



Kavernenfeld Hengelo

Bohrung 480

Arbeitspaket 2:

Durchführung von Versuchen
an Steinsalzproben aus dem Röt

Abschlussbericht

Auftrags-Nr.:

5145031243 vom 22.03.2004

Hannover, Dezember 2004

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE
HANNOVER**

Kavernenfeld Hengelo
Bohrung 480

Arbeitspaket 2:
Durchführung von Versuchen
an Steinsalzproben aus dem Röt

Abschlussbericht

- | | |
|------------------|--|
| 1. Autoren: | 5.1.2.e
5.1.2.e
5.1.2.e |
| 2. Auftrags-Nr.: | 5145031243 vom 22.03.2004 |
| 3. Auftraggeber: | Akzo Nobel Salt bv Hengelo, Boortorenweg 27,
7554 RS Hengelo, Niederlande |
| 4. Datum: | 21. Dezember 2004 |
| 5. Tagebuch-Nr.: | 12074/04 |

Inhaltsverzeichnis

	Blatt
1 Vorbemerkung	3
1.1 Vorgang	3
1.2 Zweck der Untersuchungen	3
1.3 Geologische und petrographische Gegebenheiten	4
1.4 Probennahme	4
1.5 Prüfkörperherstellung	4
2 Versuchsdurchführung	5
2.1 Allgemeine Bemerkungen	5
2.2 Uniaxiale Kriechversuche	5
2.3 Triaxiale Kriechversuche	6
2.4 Echt-triaxiale Verformungsversuche an Steinsalzwürfeln	6
2.4.1 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Dilatanzgrenze	6
2.4.2 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Kompressions- festigkeit	7
2.4.3 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Extensions- festigkeit	8
3 Ergebnisse der Laborversuche	8
3.1 Kriechversuche	8
3.2 Dilatanz bei echt-triaxialer Belastung an Würfelproben	9
3.3 Bruchfestigkeit bei echt-triaxialer Belastung an Würfelproben	10
4 Geotechnische Bewertung der Laborversuchsergebnisse	11
Literaturverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	13
Abbildungsverzeichnis	14
Anhang	19
Gesamtblattzahl:	82

1 Vorbemerkung

Die Firma Akzo Nobel plant, ihr Solekavernenfeld bei Hengelo zu erweitern. Aufbauend auf Untersuchungen bzw. Gutachten durch die BGR aus dem Jahre 1984 wurde die BGR unter anderem mit weiterführenden Laboruntersuchungen an Steinsalz aus zuvor genanntem Kavernenfeld beauftragt.

1.1 Vorgang

Unter der Auftragsnummer 5145031243 hat Akzo Nobel die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) am 22. 03. 04 mit der Durchführung von Laborversuchen an Steinsalzprüfkörpern beauftragt, die zuvor aus Bohrkernen der Bohrung 480 des Kavernenfeldes Hengelo gewonnen worden waren. Die Kriechuntersuchungen sowie die echt-triaxialen Versuche zur Bestimmung der Dilatanz- und Festigkeitsgrenzen unter Kompression und Extension wurden in der BGR unter dem Arbeitspaket „Durchführung von Versuchen an Steinsalzproben aus dem Röt“ durchgeführt.

Die besondere Problemstellung wurde vom Auftraggeber und der BGR auf einer gemeinsamen Besprechung am 03. 02. 04 mit Vertretern des Niederländischen Bergamtes SodM erörtert. Das sich daraus ergebende Untersuchungsziel und erweiterte Laborprogramm wurde im oben genannten Auftrag und seinem Nachtrag vom Mai 2004 zusammengefasst.

1.2 Zweck der Untersuchungen

Für den Bereich Hengelo liegen bereits die Ergebnisse geotechnischer Untersuchungen der BGR aus dem Jahre 1984 vor (LANGER 1984). Ziel der aktuellen Untersuchungen ist deshalb die Bestätigung der damals ermittelten Kennwerte oder eine Neubewertung, sowie die zusätzliche Ermittlung der Dilatanzgrenze bei Kompression und Extension.

Zur Berechnung der Standsicherheit und Konvergenz von Kavernen ist die genaue Kenntnis des mechanischen Verhaltens der anstehenden Gesteine unerlässlich. Das mechanische Verhalten der Salzgesteine wird wesentlich durch Kriechen, Dilatanz und Bruch bestimmt. Das durchgeführte geotechnische Untersuchungsprogramm diene der Erfassung und geeigneten Beschreibung dieses Verhaltens.

Hierzu wurden die Dilatanz- und Festigkeitsgrenzen der Gesteine in echt-triaxialen Kompressions- und Extensionsversuchen und ihr Kriechverhalten in uniaxialen und triaxialen Kriechversuchen geprüft und die Stoffparameter bestimmt.

Das gewählte Probenmaterial, die Präparation der Prüfkörper, die durchgeführten Versuche sowie deren Ergebnisse werden in diesem Bericht beschrieben.

Die Versuchsergebnisse werden hinsichtlich der für Salzgesteine norddeutscher Lagerstätten vorliegenden Erfahrungen bewertet.

1.3 Geologische und petrographische Gegebenheiten

Die geologische Situation der Bohrung Twenthe-Rijn 480 ist mittels eines Säulenprofils in Abbildung 1.1 vereinfacht dargestellt. Die genaue geologisch-mineralogische Aufnahme der Bohrung kann dem Bericht zum AP1 „Geologische und geochemische Untersuchungen“ entnommen werden. Hier sind auch die Kerne der gesamten Bohrung in einer Fotodokumentation zusammengefasst.

1.4 Probennahme

Die Beurteilung der Stabilität der geplanten Salzkavernen erfordert die Kenntnis der geomechanischen Kennwerte der geologischen Schichten. Deshalb wurden aus den sechs Teufenbereichen Ex1, Ex2, P1, P2, P3 und P4 Proben entnommen, um daraus zylindrische und würfelförmige Prüfkörper für geomechanische Laborversuche herzustellen (s. Abb. 1.1).

1.5 Prüfkörperherstellung

Bei der Bemessung und der Präparation der zylindrischen und würfelförmigen Gesteinsprüfkörper wurde in Anlehnung an DIN 1045, Blatt 1 verfahren.

Das Kernmaterial wurde zunächst mit einer Gesteinssäge trocken vorgeschnitten und dann auf das Prüfkörpermaß abgedreht. Die Sollmaße der zylindrischen Prüfkörper betragen für uni- und triaxiale Kriech- und Festigkeitsversuche: Länge 250 mm, Durchmesser 100 mm und an Würfeln für die echt-triaxialen Verformungsversuche 53 mm Kantenlänge. In Abhängigkeit vom Zustand der Proben und der Art und Anzahl der Bearbeitungsschritte ergaben sich geringfügige Abweichungen von diesen Sollwerten. Alle Prüfkörper wurden standardmäßig vor Versuchsbeginn geologisch – mineralogisch beschrieben, vermessen, gewogen und fotografiert. Per Ultraschallmessung wurde die Geschwindigkeit der Kompressions- und Scherwellen bestimmt. In Tabelle 1.1 sind ausgewählte Kenndaten der zylindrischen Prüfkörper der uni- und triaxialen Kriechversuche dargestellt. Die Kenndaten der Würfelprüfkörper für echt-triaxiale Untersuchungen sind aus den Tabellen 1.2 und 1.3 zu ersehen. Alle angegebenen Versuchsergebnisse beziehen sich auf die tatsächlichen Prüfkörpermaße.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Allgemeine Bemerkungen

Auftragsgemäß wurden Kriechversuche zur Bestimmung der Kriecheigenschaften, der Kriechklassen für das stationäre Kriechen, durchgeführt. Ferner sind Verformungsversuche mit konstanten Belastungsraten durchgeführt worden, aus denen Bruchfestigkeiten und Werte für die Dilatanzgrenze ermittelt wurden.

Die Festigkeit von Gesteinen ist nicht nur von der Belastung selbst, sondern auch von der Belastungsgeometrie, dem Spannungspfad, abhängig. Der Wertebereich kann anhand der beiden extremen Belastungsarten Kompression und Extension beobachtet und beschrieben werden. Da im Einflussbereich der Kavernen räumlich und zeitlich verschiedenartige Belastungsbedingungen zu erwarten sind, wurden die Festigkeits- und die Dilatanzgrenze sowohl unter Kompressions- als auch unter Extensionsbedingungen bestimmt.

Entsprechend dem Auftrag wurden in den gesteinsmechanischen Labors der BGR Prüfkörper aus den Horizonten Ex1, Ex2, P1, P2, P3 und P4 mit den nachfolgend aufgelisteten Versuchstechniken untersucht (s. Abb. 1.1):

- uniaxiale Kriechversuche an 30 zylindrischen Prüfkörpern zur Bestimmung der stationären Kriechparameter aus den Horizonten P1, P2, P3 und P4
- sechs triaxiale Kriechversuche an zylindrischen Prüfkörpern zur Bestimmung der stationären Kriechparameter aus den Horizonten P3 und P4
- Je 11 echt-triaxiale Verformungsversuche an Würfeln aus den Horizonten P1 und P2 zur Bestimmung der Dilatanz- und der Festigkeitsgrenze bei Kompression
- Zehn echt-triaxiale Verformungsversuche an Würfeln aus dem Horizont Ex1 und 14 Versuche an Material aus dem Horizont Ex2 zur Bestimmung der Dilatanz- und der Festigkeitsgrenze bei Extension

2.2 Uniaxiale Kriechversuche

Die uniaxialen Kriechversuche wurden in der Zeitstandprüfeinrichtung der BGR bei einer Temperatur von 22 °C, bei einer Regelgenauigkeit von ± 0.5 °C durchgeführt. In dieser Prüfanlage werden in einem Belastungsrahmen je 5 Proben übereinander gleichzeitig belastet. Die Maximallast beträgt 300 kN. Da die Proben sich bedingt durch die Belastung verkürzen, vergrößert sich während des Versuchsverlaufs der Probenquerschnitt. Die resultierende Vergrößerung der Querschnittsfläche bedingt ein Absinken der Spannung, die aber regelmäßig durch Erhöhung der Last wieder auf den Sollwert gebracht wird. Dies geschieht entsprechend der Empfehlung Nr. 16 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.

(HUNSCHE 1994) mit der Annahme, dass das Volumen konstant und die Probe zylinderförmig bleibt und keine Tonnenform annimmt.

Die Proben wurden zunächst mit einer Belastungsrate von ca. 1 MPa/min bis zur Anfangsprüfspannung belastet. Diese Spannung wurde dann bis zum Versuchsende konstant gehalten, bei dem sich eine annähernd konstante Kriechrate eingestellt hatte (70 Tage und mehr, s. Abb. 3.1).

2.3 Triaxiale Kriechversuche

Die triaxialen Kriechversuche wurden in triaxialen Prüfständen der BGR bei einer Temperatur von 40 °C, einem Manteldruck $p_c = 12$ MPa und einer Axialspannung $\sigma_1 = 28$ MPa durchgeführt. Die Differenzspannung $\Delta\sigma$ betrug somit 16 MPa. Wie bei den uniaxialen Versuchen wurde je nach Verformungsverlauf die Differenzspannung regelmäßig dem Sollwert angepasst.

Die Proben wurden zunächst auf Andruck gefahren, wobei $\sigma_1 \approx p_c + 0.5$ MPa, $p_c \approx 1$ MPa und $T =$ Raumtemperatur (22 °C) betrugen. Sodann erfolgte das Aufheizen auf die Versuchstemperatur. Hiernach wurden die Proben hydrostatisch bis zum Sollwert des für den Versuch geplanten Manteldrucks belastet. Als letztes erfolgte dann die deviatorische Belastung bis zum Erreichen von $\Delta\sigma_{\text{soll}}$. Diese Spannung wurde dann definitionsgemäß wie bei den uniaxialen Kriechversuchen konstant gehalten. Nach Erreichen einer annähernd konstanten Kriechrate wurden die Versuche beendet.

2.4 Echt-triaxiale Verformungsversuche an Steinsalzwürfeln

2.4.1 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Dilatanzgrenze

Zur Ermittlung der Dilatanzgrenze der Steinsalzproben wurden echt-triaxiale Verformungsversuche durchgeführt. Für diesen Versuchstyp existieren bislang keine standardisierten Empfehlungen oder Normen. Daher wurden die Regeln der BGR angewandt (HUNSCHE 1992). In der echt-triaxialen Prüfmaschine der BGR (s. Abb. 2.1) wurden hierzu würfelförmige Prüfkörper mit 53 mm Kantenlänge belastet (s. Kap. 1.5, Tab. 1.2, 1.3 und Abb. 2.2).

Bei den Versuchen zur Bestimmung der Dilatanzgrenze wurde zunächst jeder Probekörper mit den sechs Druckplatten der Prüfmaschine bei geringer allseitig gleicher Spannung konsolidiert. Danach wurden die Normalspannungen

bei konstanter mittlerer Spannung $\sigma_o = \frac{I_\sigma}{3} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ so verändert, dass

die Oktaederschubspannung $\tau_o = \sqrt{\frac{2}{3} II_s} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}$

mit 1 MPa/min anstieg. Die Spannungen und resultierenden Dehnungen aller drei Achsrichtungen wurden beobachtet und in kurzen Zeitintervallen aufge-

zeichnet. Aus diesen Daten wurde die volumetrische Dehnrates $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_3$ sowie eine effektive Scherrates $\dot{\epsilon}_{eff} = \sqrt{\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_3^2}$ (mit $\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon}_v/3$) errechnet.

Neben der volumetrischen Dehnung dient der Dehnratesquotient $r_v = \frac{-\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_{eff}}$ als

Maß für die Dilatanzveränderung unter einer bestimmten Spannung (s. Abb. 3.4 und Tab. 3.2). Der Dehnratesquotient r_v nimmt für konstante Spannungen einen konstanten Wert an (Dilatanzkonzept, CRISTESCU & HUNSCHE 1998; HUNSCHE & SCHULZE 2000). Eine genaue Dilatanzmessung ist nur bei homogener Verformung der Prüfkörper möglich, d. h. wenn mit $S_1 \dot{\epsilon}_1 + S_2 \dot{\epsilon}_2 + S_3 \dot{\epsilon}_3 \approx \tau_{eff} \cdot \dot{\epsilon}_{eff}$ (wobei $S_i = \sigma_i - \sigma_o$ und $\tau_{eff} = \sqrt{2II_S}$) die Dehnungsrichtungen den Richtungen der sie auslösenden Spannungen entsprechen. Um diesen Zustand der Koaxialität des Spannungs- und Dehnungstensors sicher zu erreichen, wurden in die 3D-Verformungsversuche jeweils mehrfach mehrstündige Phasen konstanter Spannungen eingefügt. Aus den Messungen ergeben sich die Werte für r_v . Die weitere Erhöhung der Scherspannung am Ende des Versuchs erlaubte häufig auch die Beobachtung des Bruchs.

Entsprechend dem Prüfauftrag wurden triaxiale Kompressionsversuche bei mittleren Normalspannungen von 7.5, 10, 15, 20, 30 und 40 MPa durchgeführt. Noch geringere mittlere Normalspannungen sind mit echt-triaxialen Prüfmaschinen sowohl technisch schwer beherrschbar als auch aufgrund der sehr geringen Dehnrates nur mit großem Fehler für Aussagen zur Dilatanzgrenze auswertbar. Höhere mittlere Normalspannungen als die untersuchten sind aufgrund der begrenzten Teufenlage für den Untersuchungsfall nicht von Interesse.

Details zu den jeweiligen Versuchsverläufen finden sich in Tabelle 1.2 sowie in den Abbildungen A01a bis A28b.

2.4.2 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Kompressionsfestigkeit

Die Experimente zur Bestimmung der Kurzzeitbruchfestigkeit an Würfelproben folgten dem oben beschriebenen Vorgehen in analoger Weise. Jedoch entfielen die langen Haltephasen konstanter Spannung zur Dilatanz-Bestimmung. Ausgehend von einem erhöhten isotropen Spannungszustand wurden die Spannungskomponenten mit einer mittleren Spannungsrate von 5 MPa/min so geändert, dass die Schubspannung stetig bis zum Bruch anstieg. Bei Kompressionsversuchen wurde dabei die Normalspannung in einer Achsrichtung gesteigert und in den beiden anderen Achsrichtungen gemindert, so dass die mittlere Spannung konstant blieb.

Es wurden triaxiale Kompressionsversuche in einem Intervall der mittleren Normalspannungen von 8 bis 40 MPa durchgeführt (s. Tab. 1.3 und Abb. A29a bis A39b).

