie wurde aus den Lastverformungskurven als quasi lineare Anfangssteigung ermittelt. Ihre Werte sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Tabelle 4-1 Ersatz-Kreisdurchmesser und Drucksteifigkeit

Nr.	Abschnitt	F_{\max} kN	d mm	$d_{ct,3}$ mm	k kN/mm
1	13/1	893	249	229	79,2
2	2/1	472	206	184	60,4
3	20/2	442	245	228	32,4
4	15/3	432	195	186	51,7
5	17/1	496	245	213	64,5
6	7/1	360	190	175	55,7
7	6/1	424	220	202	45,6
8	21/2	741	225	212	73,1
9	22/2	220	201	186	13,4
10	15/2	709	219	211	73,6
11	26/1	516	203	186	56,7
12	5/3	320	198	191	29,9
13	9/3	214	163	160	16,8
14	25/1	486	211	199	53,5
15	12/1	373	242	207	27,6
16	16/2	317	177	172	30,6
17	3/3	216	196	187	19,2
18	24/2	390	216	199	41,5
19	6/3	251	184	173	20,0
20	10/2	524	214	197	76,1
21	11/2	302	196	180	38,7
22	27/2	1120	247	231	98,1
23	19/2	326	232	205	18,1
24	3/2	622	234	213	56,7
25	9/1	345	211	189	36,0
26	28/2	850	247	230	109
27	27/3	672	223	209	74,0
28	4/1	485	179	171	61,6
29	24/3	395	180	168	41,1

4.3 Tragfähigkeitsvorhersage

Eine einfache und aussagekräftige Vorhersage der Tragfähigkeit ist mit folgendem Modell möglich:

$$\ln(F_{\max}) = a + b \cdot d_{\text{ct},3} + c \cdot k + e.$$

Der logarithmierte Maximalwert der Traglast wird u. a. ausgedrückt durch den Durchmesser im mittleren Drittel $d_{\text{ct},3}$ und die Drucksteifigkeit k sowie den Fehler e . Die spezifizierte Form lautet:

$$\begin{aligned} \ln(F_{\max}) &= 4,17 + 0,00639 \cdot d_{\text{ct},3} + 0,0132 \cdot k + e \\ n &= 29 \quad r^2 = 0,919 \quad e : N(0;0,122) \end{aligned} \quad (4)$$

Bild 4-2 verdeutlicht die enge Korrelation ($r = 0,96$) zwischen den beobachteten Werten und den Vorhersagewerten. In der Darstellung sind beide Werte logarithmiert.

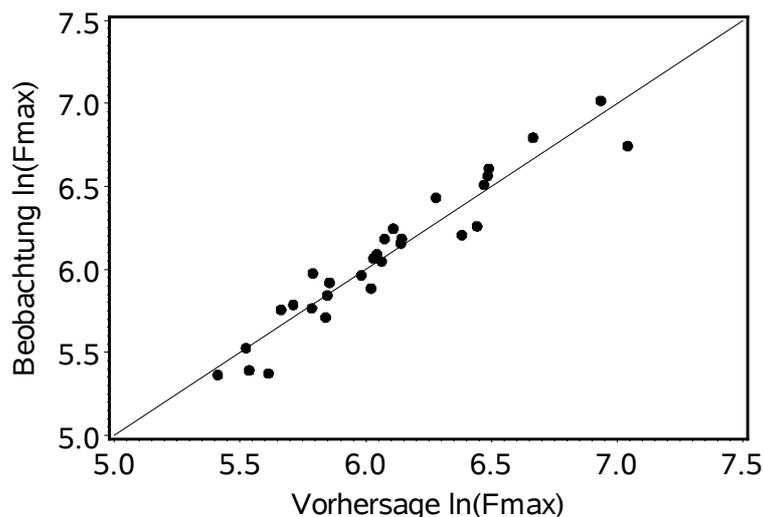


Bild 4-2 Modell (4): beobachtete Werte und Vorhersage, jeweils logarithmiert

4.4 Weiterer Untersuchungsbedarf

Die in der Studie geleistete Arbeit führte zu einem nicht bewusst anvisierten Ziel, von dem aus weiterer Untersuchungsbedarf aufgezeigt werden kann. Die bislang erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass die CT-Technologie hinsichtlich der Beschreibung mechanisch relevanter Querschnittswerte und eine mechanische Vorbelastung hinsichtlich der Ermittlung einer systembedingten Drucksteifigkeit gemeinsam zur Vorhersage der Tragfähigkeit natürlich gewachsener axial gedrückter Stäbe geeignet sind. Technisch damit eng verwandt, aber nicht gleich ist z. B. das Funktionsprinzip von Biegemaschinen mit Röntgenzeile zur Festigkeitssortierung von Schnittholz.

Bei den jetzigen Ergebnissen wurde noch nicht berücksichtigt, dass sich mit der numerischen Beschreibung der räumlich verlaufenden Schwerelinie mit hoher Wahrscheinlichkeit weitere die Tragfähigkeit kennzeichnende Merkmale werden ableiten lassen. Mit dem Ziel der Nutzbarmachung von Holz für tragende Zwecke ist eine finanzierte Fortsetzung der Arbeit in folgenden Schwerpunkten sehr wünschenswert:

- Entwicklung von und Versuche zu Verbindungstechniken für die Herstellung von (frei bewitterten) Konstruktionen wie Fachwerkbrücken und -türmen aus natürlich gewachsenem Rundholz
- Modellierung der spannungslosen natürlichen Vorkrümmung der Stäbe und Bestimmung eines weiteren die Tragfähigkeit kennzeichnenden Systemwertes zur Verbesserung der Tragfähigkeitsvorhersage. Dazu ist der räumliche Verlauf der Schwerelinie aus den CT-Daten zu konstruieren und auszuwerten.
- Modellierung der Tragfähigkeitsversuche mit der Methode der finiten Elemente. Eine solche Untersuchung zielt darauf ab, eine tatsächliche mechanische Vorbelastung computergestützt zu simulieren. Geeignete Rohdaten dafür liefert dann alleine die CT-Untersuchung.
- Ausweitung der Untersuchung auf weitere Holzarten

Anlagen



Bild A-1 Robinienlangholz auf dem Holzplatz der FVA



Bild A-2 Aufteilung des Robinienlangholzes

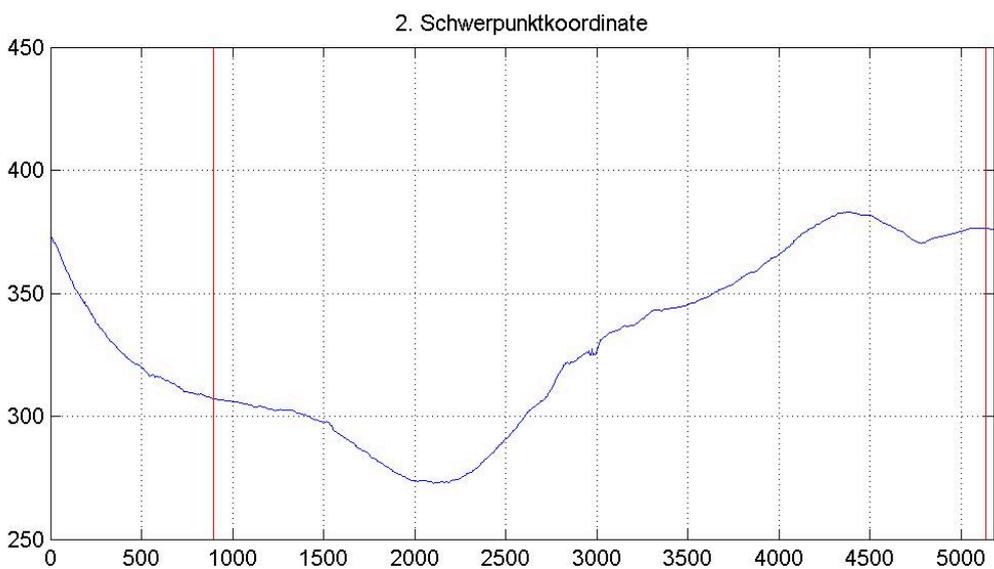
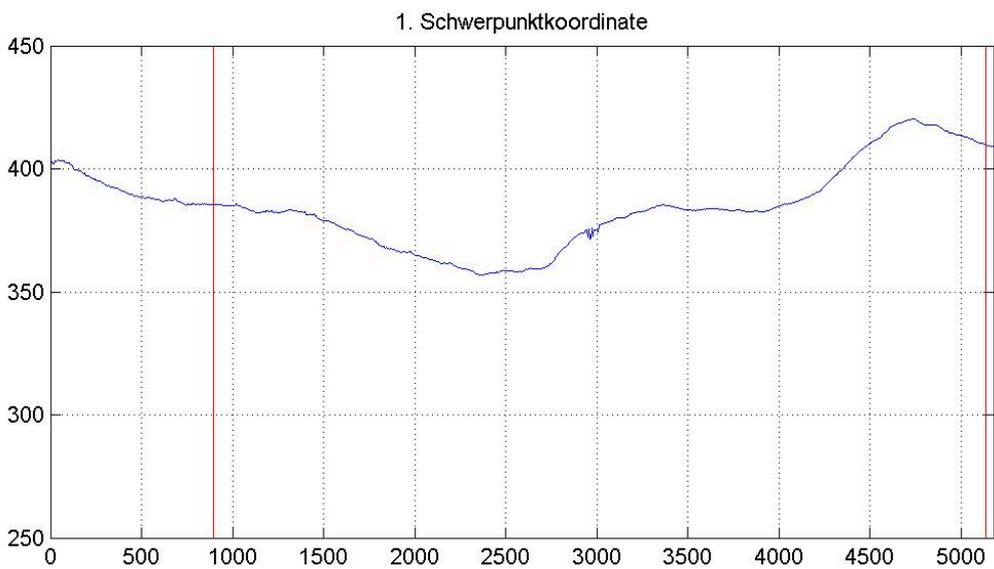
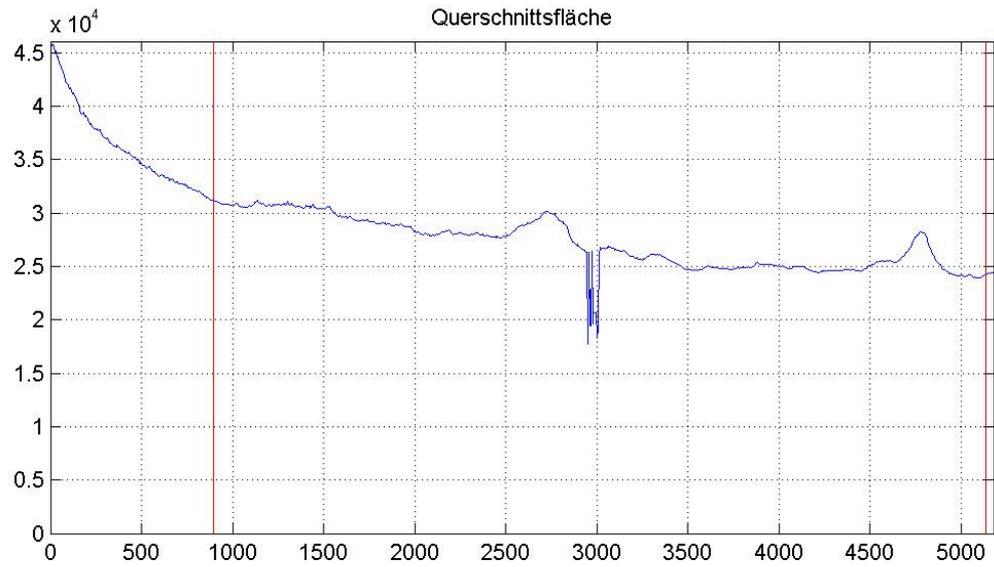


Bild A-3 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 2/1

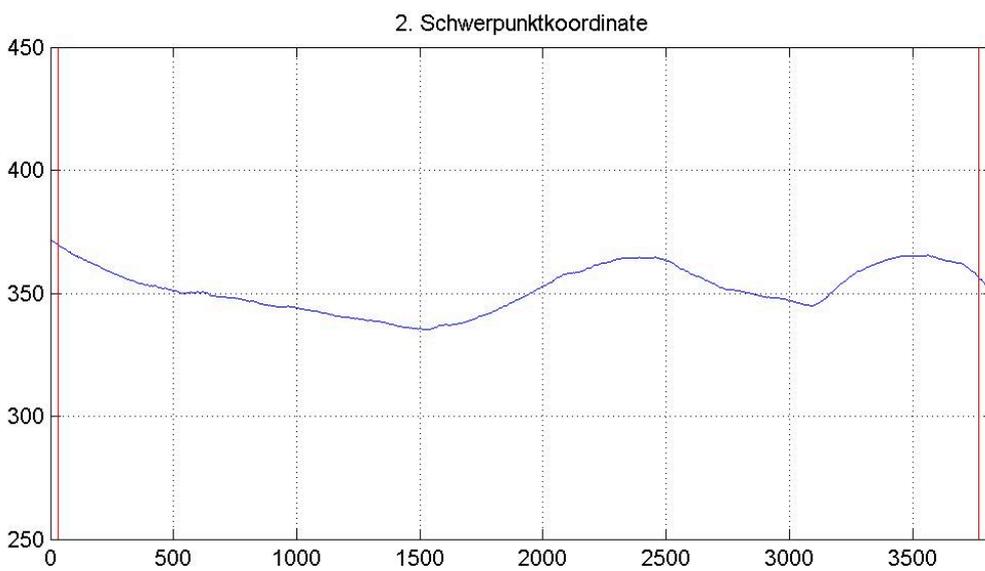
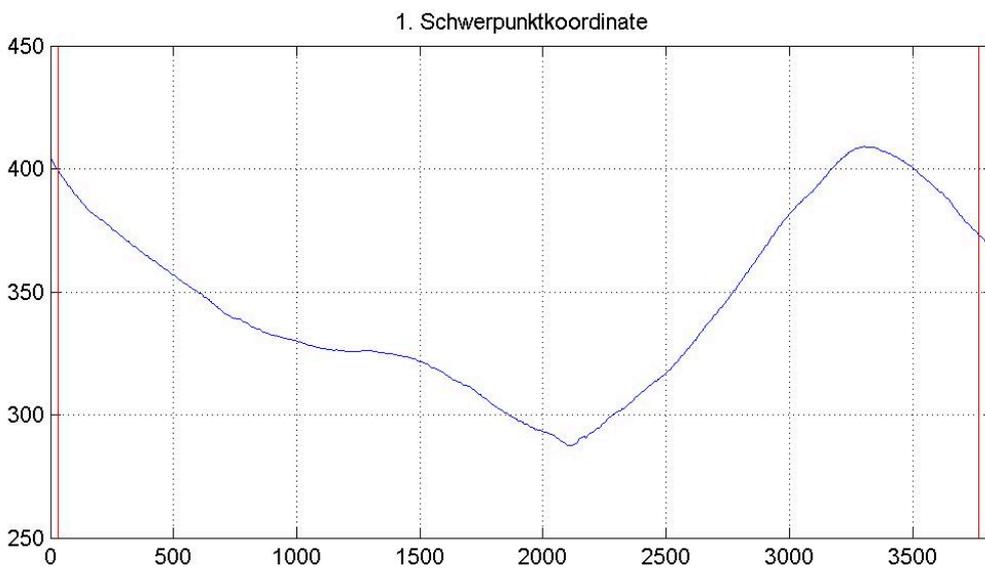
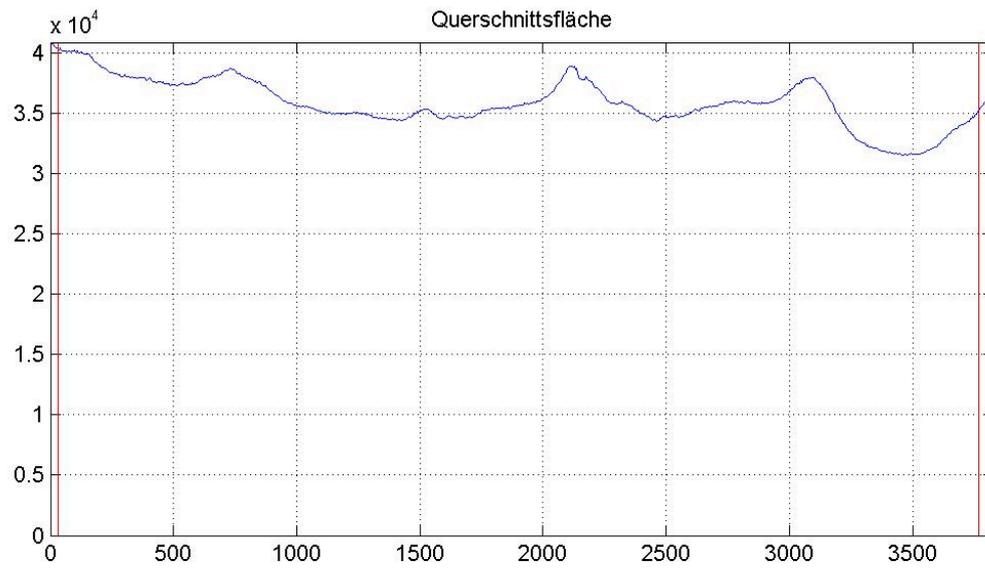


Bild A-4 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 3/2

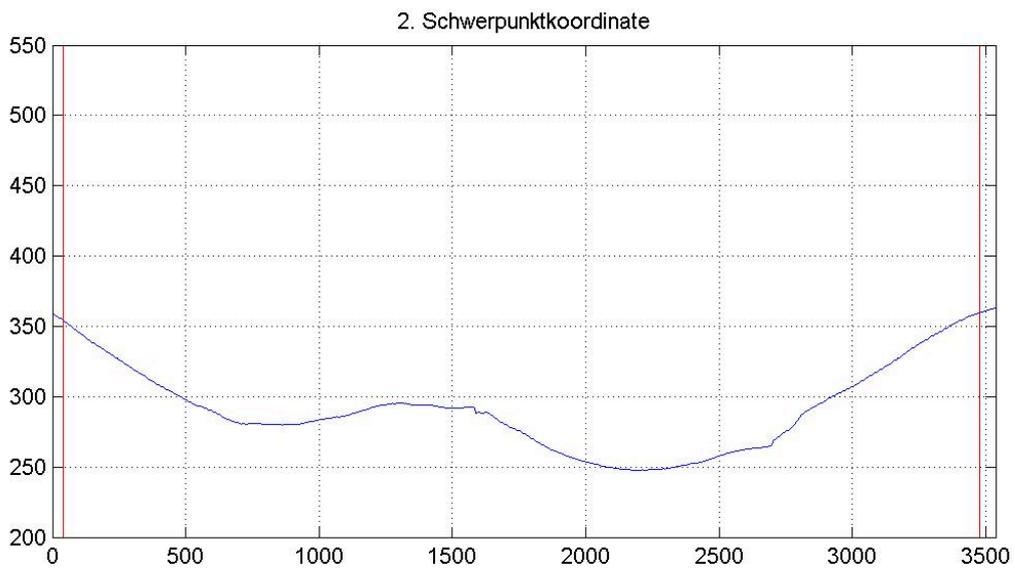
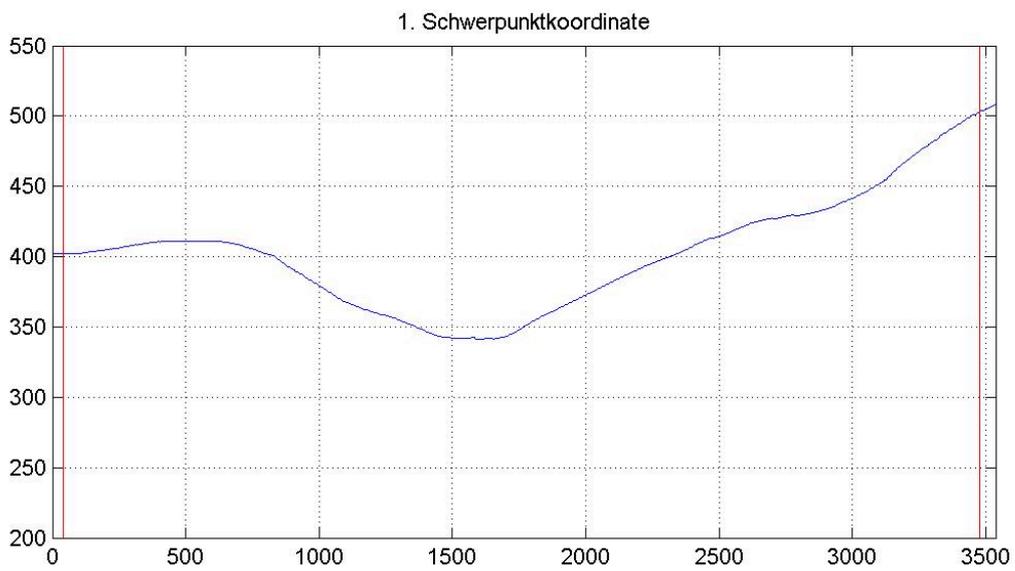
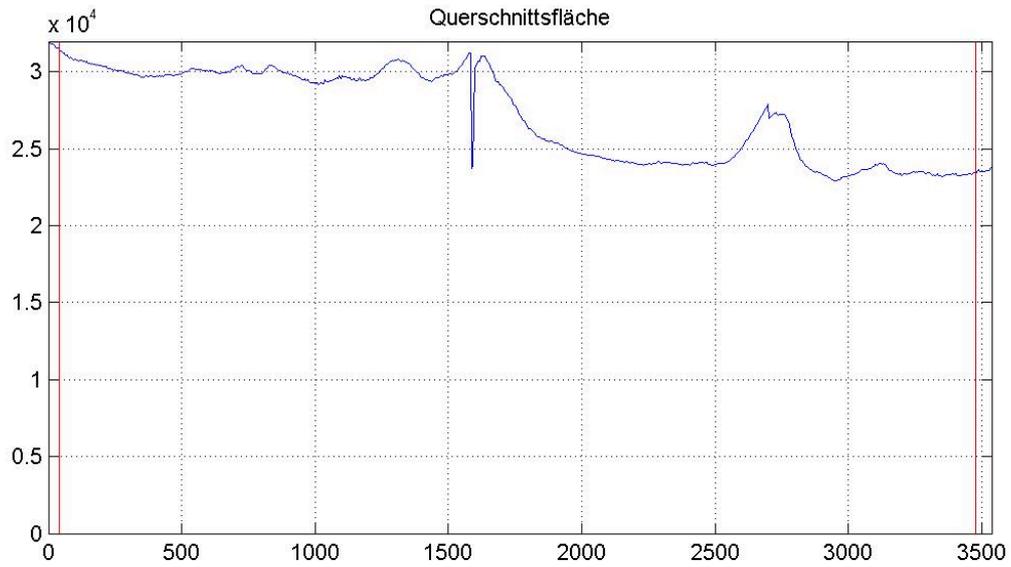


Bild A-5 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 3/3

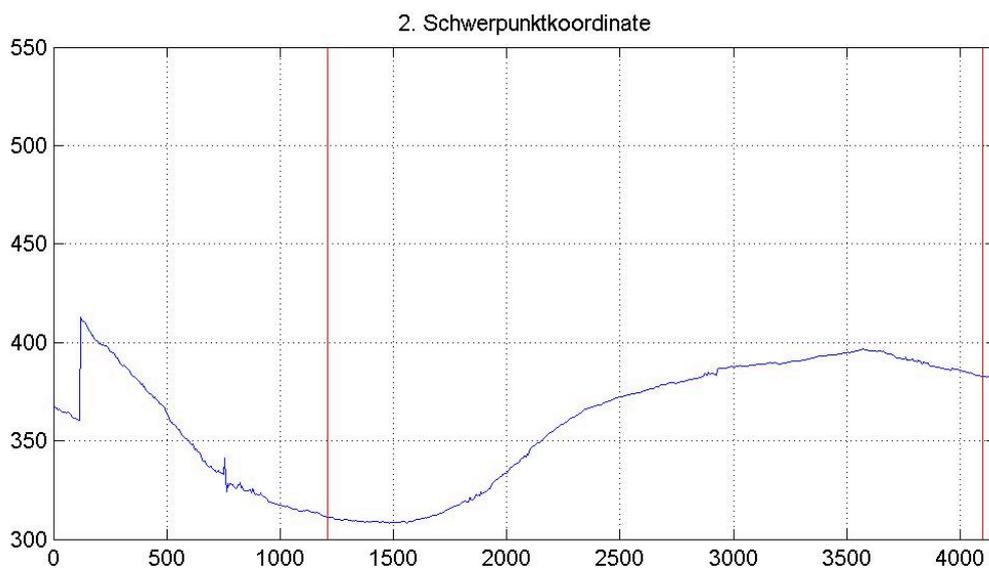
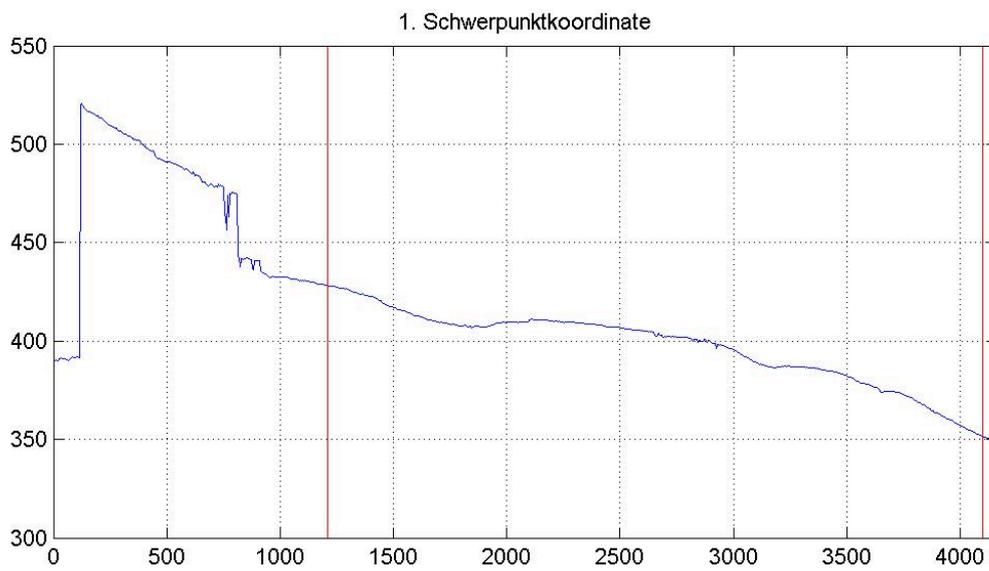
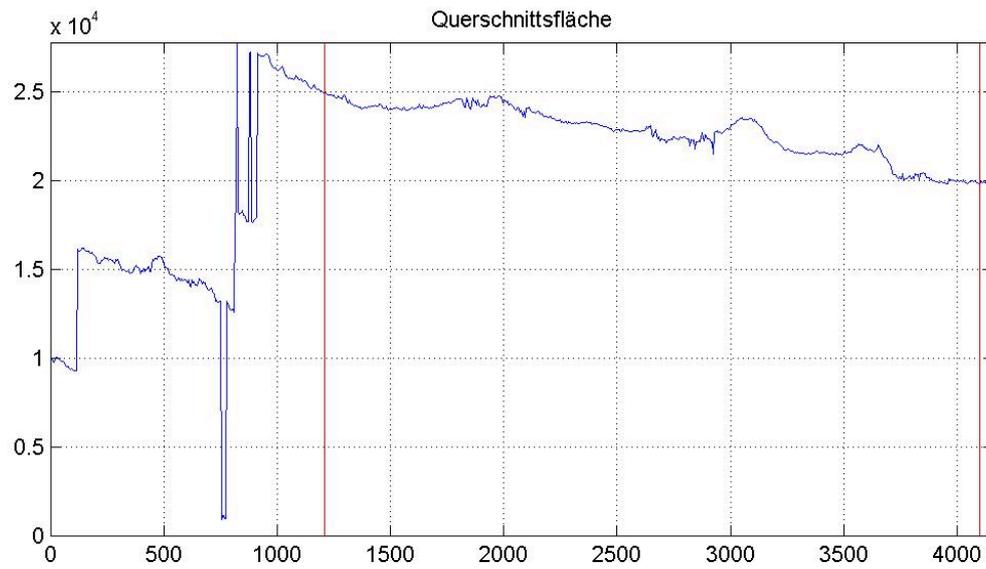