2.4.3 Experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Extensionsfestigkeit

Prinzipiell erfolgten die Extensionsversuche unter den gleichen Bedingungen wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben. Jedoch wurde die Normalspannung in den Versuchen in zwei Achsrichtungen gesteigert und in der dritten Hauptrichtung so gemindert, dass die mittlere Spannung konstant blieb. Gemäß dem Prüfauftrag wurden triaxiale Extensionsversuche bei mittleren Normalspannungen zwischen 15 und 40 MPa durchgeführt (s. Tab. 1.3 sowie Abb. A40a bis A47b). Bei Extension sind geringe mittlere Normalspannungen kaum zugänglich, da die kleinste Hauptnormalspannung σ_3 schon für $\tau_o = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_o$ zu Null wird

und wiederum Zugspannungen zur Beibehaltung konstanter mittlerer Spannungen aufgebracht werden müssten. Höhere mittlere Normalspannungen sind aus oben genannten Gründen ebenfalls von geringem praktischem Interesse.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der hier geprüften Salzgesteine erforderte anfangs die mehrfache Änderung der Versuchsplanung, die Wiederholung von Einzelversuchen und die Vorkonsolidation ausgewählter Proben. Eine nachhaltige Schädigung des Gesteinsgefüges der Prüfkörper durch den Bohrvorgang konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

3 Ergebnisse der Laborversuche

3.1 Kriechversuche

Die Ergebnisse von Kriechversuchen werden bei der BGR durch ihre Aufbereitung in Form von Homogenbereichen für Berechnungen verfügbar gemacht. Ein Homogenbereich im Steinsalz ist ein Gebirgsbereich, in dem das Gestein eine ungefähr gleiche stationäre Kriechrate zeigt. Die Homogenbereiche unterscheiden sich voneinander durch den Vorfaktor V im Kriechgesetz BGRa oder BGRb. Bei der Abgrenzung der Homogenbereiche ist die stationäre Kriechrate das wichtigste Maß. Durch Vergleich mit den stationären Kriechgesetzen BGRa oder BGRb können die Kriechklassen K errechnet oder aus Abbildung 3.2 abgelesen werden, wobei außerdem folgende Beziehung gilt: $V = \frac{1}{32} \cdot 2^K$.

Die Einteilung nach Kriechklassen erfolgt für die uniaxialen Versuche bei Raumtemperatur auf der Grundlage des Kriechgesetzes BGRa. Bei Versuchen mit erhöhter Temperatur und bei triaxialen Versuchen ohne wesentliche Dilatanz wird das Kriechgesetz BGRb benutzt. Die Verwendung von Kriechklassen ist eine gute Möglichkeit, das Kriechverhalten auf überschaubare Weise darzustellen.

Die Formulierungen der Kriechgesetze BGRa und BGRb beschreiben die Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des stationären Kriechens von Steinsalz in der für die Homogenbereiche genutzten Form:

Referenzkriechgesetz BGRa:

$$\dot{\epsilon}_s = V \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n$$

$$A = 0.18 \text{ d}^{-1}$$

$$Q = 54 \text{ kJ/mol}$$

$$V = \text{Vorfaktor} \quad \sigma^* = 1 \text{ MPa (Normierung)}$$

Referenzkriechgesetz BGRb:

$$\dot{\epsilon}_s = V \left[A_1 \cdot \exp\left(\frac{-Q_1}{R \cdot T}\right) + A_2 \cdot \exp\left(\frac{-Q_2}{R \cdot T}\right) \right] \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n$$

$$A_1 = 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}$$

$$Q_1 = 42 \text{ kJ/mol}$$

$$A_2 = 2.1 \cdot 10^6 \text{ d}^{-1}$$

$$Q_2 = 113 \text{ kJ/mol}$$

$$n = 5 \quad R = 8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ/(mol} \cdot \text{K)}$$

Die ermittelten Kriechraten der uniaxialen Kriechversuche der Horizonte P1 und P2 (so3) entsprechen den Kriechklassen 4 bis 6. Dies entspricht den Kriechraten, die von LANGER (1984) ermittelt wurden.

In den Horizonten P3 und P4 (so1) wurden bei den uniaxialen Kriechversuchen Kriechraten gemessen, die den Kriechklassen 4 bis 8 entsprechen. Auch dies bestätigt die Werte von LANGER (1984). Die triaxialen Kriechversuche, die bei erhöhter Temperatur (40 °C, s. auch Tab. 3.1) durchgeführt wurden, ergaben nach BGRb die Kriechklassen 7 bis 9. Die höheren Werte im triaxialen Versuch sind wahrscheinlich darauf zurück zu führen, dass die triaxialen Kriechversuche im Gegensatz zu den uniaxialen Versuchen undrainiert durchgeführt wurden und der sehr hohe Wassergehalt von bis zu 5.1 Gew.-% (s. Bericht zum AP 1 – „Geologische und geochemische Untersuchungen“) die Verformung beschleunigt. Vergleichswerte von den Untersuchungen von LANGER (1984) liegen nicht vor, da damals keine triaxialen Kriechversuche durchgeführt wurden.

3.2 Dilatanz bei echt-triaxialer Belastung an Würfelproben

Die Dilatanzgrenze für Kompression und Extension wurde sowohl beim Nulldurchlauf der volumetrischen Verformungsgeschwindigkeit als auch während der Haltephasen ober- und unterhalb der eigentlichen Dilatanzgrenze unter

Verwendung der Dehnratenquotienten $r_V = \frac{-\dot{\epsilon}_V}{\dot{\epsilon}_{eff}}$ und mit Hilfe nachfolgender

statistischer Ausgleichsrechnung bestimmt. An die dabei beobachteten mittleren Spannungen σ_o , effektiven Scherspannungen τ_{eff} und Dehnratenquotienten r_V wurde eine Dilatanzgleichung der Form $(\tau_{eff} - \tau_{eff D}) \dot{\epsilon}_{eff}^m = -\dot{\epsilon}_V^m \sigma_o$ nach dem Verfahren der kleinsten Abstandsquadrate (MKQ) angepasst. $\tau_{eff D}$ ist dabei die effektive Scherspannung der Dilatanzgrenze. Dieses Konzept für die Beschreibung der Dilatanzentwicklung ($\dot{\epsilon}_V$) hat sich in der Vergangenheit als sehr tragfähig bei verschiedenen Steinsalztypen erwiesen (HUNSCHKE 1998). Die Dilatanzgrenze und r_V -Isolinien wurden dabei analog zur Festigkeitsgrenze mit einer Potenzfunktion gemäß $\sqrt{II_s} = \alpha \cdot I_\sigma^p$ beschrieben (s. Kap. 3.3).

Die Ergebnisse bezüglich Dilatanz unter Extensionsbedingungen finden sich in den Tabellen 3.2 und 3.4 sowie in Abbildung 3.4. Resultate der Kompressions-

versuche hinsichtlich Dilatanz sind in den Tabellen 3.2 (Teil 2) und 3.4 enthalten sowie in Abbildung 3.4 dargestellt.

3.3 Bruchfestigkeit bei echt-triaxialer Belastung an Würfelproben

Der Bruch bei Kompression wurde bei der maximal aufgenommenen Schubspannung festgelegt. Dies war bei den Versuchen problemfrei möglich, da nach dem Erreichen der Festigkeitsgrenze des Materials die aufnehmbare Schubspannung wie auch bei Zylinderproben in Kármán-Versuchen absank und somit eine eindeutige Bruchdetektion möglich war.

Im Unterschied zur Kompressionsbelastung werden unter Extensionsbedingungen Zugrisse normal zur Entlastungsrichtung generiert, die zum Materialversagen führen. Unter anderem durch die starre Einspannung des Prüfkörpers zwischen den umgebenden Lastplatten der Prüfmaschine ist jedoch die Detektion dieses Prozesses schwierig und die vereinfachende Angabe der maximal im Versuch aufgebrachten Schubspannung würde zu fehlerhaft großen Festigkeiten führen. Beim Einsetzen des Bruches der Probe werden jedoch verstärkt akustische Emissionen im Prüfkörper freigesetzt, die aus der Neugenerierung und Ausbreitung von (Mikro)-Rissen herrühren. Im Versagensfall nimmt die Rate der akustischen Emissionen extrem zu, so dass der Anfang dieser Phase als Beginn des Versagens der Probe verstanden werden kann. Dieser Ansatz hat sich in früheren Studien bewährt.

Die Definition der Festigkeiten des Materials erfolgte durch Angabe der Parameter α und p eines modifizierten Drucker-Prager-Kriteriums. Dabei ist die zweite Invariante des deviatorischen Spannungstensors I_σ als Potenzfunktion nichtlinear abhängig von der ersten Invariante des Spannungstensors I_1 in der folgenden Form: $\sqrt{II_s} = \alpha \cdot I_\sigma^p$.

In die folgenden numerischen Modellierungen fanden dabei die Parameter einer so genannten „Unteren Einhüllenden“ Eingang. Diese erfüllt die Bedingungen, dass sämtliche Messwerte auf oder oberhalb der Kurve liegen und dass außerdem die Summe der Abstandsquadrate zwischen den Messwerten und der Linie minimal ist (Methode der kleinsten Quadrate). Daher stellt sie eine konservative Angabe der Festigkeit des untersuchten Materials dar (HUNSCH & ALBRECHT 1990).

Die Ergebnisse der Bruchfestigkeit bei Extension und Kompression sind in den Tabellen 3.3 und 3.4 enthalten sowie in den Abbildungen 3.3a und 3.3b dargestellt.

4 Geotechnische Bewertung der Laborversuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Einzelversuche für jeden Horizont zusammenfassend dargestellt und bewertet.

Die Prüfung des Kriechverhaltens der Salzgesteine der Horizonte P1, P2, P3 und P4 mittels uniaxialer Kriechversuche ergab gleiche Werte wie bei den Versuchen in 1984. Die triaxialen Kriechversuche ergaben höhere Kriechklassen. Der Einfluss der gemessenen sehr hohen Feuchtegehalte ist wahrscheinlich. Ein unterschiedliches Kriechverhalten zwischen den untersuchten Horizonten konnte nicht festgestellt werden.

Die Prüfung des Dilatanz- und Bruchverhaltens der Salzgesteine der Horizonte Ex1, Ex2, P3 und P4 mittels echt-triaxialer Dilatanzuntersuchungen an Würfelproben ergab hinsichtlich der Druckfestigkeiten:

1. Die Salzgesteine der verschiedenen geprüften Horizonte besitzen, im Vergleich zu den Gesteinen norddeutscher Salzdome, geringere Festigkeiten unter Extensionsbedingungen. Die Festigkeit bei Kompression lässt hingegen keine Unterschiede erkennen.
2. Die verschiedenen Horizonte unterscheiden sich nicht hinsichtlich ihrer Bruchfestigkeit sowohl unter Extensions- als auch Kompressionsbedingungen.
3. Die Bruchgrenzkurven bei Kompression liegen erwartungsgemäß höher als die bei Extension (HUNSCH & ALBRECHT 1990). Beide können in dem dargestellten Spannungsbereich gut durch die in den Abbildungen 3.3a, 3.3b und 3.5 angegebenen Kurven entsprechend dem modifizierten Drucker-Prager-Bruchkriterium $\sqrt{II_s} = \alpha \cdot I_\sigma^p$ approximiert werden.
4. Die Ergebnisse der von der BGR im Jahre 1984 durchgeführten Kompressionsfestigkeitsuntersuchungen in Kármán-Versuchen (LANGER 1984) liegen zum Teil unter denen des neu geprüften Steinsalzes (s. Abb. 3.5).

Die Prüfung des Verformungsverhaltens der Salzgesteine der Horizonte Ex1, Ex2, P3 und P4 mittels echt-triaxialer Dilatanzuntersuchungen an Würfelproben ergab hinsichtlich der Dilatanzgrenze:

1. Das an Salzgesteinen norddeutscher Salzstöcke erprobte Verfahren zur Bestimmung der Dilatanzrelation konnte ohne jede Einschränkung angewandt werden.
2. Die Dilatanzgrenze der untersuchten Salzgesteine wurde als Funktion von Spannungsinvarianten gemäß $\sqrt{II_s} = \alpha \cdot I_\sigma^p$ bestimmt (s. Tab. 3.2 und 3.4 und Abb. 3.4).
3. Es konnte kein Unterschied hinsichtlich der Dilatanzeigenschaften der verschiedenen Horizonte festgestellt werden (s. Tab. 3.2).
4. Die Dilatanzgrenzen für Kompression und für Extension erwiesen sich als praktisch identisch. Die gefundenen Differenzen sind wesentlich kleiner als die mittleren Vertrauensbereiche der Messungen. Daher wird

eine mittlere Ausgleichskurve als Repräsentant aller Messwerte empfohlen (s. Abb. 3.4).

5. Die Dilatanzgrenze der Salzgesteine der geprüften Horizonte der Bohrung Twenthe-Rijn 480 unterscheidet sich nicht signifikant von der des Steinsalzes norddeutscher Salzstöcke (HUNSCHKE 1998) (s. Abb. 3.6).

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE HANNOVER

Im Auftrag:

5.1.2.e

5.1.2.e

– Dir. u. Prof. –
Abteilungsleiter B2

5.1.2.e

5.1.2.e

– Wiss. Direktor –

5.1.2.e

5.1.2.e

– Wiss. Angestellter –

5.1.2.e

5.1.2.e

– Geologieoberrat –
AP – Leiter

Literaturverzeichnis

LANGER, M. (1984): Geotechnische Laboruntersuchungen an Bohrkernen des Kavernenfeldes Hengelo, 18 S., 21 Anl.

HUNSCHE, U. & H. ALBRECHT (1990): Results of true triaxial strength tests on rock salt, Engineering Fracture Mechanics, Bd. 35, Nr. 4/5, S. 867-877.

HUNSCHE, U. (1992): True triaxial failure tests on cubic rock salt samples – experimental methods and results. – In: Finite Inelastic Deformations – Theory and Applications, Proc. IUTAM-Symposium Hannover, Germany 1991. Editors: BESDO, D. & E. STEIN; S. 525-536.

HUNSCHE, U. (1994): Ein- und dreiaxiale Kriechversuche an Gesteinsproben. Empfehlung Nr. 16 des Arbeitskreises 19 – Versuchstechnik im Fels – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. Bautechnik, Bd. 71, S. 500-505.

HUNSCHE, U. (1998): Determination of the dilatancy boundary and damage up to failure for four types of rock salt at different stress geometries. – In: The Mechanical Behavior of Salt IV, Proc. of the Fourth Conf., (MECASALT IV), Montreal 1996. Editors: AUBERTIN, M. & H. R. HARDY, Jr.; S. 163–174.

CRISTESCU, N. & U. HUNSCHE (1998): Time Effects in Rock Mechanics.-Series: Materials, Modelling and Computation. John Wiley & Sons, Chichester (UK), 342 S.

HUNSCHE, U. & O. SCHULZE (2000): Measurement and Calculation of the Evolution of Dilatancy and Permeability in Rock Salt. – In: Proc. 3. Workshop Kluft-Aquifere “Gekoppelte Prozesse in Geosystemen”, Hannover Nov. 2000. Editors: KOLDITZ, O. ET AL., Bericht 60/2000, S. 107-113.

EICKEMEIER, R. & S. HEUSERMANN (2004): Ermittlung der zulässigen Beanspruchung von Pfeilern im Kavernenfeld Hengelo, 32 S.

Tabellenverzeichnis

Nr.	Titel
1.1	Ausgewählte Kenndaten der zylindrischen Prüfkörper für Kriechversuche
1.1a	Legende zu Tabelle 1.1
1.2	Probekörper und Versuchsbedingungen zur Prüfung der echt-triaxialen Dilatanz in Stufenversuchen
1.3	Probekörper und Versuchsbedingungen zur Prüfung der echt-triaxialen Kurzzeitbruchfestigkeit
3.1	Ergebnisdaten der uni- und triaxialen Kriechversuche
3.2	Spannungen und Dehnraten als Ergebnis der echt-triaxialen Dilatanz-
Teil 1	versuche

- 3.2 Spannungen und Dehnraten als Ergebnis der echt-triaxialen Dilatanz-
Teil 2 versuche bei Extension
- 3.3 Spannungs-Relationen beim Bruch in echt-triaxialen Kurzzeitbruch-
versuchen
- 3.4 Zusammenstellung der Festigkeitsparameter des modifizierten
Drucker-Prager-Modells und Parameter der Dilatanzgrenze für alle
Horizonte bei Kompression und Extension

Abbildungsverzeichnis

Nr.	Titel
1.1	Säulenprofil der Bohrung Twenthe-Rijn 480 im Teufenbereich der geplanten Kavernen mit Übersicht der geprüften Proben (E - Echt-triaxiale Extension, K - Echt-triaxiale Kompression, Kr – Kriechversuch)
2.1	Zentrum der echt-triaxialen Prüfmaschine mit Steinsalzprobe, Kantenlänge: 53 mm
2.2	Würfelproben vor (links) und nach dem echt-triaxialen Versuch: Kompression (Mitte) und Extension (rechts)
3.1	Verformungsraten über der Laufzeit ausgewählter uniaxialer Kriechversuche
3.2	Kriechklassen nach BGRa
3.3a	Festigkeit des Steinsalzes bei echt-triaxialer Kompression; "Untere Einhüllende" gemäß modifiziertem Drucker-Prager-Kriterium
3.3b	Festigkeit des Steinsalzes bei echt-triaxialer Extension; "Untere Einhüllende" gemäß modifiziertem Drucker-Prager-Kriterium
3.4	Dilatanzgrenze des geprüften Steinsalzes bei Kompressions und Extension sowie als Mittel aller Messungen; Pfeile geben die theoretische Lage der Messwerte bei Erfüllung der Dilatanzgleichung an (Fehlermaß)
3.5	Festigkeitsgrenzen des geprüften Steinsalzes bei Kompression und Extension sowie die Dilatanzgrenze im Spannungsraum ermittelt unter echt-triaxialen Bedingungen (Quadratische Symbole); Kármán-Versuche von LANGER (1984) an Steinsalz (Rötsalz Typen A und C) der Bohrung Hengelo 310 sowie Vorversuche (Kreissymbole).
3.6	Vergleich der Festigkeitsgrenzen des geprüften Steinsalzes bei Kompression und Extension mit den von EICKEMEIER & HEUSERMANN (2004) für Rötsalz verwendeten Ansätzen. Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Dilatanzgrenze mit der von CRISTESCU & HUNSCHE (1998) allgemein für Steinsalz angegebenen.

- A01a Probe Twenthe-Rijn480/08/006/02 Versuchsführung (Extension)
- A01b Probe Twenthe-Rijn480/08/006/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A02a Probe Twenthe-Rijn480/08/006/03 Versuchsführung (Extension)
- A02b Probe Twenthe-Rijn480/08/006/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A03a Probe Twenthe-Rijn480/08/006/04 Versuchsführung (Extension)
- A03b Probe Twenthe-Rijn480/08/006/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A04a Probe Twenthe-Rijn480/08/006/01 Versuchsführung (Extension)
- A04b Probe Twenthe-Rijn480/08/006/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A05a Probe Twenthe-Rijn480/08/003/04 Versuchsführung (Extension)
- A05b Probe Twenthe-Rijn480/08/003/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A06a Probe Twenthe-Rijn480/08/003/03 Versuchsführung (Extension)
- A06b Probe Twenthe-Rijn480/08/003/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A07a Probe Twenthe-Rijn480/08/003/02 Versuchsführung (Extension)
- A07b Probe Twenthe-Rijn480/08/003/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A08a Probe Twenthe-Rijn480/08/003/01 Versuchsführung (Extension)
- A08b Probe Twenthe-Rijn480/08/003/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A09a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/04 Versuchsführung (Extension)
- A09b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A10a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/03 Versuchsführung (Extension)
- A10b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A11a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/01 Versuchsführung (Kompression)
- A11b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A12a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/02 Versuchsführung (Extension)
- A12b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A13a Probe Twenthe-Rijn480/08/008/03 Versuchsführung (Kompression)

- A13b Probe Twenthe-Rijn480/08/008/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A14a Probe Twenthe-Rijn480/08/010/01 Versuchsführung (Kompression)
- A14b Probe Twenthe-Rijn480/08/010/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A15a Probe Twenthe-Rijn480/08/010/02 Versuchsführung (Kompression)
- A15b Probe Twenthe-Rijn480/08/010/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A16a Probe Twenthe-Rijn480/08/010/03 Versuchsführung (Kompression)
- A16b Probe Twenthe-Rijn480/08/010/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A17a Probe Twenthe-Rijn480/09/001/01 Versuchsführung (Kompression)
- A17b Probe Twenthe-Rijn480/09/001/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A18a Probe Twenthe-Rijn480/10/007/04 Versuchsführung (Kompression)
- A18b Probe Twenthe-Rijn480/10/007/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A19a Probe Twenthe-Rijn480/09/001/02 Versuchsführung (Kompression)
- A19b Probe Twenthe-Rijn480/09/001/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A20a Probe Twenthe-Rijn480/10/006/02 Versuchsführung (Kompression)
- A20b Probe Twenthe-Rijn480/10/006/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A21a Probe Twenthe-Rijn480/10/006/03 Versuchsführung (Kompression)
- A21b Probe Twenthe-Rijn480/10/006/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A22a Probe Twenthe-Rijn480/10/006/04 Versuchsführung (Kompression)
- A22b Probe Twenthe-Rijn480/10/006/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A23a Probe Twenthe-Rijn480/10/006/05 Versuchsführung (Kompression)
- A23b Probe Twenthe-Rijn480/10/006/05 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A24a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/01 Versuchsführung (Extension)
- A24b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A25a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/02 Versuchsführung (Extension)
- A25b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

- A26a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/03 Versuchsführung (Extension)
- A26b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A27a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/05 Versuchsführung (Extension)
- A27b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/05 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A28a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/06 Versuchsführung (Extension)
- A28b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/06 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A29a Probe Twenthe-Rijn480/10/008/02 Versuchsführung (Kompression)
- A29b Probe Twenthe-Rijn480/10/008/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A30a Probe Twenthe-Rijn480/10/008/03 Versuchsführung (Kompression)
- A30b Probe Twenthe-Rijn480/10/008/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A31a Probe Twenthe-Rijn480/10/008/04 Versuchsführung (Kompression)
- A31b Probe Twenthe-Rijn480/10/008/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A32a Probe Twenthe-Rijn480/10/010/02 Versuchsführung (Kompression)
- A32b Probe Twenthe-Rijn480/10/010/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A33a Probe Twenthe-Rijn480/10/010/03 Versuchsführung (Kompression)
- A33b Probe Twenthe-Rijn480/10/010/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A34a Probe Twenthe-Rijn480/10/010/04 Versuchsführung (Kompression)
- A34b Probe Twenthe-Rijn480/10/010/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A35a Probe Twenthe-Rijn480/09/004/02 Versuchsführung (Kompression)
- A35b Probe Twenthe-Rijn480/09/004/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A36a Probe Twenthe-Rijn480/09/004/03 Versuchsführung (Kompression)
- A36b Probe Twenthe-Rijn480/09/004/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A37a Probe Twenthe-Rijn480/09/004/04 Versuchsführung (Kompression)
- A37b Probe Twenthe-Rijn480/09/004/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A38a Probe Twenthe-Rijn480/09/007/01 Versuchsführung (Kompression)

- A38b Probe Twenthe-Rijn480/09/007/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A39a Probe Twenthe-Rijn480/09/007/02 Versuchsführung (Kompression)
- A39b Probe Twenthe-Rijn480/09/007/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A40a Probe Twenthe-Rijn480/05/002/03 Versuchsführung (Extension)
- A40b Probe Twenthe-Rijn480/05/002/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A41a Probe Twenthe-Rijn480/05/002/02 Versuchsführung (Extension)
- A41b Probe Twenthe-Rijn480/05/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A42a Probe Twenthe-Rijn480/05/002/01 Versuchsführung (Extension)
- A42b Probe Twenthe-Rijn480/05/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A43a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/08 Versuchsführung (Extension)
- A43b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/08 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A44a Probe Twenthe-Rijn480/05/001/07 Versuchsführung (Extension)
- A44b Probe Twenthe-Rijn480/05/001/07 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A45a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/01 Versuchsführung (Extension)
- A45b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A46a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/02 Versuchsführung (Extension)
- A46b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation
- A47a Probe Twenthe-Rijn480/08/002/08 Versuchsführung (Extension)
- A47b Probe Twenthe-Rijn480/08/002/08 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

Anhang

Tab. 1.1 Ausgewählte Kenndaten der zylindrischen Prüfkörper für Kriechversuche

File-nummer	Material-nummer	Teufe [m]	Stratig. Schicht	Stratig. Hor.	Kristall.	Einf. [°]	Nebengemenge	Dichte [kg/m ³]	E-Modul [GPa]	Poisson-Zahl	Versuchsdauer [d]	Modus
04162	480/05/005/02	424.87	so3	P1	m,g	-	A/T8/9	2176	-	-	60	Kr1
04163	480/05/008/02	427.20	so3	P1	m,g	90	A/T8/9	2174	-	-	60	Kr1
04164	480/05/008/03	427.81	so3	P1	m,g	-	A/T8/9	2177	-	-	60	Kr1
04165	480/05/009/02	428.60	so3	P1	m,g	-	A/T8/9	2181	-	-	60	Kr1
04166	480/05/010/02	429.13	so3	P1	m,g	-	A/T8/9	2177	-	-	60	Kr1
04168	480/06/002/03	430.13	so3	P1	g	-	A/T8/9	2167	-	-	52	Kr1
04167	480/06/002/02	430.87	so3	P2	g	-	A/T8/9	2180	-	-	52	Kr1
04169	480/06/003/02	432.07	so3	P2	g,2x	-	A/T9	2177	-	-	52	Kr1
04170	480/06/003/03	432.33	so3	P2	g	-	A/T9	2172	-	-	52	Kr1
04171	480/06/005/02	433.80	so3	P2	g	0	A/T9	2205	-	-	52	Kr1
04045	480/08/008/02	454.34	so1	P3	m,3g	-	A2,T9	2179	-	-	70	Kr1
04046	480/09/002/01	457.85	so1	P3	m,3g	-	A3x2	2174	-	-	50	Kr3
04047	480/09/002/02	458.10	so1	P3	f,m,3g	-	A6	2151	-	-	84	Kr1
04048	480/09/002/03	458.35	so1	P3	m,f,3g	10	A3	2177	24.0	0.38	70	Kr1
04049	480/09/003/01	458.65	so1	P3	m,f,3g	0	A6	2159	25.7	0.36	70	Kr3
04050	480/09/003/02	458.90	so1	P3	m,f,3g	0	A3	2165	27.3	0.35	84	Kr1
04051	480/09/004/01	459.75	so1	P3	m,f,3g	0	A6	2155	28.3	0.33	84	Kr1
04052	480/09/005/01	460.74	so1	P3	m,f,3g	10	A3x2	2149	-	-	70	Kr1
04053	480/09/005/02	461.00	so1	P3	m,f,3g	-	-	2149	30.3	0.31	70	Kr1
04054	480/09/005/03	461.32	so1	P3	m,f,3g	5	A2,A3x2	2159	28.0	0.34	84	Kr1
04055	480/09/006/01	461.78	so1	P3	m,f,3g	0	A6x2	2148	29.7	0.33	61	Kr3
04056	480/09/006/02	462.06	so1	P3	m,f,3g	30	A6	2151	30.3	0.32	84	Kr1
04057	480/09/010/01	465.53	so1	P4	g	-	T/A3/9	2204	-	-	73	Kr1
04059	480/10/003/01	468.31	so1	P4	g	-	T/A3/9	2180	-	-	93	Kr1
04060	480/10/004/01	468.72	so1	P4	g	10	A3/8	2181	28.4	0.35	75	Kr3
04061	480/10/004/02	469.03	so1	P4	g	-	T/A3/9	2226	-	-	93	Kr1
04062	480/10/005/01	469.90	so1	P4	g	-	T/A3/9	2209	-	-	75	Kr3
04063	480/10/006/01	470.60	so1	P4	g	-	A6,T5	2183	28.4	0.35	73	Kr1
04064	480/10/007/01	471.39	so1	P4	g	-	A/T 3/6/9	2190	-	-	93	Kr1
04066	480/10/007/03	471.95	so1	P4	g,x	-	A/T 3/6/9	2182	-	-	73	Kr1
04067	480/10/008/01	472.36	so1	P4	g	-	A/T 3/6/9	2182	-	-	93	Kr1
04068	480/10/009/01	473.42	so1	P4	g,m,1x	0	2xA3,1xA6	2180	-	-	82	Kr3
04069	480/10/009/02	473.67	so1	P4	f,2m	0	6xA6	2165	29.1	0.34	73	Kr1
04070	480/10/010/01	473.85	so1	P4	f,2m	0	2xA6	2159	-	-	93	Kr1

Tab. 1.1a Legende zu Tab. 1.1

Kristallinität:	f - fein	1 -	vereinzelt
	m - mittel	2 -	gelegentlich
	g - grob	3 -	partienweise
	x - klastisch		
Einfallen:	der Schichten aus der Horizontalen [°]		
Neben-	A - Anhydrit	2	verfaltete
gemenge:	T - Ton		durchgehende Bänder
	/ - Nebengemenge	3	und Linien
	- - vermengt		zerrissene verfaltete
	kein Nebengemenge		Bänder und Linien,
	xi - vorhanden	5	Flockenlinien
	Anzahl der Linien	6	Flocken unregelmäßig
			verteilt
		8	Schlieren, Wolken,
			Staub schwach diffus
		9	zoniert
			vereinzelt Flocken,
			Schlieren, Spots
			Säume,
			Zwickelfüllungen
Modus:	Kr1 – uniaxialer Kriechversuch		
	Kr3 – triaxialer Kriechversuch		

Tab. 1.2 Probekörper und Versuchsbedingungen zur Prüfung der echt-triaxialen Dilatanz in Stufenversuchen

File-nummer	Material-nummer	Teufe [m]	Stratigraphie Schicht	Dichte [kg/m³]	Seitenlängen [mm]			Versuchsdatum	Temperatur [°C]	Feuchte rel. [%]	Modus	Mittl. Spannung [MPa]
					1/3	2/4	5/6					
04017	480/08/006/02	452.21	so1	2200	53.002	52.953	52.985	27.04.04	26	28	Ext.	30
04018	480/08/006/03	452.27	so1	2173	52.985	52.962	52.987	28.04.04	27	28	Ext.	20
04019	480/08/006/04	453.33	so1	2198	52.967	52.942	52.998	04.05.04	27	28	Ext.	12
04016	480/08/006/01	452.15	so1	2196	52.993	52.968	53.002	17.05.04	27	28	Ext.	20
04015	480/08/003/04	449.48	so1	2153	53.005	52.942	52.947	24.05.04	25	27	Ext.	30
04014	480/08/003/03	449.42	so1	2154	52.925	52.933	53.008	25.05.04	26	26	Ext.	12
04013	480/08/003/02	449.36	so1	2150	52.995	52.938	52.960	15.06.04	26	31	Ext.	40
04012	480/08/003/01	449.30	so1	2150	53.002	52.930	52.965	17.06.04	26	32	Ext.	30
04011	480/08/002/04	448.48	so1	2149	52.992	52.972	52.912	07.07.04	26	32	Ext.	20
04010	480/08/002/03	448.42	so1	2164	52.983	52.968	52.958	09.07.04	26	32	Ext.	10
04086	480/08/002/06	448.70	so1	2155	52.982	52.887	53.023	26.07.04	26	31	Komp.	30-20
04087	480/08/002/07	448.75	so1	2154	53.005	52.938	53.010	29.07.04	27	31	Ext.	40
04101	480/08/008/03	454.79	so1	2142	53.045	53.037	53.030	10.08.04	29	33	Komp.	40-30
04102	480/08/010/01	456.30	so1	2180	53.038	53.045	53.033	12.08.04	28	32	Komp.	40
04103	480/08/010/02	456.35	so1	2208	53.040	53.042	53.033	17.08.04	28	32	Komp.	30-20
04104	480/08/010/03	456.40	so1	2160	53.038	53.025	53.033	19.08.04	28	33	Komp.	20-10
04105	480/09/001/01	457.61	so1	2205	53.063	53.072	53.027	24.08.04	27	31	Komp.	15-7.5
04119	480/10/007/04	472.20	so1	2209	53.028	52.963	53.052	25.08.04	28	31	Komp.	40-30
04106	480/09/001/02	457.66	so1	2171	53.038	53.018	53.023	30.08.04	27	30	Komp.	40
04115	480/10/006/02	470.93	so1	2184	53.047	53.038	52.998	07.09.04	27	31	Komp.	40-30
04116	480/10/006/03	470.99	so1	2190	53.012	53.092	53.037	08.09.04	27	30	Komp.	30-20
04117	480/10/006/04	471.11	so1	2184	53.008	53.000	53.038	13.09.04	27	30	Komp.	20-10
04118	480/10/006/05	471.17	so1	2262	53.088	53.038	53.038	15.09.04	27	29	Komp.	15-7.5
04150	480/05/001/05	421.28	so3	2176	53.028	53.015	53.015	16.09.04	27	28	Ext.	20-10
04146	480/05/001/01	421.04	so3	2161	53.002	53.020	52.997	20.09.04	27	29	Ext.	30-20
04147	480/05/001/02	421.10	so3	2165	52.982	53.000	53.003	22.09.04	27	29	Ext.	40
04148	480/05/001/03	421.16	so3	2188	53.008	52.983	52.988	23.09.04	26	30	Ext.	40-30
04151	480/05/001/06	421.34	so3	2195	53.030	52.997	53.028	30.09.04	27	30	Ext.	15-7.5

Tab. 1.3 Probekörper und Versuchsbedingungen zur Prüfung der echt-triaxialen Kurzzeitbruchfestigkeit