Bild A-6 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 4/1

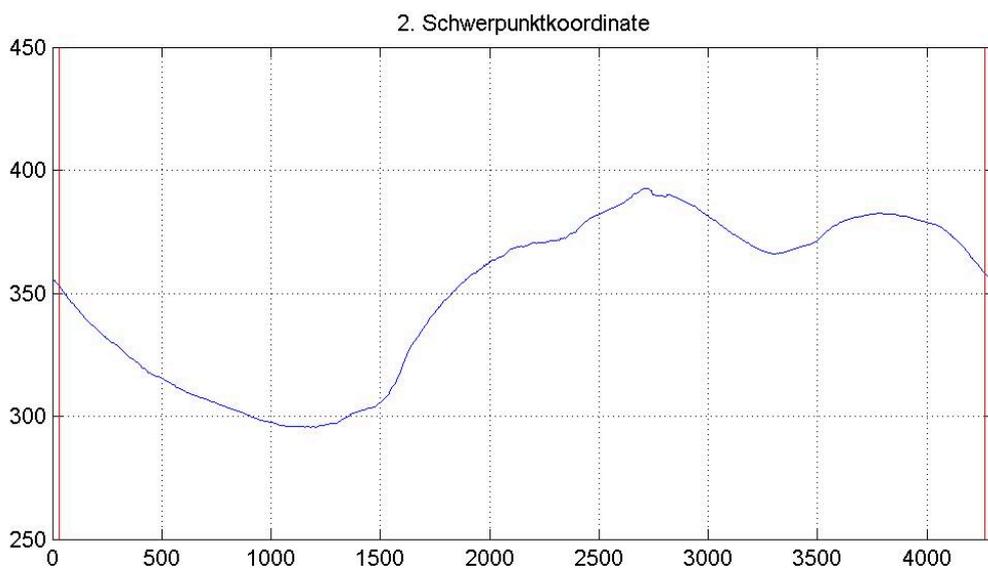
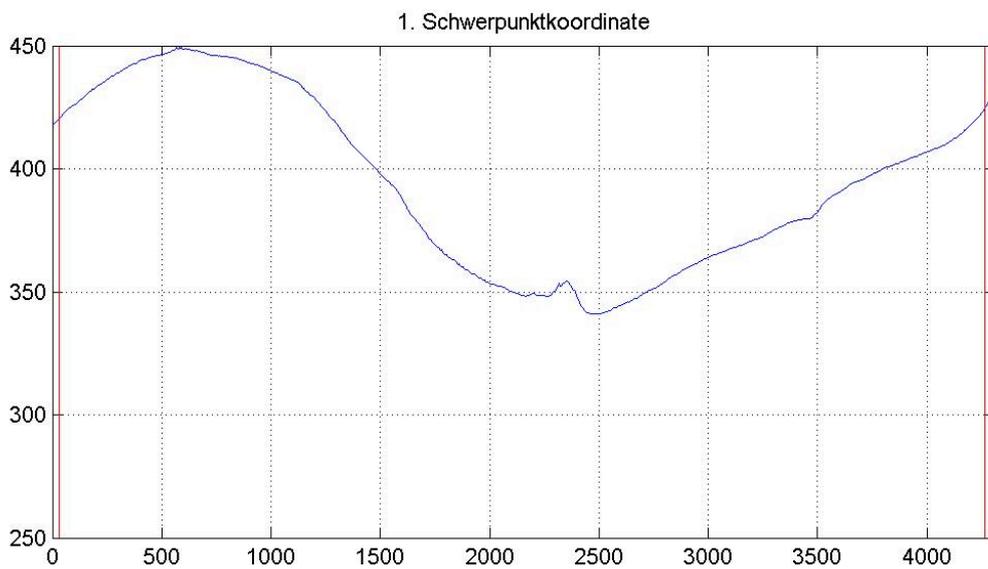
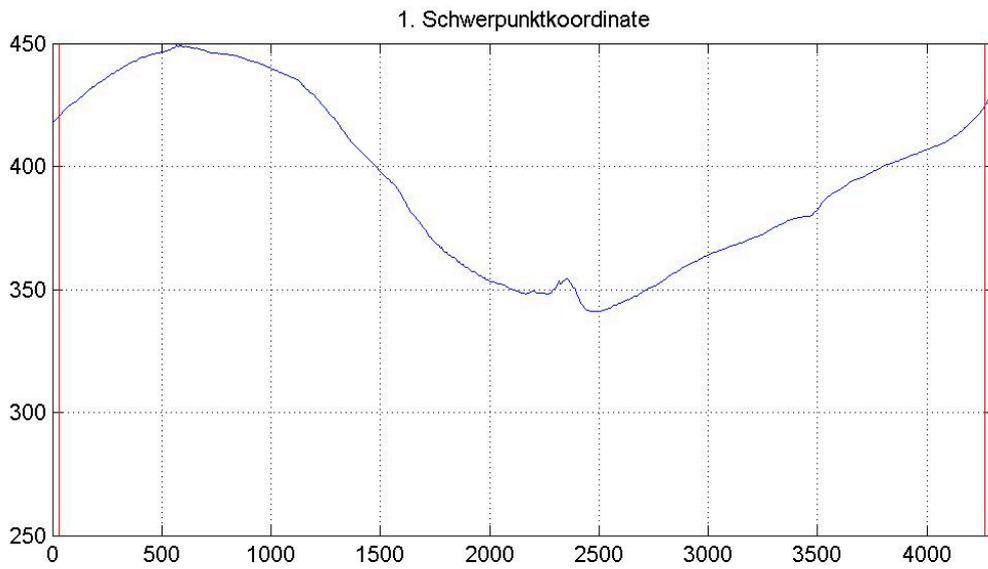


Bild A-7 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 5/3

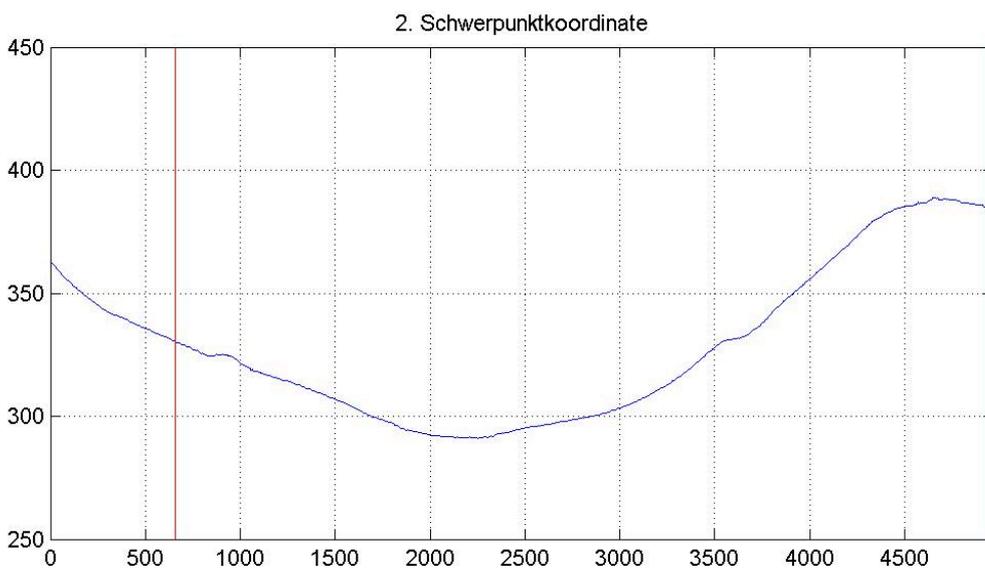
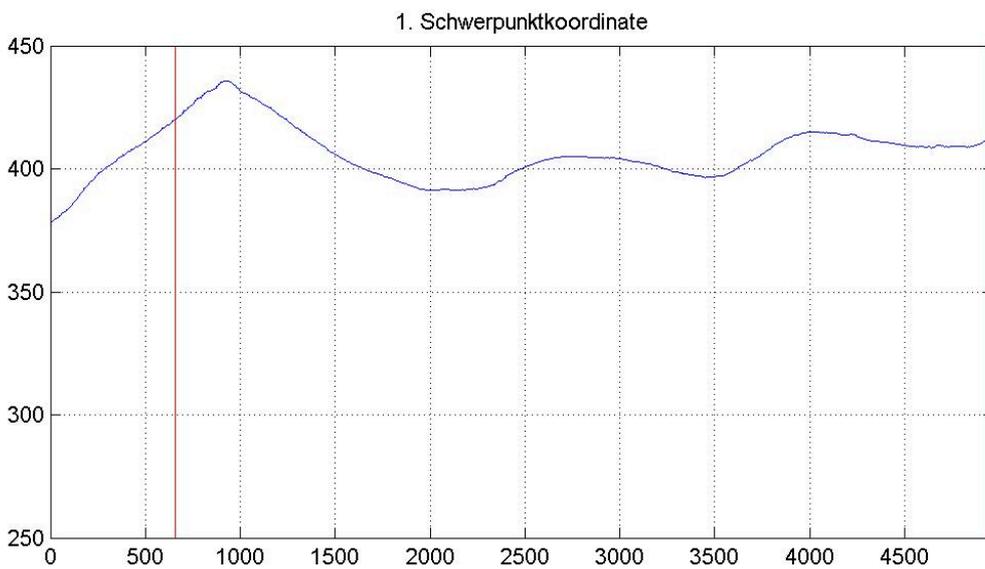
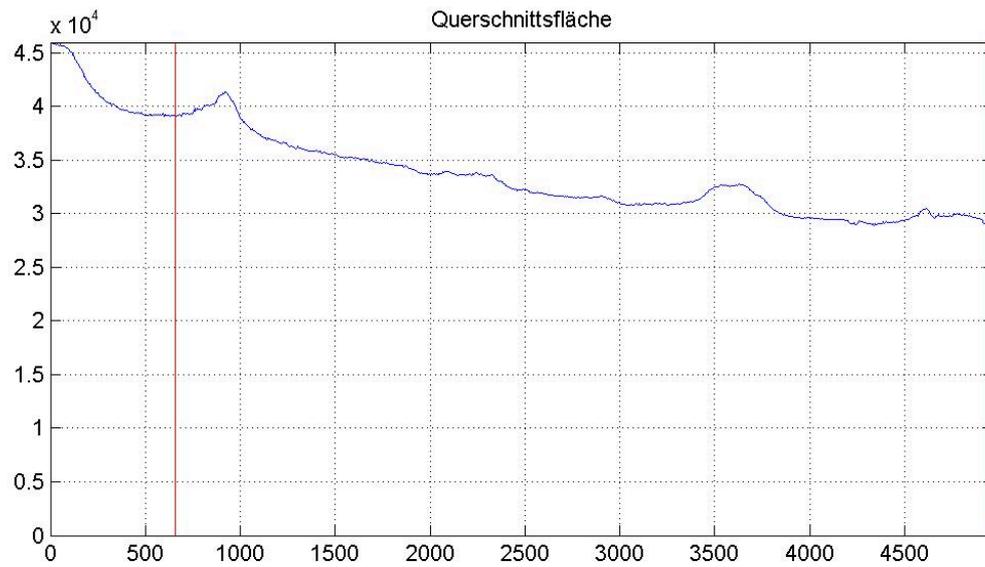


Bild A-8 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 6/1

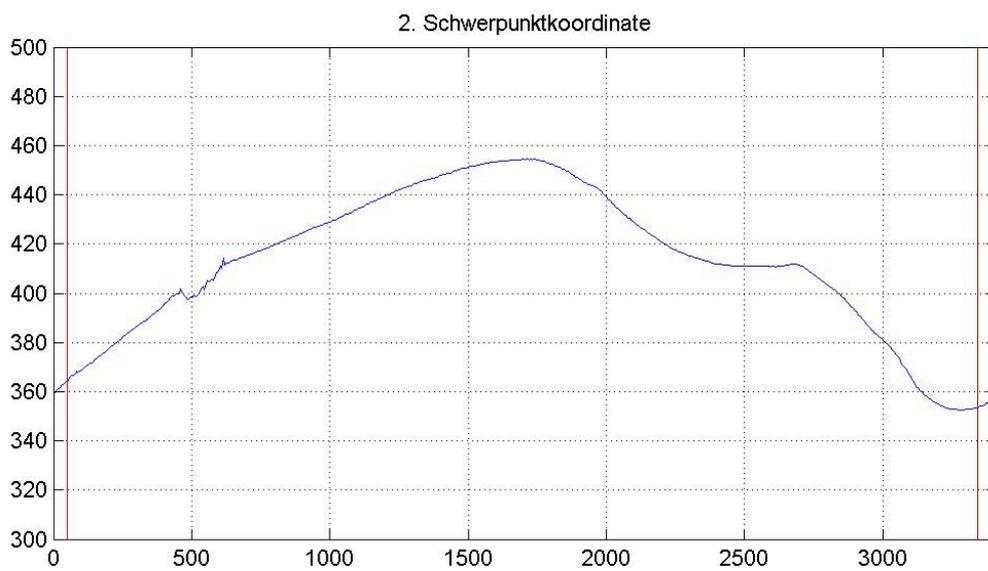
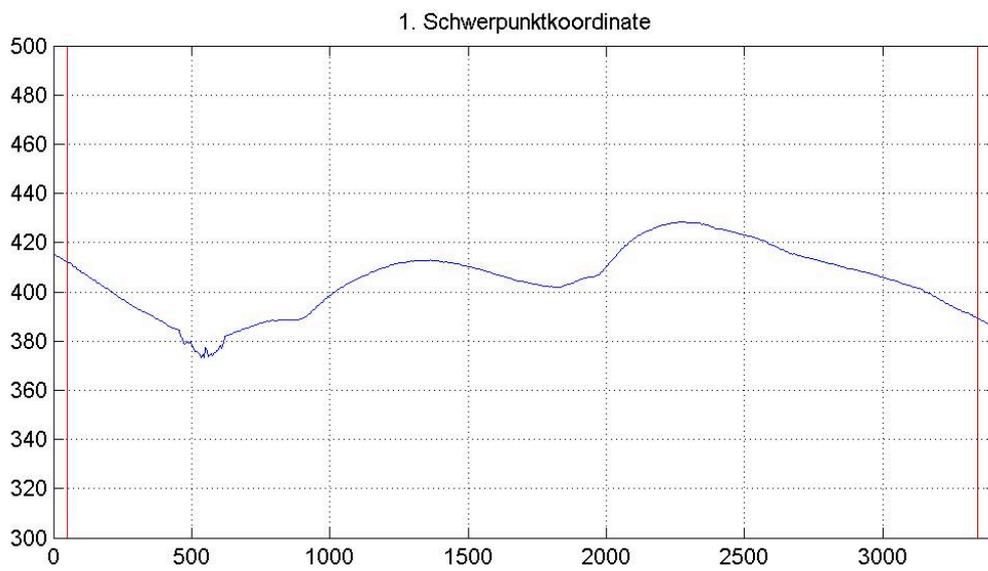
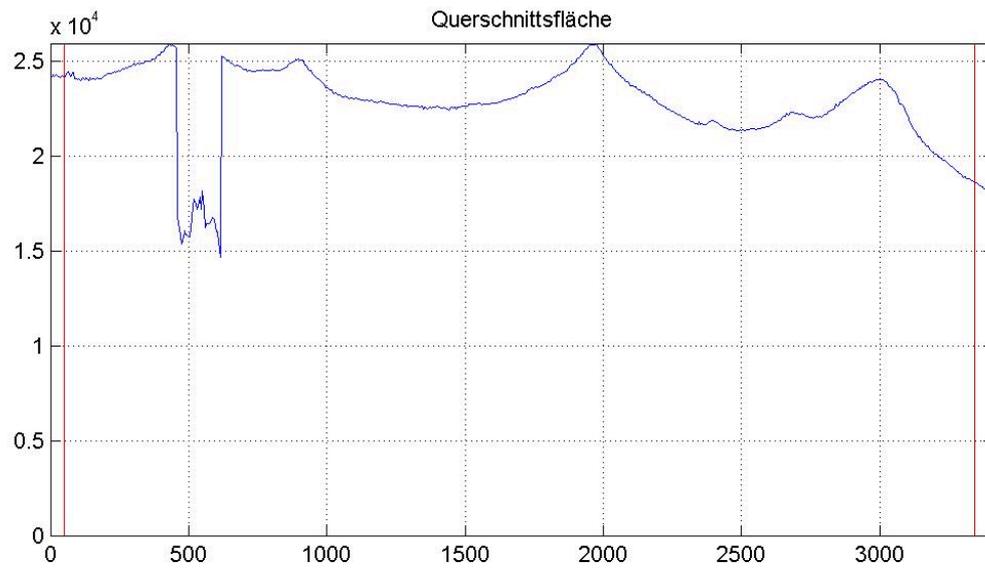


Bild A-9 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 6/3

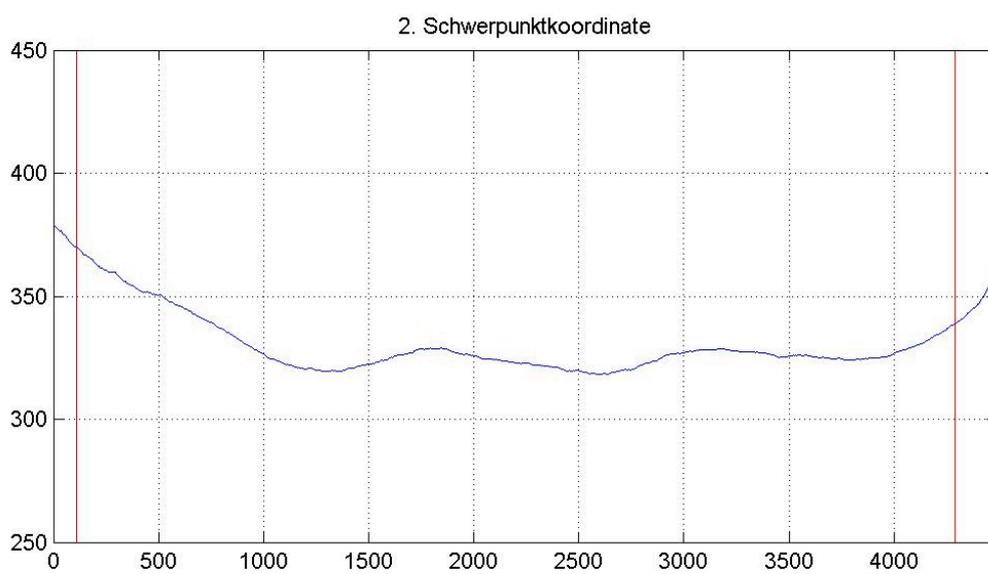
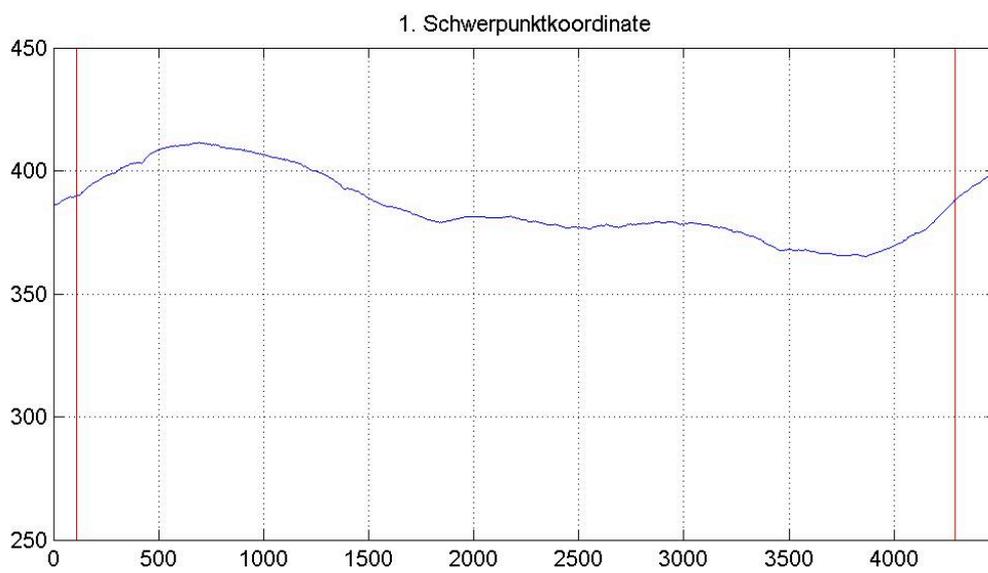
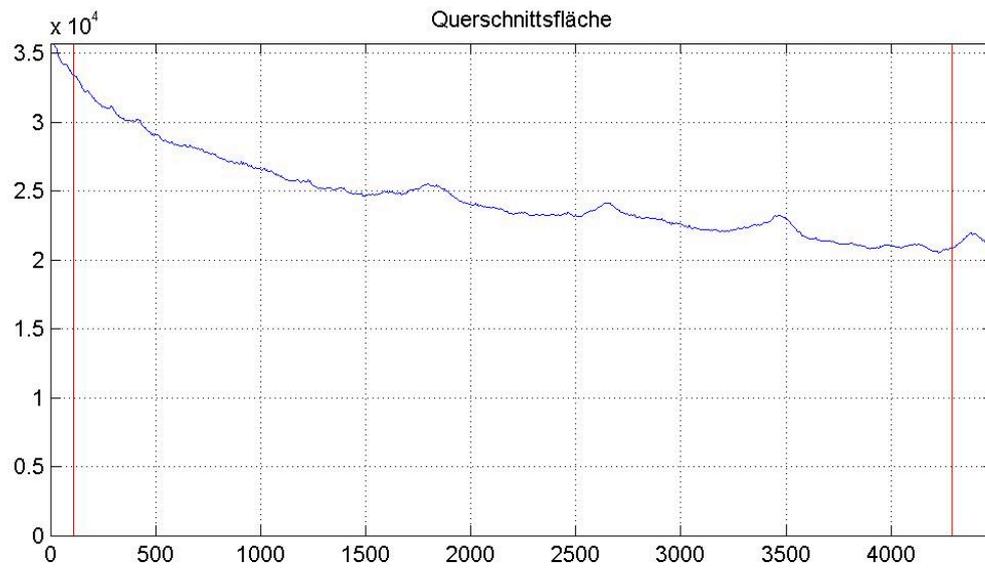