File-nummer	Material-nummer	Teufe [m]	Stratigraphie Schicht	Hor.	Dichte [kg/m³]	Seitenlängen [mm] 1/3 2/4 5/6	Versuchsdatum	Temperatur [°C]	Feuchte rel. [%]	Modus	Mittl. Spang. [MPa]
04120	480/10/008/02	472.84	so1	P 4	2165	53.0517 52.9867 53.0583	04.10.04	23	37	Komp.	40
04121	480/10/008/03	472.91	so1	P 4	2271	53.065 52.988 53.040	05.10.04	26	36	Komp.	30
04122	480/10/008/04	472.98	so1	P 4	2173	52.975 53.112 53.057	06.10.04	27	36	Komp.	20
04123	480/10/010/02	474.19	so1	P 4	2160	53.017 53.087 53.002	06.10.04	27	36	Komp.	15
04124	480/10/010/03	474.25	so1	P 4	2166	53.007 53.070 53.040	07.10.04	26	37	Komp.	8
04125	480/10/010/04	474.33	so1	P 4	2161	53.058 53.028 53.058	27.10.04	25	30	Komp.	20
04107	480/09/004/02	460.27	so1	P 3	2141	53.028 53.012 53.025	28.10.04	26	30	Komp.	40
04108	480/09/004/03	460.32	so1	P 3	2126	53.007 53.008 53.013	28.10.04	25	30	Komp.	30
04109	480/09/004/04	460.37	so1	P 3	2136	53.010 53.017 53.012	01.11.04	25	31	Komp.	20
04111	480/09/007/01	462.77	so1	P 3	2141	53.015 53.002 53.035	03.11.04	25	32	Komp.	15
04112	480/09/007/02	462.82	so1	P 3	2148	53.022 53.010 53.038	04.11.04	23	36	Komp.	8
04156	480/05/002/03	422.35	so3	Ex 1	2186	53.023 52.992 53.003	05.11.04	25	32	Ext.	20
04155	480/05/002/02	422.29	so3	Ex 1	2220	52.968 52.983 53.022	08.11.04	25	27	Ext.	30
04154	480/05/002/01	422.23	so3	Ex 1	2222	52.993 53.020 53.015	10.11.04	23	26	Ext.	40
04153	480/05/001/08	421.46	so3	Ex 1	2187	53.022 53.020 53.025	10.11.04	25	24	Ext.	15
04152	480/05/001/07	421.40	so3	Ex 1	2175	53.010 52.995 53.020	15.11.04	25	23	Ext.	25
04008	480/08/002/01	448.30	so1	Ex 2	2259	52.998 52.935 52.953	17.11.04	24	26	Ext.	25
04009	480/08/002/02	448.36	so1	Ex 2	2234	52.968 52.957 52.958	18.11.04	25	26	Ext.	40
04088	480/08/002/08	448.80	so1	Ex 2	2155	53.008 52.933 52.995	18.11.04	25	27	Ext.	20

Tab. 3.1 Ergebnisdaten der uni- und triaxialen Kriechversuche

File-nummer	Material-nummer	Horizont	Modus	¹ [MPa]	³ [MPa]	[MPa]	Feuchte rel. [%]	Temperatur [°C]	stat. Kriechrate [1/d] • 10 ⁻⁵	Kriech- klasse	wahre Teilverformung [%]
04162	480/05/005/02	P1	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	1.1	4	0.689
04163	480/05/008/02	P1	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	1.3	5	0.614
04164	480/05/008/03	P1	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	2.6	6	0.918
04165	480/05/009/02	P1	Kr1	12	0	12	45	22	1.2	4	0.631
04166	480/05/010/02	P1	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	2.4	5	0.961
04168	480/06/002/03	P1	Kr1	12	0	12	45	22	2.5	6	0.768
04167	480/06/002/02	P2	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	2.7	6	0.713
04169	480/06/003/02	P2	Kr1	12	0	12	45	22	3.1	6	0.776
04170	480/06/003/03	P2	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	2.4	5	0.784
04171	480/06/005/02	P2	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	1.2	5	0.543
04045	480/08/008/02	P3	Kr1	12	0	12	45	22	1.9	5	1.101
04046	480/09/002/01	P3	Kr3	16	0	16	-	40	44.0	9	4.161
04047	480/09/002/02	P3	Kr1	12	0	12	45	22	4.1	6	1.765
04048	480/09/002/03	P3	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	2.7	6	1.465
04049	480/09/003/01	P3	Kr3	28	12	16	-	40	48.0	9	0.999
04050	480/09/003/02	P3	Kr1	12	0	12	45	22	2.5	6	1.328
04051	480/09/004/01	P3	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	2.7	6	1.711
04052	480/09/005/01	P3	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	5.1	7	1.923
04053	480/09/005/02	P3	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	3.1	6	1.331
04054	480/09/005/03	P3	Kr1	12.1	0	12.1	45	22	1.5	5	1.208
04055	480/09/006/01	P3	Kr3	28	12	16	-	40	52.0	9	5.210
04056	480/09/006/02	P3	Kr1	12	0	12	45	22	3.9	6	1.554
04057	480/09/010/01	P4	Kr1	12	0	12	45	22	3.1	6	0.794
04059	480/10/003/01	P4	Kr1	12	0	12	45	22	2.7	6	0.969
04060	480/10/004/01	P4	Kr3	30	12	18	-	42	61.0	9	6.840
04061	480/10/004/02	P4	Kr1	12	0	12	45	22	1.1	4	0.514
04062	480/10/005/01	P4	Kr3	28	12	16	-	40	19.0	7	3.055
04063	480/10/006/01	P4	Kr1	12.2	0	12.2	45	22	2.6	5	0.809
04064	480/10/007/01	P4	Kr1	12	0	12	45	22	2.8	6	1.103
04066	480/10/007/03	P4	Kr1	12	0	12	45	22	4.3	6	1.606
04067	480/10/008/01	P4	Kr1	12	0	12	45	22	2.6	6	1.265
04068	480/10/009/01	P4	Kr3	28	12	16	-	40	37.0	8	4.918
04069	480/10/009/02	P4	Kr1	11.9	0	11.9	45	22	11.0	8	2.191
04070	480/10/010/01	P4	Kr1	12	0	12	45	22	3.3	6	1.331

Tab. 3.2 Spannungen und Dehnraten als Ergebnis der echt-triaxialen Dilatanzversuche
(Teil 1)

File-nummer	Material - nummer	Horizont	Modus	Ziel	Oktaederspannung [MPa]		Dehnraten-Quotient (rv)	$II_S^{0.5}$ [MPa]		Differenz
					normal	tangential		Grenze (rv=0)	rv-Modell	
04146	480/05/001/01	Ex 1	Ext.	rv-Wert	30.10	10.91	-0.06	13.58	14.92	-1.55
04146	480/05/001/01	Ex 1	Ext.	rv-Wert	30.10	12.09	-0.10	13.58	15.85	-1.05
04147	480/05/001/02	Ex 1	Ext.	rv-Wert	40.21	12.58	0.00	15.91	15.91	-0.49
04147	480/05/001/02	Ex 1	Ext.	rv-Wert	40.14	14.22	-0.09	15.89	18.43	-1.00
04148	480/05/001/03	Ex 1	Ext.	rv-Wert	40.19	13.12	-0.01	15.90	16.22	-0.16
04148	480/05/001/03	Ex 1	Ext.	rv-Wert	40.18	14.27	-0.09	15.90	18.43	-0.94
04150	480/05/001/05	Ex 1	Ext.	rv-Wert	20.06	9.81	-0.14	10.89	13.00	-0.98
04151	480/05/001/06	Ex 1	Ext.	rv-Wert	15.09	8.45	-0.12	9.32	10.59	-0.24
04151	480/05/001/06	Ex 1	Ext.	D-Grenze	15.05	7.24	0.56	9.31	3.32	5.55
04146	480/05/001/01	Ex 1	Ext.	D-Grenze	21.90	7.65	0.12	11.42	9.57	-0.21
04147	480/05/001/02	Ex 1	Ext.	D-Grenze	25.08	7.56	0.15	12.29	9.55	-0.28
04148	480/05/001/03	Ex 1	Ext.	D-Grenze	24.37	7.66	0.17	12.10	9.05	0.34
04150	480/05/001/05	Ex 1	Ext.	D-Grenze	18.09	7.68	0.09	10.29	9.06	0.35
04018	480/08/006/03	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.10	9.69	-0.08	10.90	12.11	-0.25
04018	480/08/006/03	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.06	11.56	-0.18	10.89	13.48	0.68
04018	480/08/006/03	Ex 2	Ext.	rv-Wert	19.92	13.46	-0.33	10.85	15.53	0.96
04019	480/08/006/04	Ex 2	Ext.	rv-Wert	12.04	5.91	-0.05	8.24	8.72	-1.48
04019	480/08/006/04	Ex 2	Ext.	rv-Wert	12.04	7.88	-0.19	8.24	9.89	-0.24
04019	480/08/006/04	Ex 2	Ext.	rv-Wert	12.04	7.87	-0.04	8.24	8.61	1.02
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.12	9.67	-0.19	10.90	13.74	-1.89
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.06	11.59	-0.27	10.89	14.74	-0.55
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.01	11.54	-0.26	10.87	14.59	-0.46
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	19.94	13.44	-0.35	10.85	15.87	0.59
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	19.93	13.44	-0.36	10.85	15.94	0.53
04012	480/08/003/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	30.06	13.21	-0.06	13.57	14.89	1.29
04011	480/08/002/04	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.08	10.38	-0.07	10.89	11.96	0.75
04011	480/08/002/04	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.09	10.38	-0.14	10.89	12.90	-0.18
04010	480/08/002/03	Ex 2	Ext.	rv-Wert	10.05	4.63	0.50	7.47	3.91	1.77
04010	480/08/002/03	Ex 2	Ext.	rv-Wert	10.10	4.67	0.31	7.49	5.24	0.48
04087	480/08/002/07	Ex 2	Ext.	rv-Wert	40.13	12.54	0.01	15.89	15.70	-0.34
04087	480/08/002/07	Ex 2	Ext.	rv-Wert	40.06	15.04	-0.09	15.88	18.56	-0.14
04087	480/08/002/07	Ex 2	Ext.	rv-Wert	40.07	15.01	-0.11	15.88	19.05	-0.67
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	D-Grenze	20.19	10.48	-0.24	10.93	14.47	-1.63
04013	480/08/003/02	Ex 2	Ext.	D-Grenze	21.71	9.21	0.00	11.37	11.37	-0.08
04012	480/08/003/01	Ex 2	Ext.	D-Grenze	17.67	7.66	0.13	10.16	8.50	0.87
04011	480/08/002/04	Ex 2	Ext.	D-Grenze	15.73	8.03	0.10	9.53	8.41	1.43

**Tab. 3.2 Spannungen und Dehnraten als Ergebnis der echt-
(Teil 2) triaxialen Dilatanzversuche**

File- nummer	Material - nummer	Horizont	Modus	Ziel	Oktaderspannung [MPa]		Dehnraten- Quotient (rv)	$\Pi_S^{0.5}$ [MPa]		Differenz
					normal	tangential		Grenze (rv=0)	rv-Modell	
04087	480/08/002/07	Ex 2	Ext.	D-Grenze	31.14	9.61	0.11	13.84	11.42	0.35
04017	480/08/006/02	Ex 2	Ext.	rv-Wert	30.03	15.77	-0.15	13.56	16.82	2.50
04017	480/08/006/02	Ex 2	Ext.	rv-Wert	30.02	15.79	-0.15	13.56	16.74	2.60
04016	480/08/006/01	Ex 2	Ext.	rv-Wert	20.13	9.68	-0.22	10.91	14.11	-2.25
04013	480/08/003/02	Ex 2	Ext.	rv-Wert	40.03	17.05	-0.10	15.87	18.78	2.10
04018	480/08/006/03	Ex 2	Ext.	D-Grenze	20.15	6.72	-0.07	10.91	11.99	-3.76
04019	480/08/006/04	Ex 2	Ext.	D-Grenze	12.10	4.03	-0.03	8.26	8.56	-3.63
04017	480/08/006/02	Ex 2	Ext.	D-Grenze	29.84	18.28	-0.23	13.52	18.53	3.86
04101	480/08/008/03	P 3	Komp.	rv-Werte	39.79	16.39	-0.15	15.82	20.06	0.01
04101	480/08/008/03	P 3	Komp.	rv-Werte	39.53	16.99	-0.15	15.76	20.20	0.61
04102	480/08/010/01	P 3	Komp.	rv-Werte	39.91	17.21	-0.16	15.84	20.57	0.51
04102	480/08/010/01	P 3	Komp.	rv-Werte	39.79	17.75	-0.17	15.82	20.67	1.06
04103	480/08/010/02	P 3	Komp.	rv-Werte	30.15	14.65	-0.16	13.60	17.10	0.85
04104	480/08/010/03	P 3	Komp.	rv-Werte	20.00	11.60	-0.17	10.87	13.39	0.82
04105	480/09/001/01	P 3	Komp.	rv-Werte	15.06	9.78	-0.18	9.31	11.32	0.66
04105	480/09/001/01	P 3	Komp.	rv-Werte	15.03	10.65	-0.24	9.30	11.90	1.15
04103	480/08/010/02	P 3	Komp.	D-Grenze	12.34	5.23	0.00	8.35	8.35	-1.95
04104	480/08/010/03	P 3	Komp.	D-Grenze	10.20	5.08	0.00	7.53	7.53	-1.31
04105	480/09/001/01	P 3	Komp.	D-Grenze	8.96	4.87	0.00	7.01	7.01	-1.05
04101	480/08/008/03	P 3	Komp.	D-Grenze	12.61	4.65	0.00	8.45	8.45	-2.76
04102	480/08/010/01	P 3	Komp.	D-Grenze	40.20	6.15	0.00	15.91	15.91	-8.37
04106	480/09/001/02	P 3	Komp.	rv-Werte	40.17	14.20	-0.14	15.90	20.06	-2.68
04115	480/10/006/02	P 3	Komp.	rv-Werte	40.10	12.14	-0.06	15.88	17.56	-2.69
04119	480/10/007/04	P 4	Komp.	rv-Werte	39.89	18.02	-0.17	15.84	20.87	1.20
04119	480/10/007/04	P 4	Komp.	rv-Werte	39.99	17.21	-0.15	15.86	20.09	0.99
04119	480/10/007/04	P 4	Komp.	D-Grenze	16.56	6.49	0.00	9.80	9.80	-1.86
04116	480/10/006/03	P 4	Komp.	rv-Werte	30.15	9.74	0.07	13.60	12.02	-0.09
04116	480/10/006/03	P 4	Komp.	rv-Werte	30.10	13.08	-0.16	13.58	17.07	-1.05
04117	480/10/006/04	P 4	Komp.	rv-Werte	19.99	11.96	-0.21	10.87	13.83	0.82
04118	480/10/006/05	P 4	Komp.	rv-Werte	15.05	7.55	0.07	9.31	8.49	0.76
04118	480/10/006/05	P 4	Komp.	rv-Werte	15.07	9.83	-0.14	9.31	10.81	1.23
04115	480/10/006/02	P 4	Komp.	D-Grenze	40.22	5.68	0.00	15.91	15.99	-9.03
04116	480/10/006/03	P 4	Komp.	D-Grenze	30.18	5.32	-0.06	13.60	14.87	-8.35
04117	480/10/006/04	P 4	Komp.	D-Grenze	20.11	4.55	-0.08	10.90	12.11	-6.54
04118	480/10/006/05	P 4	Komp.	D-Grenze	15.10	4.09	-0.06	9.32	9.95	-4.95