Bild A-10 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 7/1

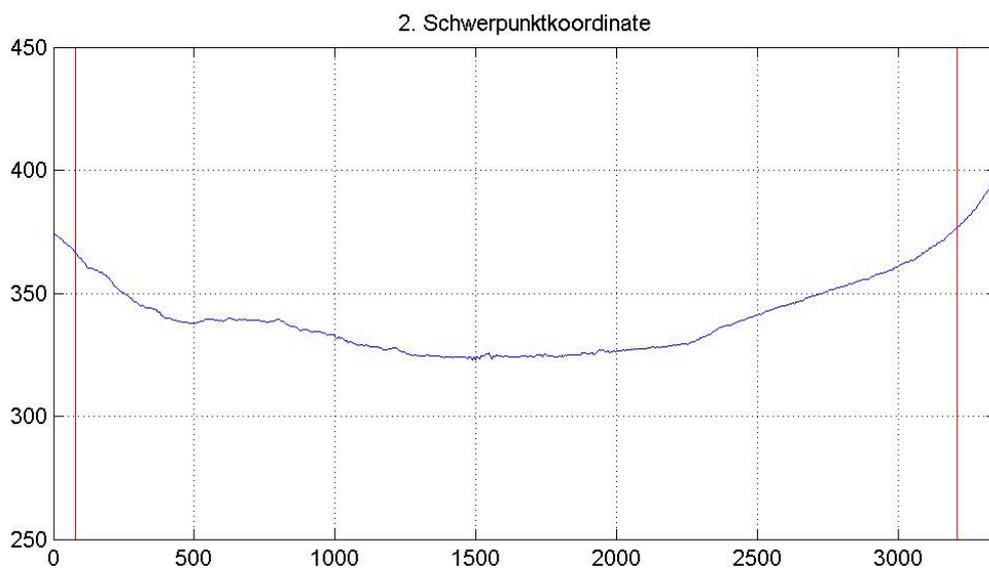
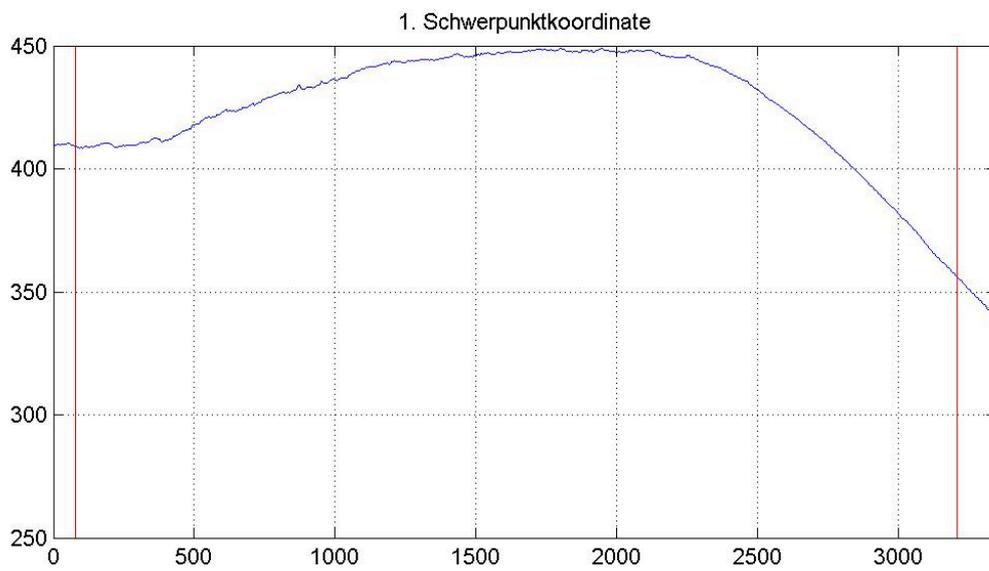
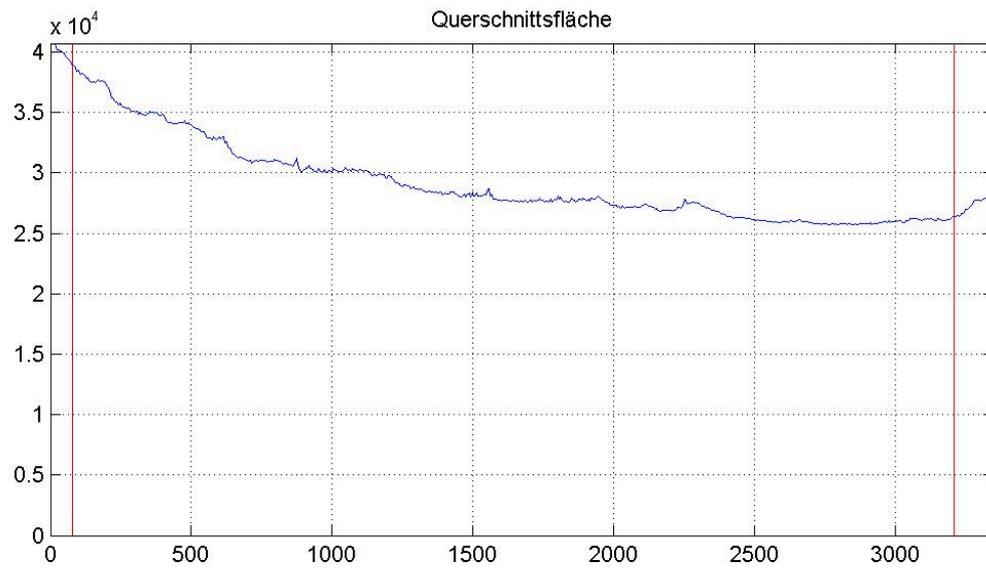


Bild A-11 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 9/1

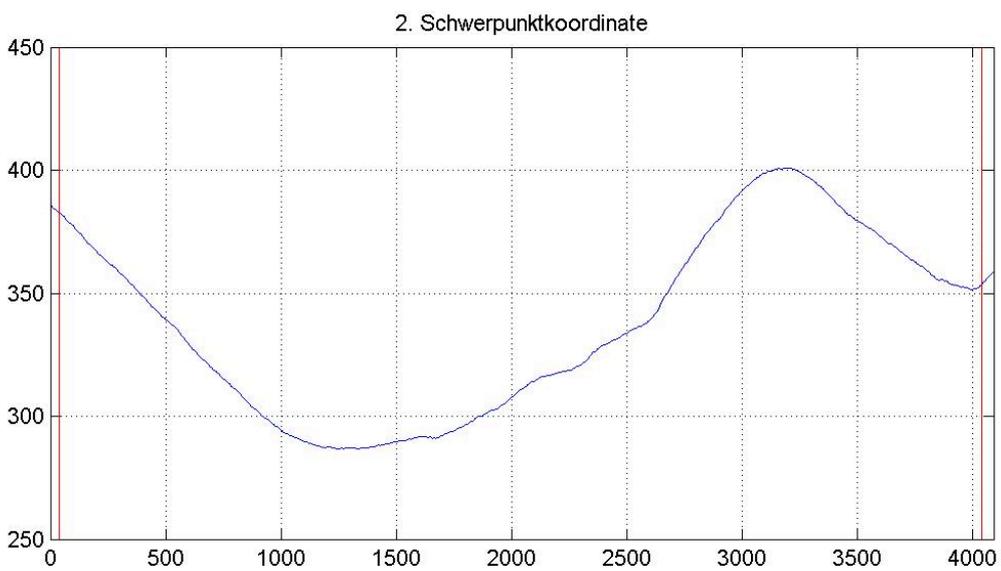
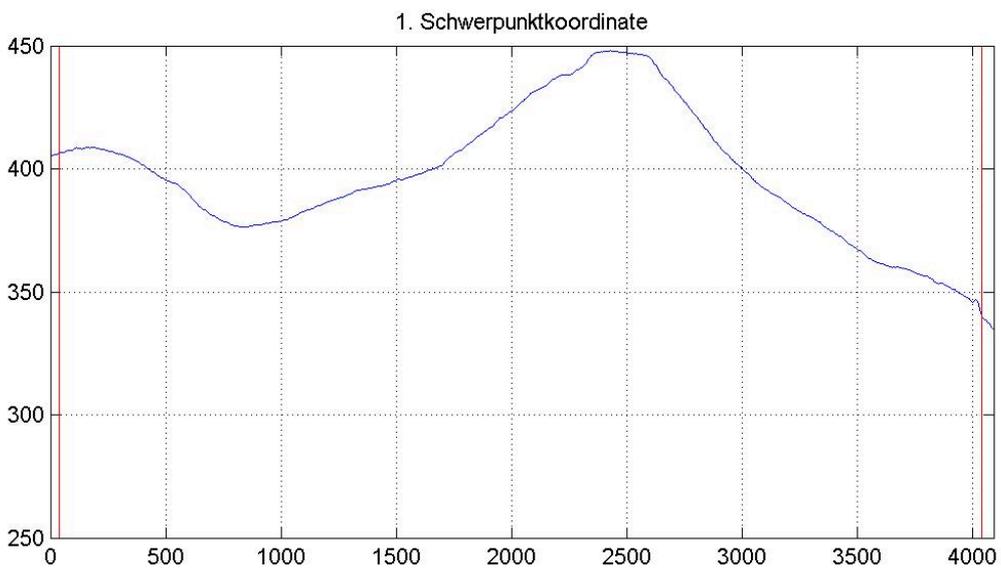
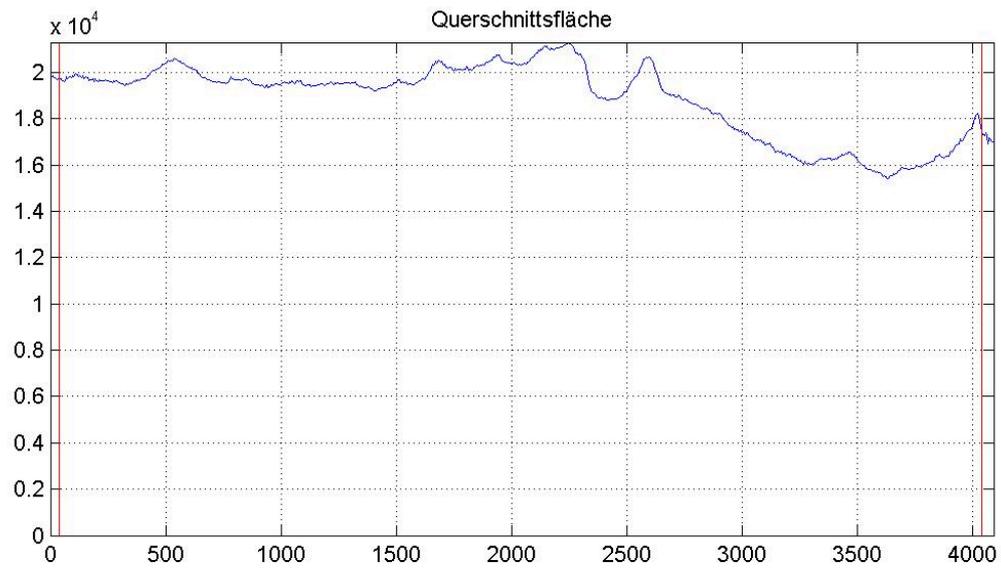


Bild A-12 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 9/3

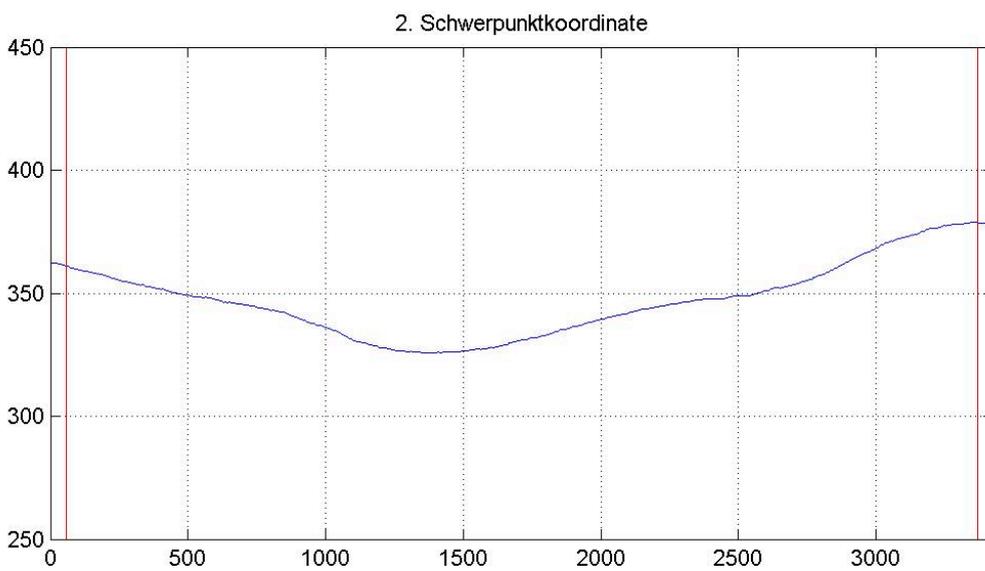
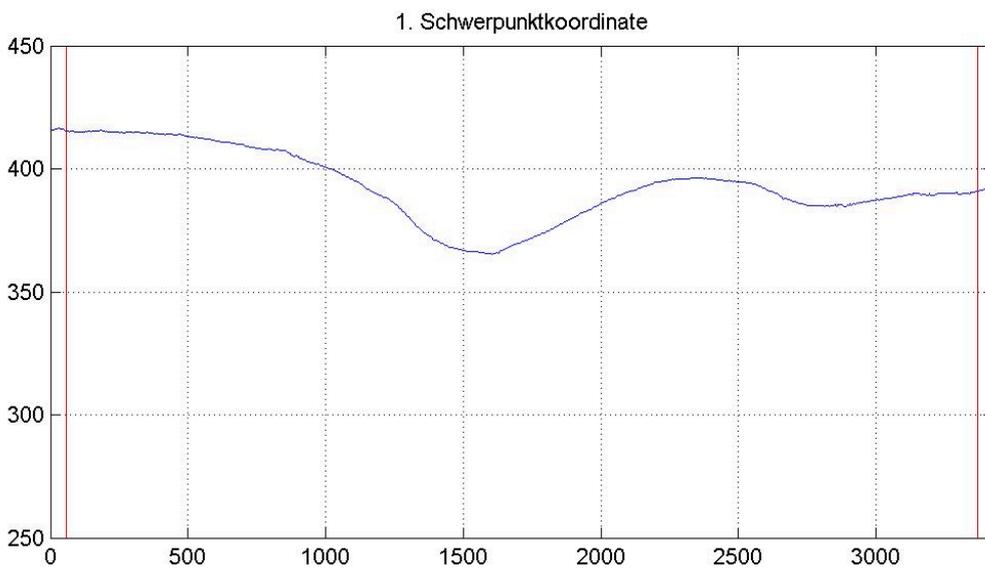
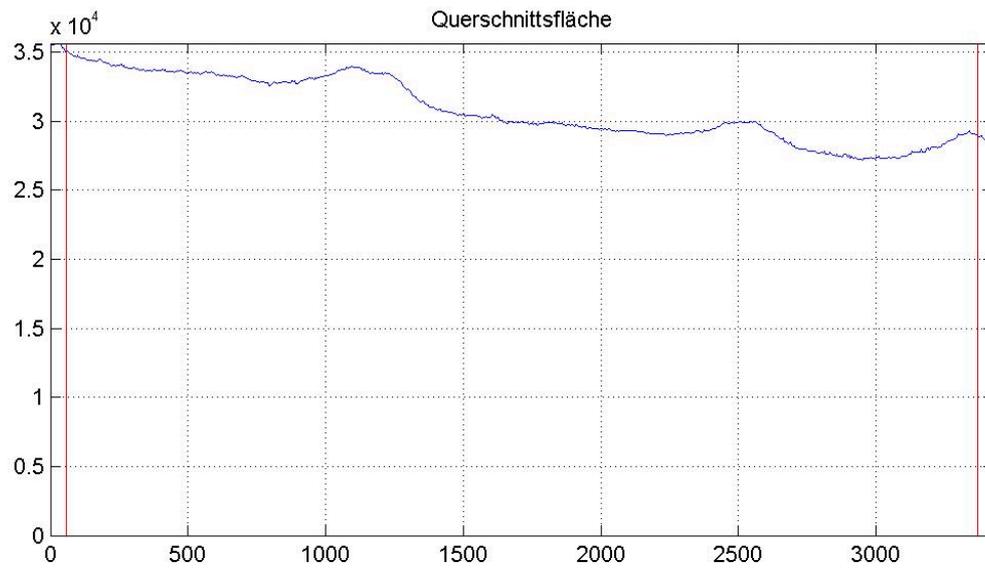


Bild A-13 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 10/2

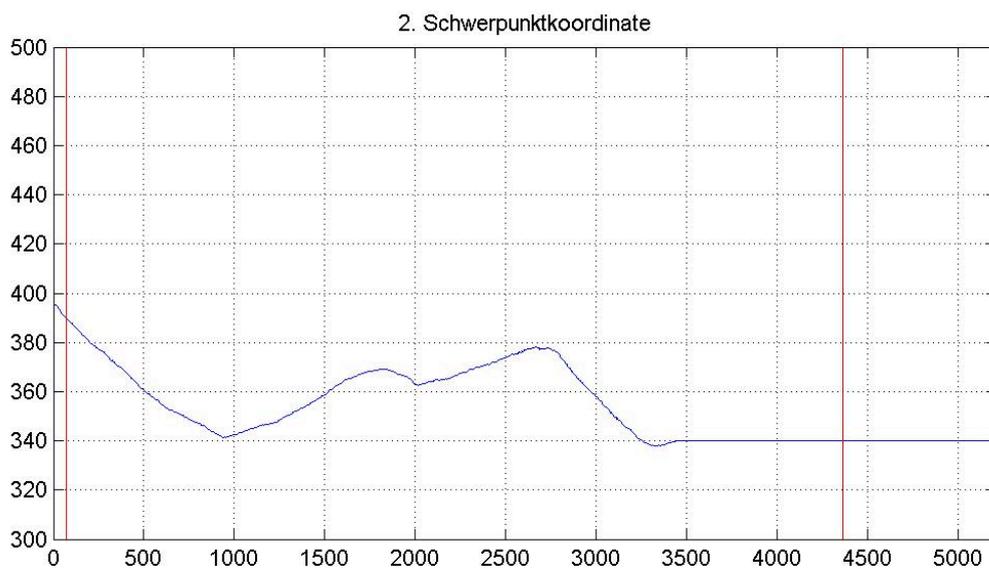
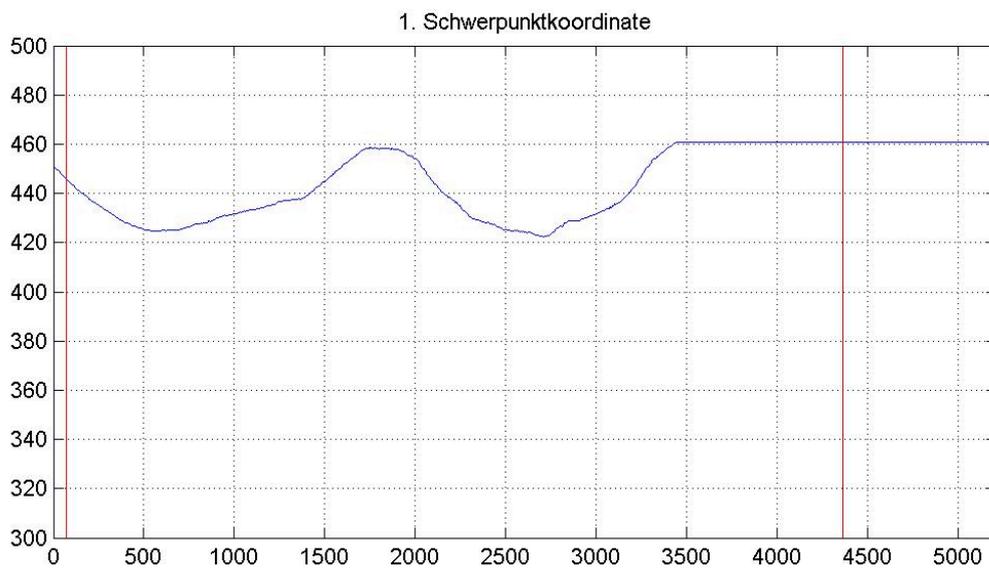
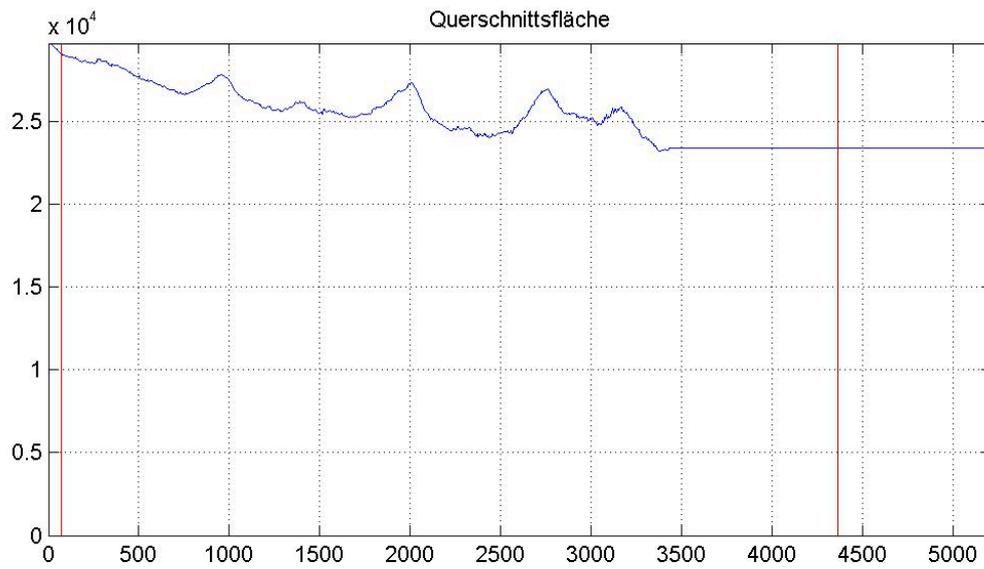


Bild A-14 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 11/2

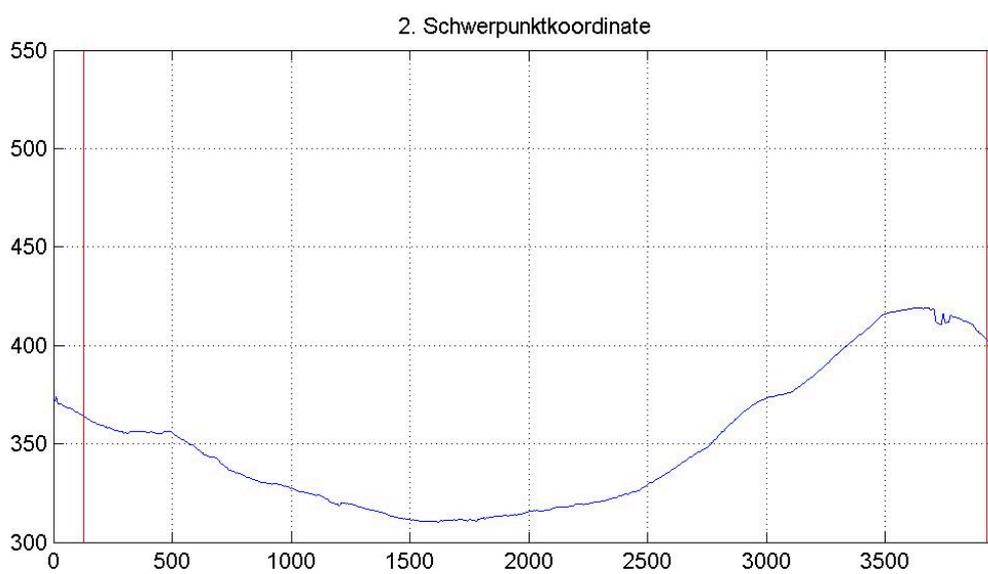
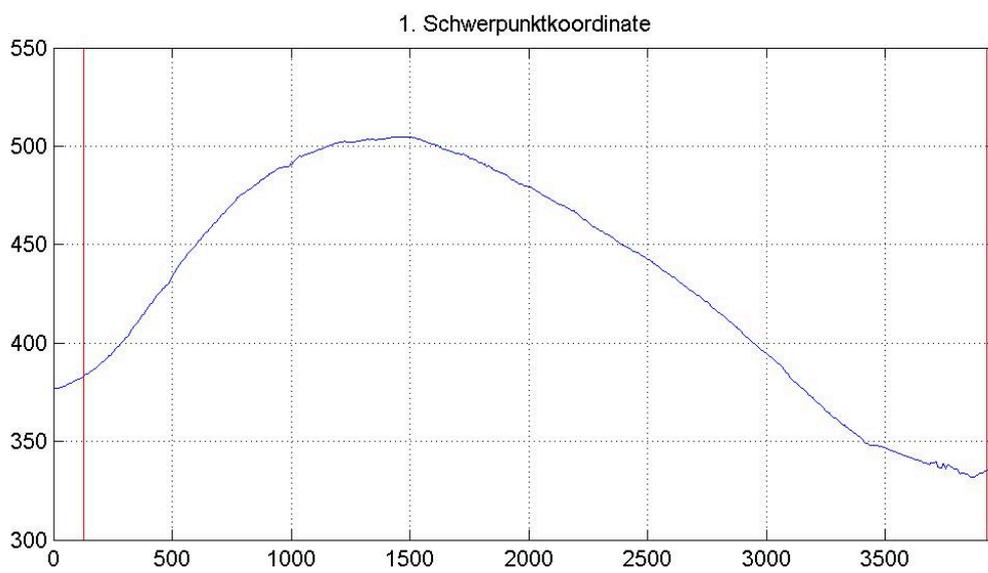
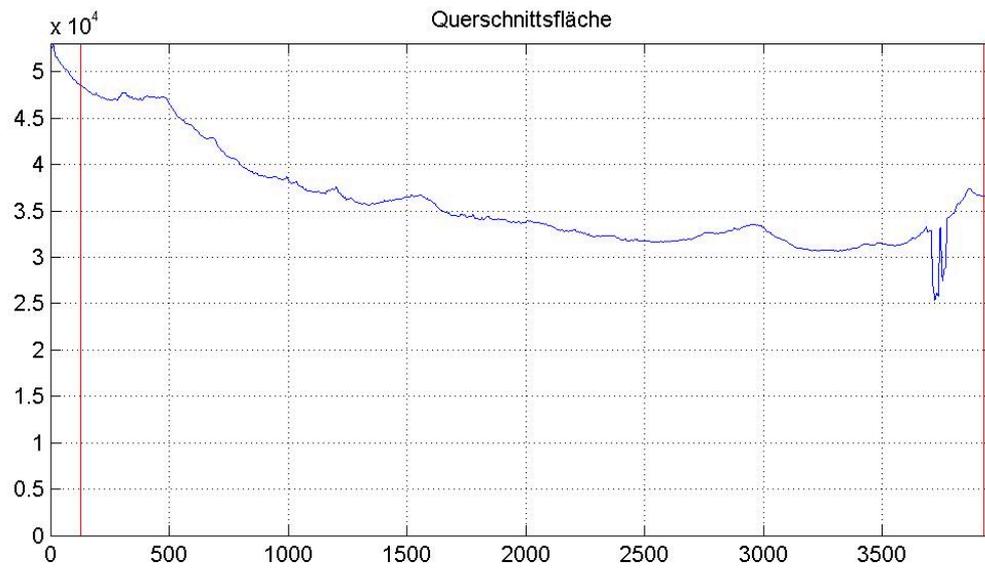


Bild A-15 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 12/1

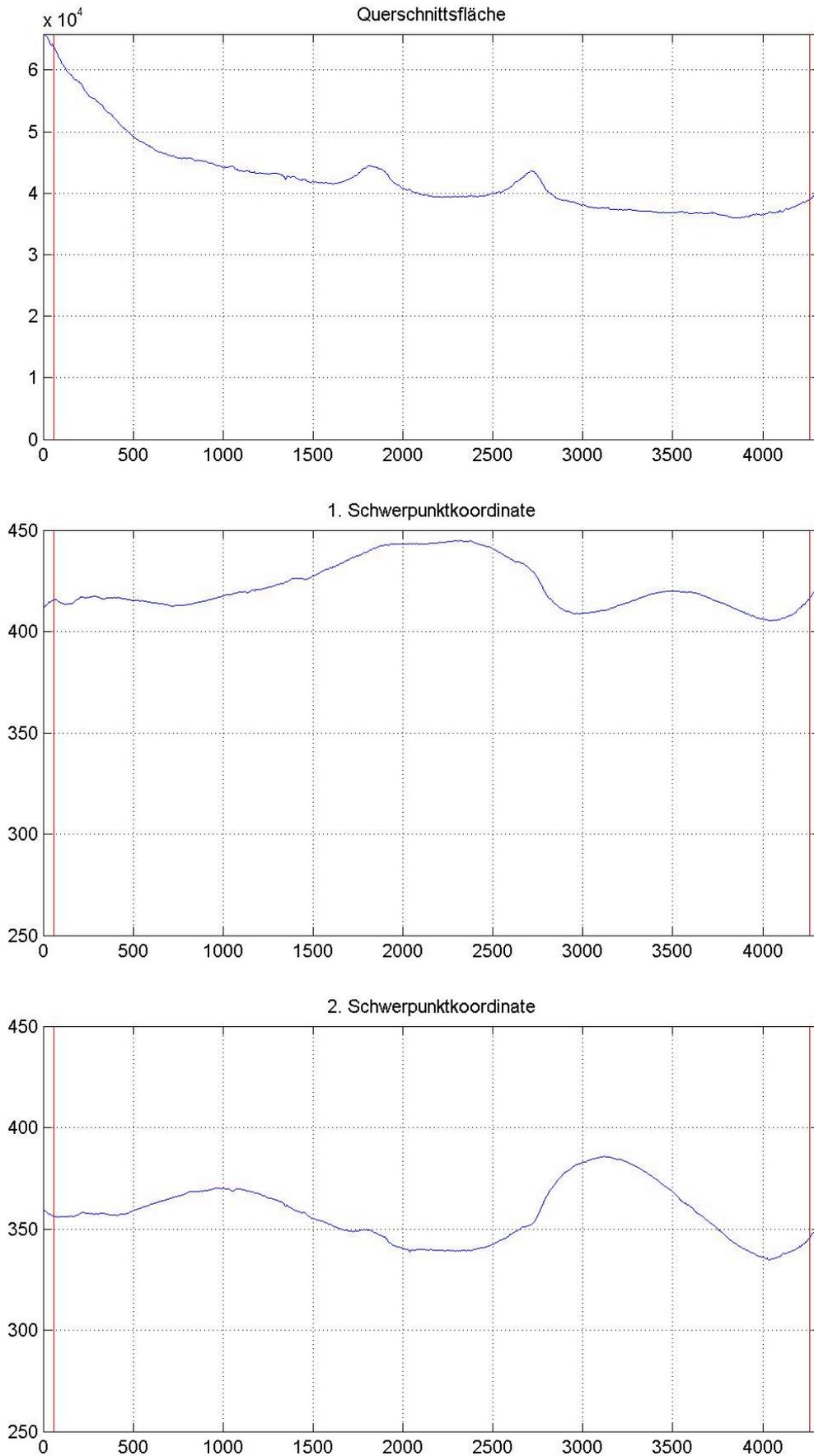


Bild A-16 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 13/1

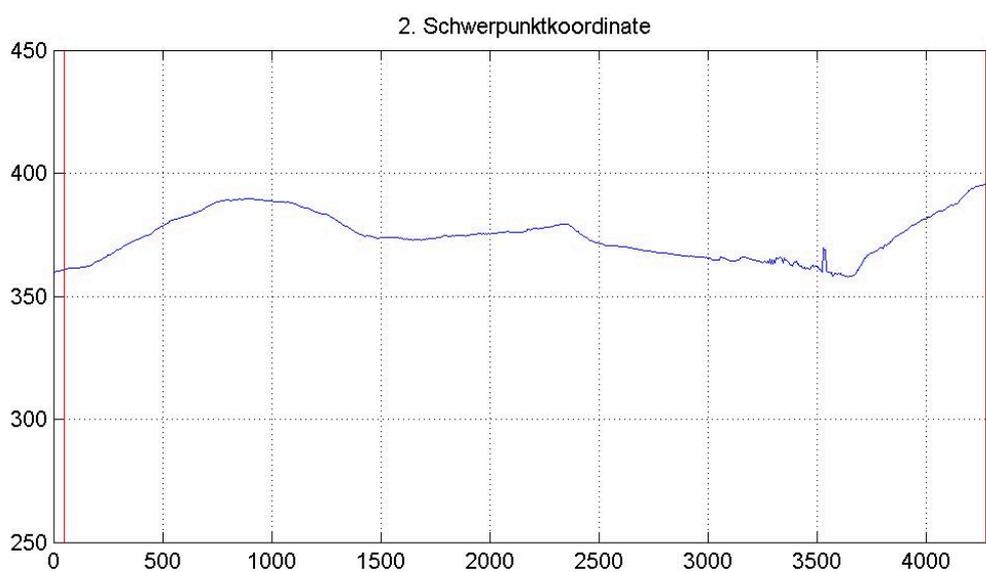
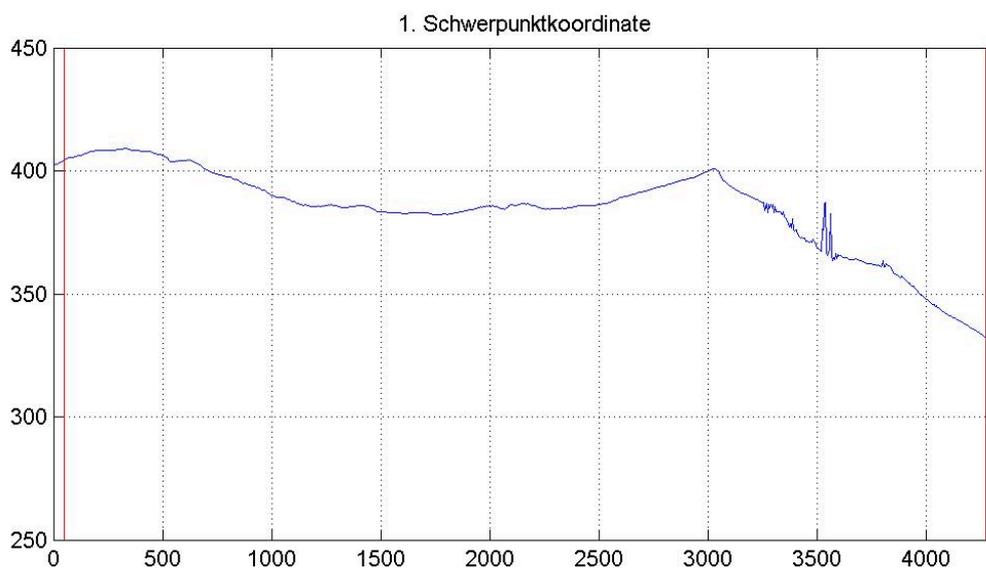
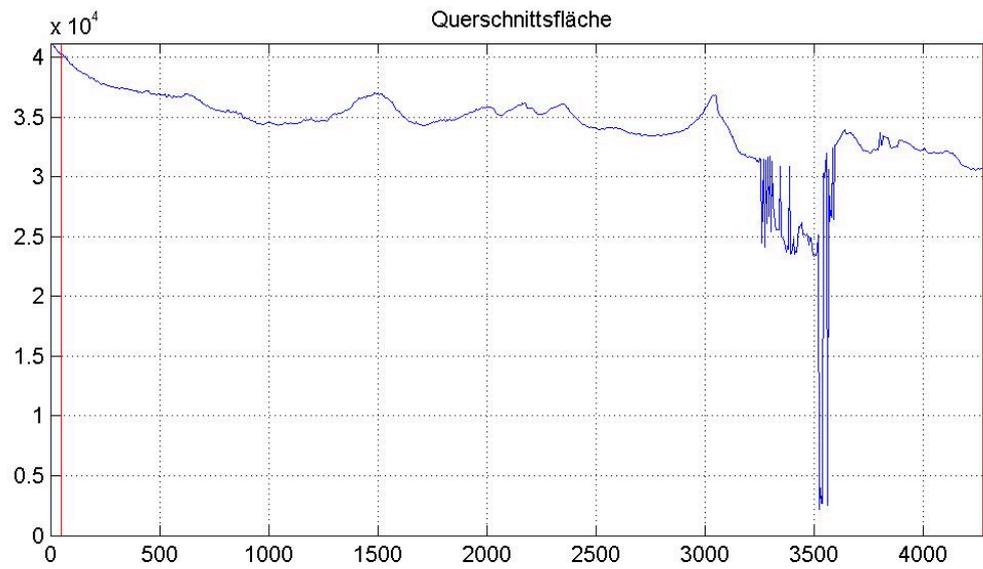


Bild A-17 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 15/2

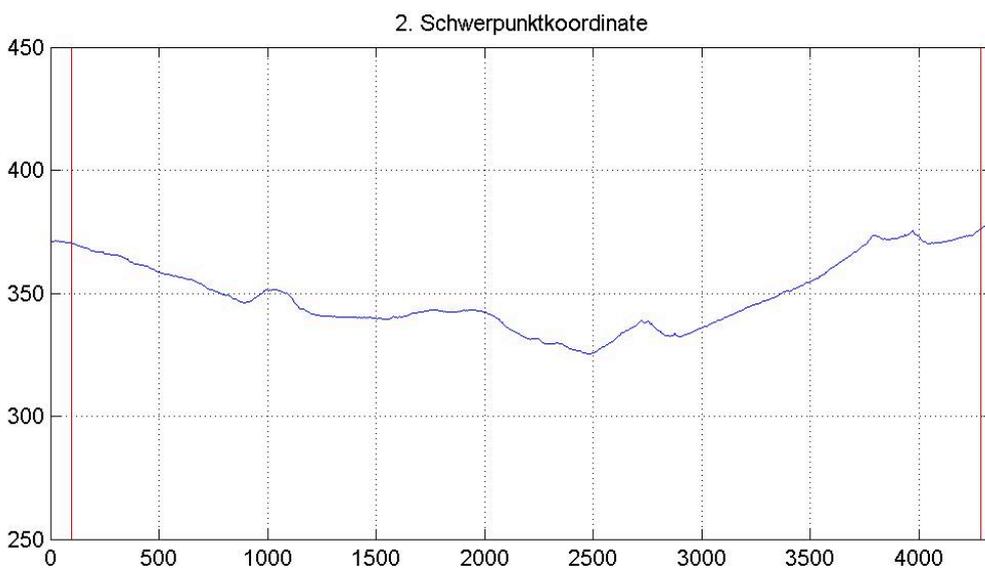
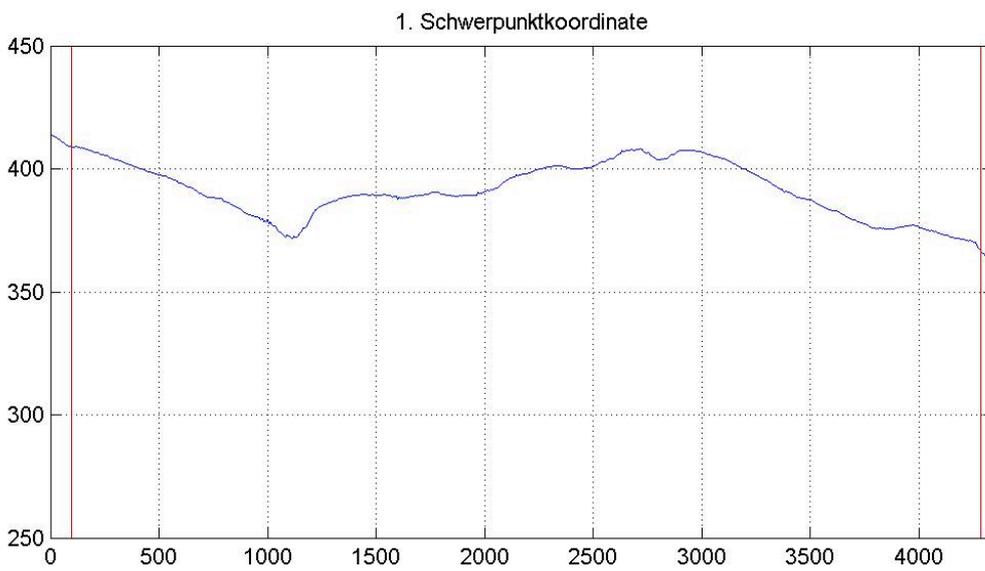
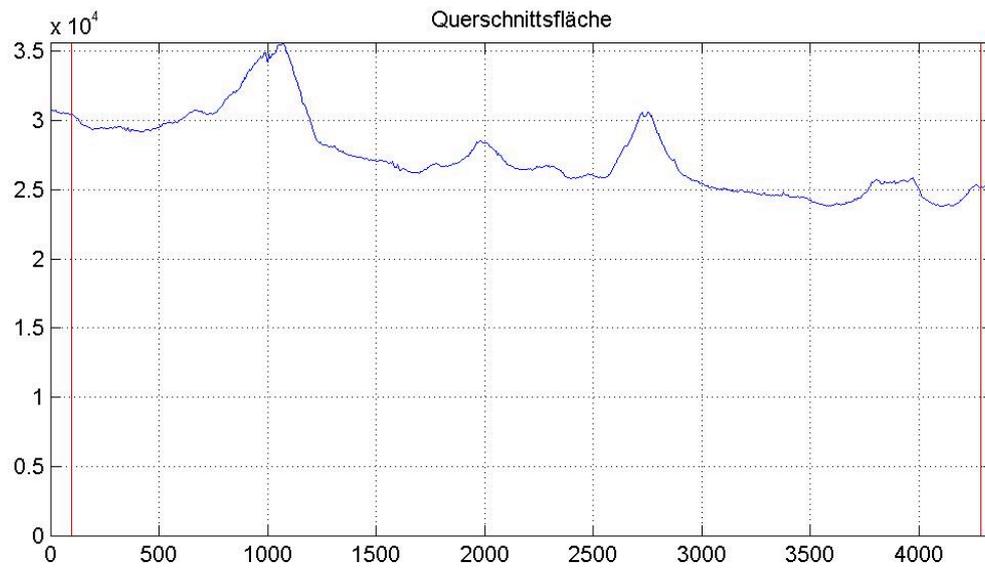


Bild A-18 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 15/3

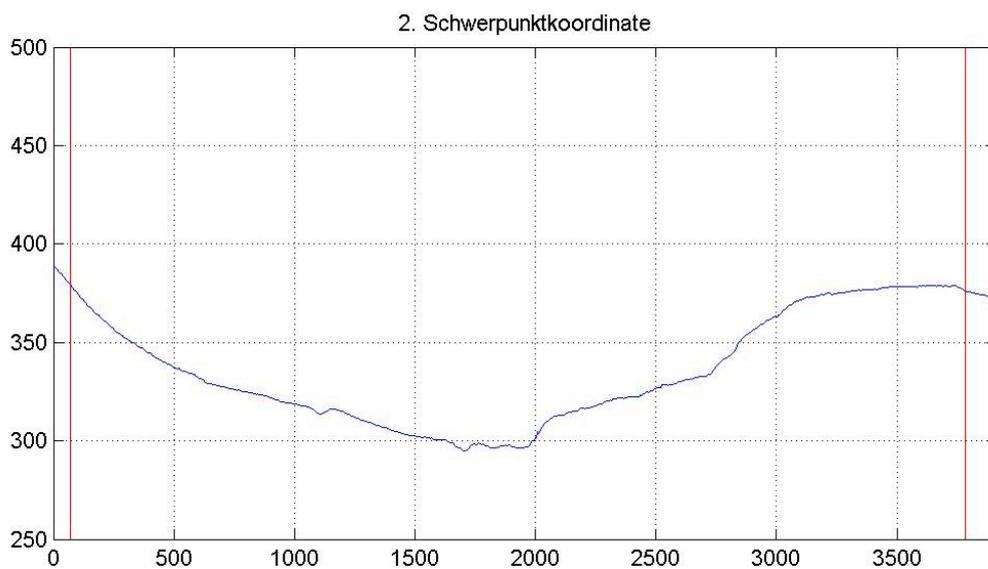
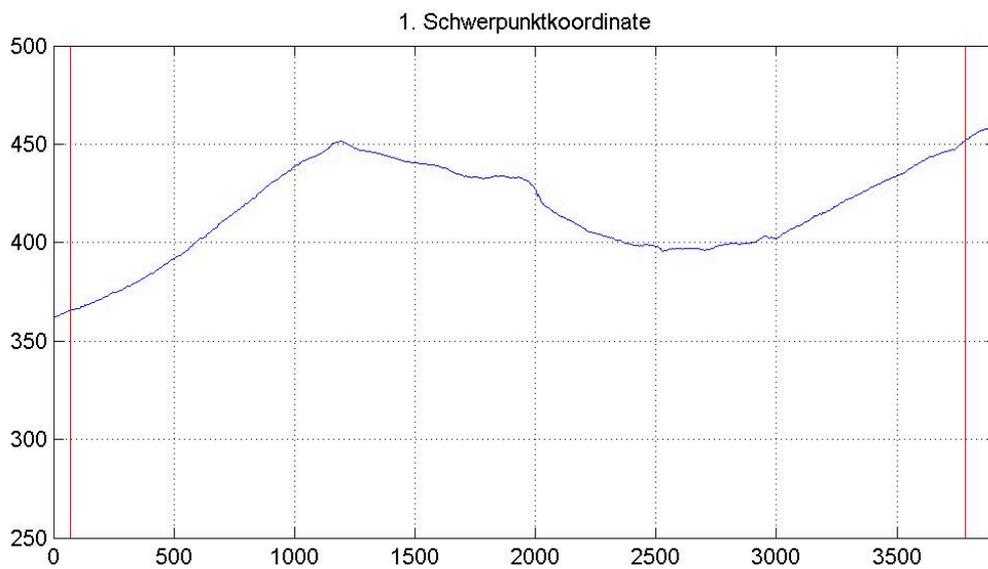
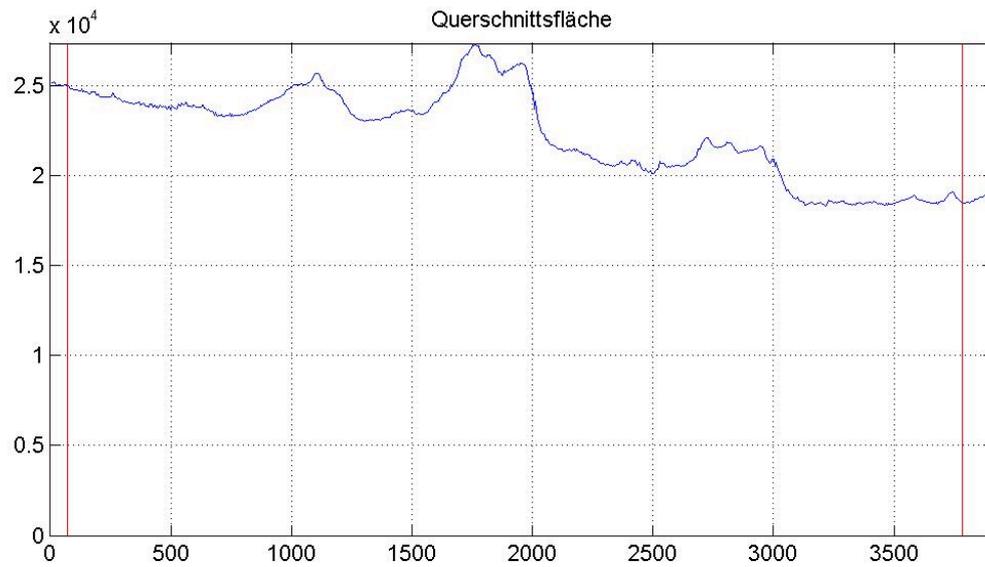


Bild A-19 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 16/2

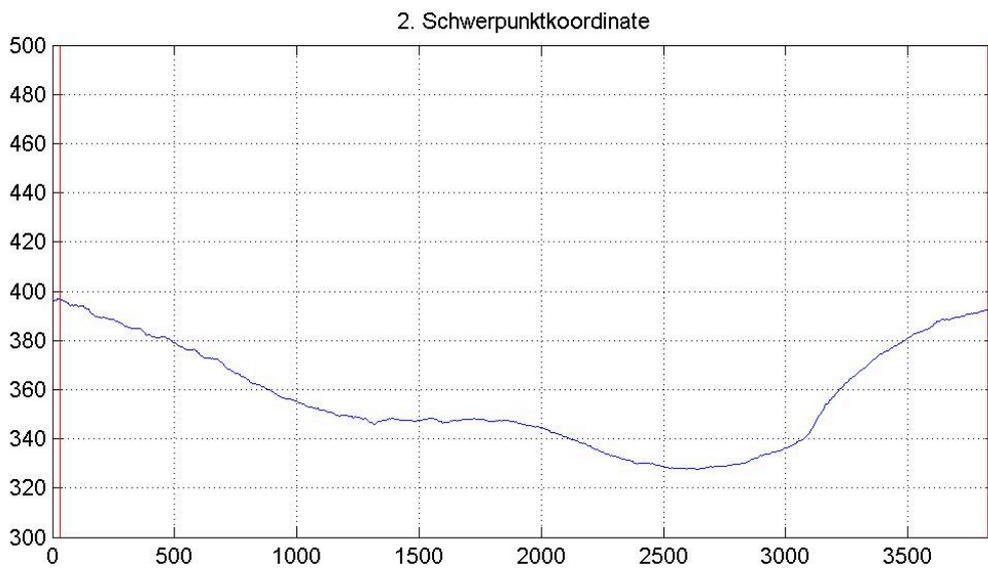
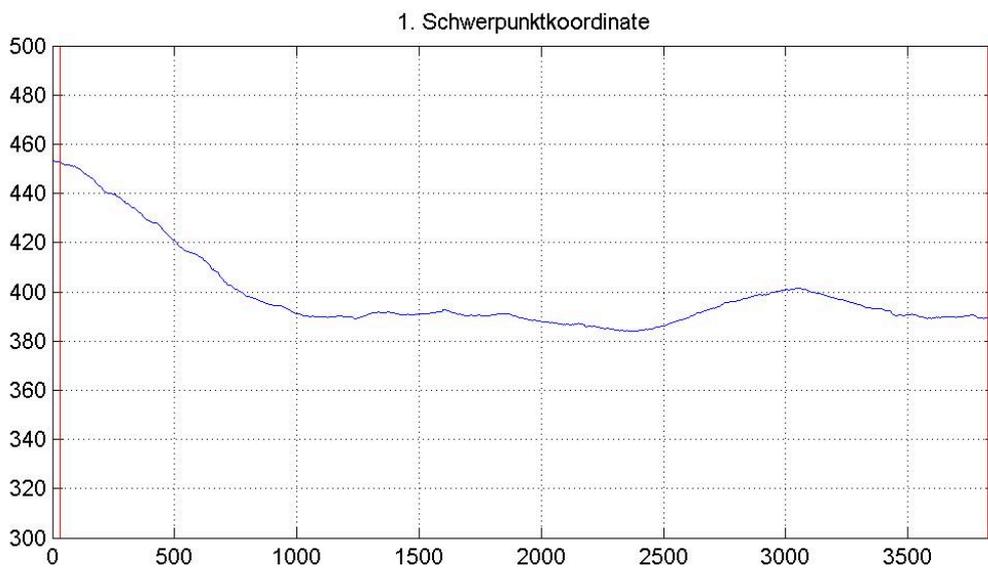
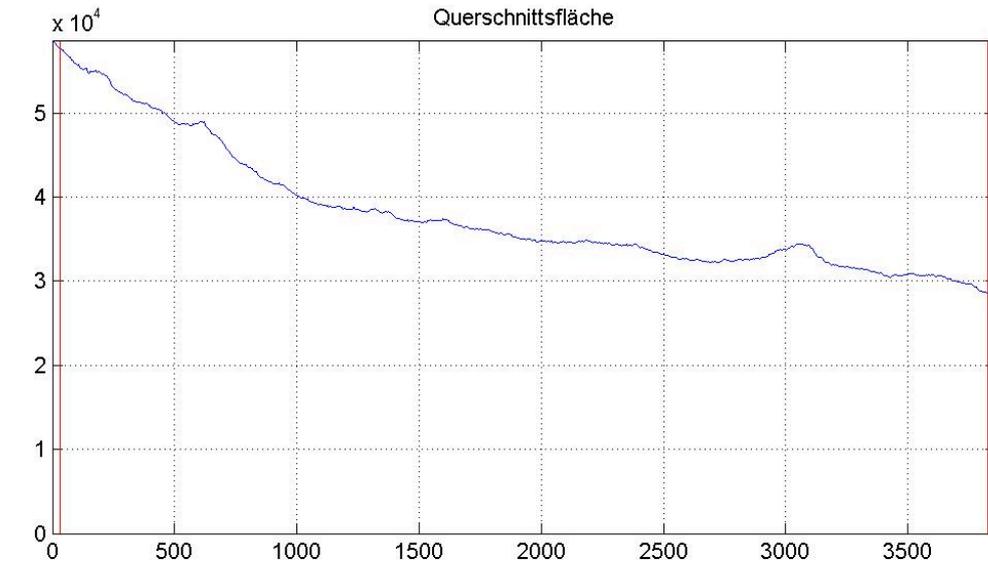