Tab. 3.3 Spannungen beim Bruch in echt-triaxialen Kurzzeitbruchversuchen

File-nummer	Material-nummer	Horizont	Modus	Versuchs-art	Oktaederspannung [MPa]		I [MPa]	$II_s^{0.5}$ [MPa]	Modell $II_s^{0.5}$ (unt. Einhüllende) [MPa]	Differenz [MPa]
					normal	tangential				
04107	480/09/004/02	P 3	Komp.	Bruch	36.61	31.44	109.82	38.51	38.29	0.22
04108	480/09/004/03	P 3	Komp.	Bruch	27.14	28.37	81.42	34.75	31.99	2.76
04109	480/09/004/04	P 3	Komp.	Bruch	18.23	22.96	54.68	28.12	25.18	2.94
04111	480/09/007/01	P 3	Komp.	Bruch	14.45	19.14	43.35	23.44	21.90	1.54
04112	480/09/007/02	P 3	Komp.	Bruch	14.42	19.06	43.27	23.35	21.88	1.47
04120	480/10/008/02	P 4	Komp.	Bruch	36.14	32.27	108.42	39.52	38.00	1.52
04121	480/10/008/03	P 4	Komp.	Bruch	26.40	25.69	79.20	31.46	31.46	0.00
04122	480/10/008/04	P 4	Komp.	Bruch	18.64	23.06	55.92	28.24	25.52	2.72
04123	480/10/010/02	P 4	Komp.	Bruch	14.31	18.87	42.94	23.12	21.78	1.34
04124	480/10/010/03	P 4	Komp.	Bruch	12.48	16.37	37.43	20.05	20.05	0.00
04125	480/10/010/04	P 4	Komp.	Bruch	18.22	22.04	54.65	26.99	25.17	1.82
04156	480/05/002/03	Ex 1	Ext.	Bruch	20.37	9.76	61.11	11.95	11.62	0.33
04155	480/05/002/02	Ex 1	Ext.	Bruch	30.53	12.97	91.59	15.88	15.31	0.57
04154	480/05/002/01	Ex 1	Ext.	Bruch	40.47	15.14	121.41	18.55	18.55	0.00
04152	480/05/001/07	Ex 1	Ext.	Bruch	25.56	12.62	76.67	15.45	13.56	1.89
04150	480/05/001/05	Ex 1	Ext.	Dilatanz	14.46	9.61	43.38	11.77	9.20	2.57
04146	480/05/001/01	Ex 1	Ext.	Dilatanz	20.59	11.25	61.78	13.78	11.71	2.07
04147	480/05/001/02	Ex 1	Ext.	Dilatanz	40.14	15.83	120.41	19.39	18.44	0.95
04148	480/05/001/03	Ex 1	Ext.	Dilatanz	30.13	14.61	90.39	17.90	15.17	2.73
04151	480/05/001/06	Ex 1	Ext.	Dilatanz	13.51	8.91	40.52	10.92	8.78	2.14
04008	480/08/002/01	Ex 2	Ext.	Bruch	25.49	12.33	76.46	15.10	13.54	1.56
04009	480/08/002/02	Ex 2	Ext.	Bruch	40.54	15.45	121.63	18.92	18.57	0.35
04088	480/08/002/08	Ex 2	Ext.	Bruch	20.35	9.48	61.04	11.61	11.61	0.00
04019	480/08/006/04	Ex 2	Ext.	Dilatanz	12.52	8.22	37.55	10.06	8.34	1.72
04013	480/08/003/02	Ex 2	Ext.	Dilatanz	40.05	17.05	120.16	20.88	18.42	2.46
04012	480/08/003/01	Ex 2	Ext.	Dilatanz	30.05	13.22	90.16	16.19	15.14	1.05
04011	480/08/002/04	Ex 2	Ext.	Dilatanz	20.12	10.87	60.37	13.32	11.52	1.79
04087	480/08/002/07	Ex 2	Ext.	Dilatanz	40.12	15.56	120.35	19.06	18.44	0.63

Tab. 3.4 Zusammenstellung der Festigkeitsparameter des modifizierten Drucker-Prager-Modells und der Parameter der Dilatanzgrenze für alle Horizonte bei Kompression und Extension

	Horizont		p
FESTIGKEIT			
Kompression			
Untere Einhüllende	P3	3.081	0.537
	P4	2.272	0.601
	P3 + P4	2.272	0.601
Mittelwert (MKQ)	P3	3.271	0.529
	P4	2.601	0.579
	P3 + P4	2.882	0.557
Extension			
Untere Einhüllende	Ex1	0.858	0.640
	Ex2	0.631	0.708
	Ex1+Ex2	0.705	0.681
Mittelwert (MKQ)	Ex1	2.058	0.465
	Ex2	1.047	0.611
	Ex1+Ex2	1.566	0.525
DILATANZ			
Kompression (MKQ)	P3 + P4	1.005	0.575
Extension (MKQ)	Ex1+Ex2	1.439	0.497
Mittel aller Versuche	alle Horizonte	1.164	0.546

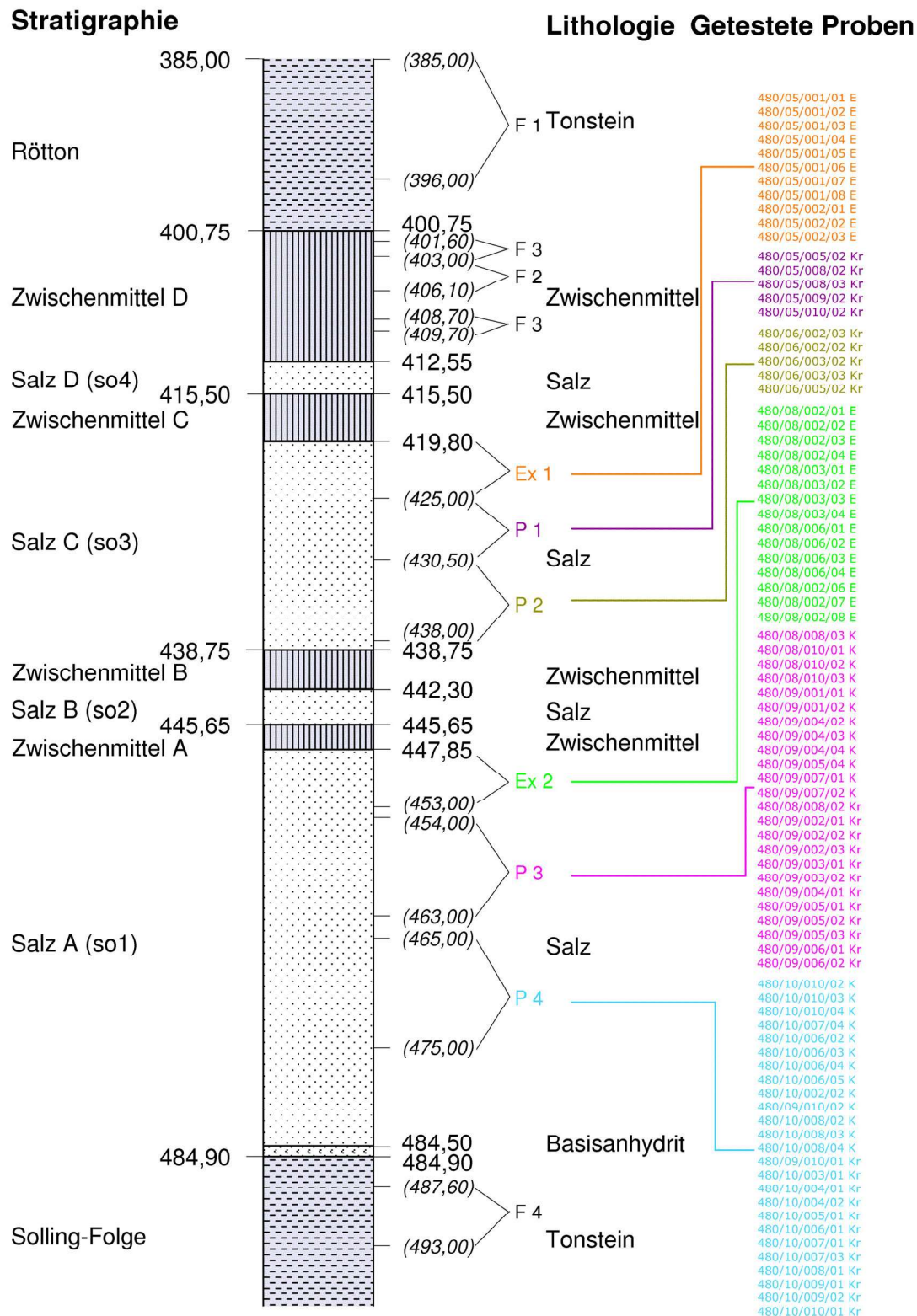


Abb. 1.1: Säulenprofil der Bohrung Twenthe-Rijn 480 im Teufenbereich der geplanten Kavernen mit Übersicht der geprüften Proben

E – Echt-triaxiale Extension

K – Echt-triaxiale Kompression

Kr – Uniaxiale und triaxiale Kriechversuche.

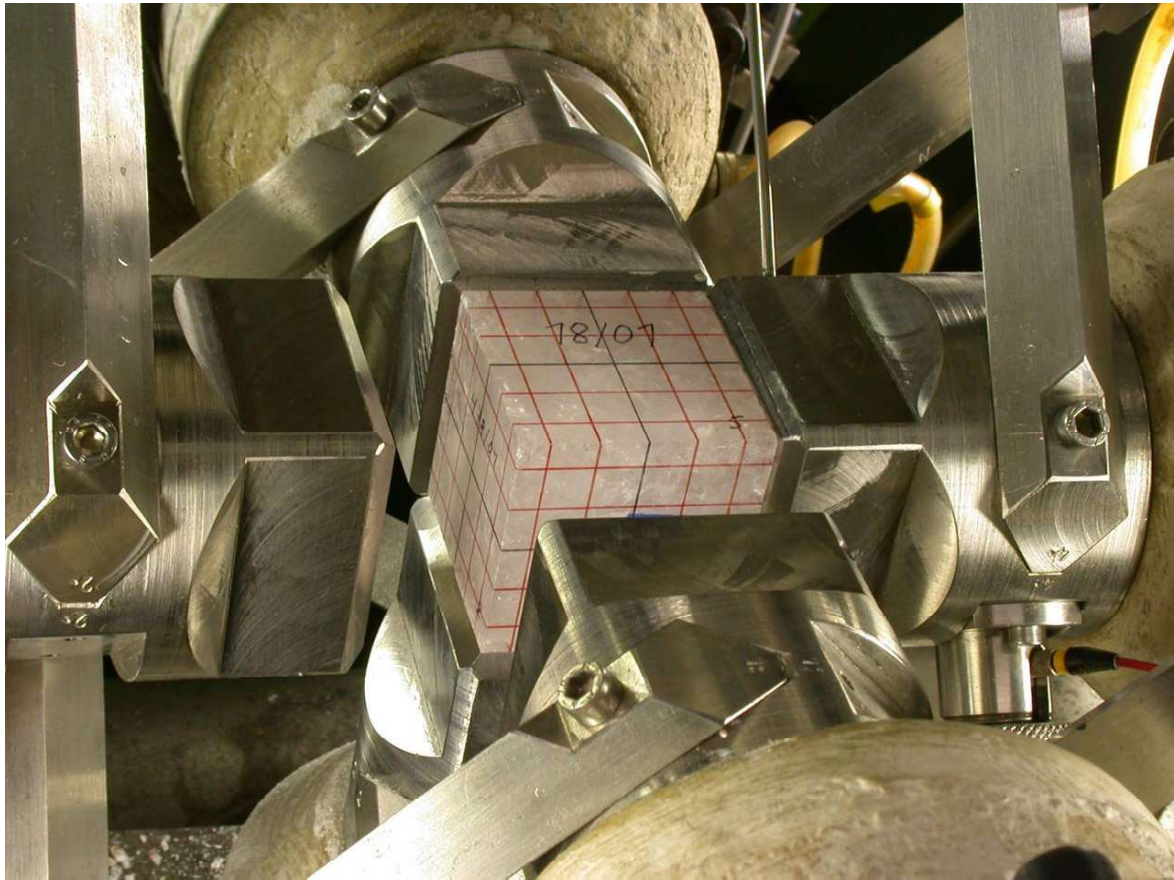


Abb. 2.1: Zentrum der echt-triaxialen Prüfmaschine mit Steinsalzprobe, Kantenlänge: 53 mm.



Abb. 2.2: Würfelproben vor (links) und nach dem echt-triaxialen Versuch: Kompression (Mitte) und Extension (rechts).

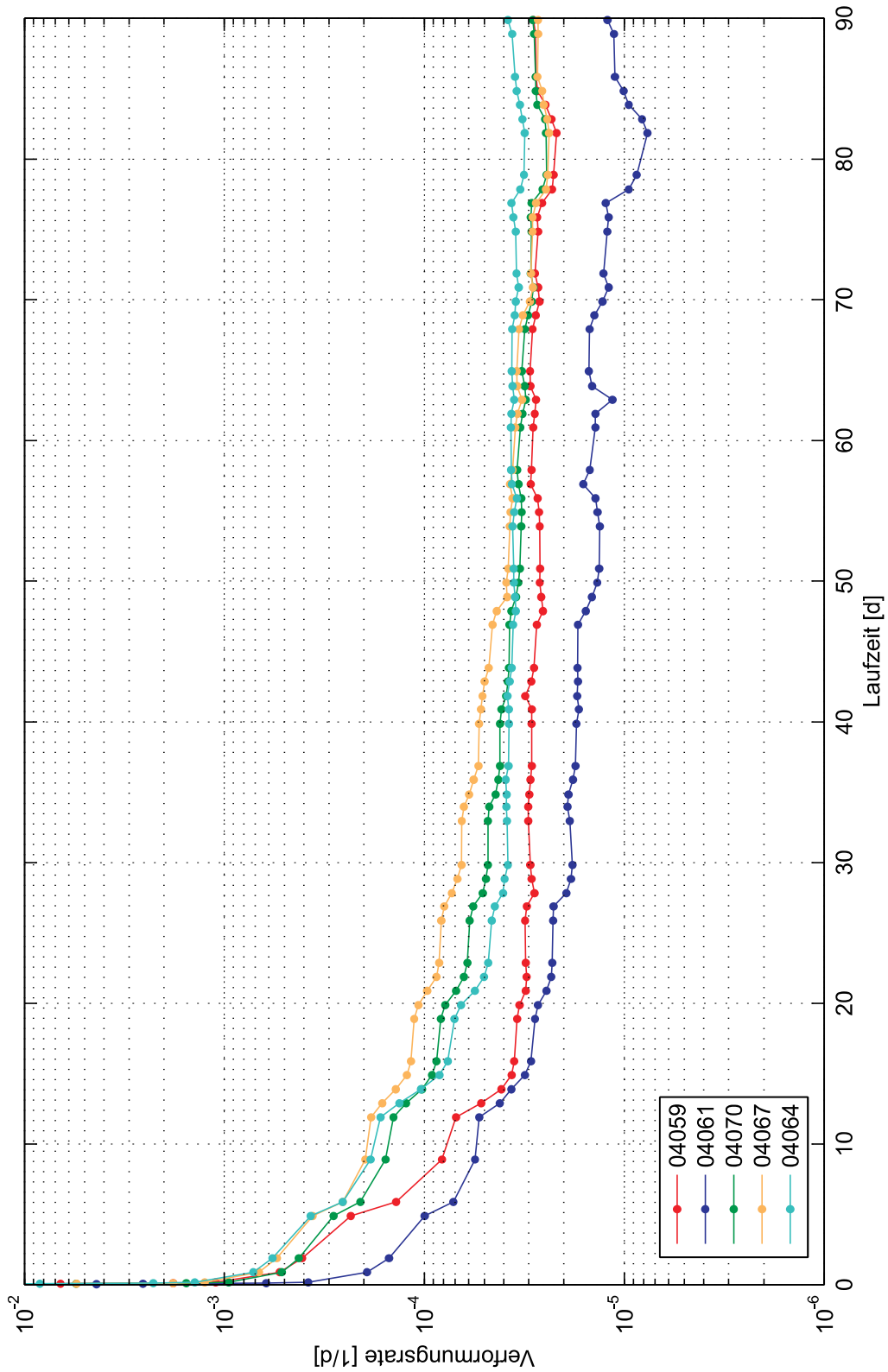


Abb. 3.1: Verformungsraten über der Laufzeit ausgewählter uniaxialer Kriechversuche.