Bild A-20 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 17/1

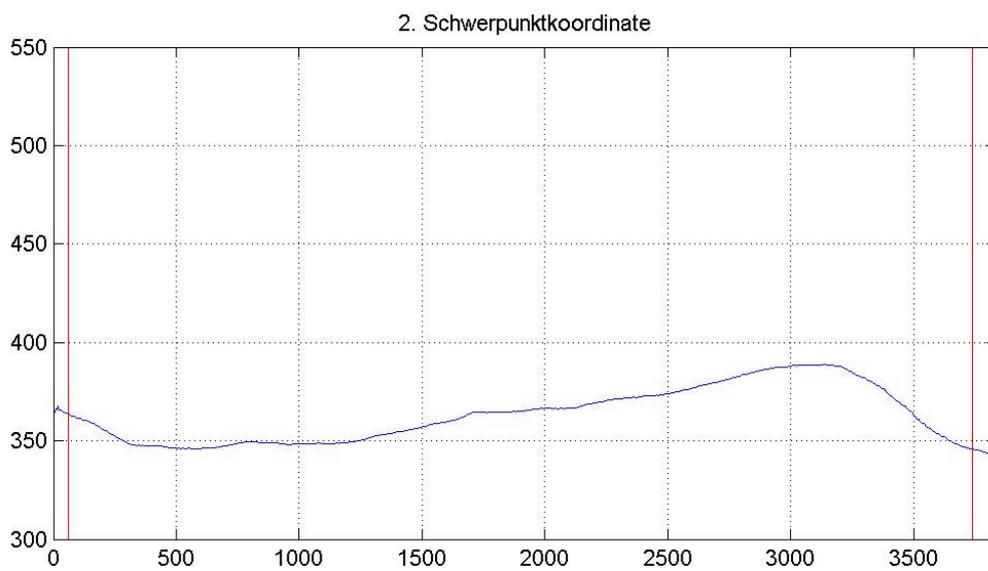
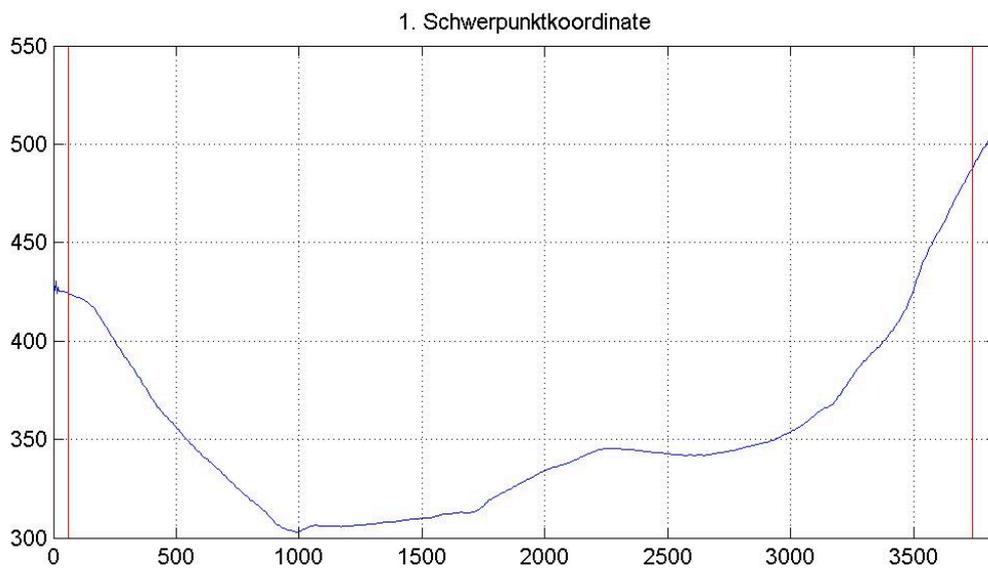
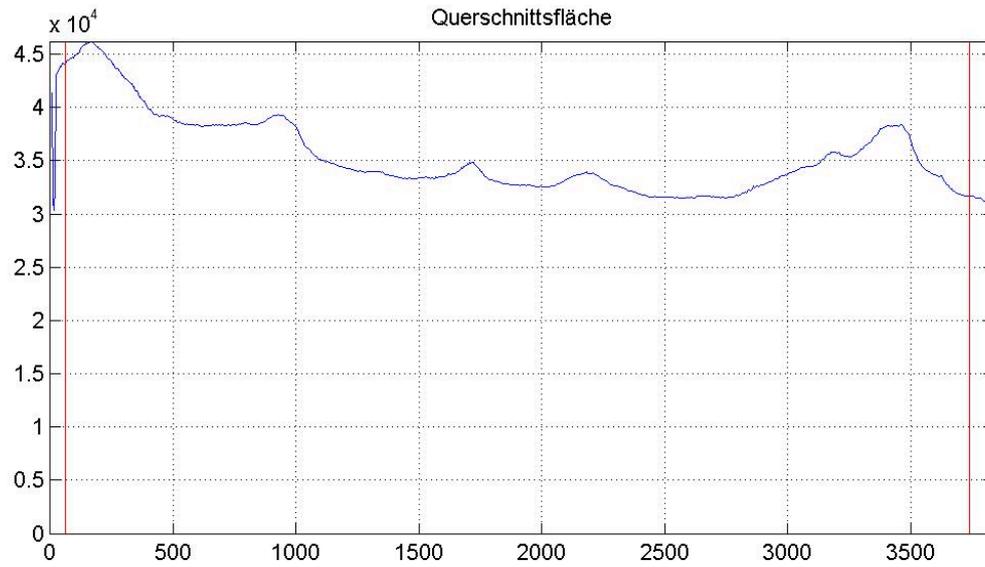


Bild A-21 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 19/2

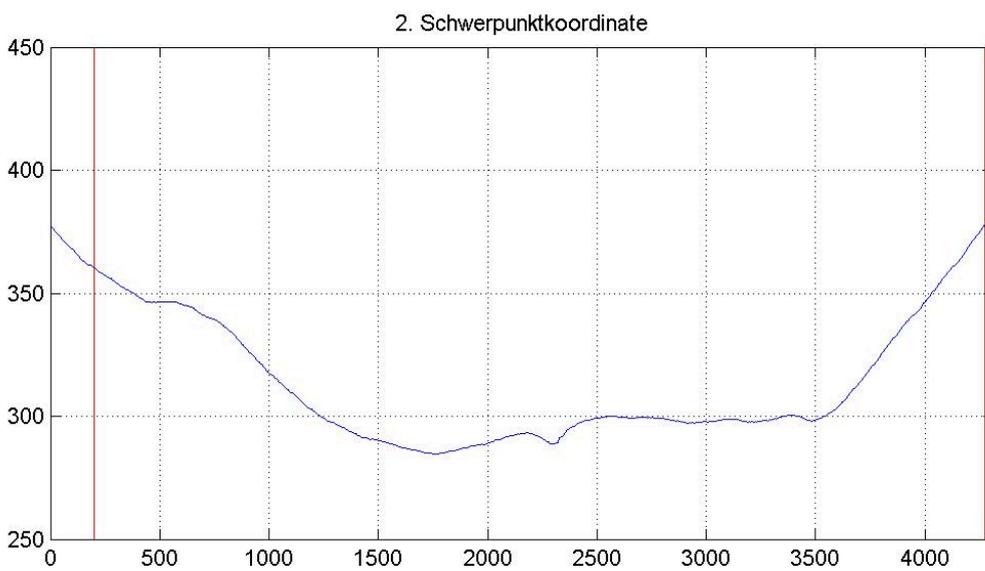
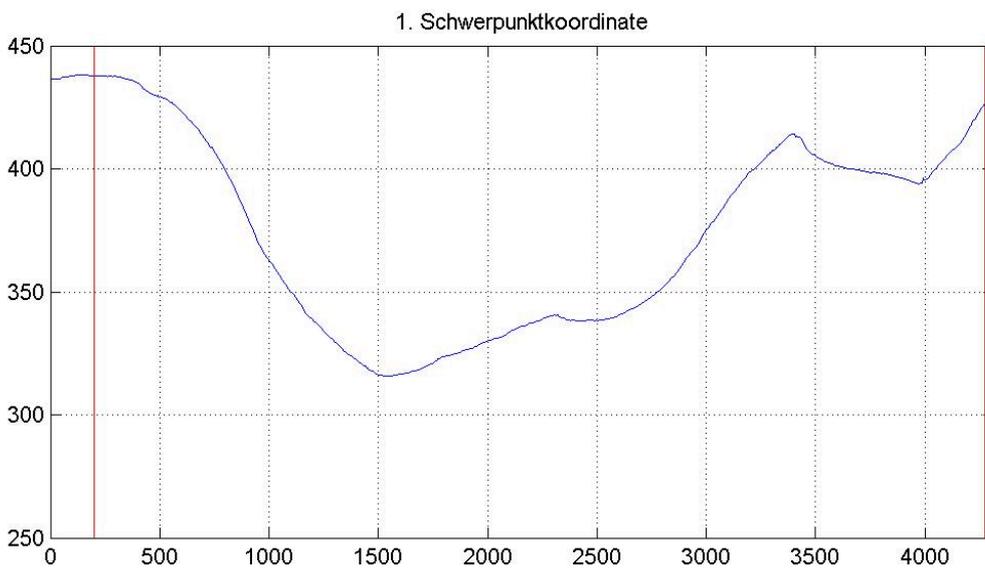
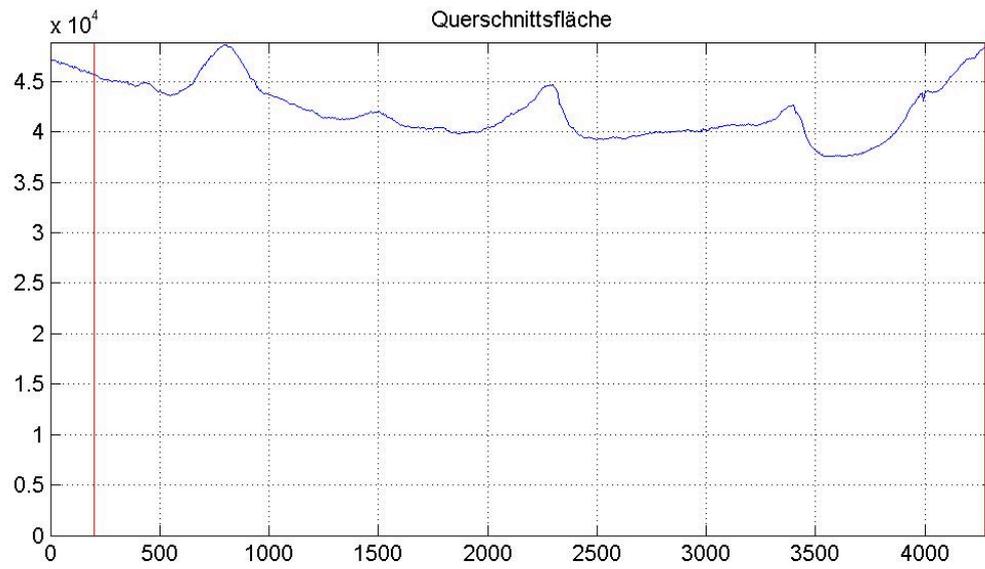


Bild A-22 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 20/2

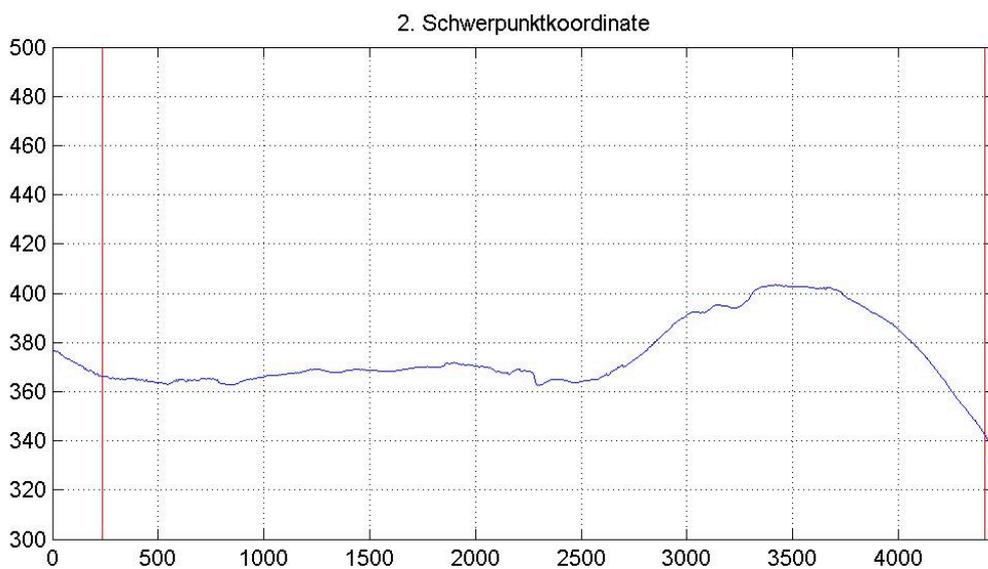
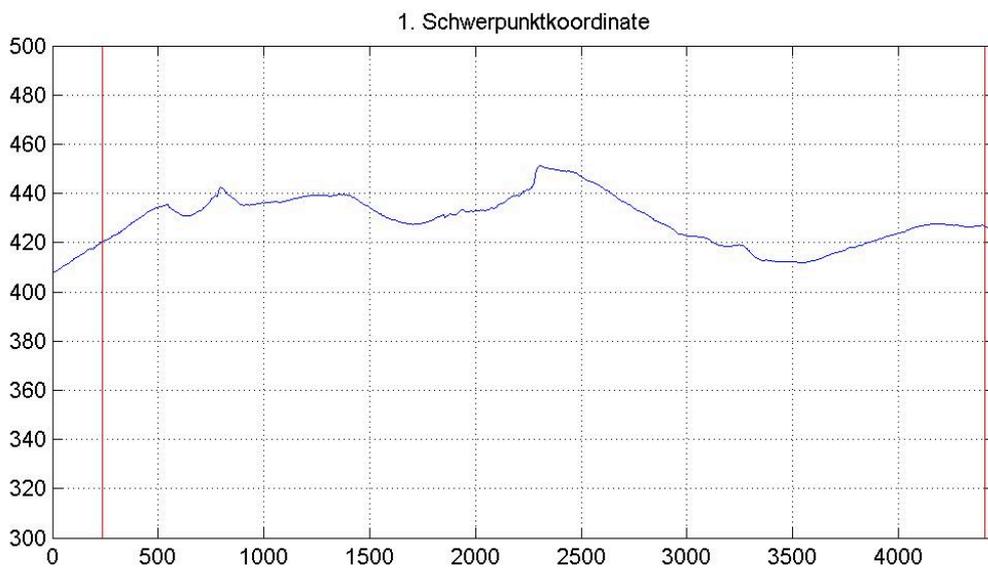
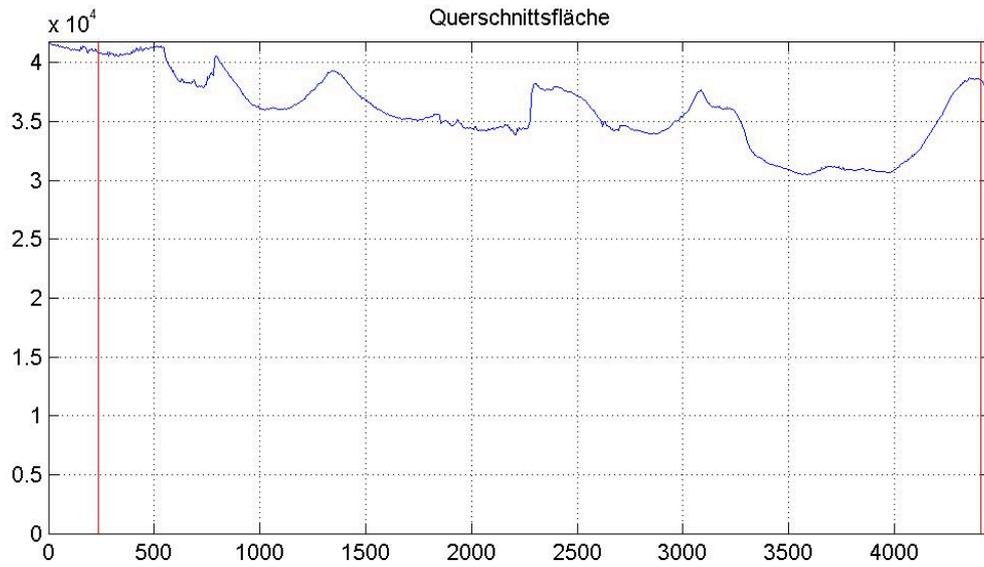


Bild A-23 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 21/2

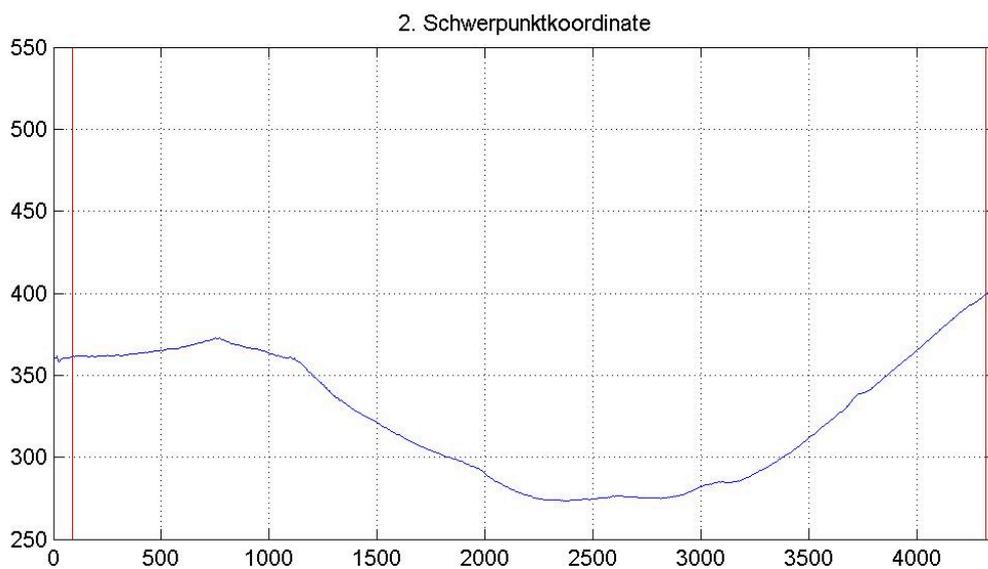
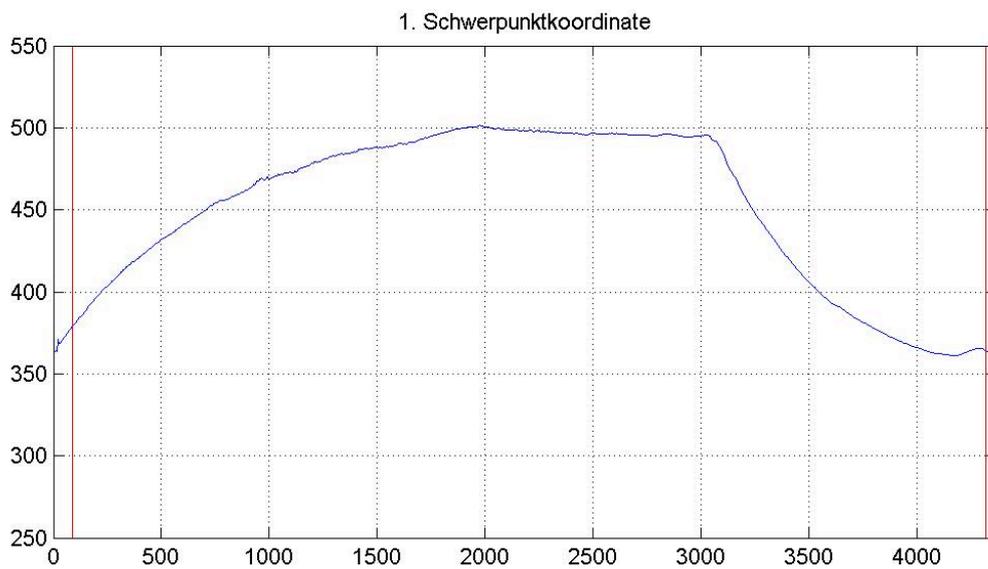
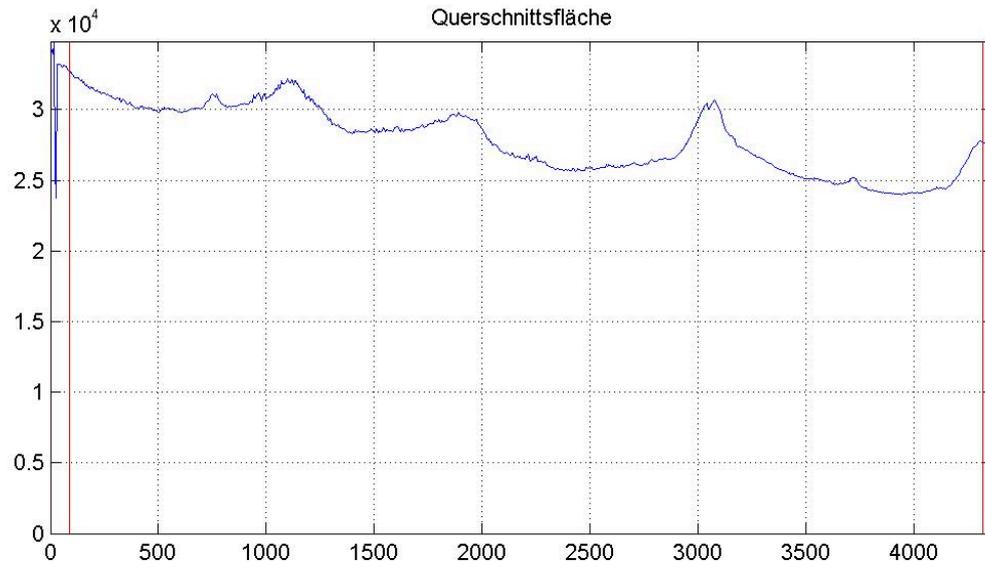


Bild A-24 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 22/2

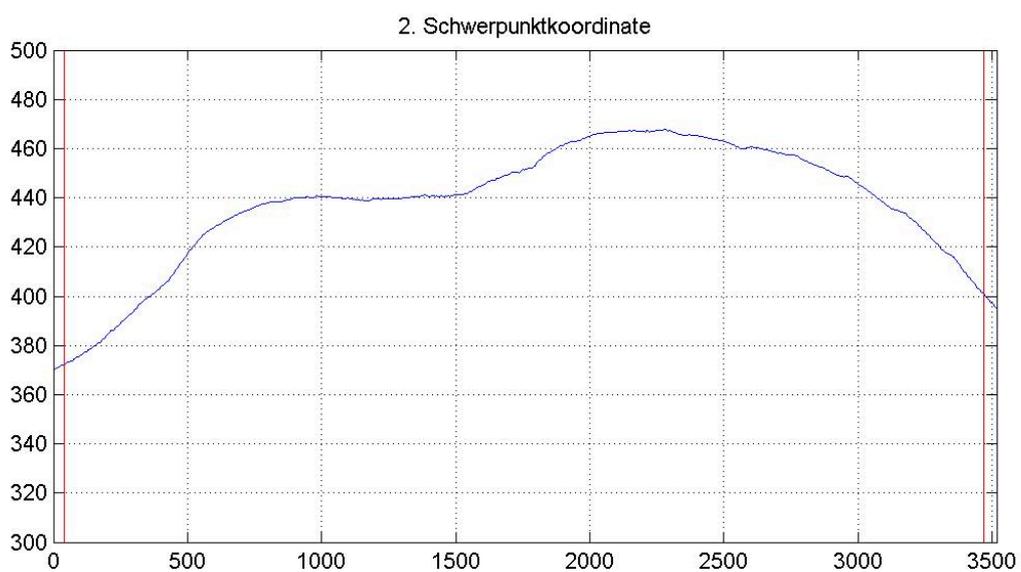
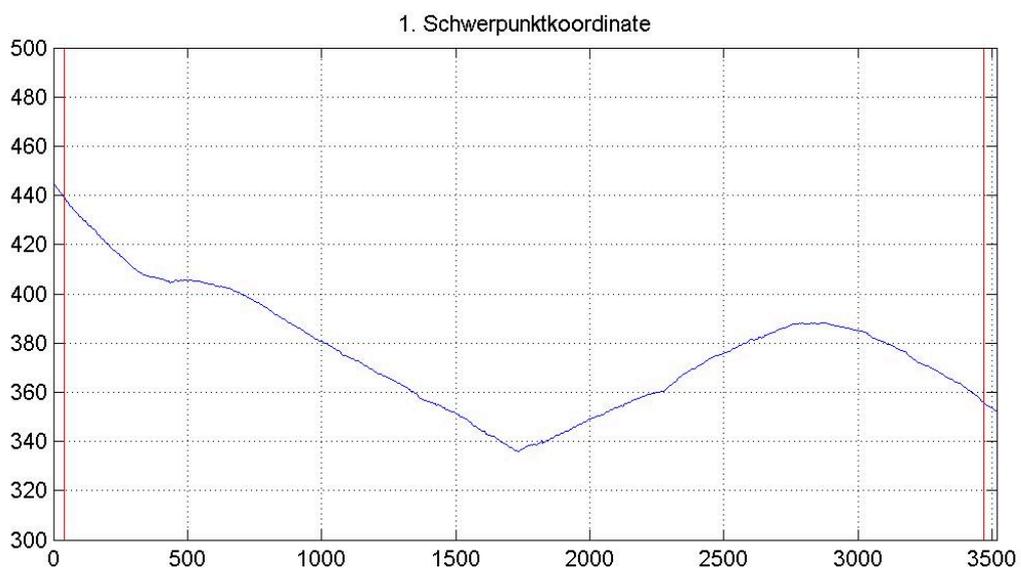
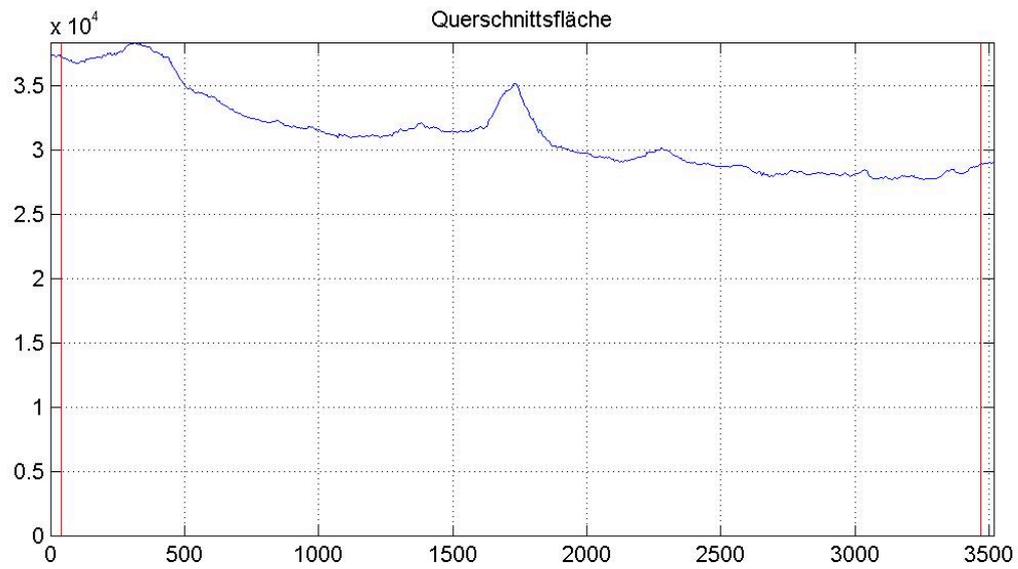