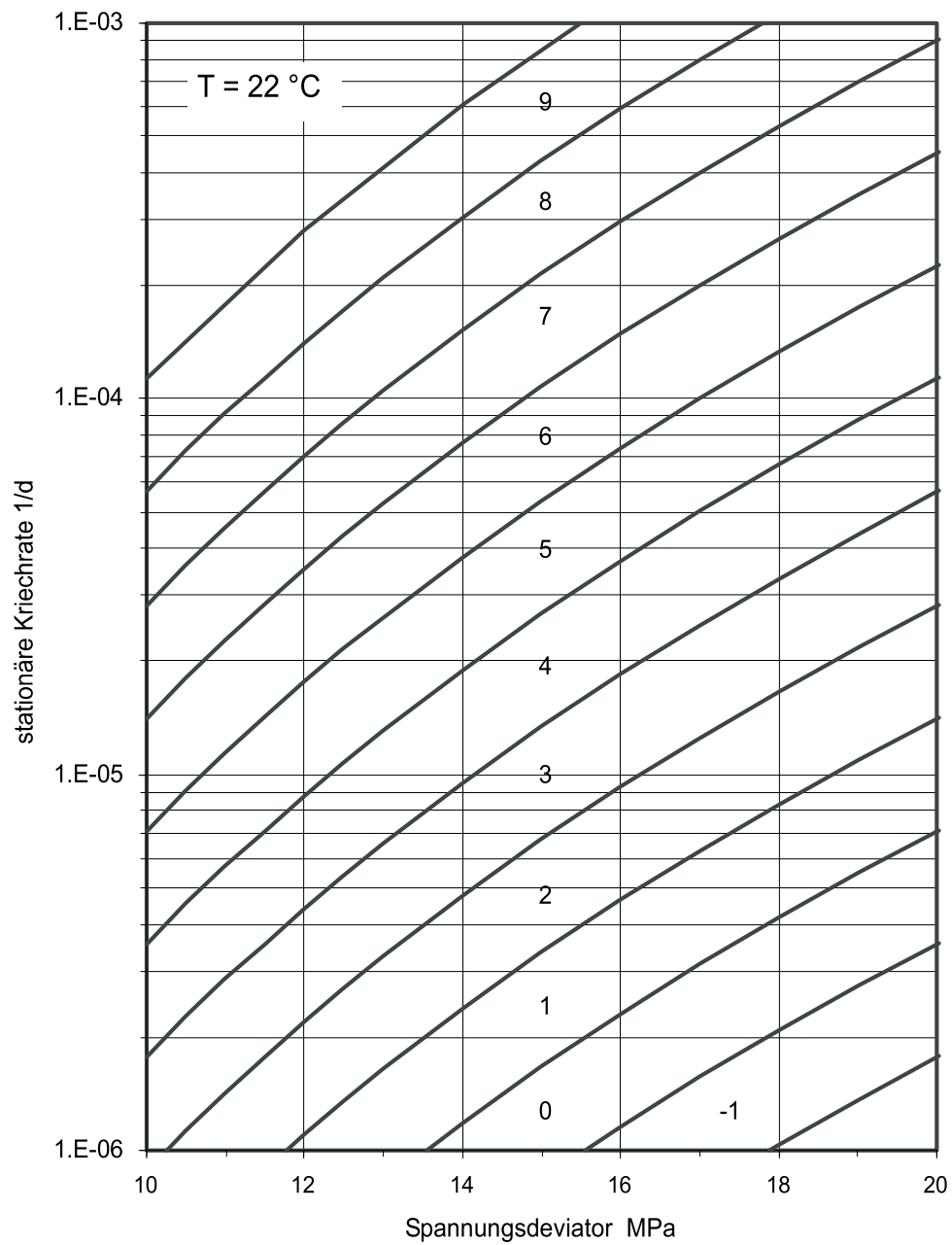


Abb. 3.2: Kriechklassen nach BGRa

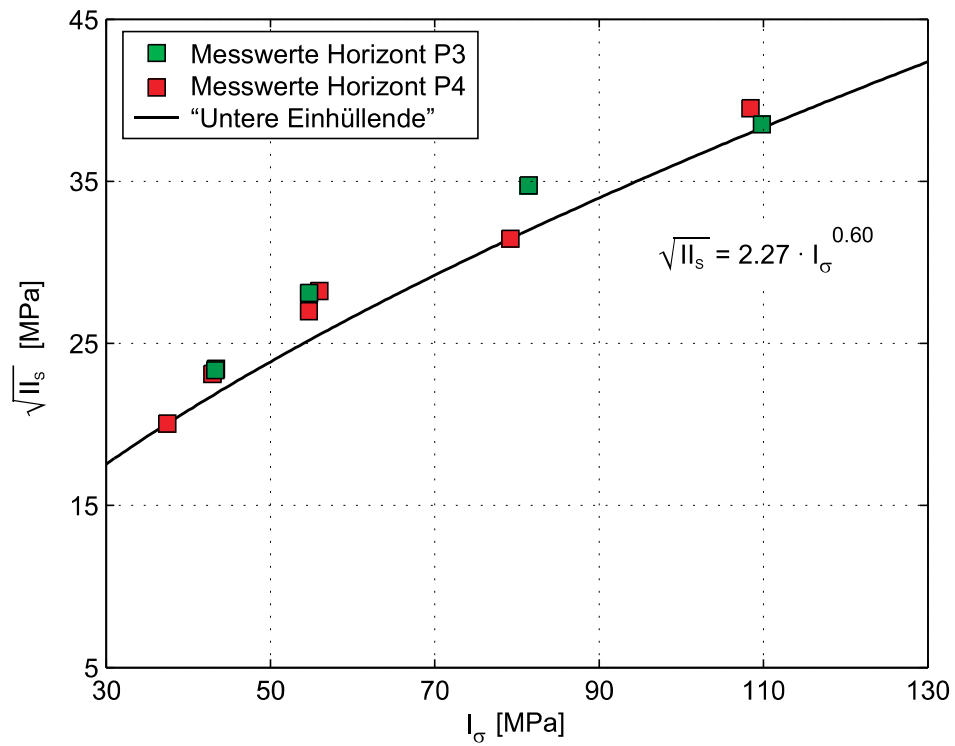


Abb. 3.3a: Festigkeit des Steinsalzes bei echt-triaxialer Kompression; „Untere Einhüllende“ gemäß modifiziertem Drucker-Prager-Kriterium

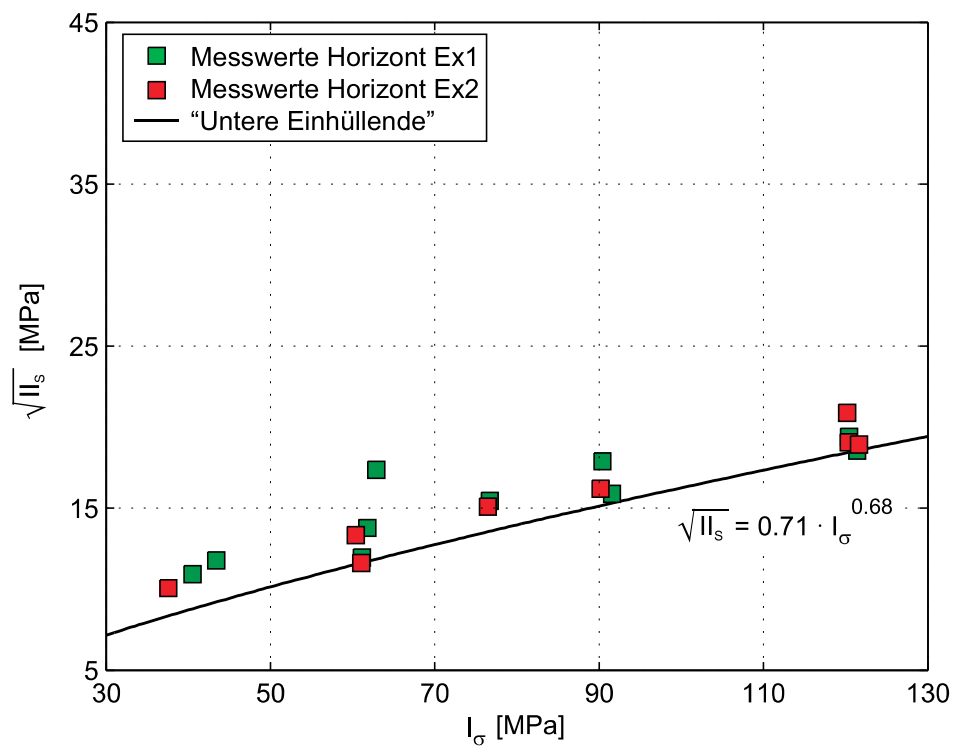


Abb. 3.3b: Festigkeit des Steinsalzes bei echt-triaxialer Extension; „Untere Einhüllende“ gemäß modifiziertem Drucker-Prager-Kriterium

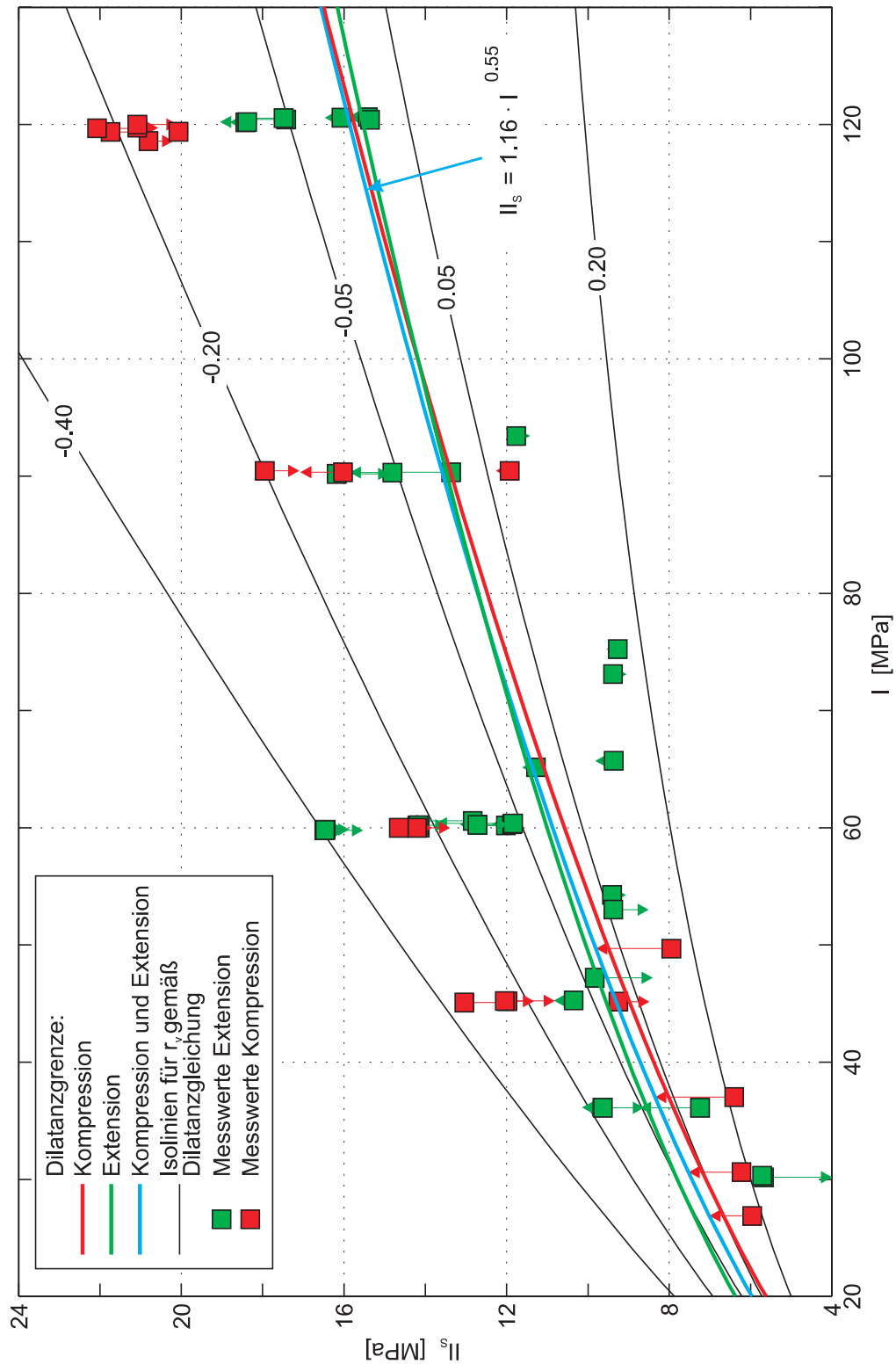


Abb. 3.4: Dilatanzgrenze des geprüften Steinsalzes bei Kompression und Extension sowie als repräsentative Kurve für alle Messungen; Pfeile geben die theoretische Lage der Messwerte bei Erfüllung der Dilatanzgleichung an (Fehlermaß).

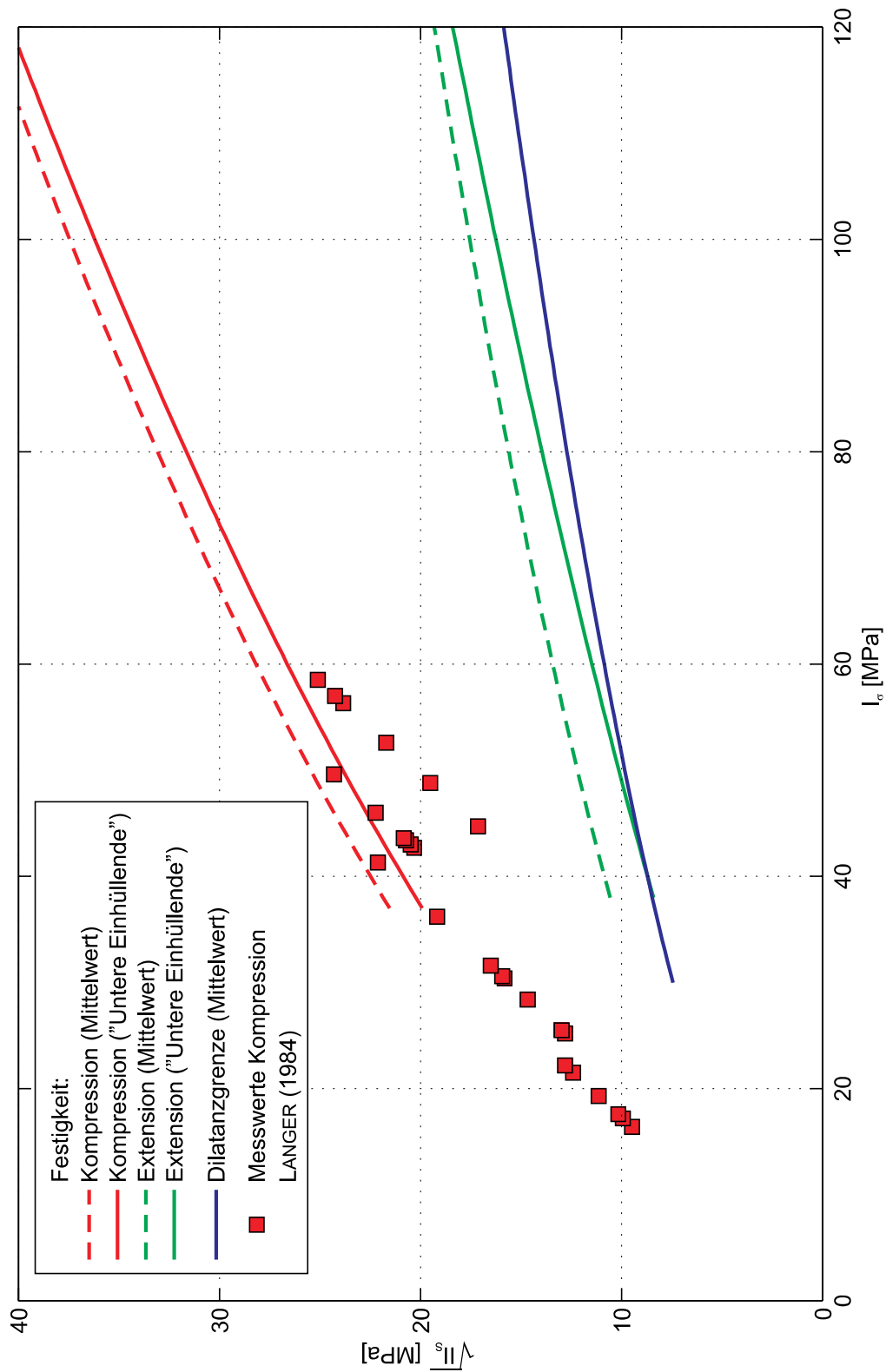


Abb. 3.5: Festigkeitsgrenzen des geprüften Steinsalzes bei Kompression und Extension sowie die mittlere Dilatanzgrenze im Spannungsraum ermittelt unter echt-triaxialen Bedingungen; Kármán-Versuche von LANGER (1984) an Steinsalz (Rötsalz Typen A und C) der Bohrung Hengelo 310.

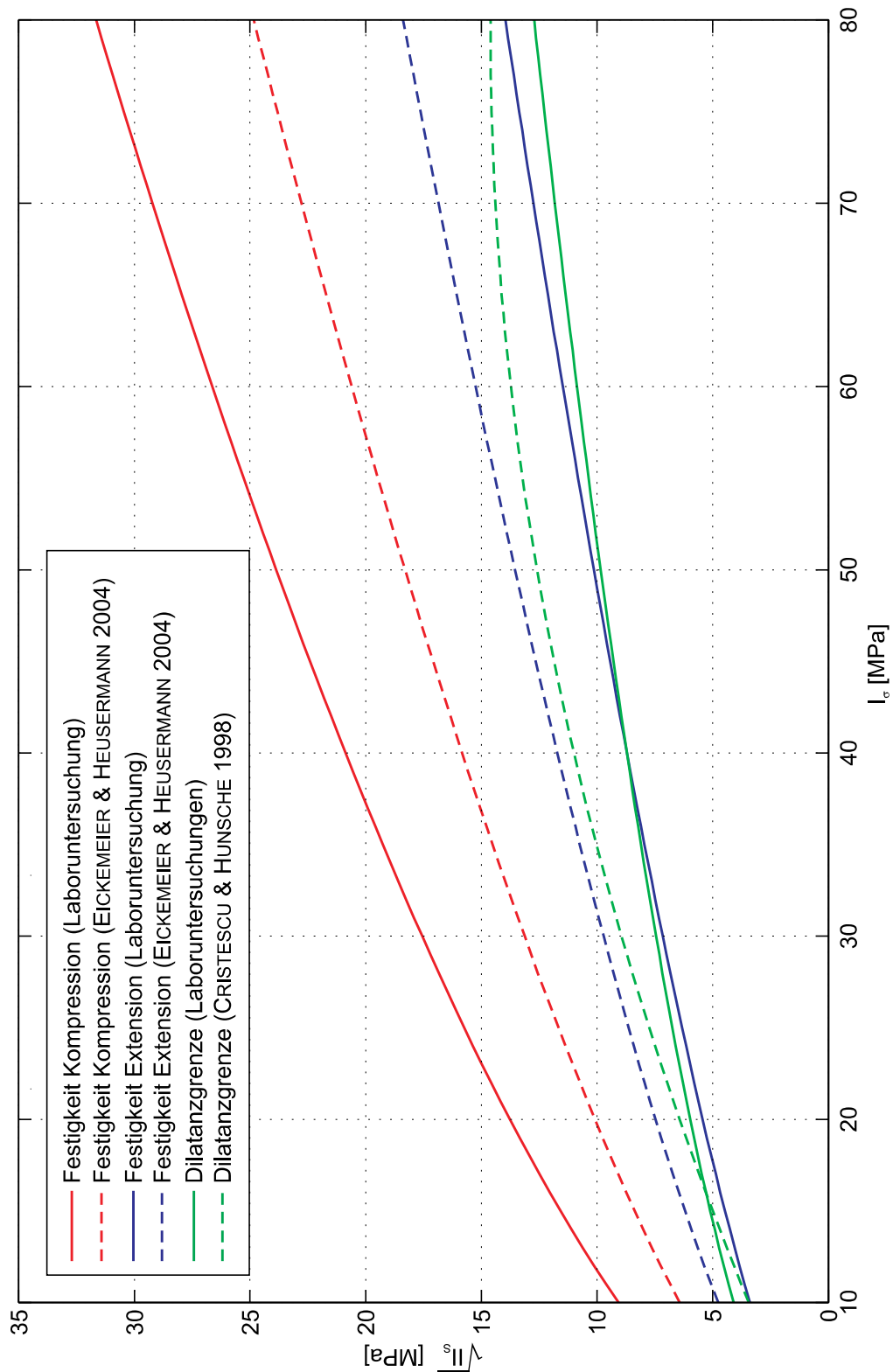


Abb. 3.6: Vergleich der Festigkeitsgrenzen des geprüften Steinsalzes bei Kompression und Extension mit den von EICKEMEIER UND HEUSERMANN (2004) für Rötsalz verwendeten Ansätzen. Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Dilatanzgrenze mit der von CRISTESCU UND HUNSCH (1998) allgemein für Steinsalz angegebenen.