Bild A-25 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 24/2

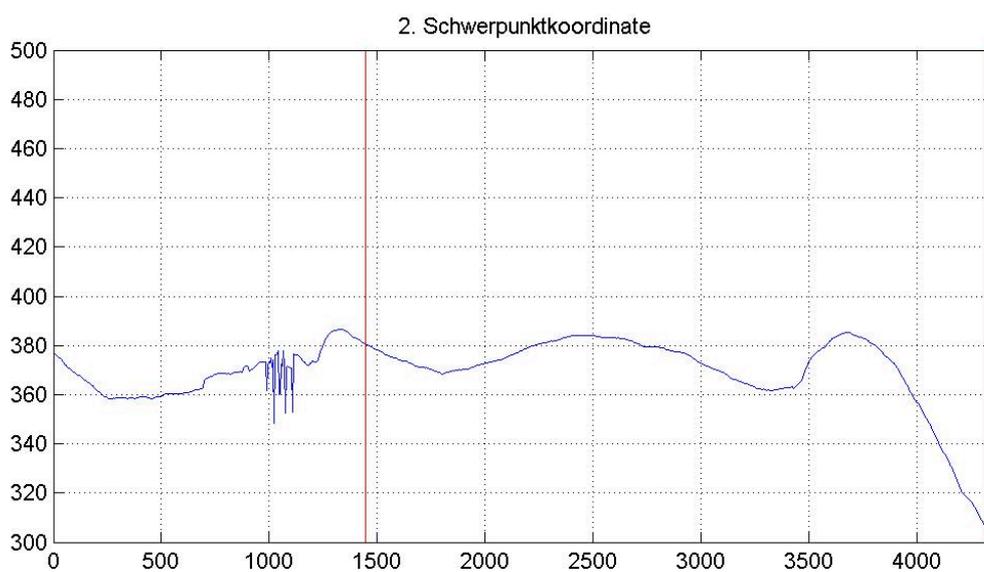
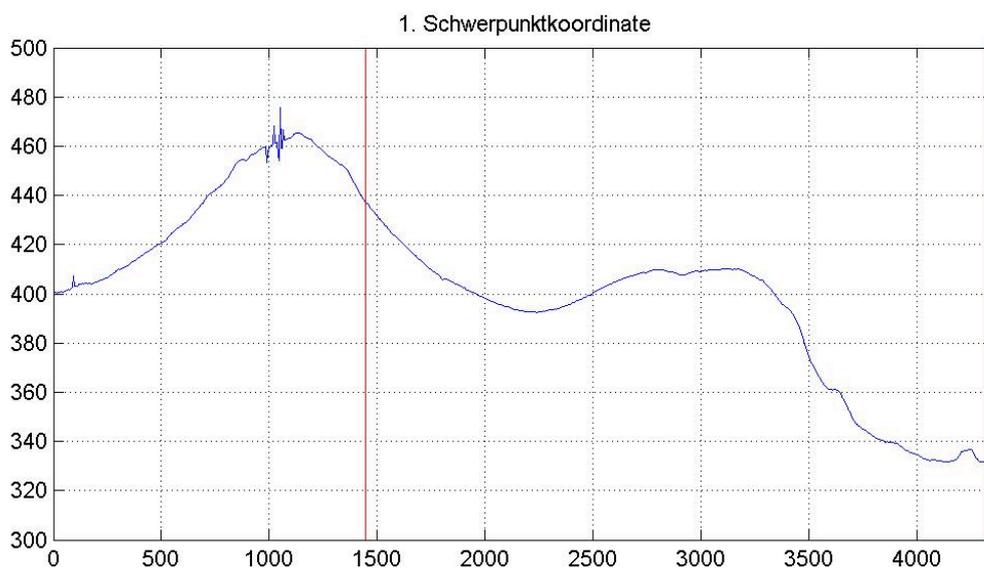
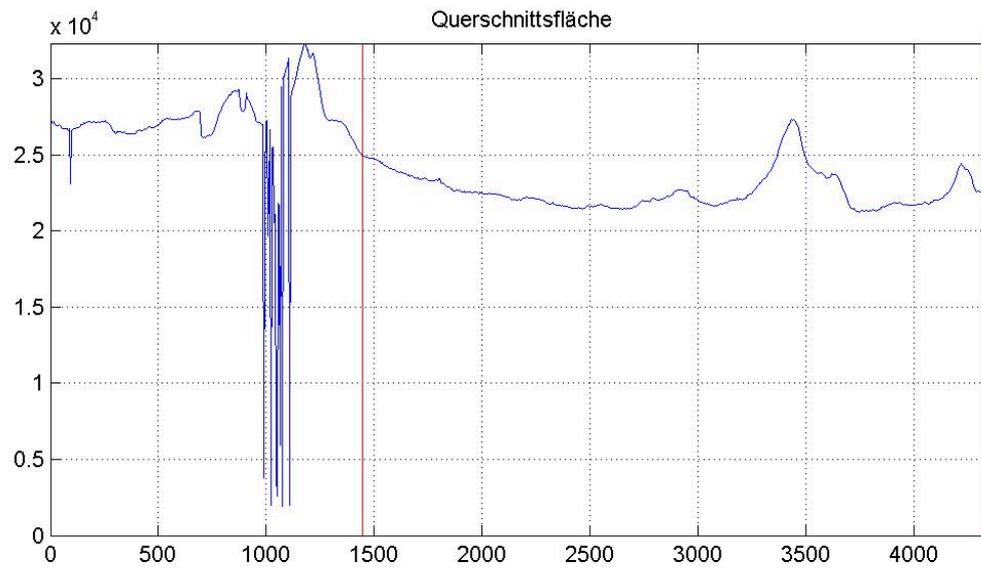


Bild A-26 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 24/3

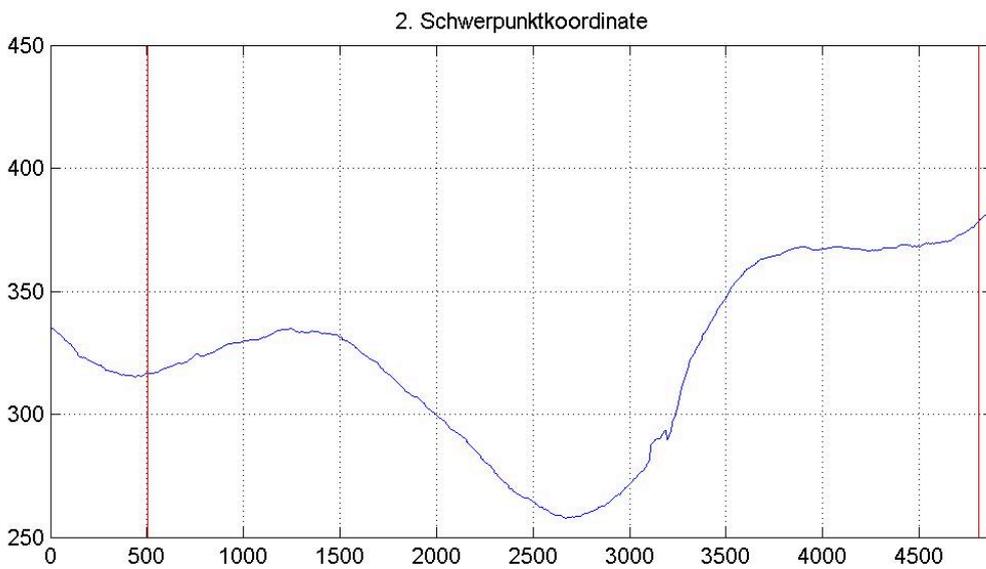
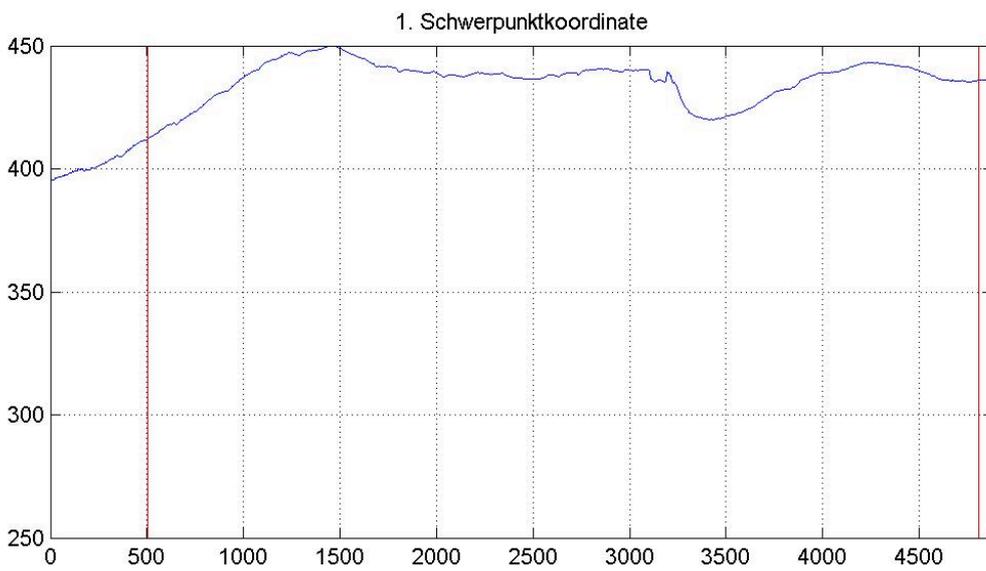
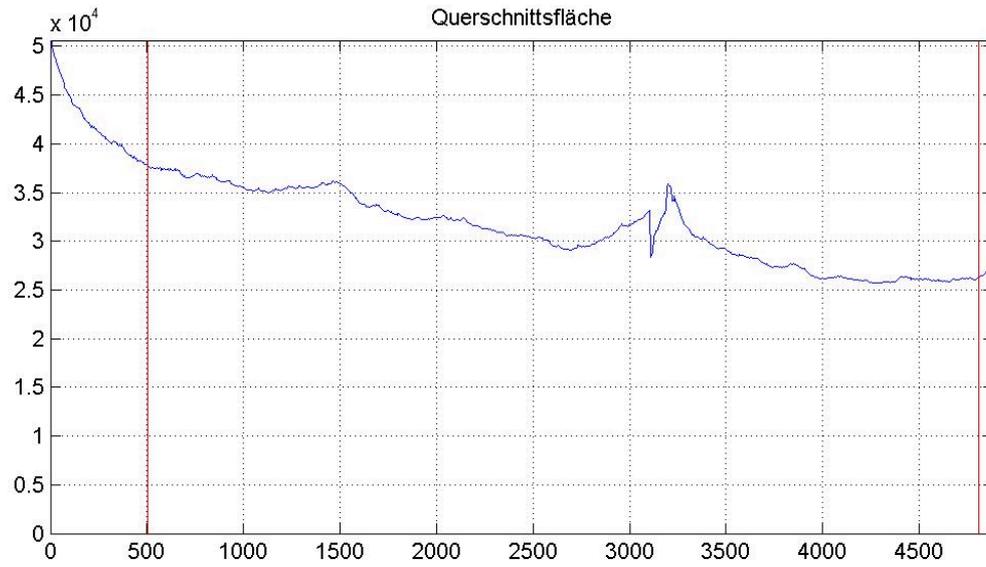


Bild A-27 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 25/1

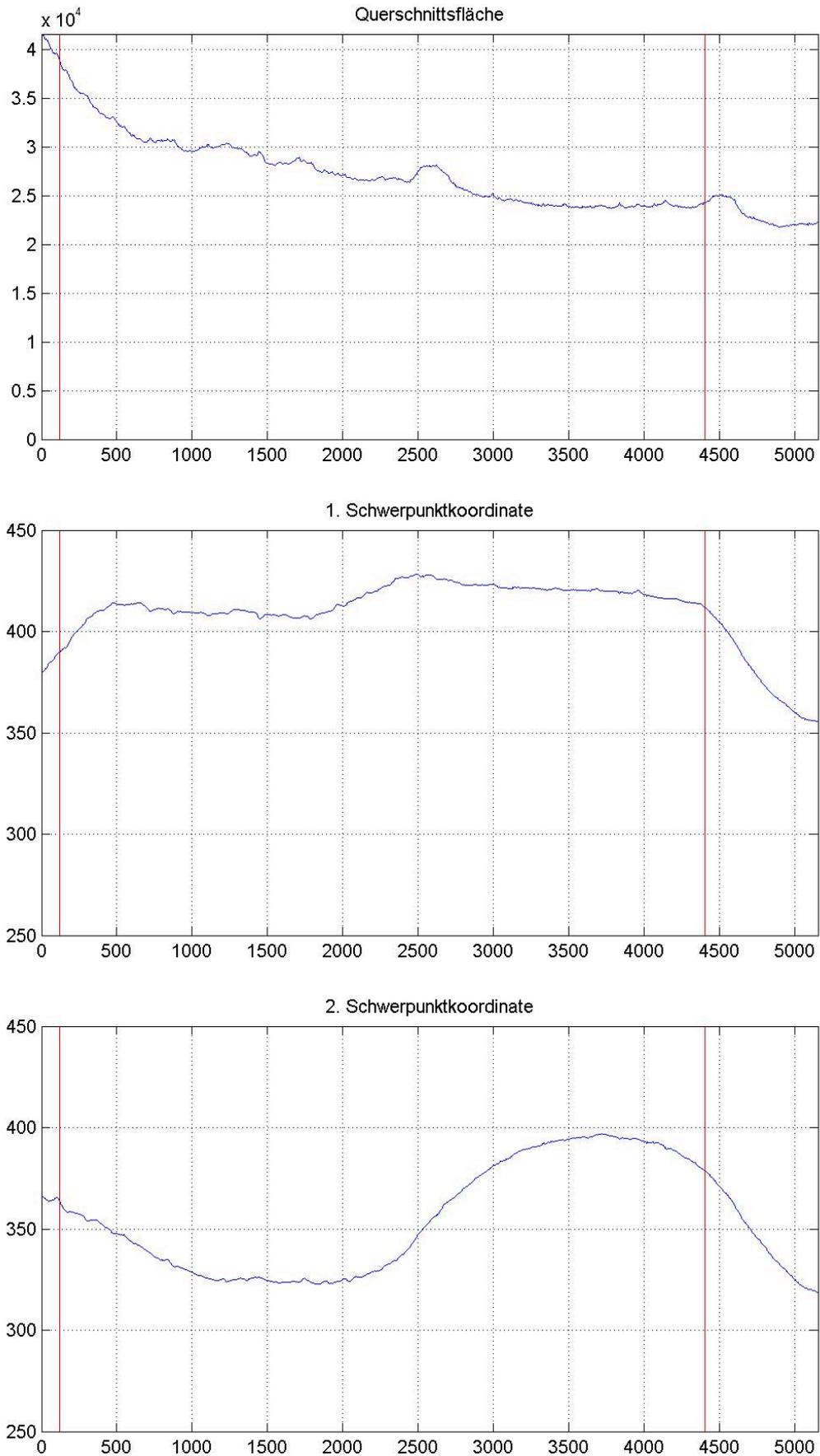


Bild A-28 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 26/1

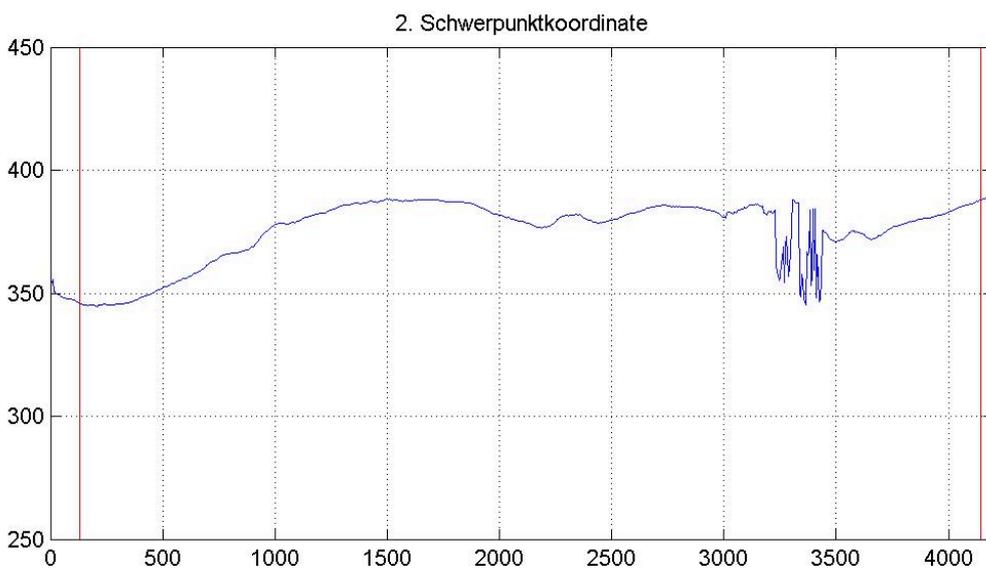
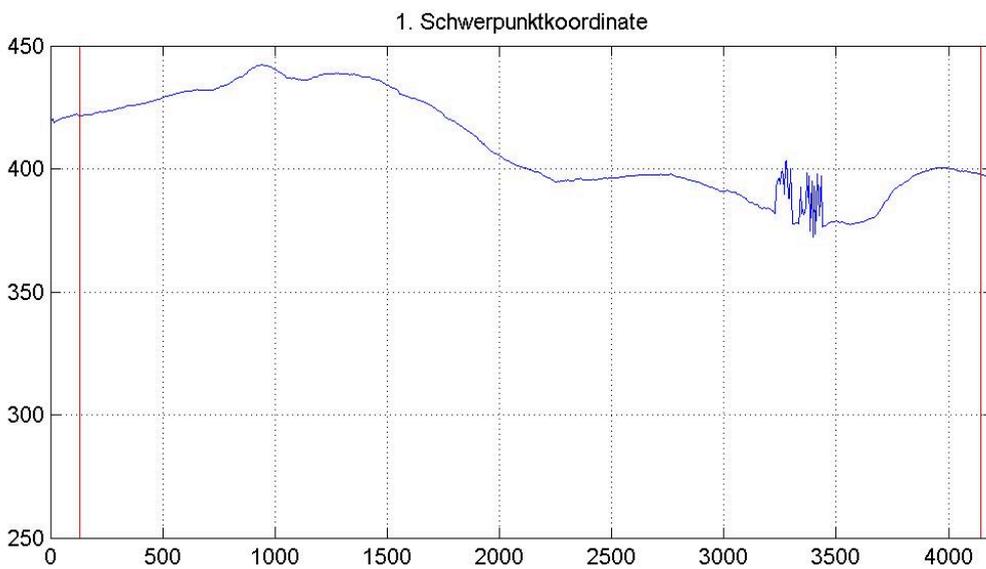
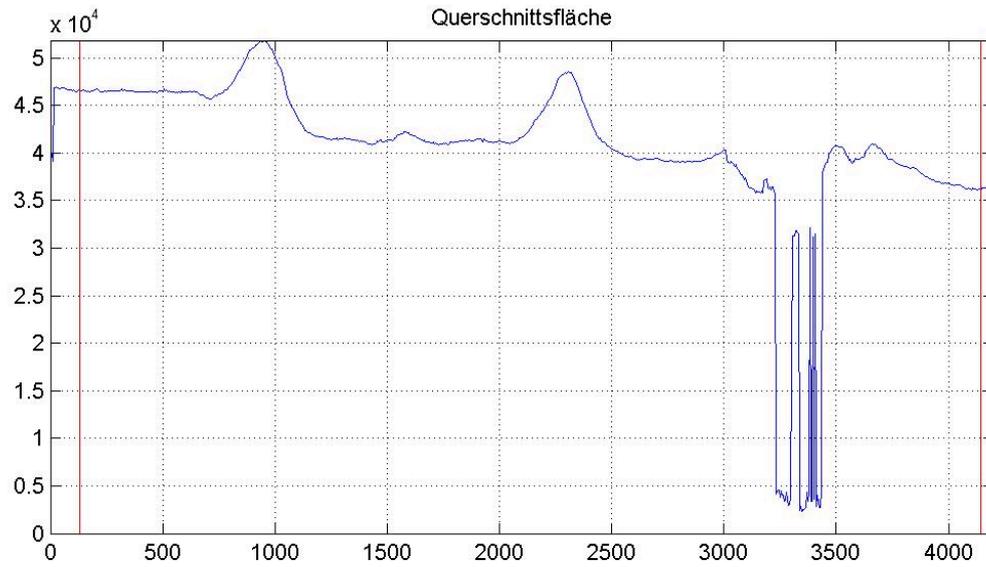


Bild A-29 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 27/2

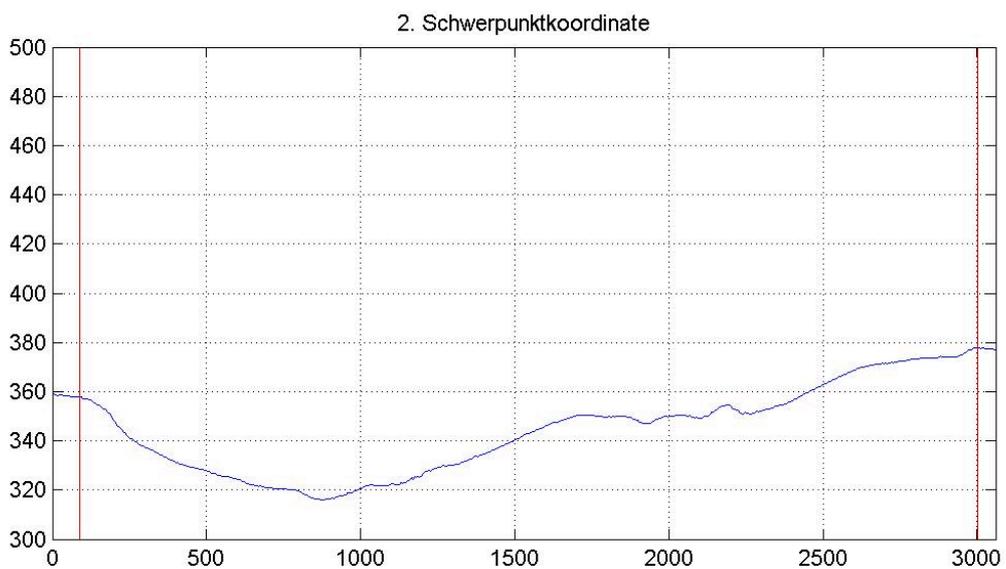
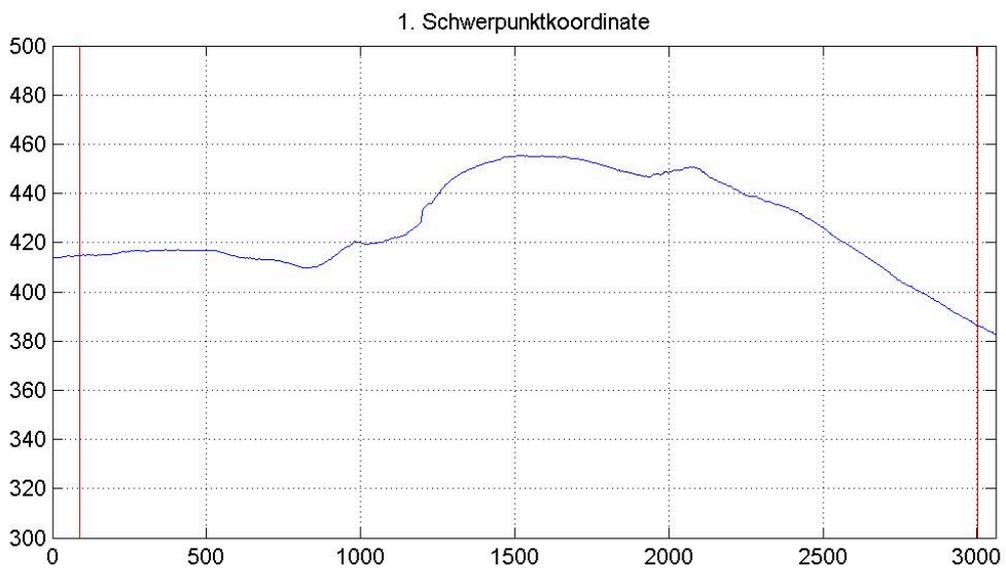
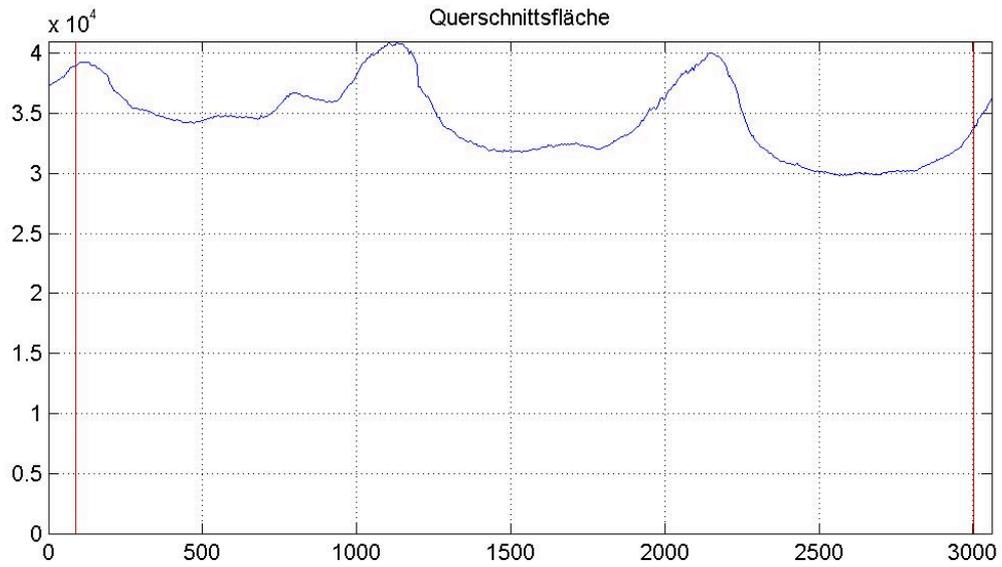