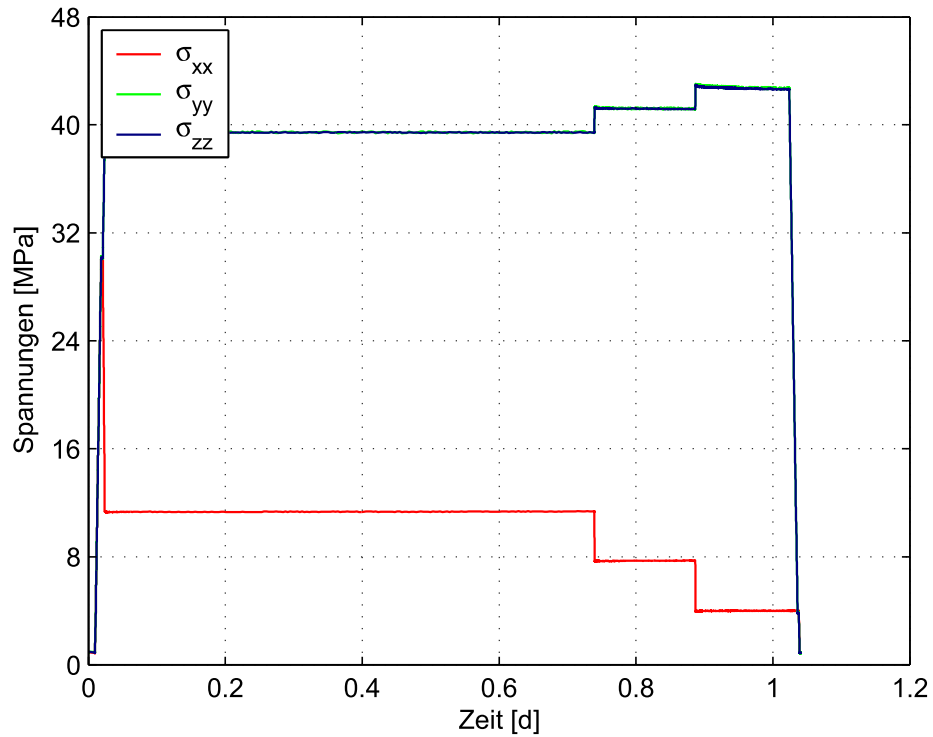


Abb. A01a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/02 Versuchsführung (Extension)

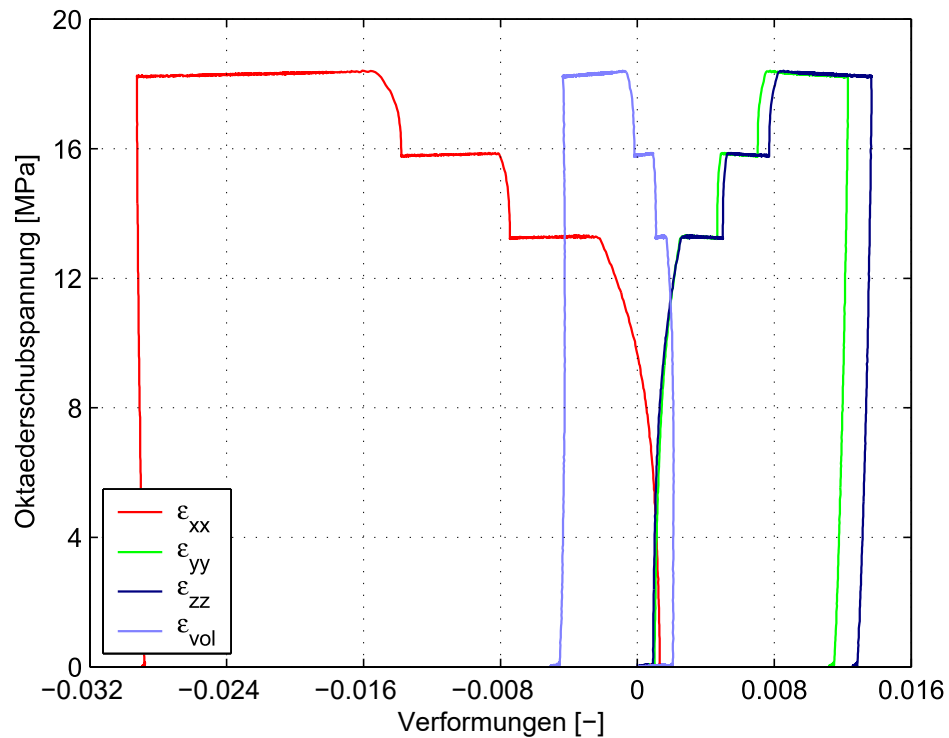


Abb. A01b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

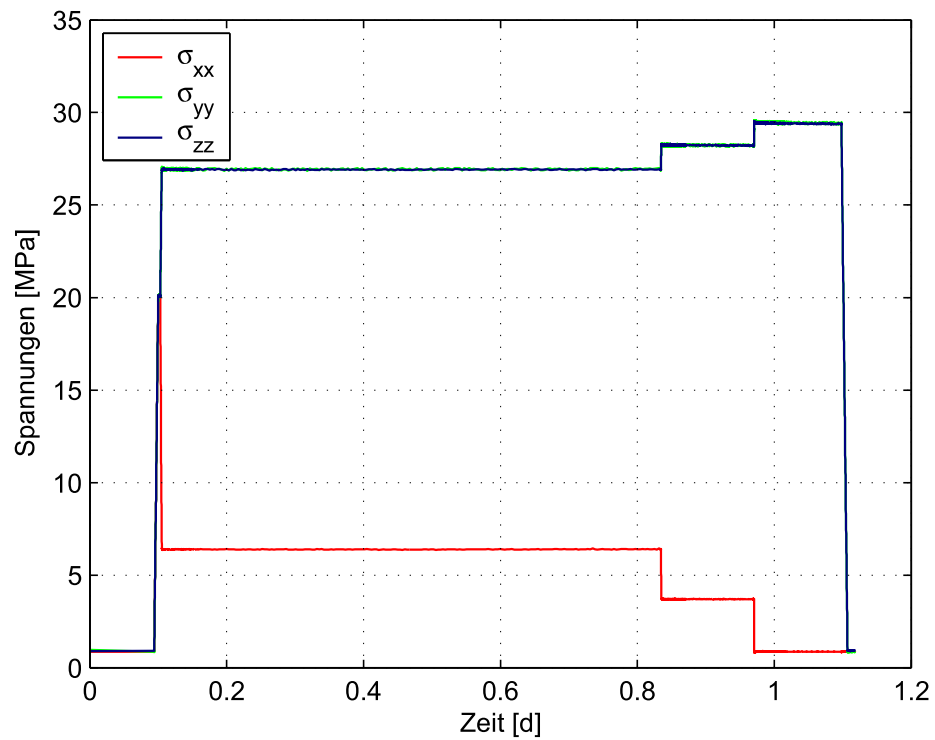


Abb. A02a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/03 Versuchsführung (Extension)

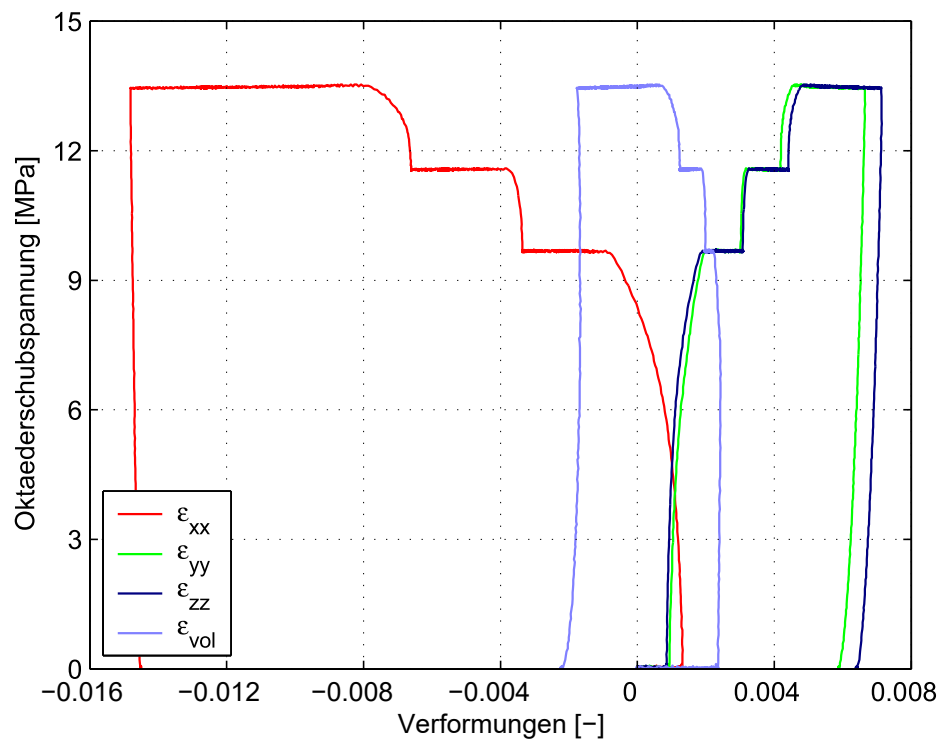


Abb. A02b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

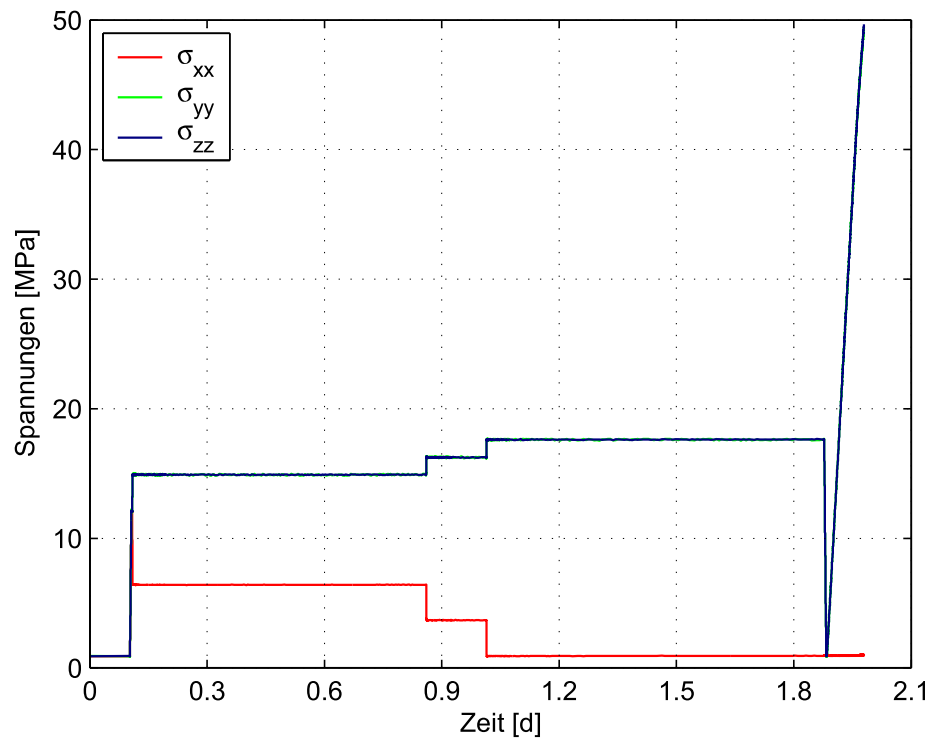


Abb. A03a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/04 Versuchsführung (Extension)

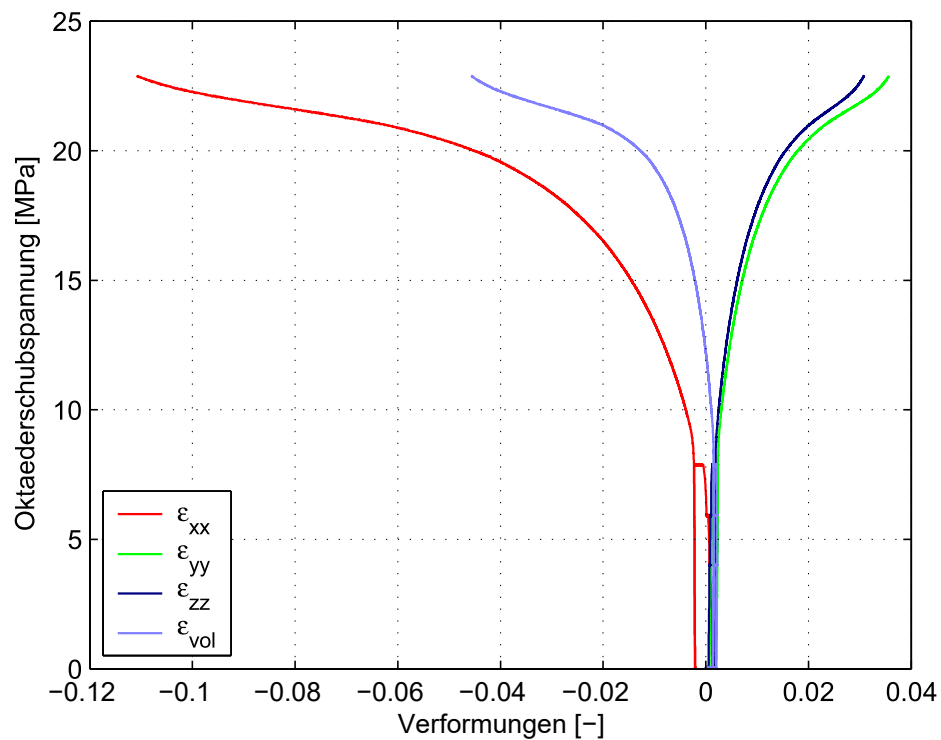


Abb. A03b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

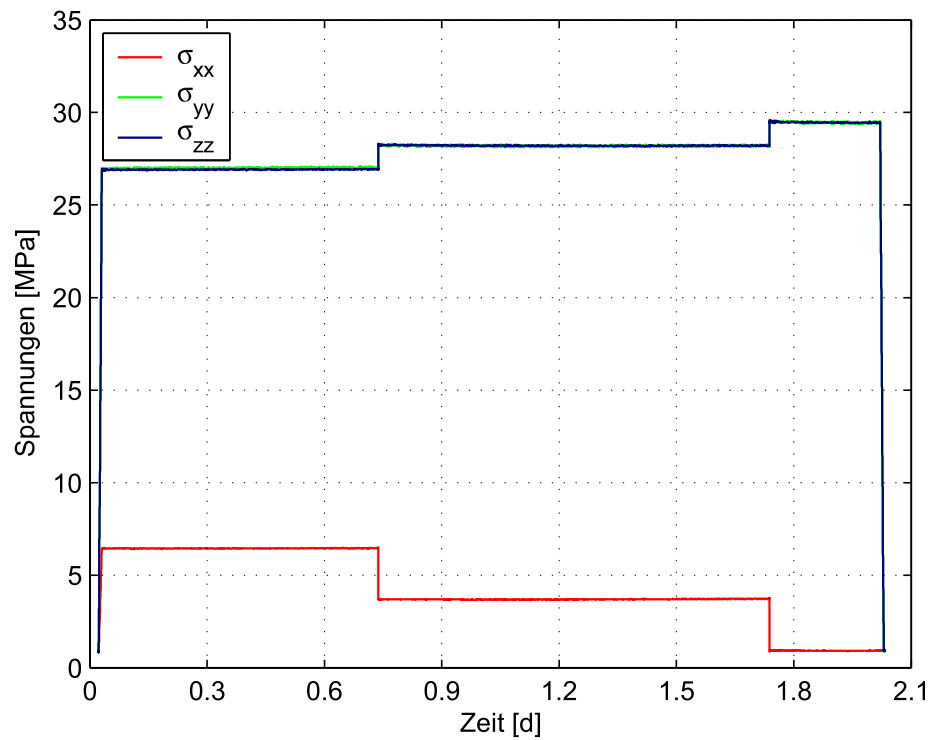


Abb. A04a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/01 Versuchsführung (Extension)