Bild A-30 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 27/3

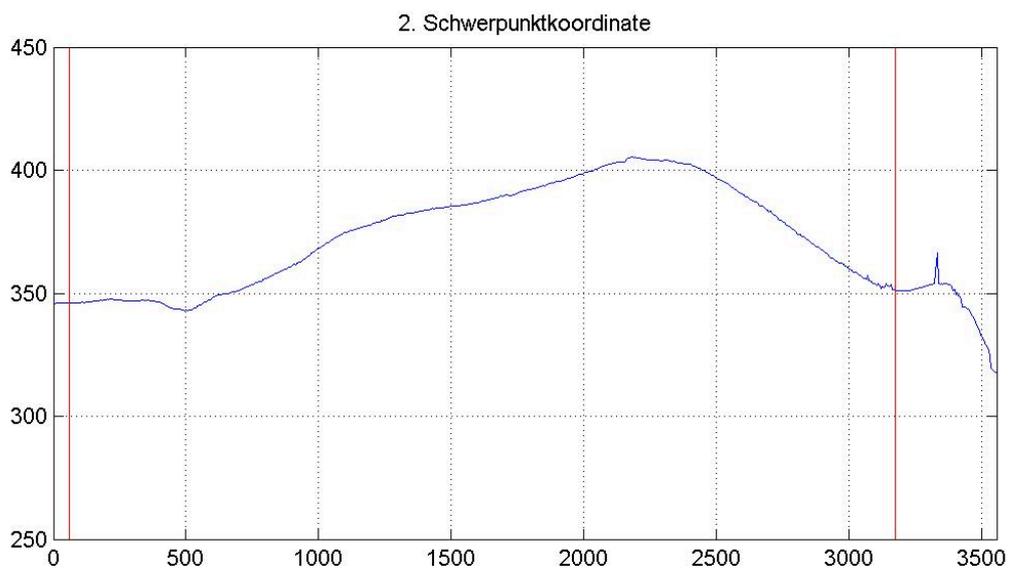
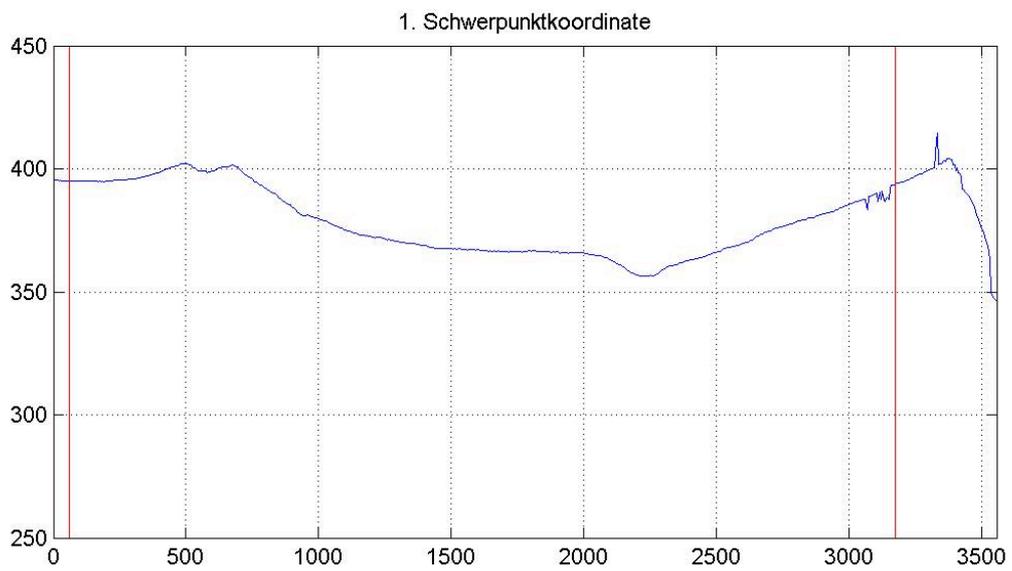
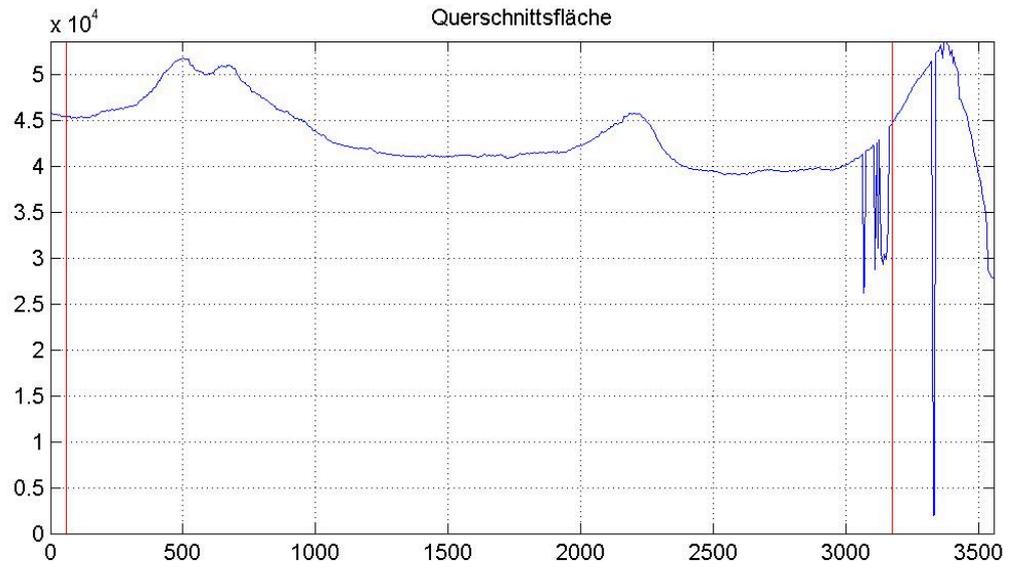


Bild A-31 Querschnittswerte Stamm-Abschn. 28/2



Bild A-32 Vorbereitung eines Druckstabs, Aufschauben der Kopf- und Fußplatten



Bild A-33 Aufgeschraubte Kopf- bzw. Fußplatte mit Kalotte



Bild A-34 Gelenkige Lasteinleitung, oben; Situation kurz vor dem Zentrieren



Bild A-35 Gelenkige Lasteinleitung, unten

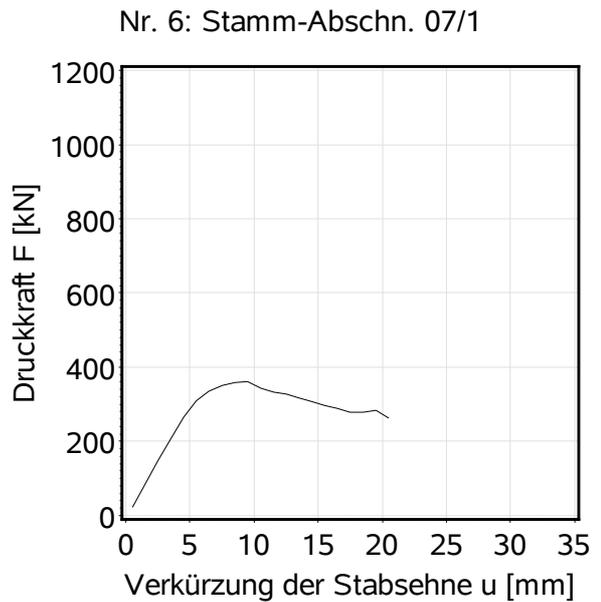
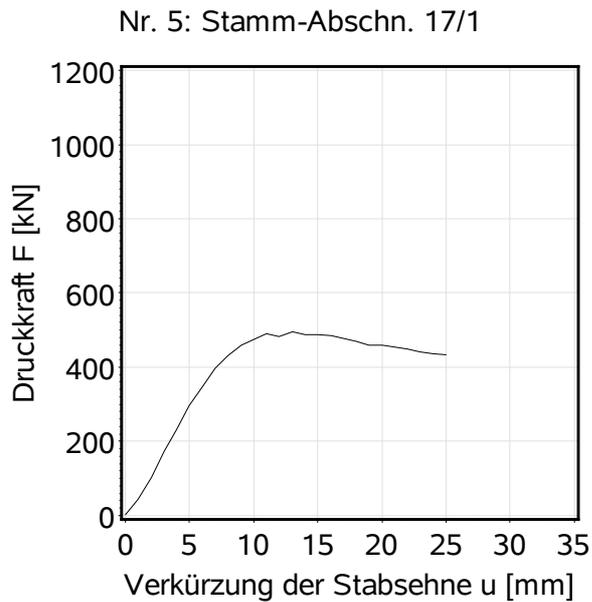
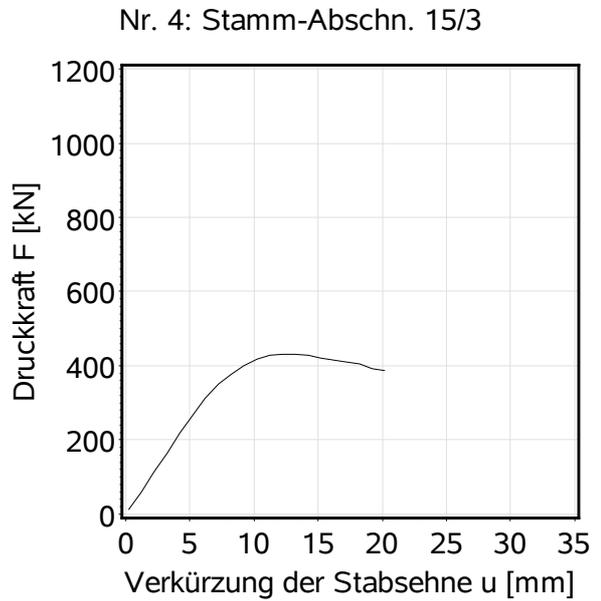
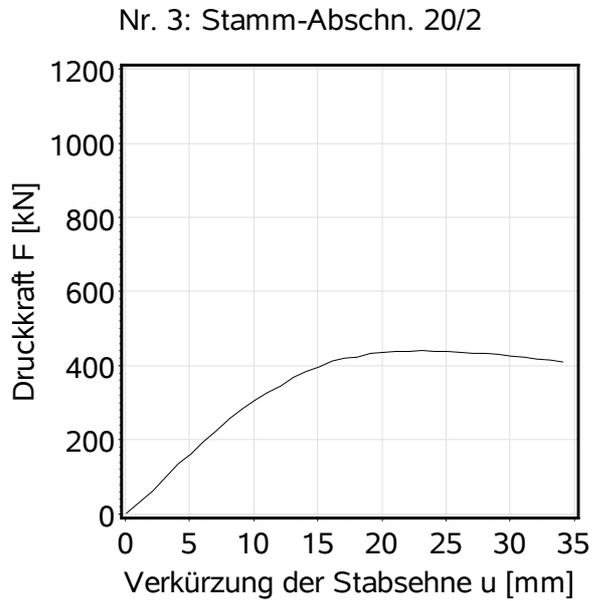
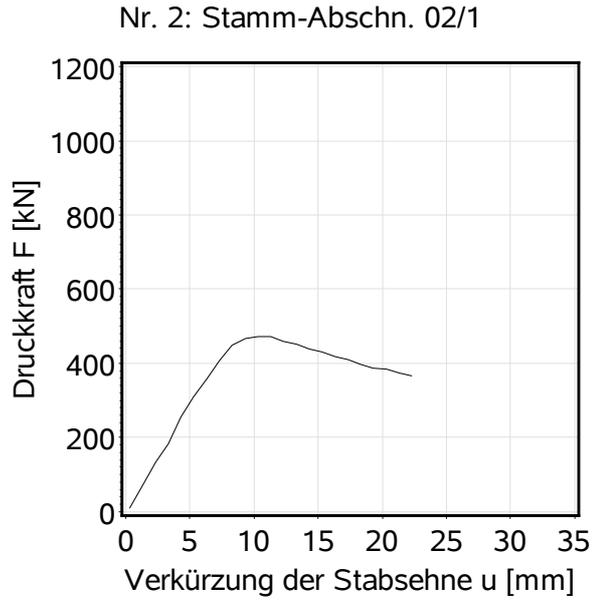
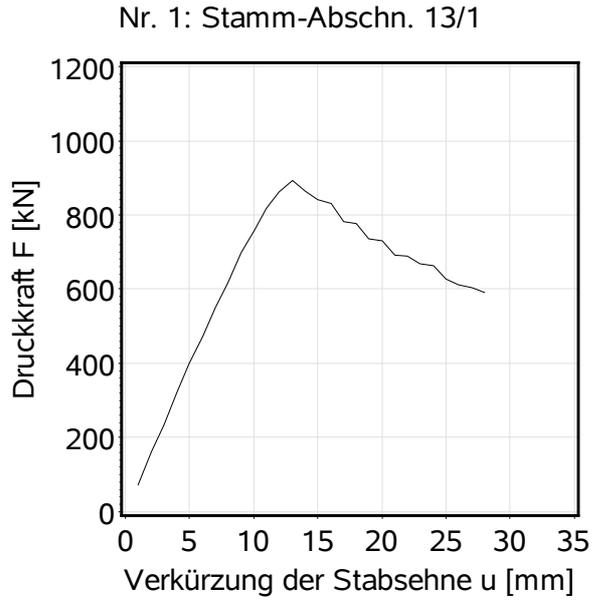


Bild A-36 Lastverformungsdiagramme

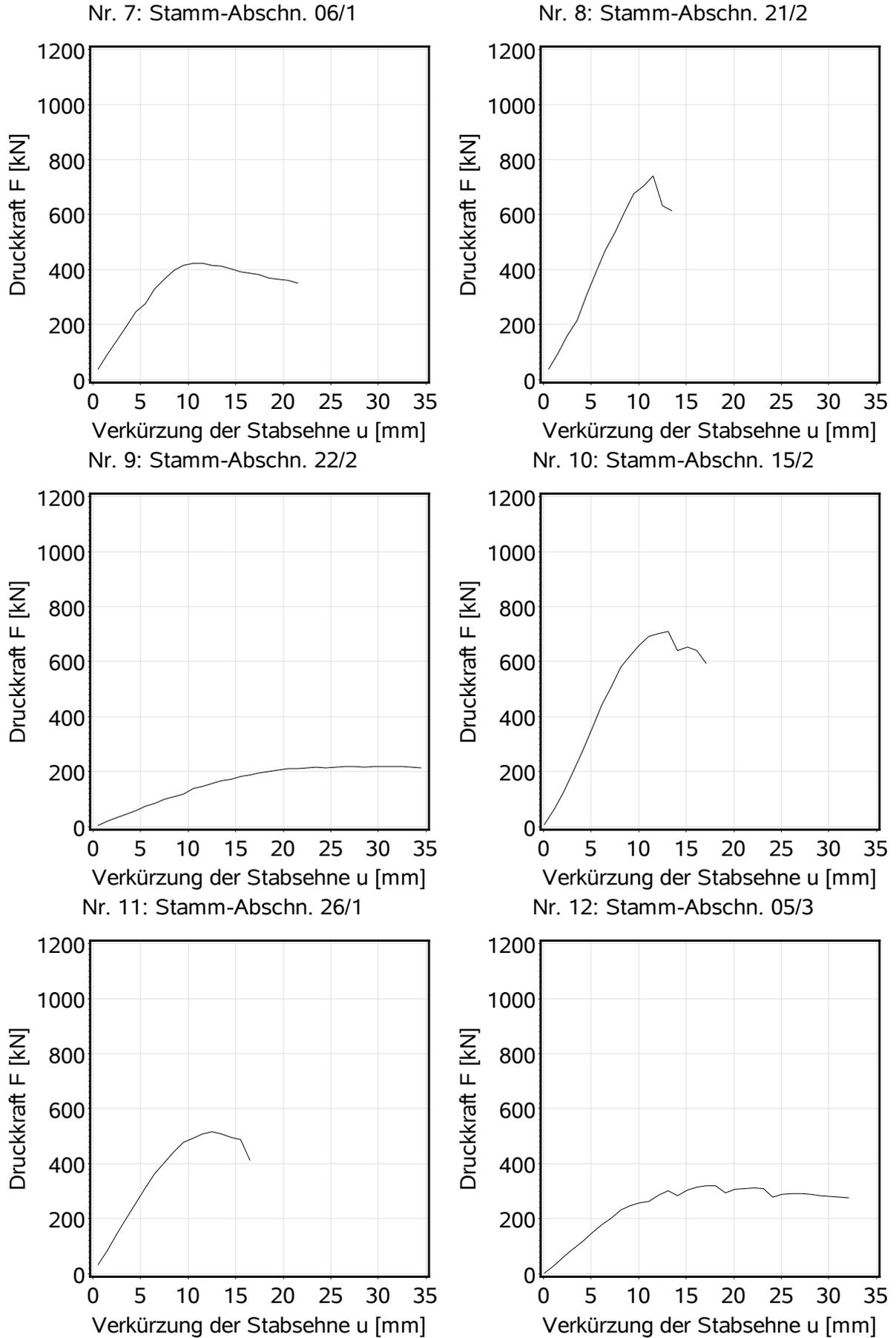
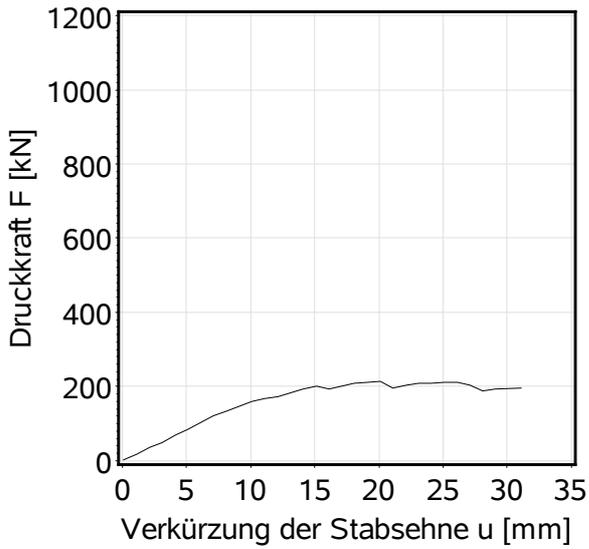
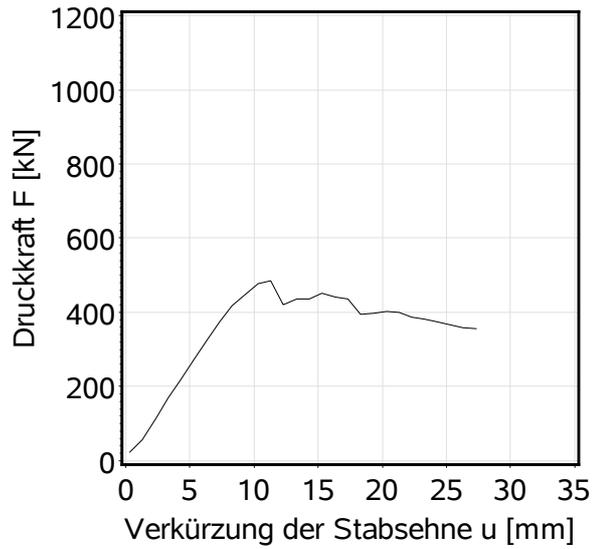


Bild A-36 (Forts.) Lastverformungsdiagramme

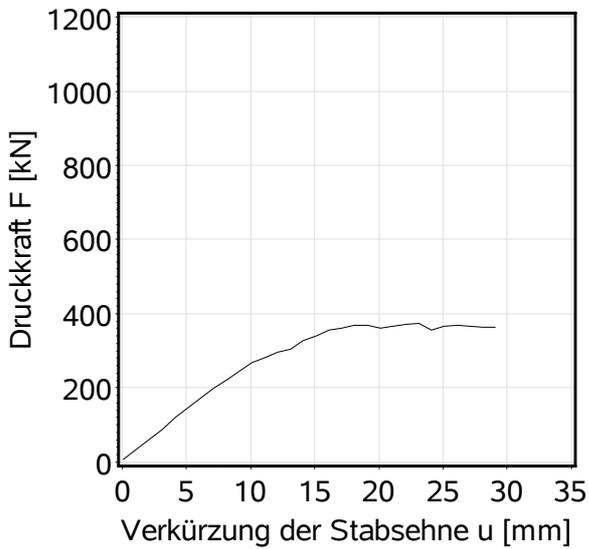
Nr. 13: Stamm-Abschn. 09/3



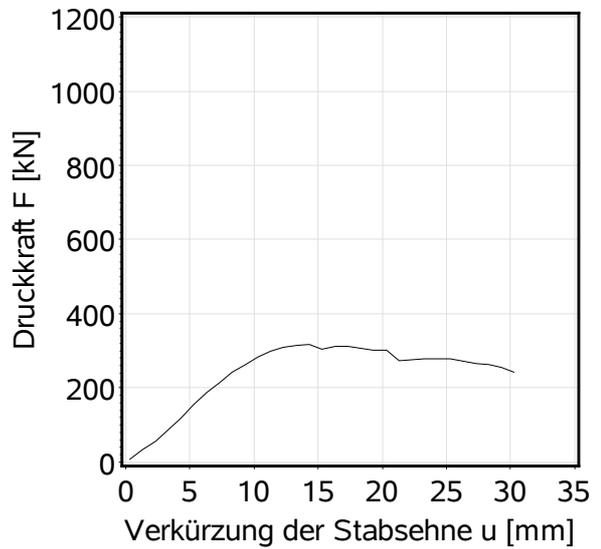
Nr. 14: Stamm-Abschn. 25/1



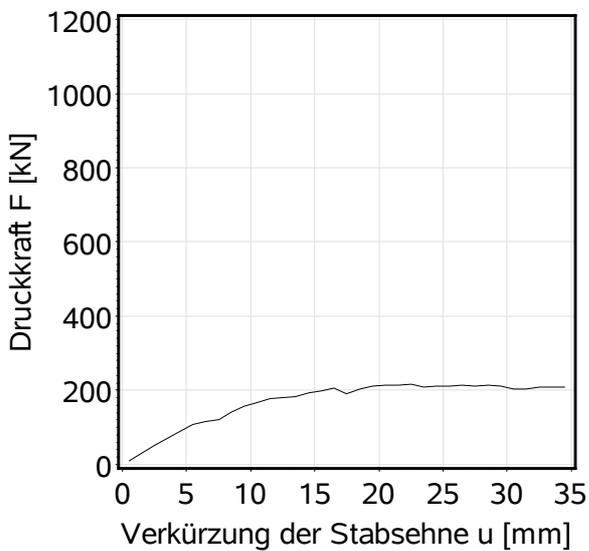
Nr. 15: Stamm-Abschn. 12/1



Nr. 16: Stamm-Abschn. 16/2



Nr. 17: Stamm-Abschn. 03/3



Nr. 18: Stamm-Abschn. 24/2

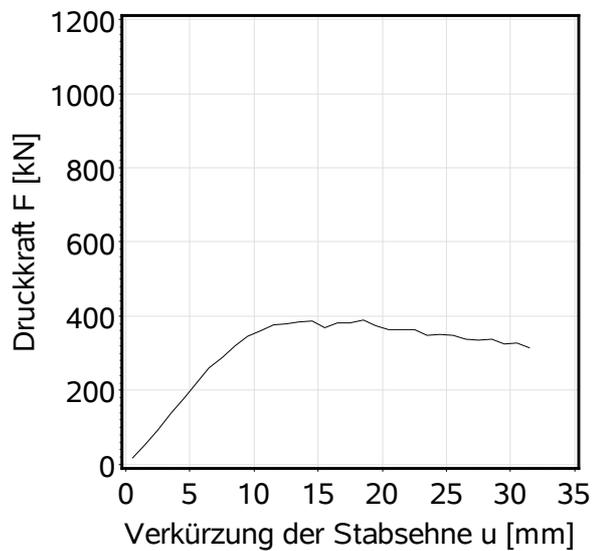
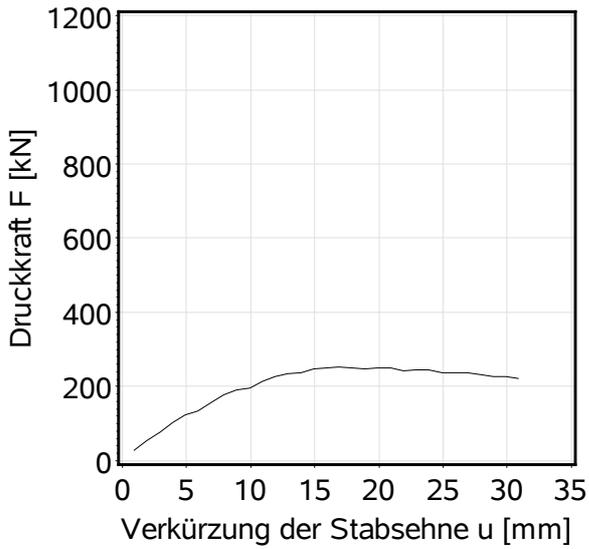
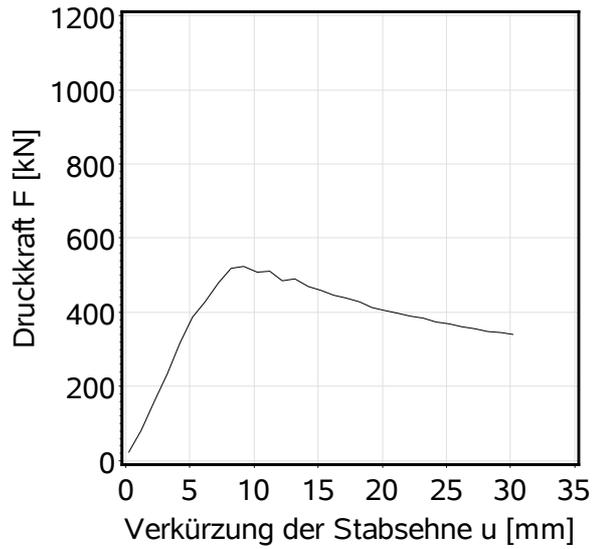


Bild A-36 (Forts.) Lastverformungsdiagramme

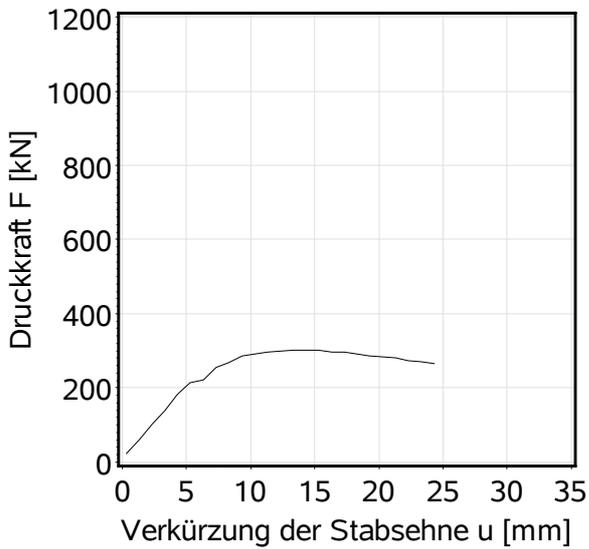
Nr. 19: Stamm-Abschn. 06/3



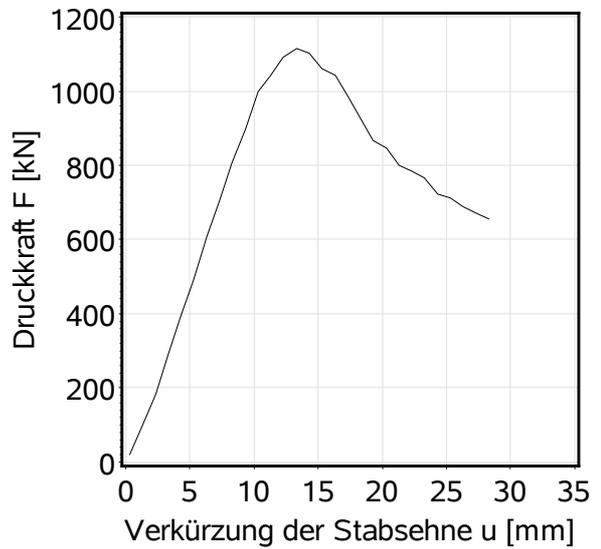
Nr. 20: Stamm-Abschn. 10/2



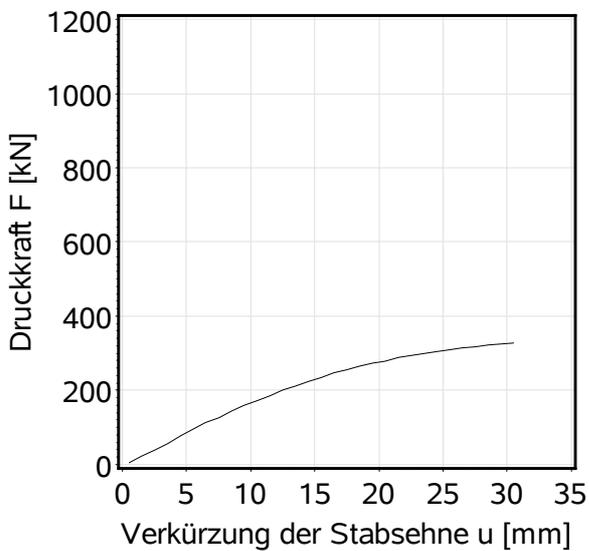
Nr. 21: Stamm-Abschn. 11/2



Nr. 22: Stamm-Abschn. 27/2



Nr. 23: Stamm-Abschn. 19/2



Nr. 24: Stamm-Abschn. 03/2

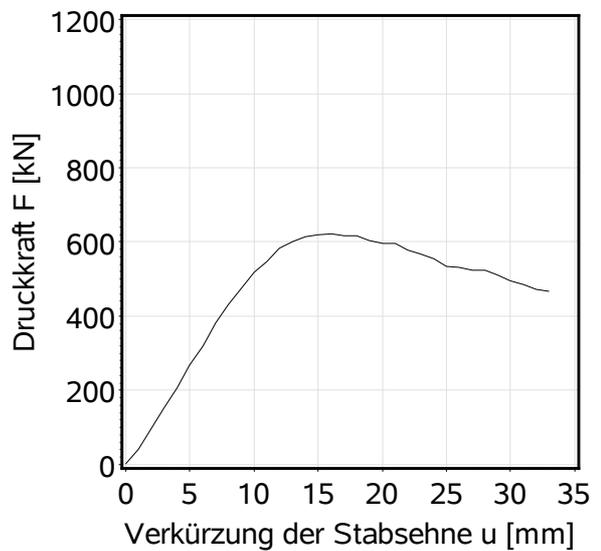
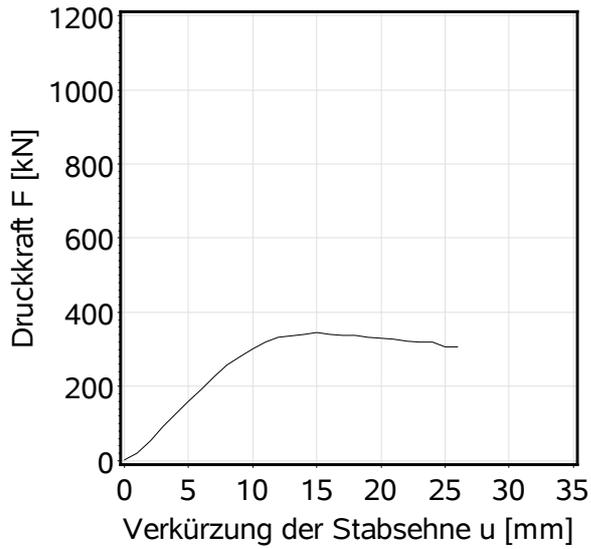
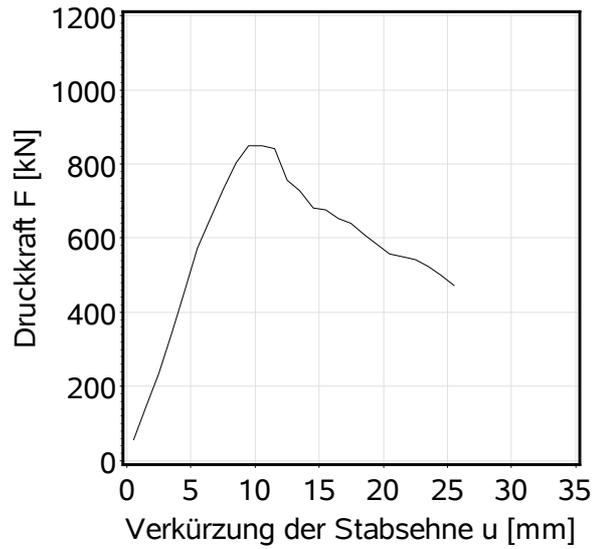


Bild A-36 (Forts.) Lastverformungsdiagramme

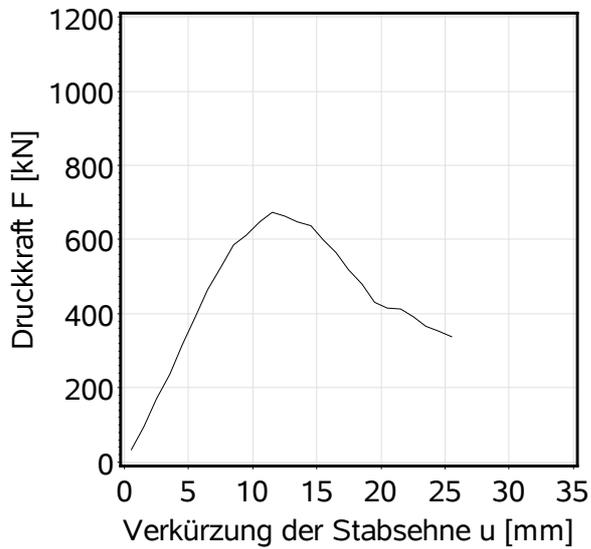
Nr. 25: Stamm-Abschn. 09/1



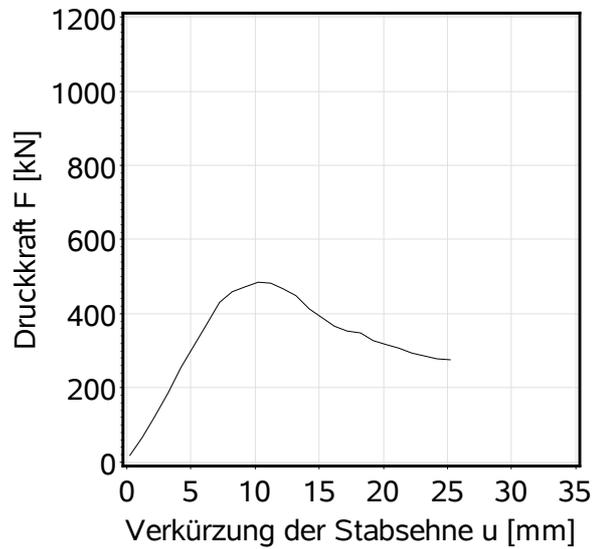
Nr. 26: Stamm-Abschn. 28/2



Nr. 27: Stamm-Abschn. 27/3



Nr. 28: Stamm-Abschn. 04/1



Nr. 29: Stamm-Abschn. 24/3

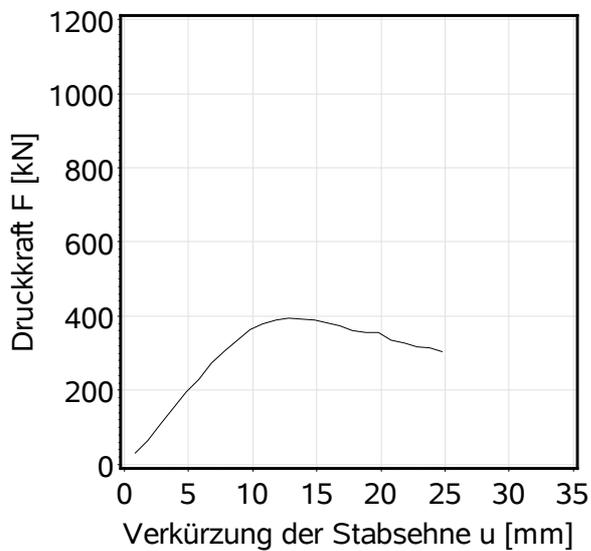


Bild A-36 (Forts.) Lastverformungsdiagramme

Tabelle A-1 Querschnittswerte, physikalische und mechanische Kenngrößen

Nr.	Abschnitt	l_{eff} mm	d_z (Zopf) mm	d_s (Stock) mm	Abholzigkeit -	u %	ρ_{brutto} kg/m ³	E_{dyn} N/mm ²
1	13/1	4333	235	263	0,76	51,8	1010	13500
2	02/1	4330	192	220	0,76	50,0	984	16500
3	20/2	4140	234	256	0,65	62,9	1150	18500
4	15/3	4310	187	203	0,46	52,7	1120	18400
5	17/1	3980	213	277	1,94	51,0	996	15400
6	07/1	4300	176	204	0,80	48,0	1100	21100
7	06/1	4420	208	232	0,65	49,4	983	16700
8	21/2	4300	213	237	0,67	52,2	1150	16100
9	22/2	4360	189	214	0,69	54,4	1120	16900
10	15/2	4350	210	227	0,47	43,0	1070	19100
11	26/1	4410	184	223	1,05	43,6	1010	17200
12	05/3	4360	190	207	0,46	53,6	1100	16800
13	09/3	4110	156	171	0,45	46,0	1020	15200
14	25/1	4430	192	231	1,05	47,7	1080	18100
15	12/1	3950	225	259	1,02	47,0	938	13700
16	16/2	3830	166	189	0,73	36,2	998	17500
17	03/3	3600	185	207	0,77	46,3	1060	17900
18	24/2	3540	204	229	0,88	42,8	927	15600
19	06/3	3430	178	189	0,42	47,3	994	18800
20	10/2	3430	201	227	0,96	45,5	965	18300
21	11/2	4390	189	204	0,41	46,6	930	12900
22	27/2	4220	239	255	0,47	50,2	1060	19400
23	19/2	3850	224	240	0,50	50,5	1040	15700
24	03/2	3850	219	248	0,93	42,4	970	16300
25	09/1	3280	196	226	1,18	44,7	971	15100
26	28/2	3270	234	259	0,98	53,6	1080	14600
27	27/3	3040	209	238	1,24	51,7	1080	14100
28	04/1	3000	174	185	0,45	42,1	981	18400
29	24/3	2980	177	183	0,25	52,0	1040	16500



Kein Bild vorhanden



Bild A-37 Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)

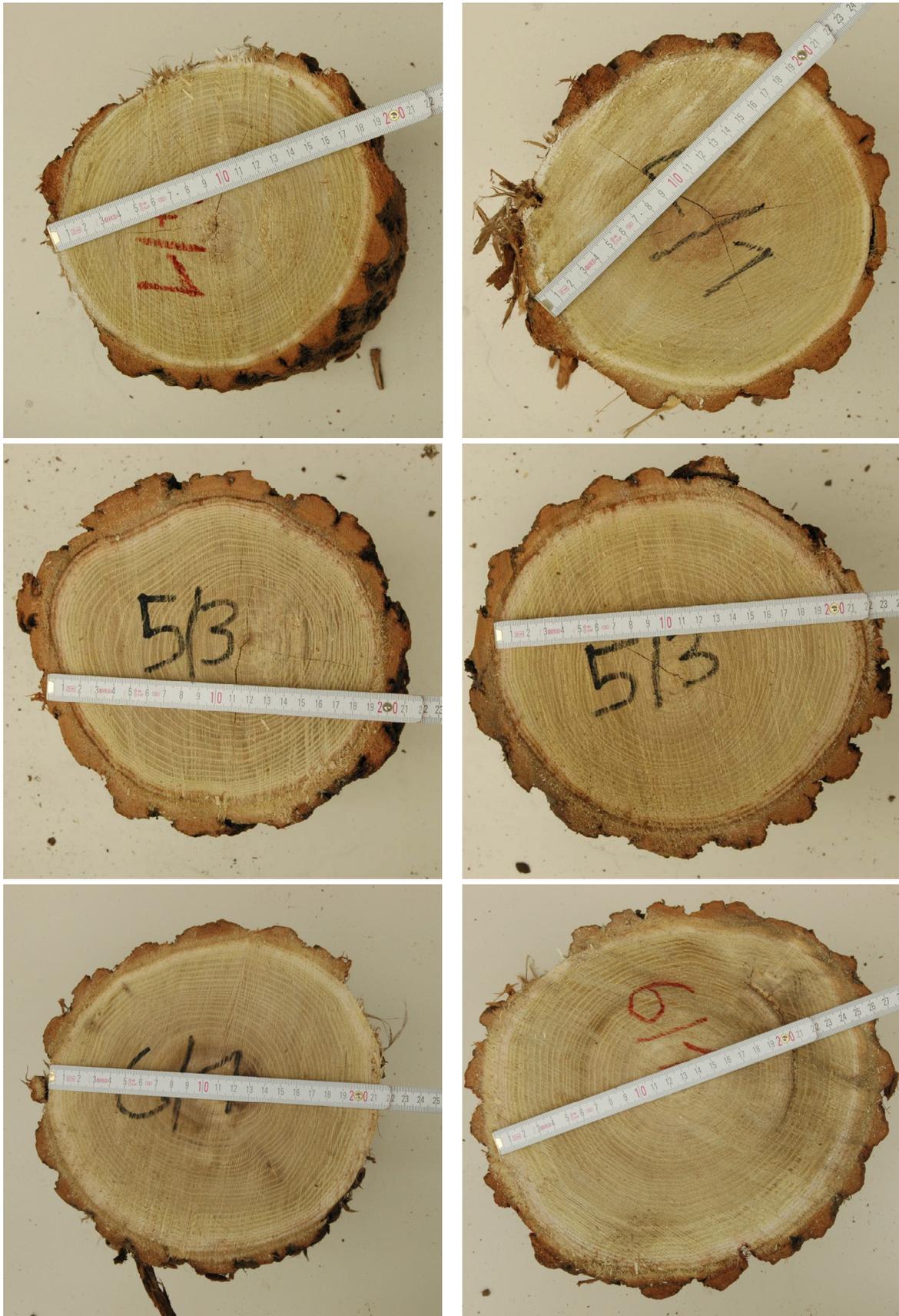


Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)

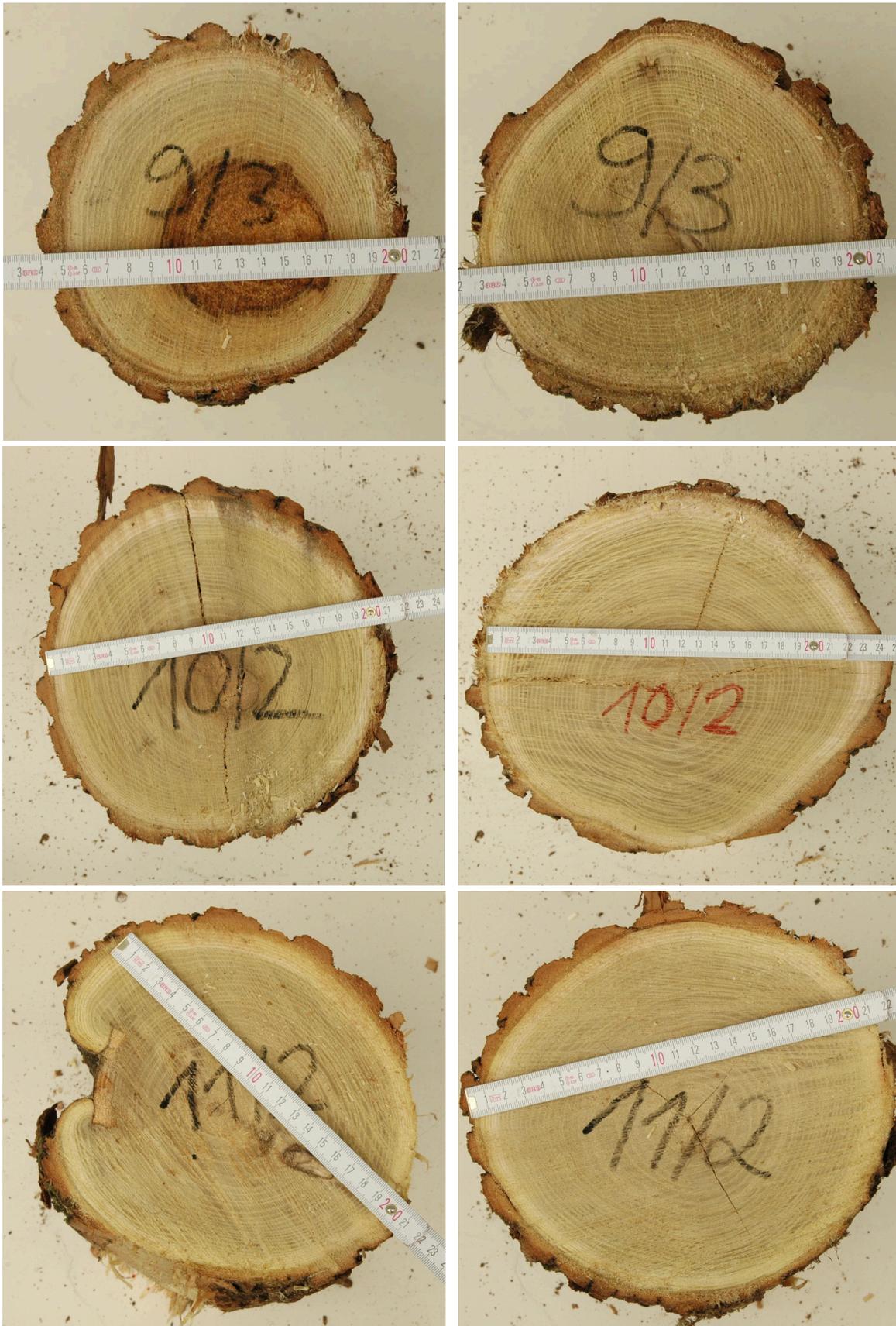


Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Kein Bild vorhanden



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)



Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)

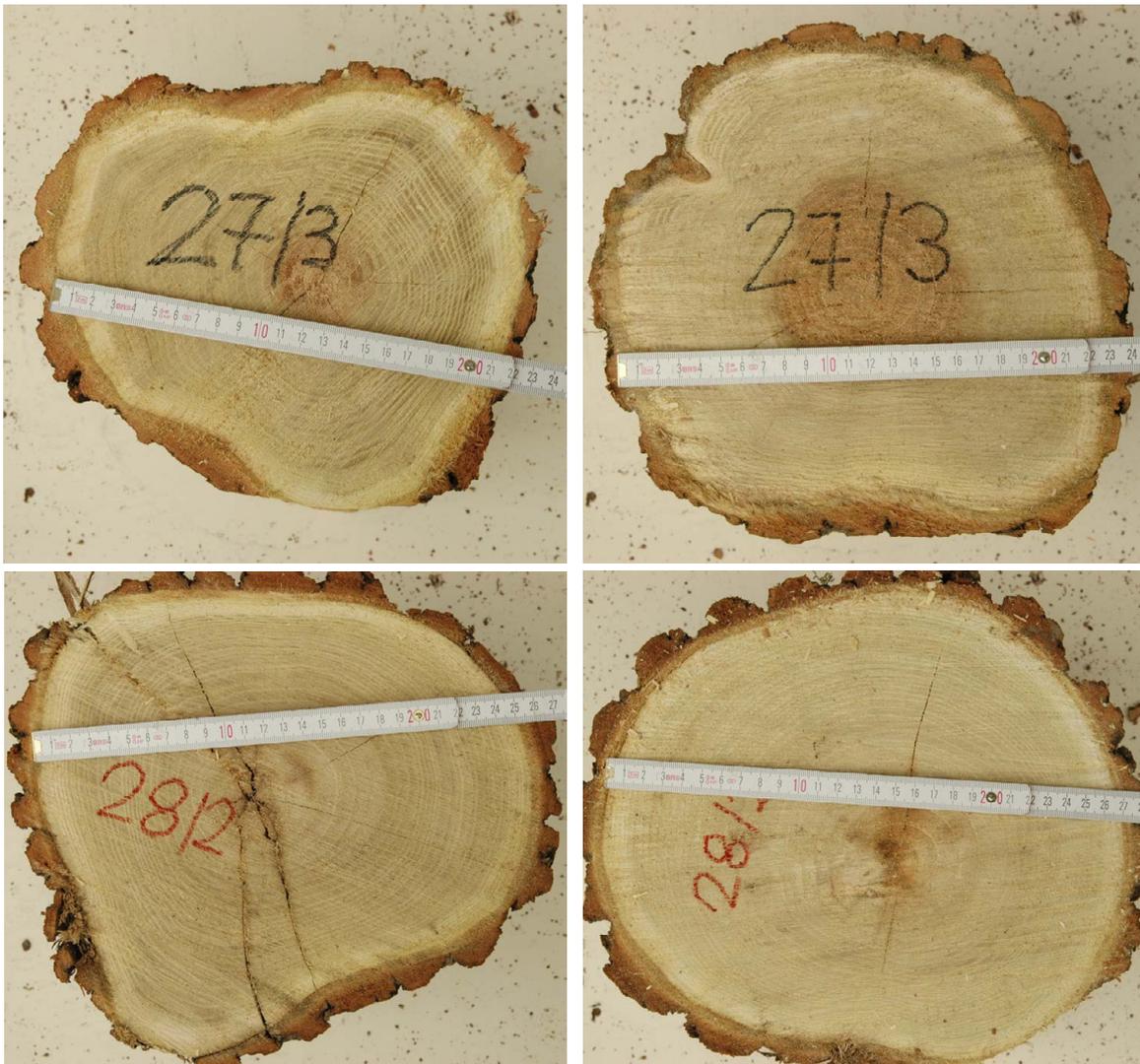


Bild A-37 (Forts.) Hirnholzflächen der beiden Referenzproben, Zopfende (links) und Stockende (rechts)