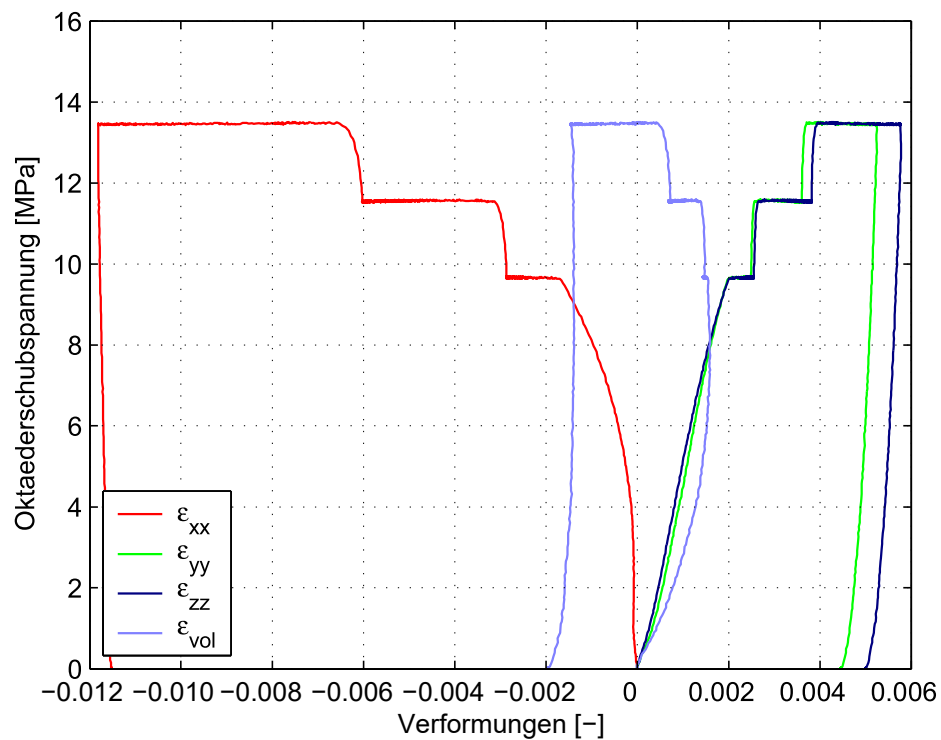


Abb. A04b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/006/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

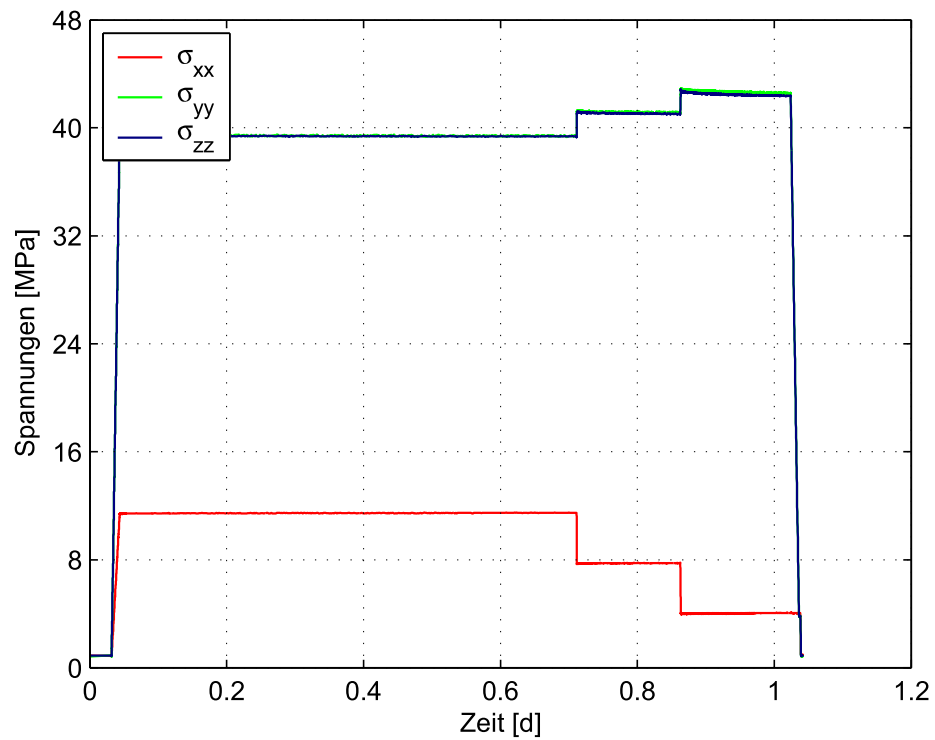


Abb. A05a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/04 Versuchsführung (Extension)

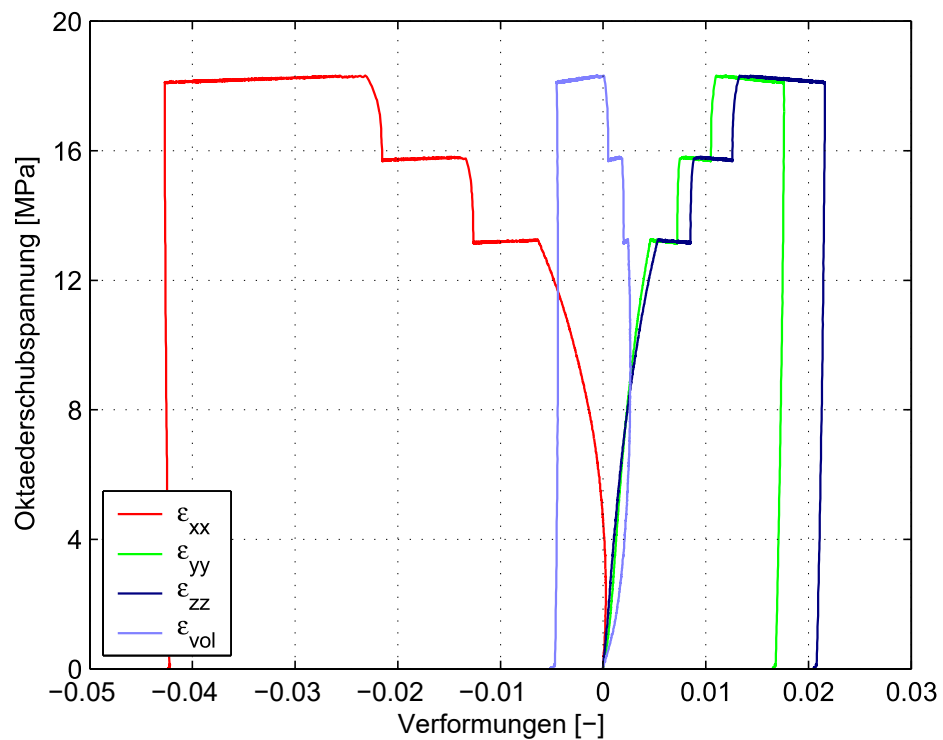


Abb. A05b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

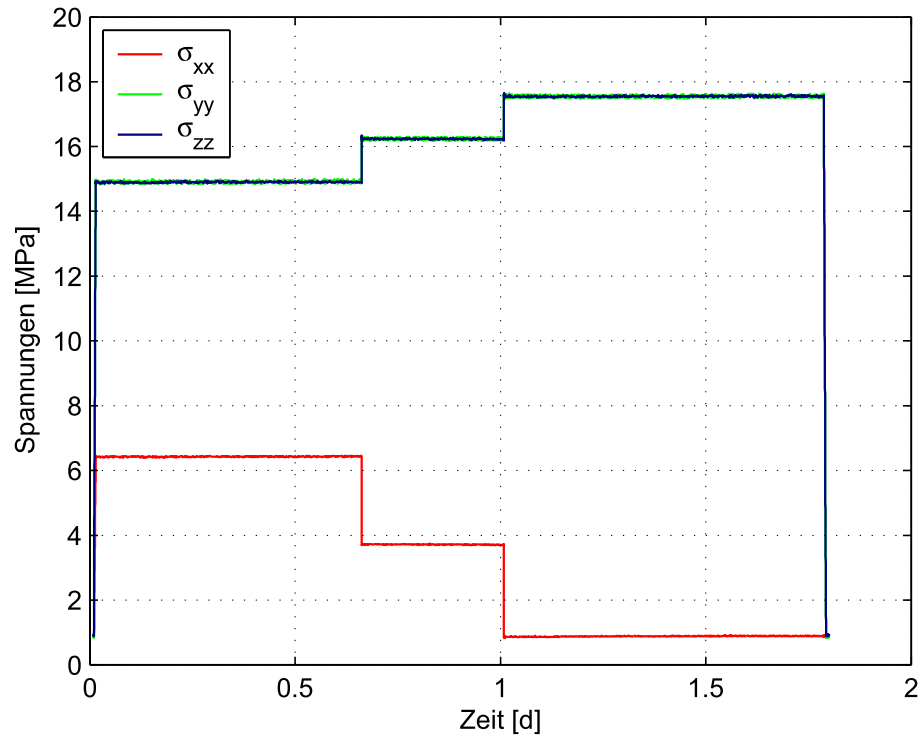


Abb. A06a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/03 Versuchsführung (Extension)

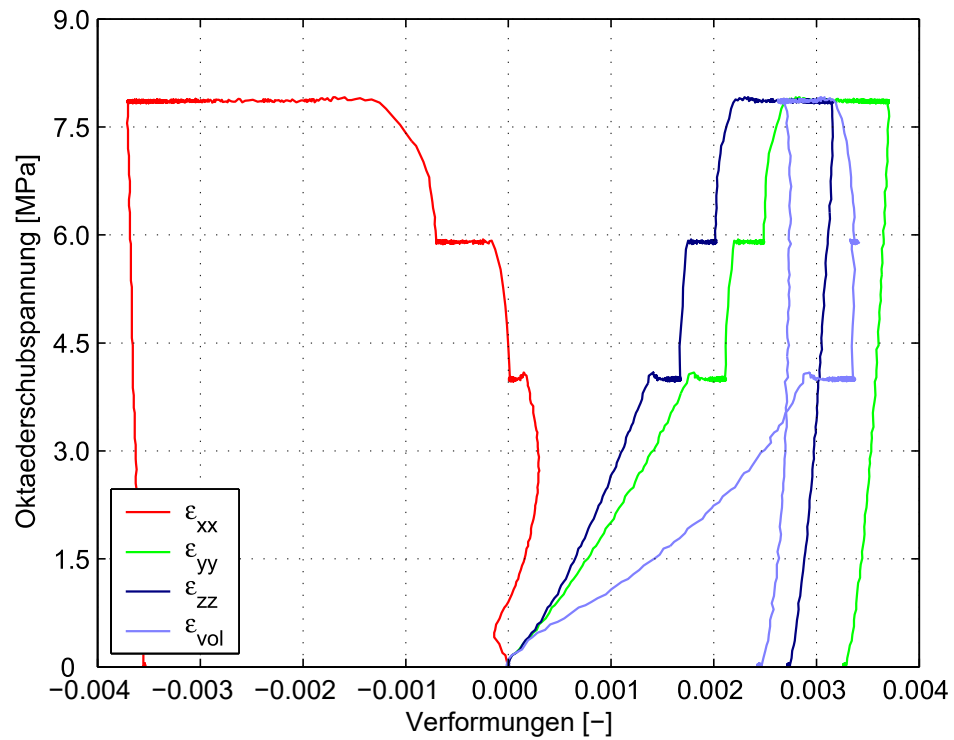


Abb. A06b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

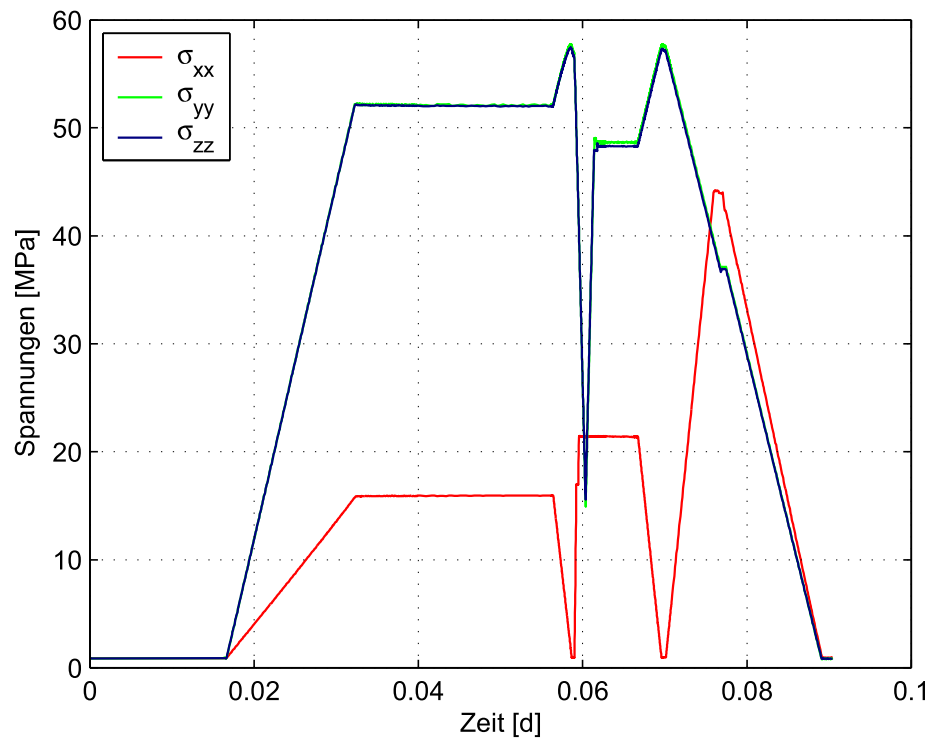


Abb. A07a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/02 Versuchsführung (Extension)

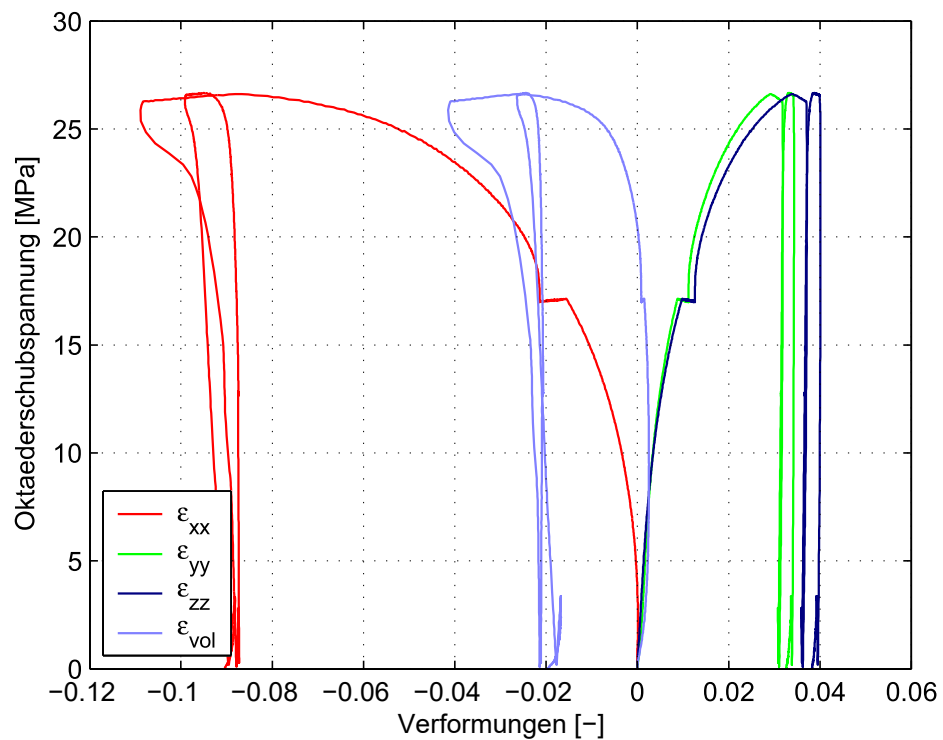


Abb. A07b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

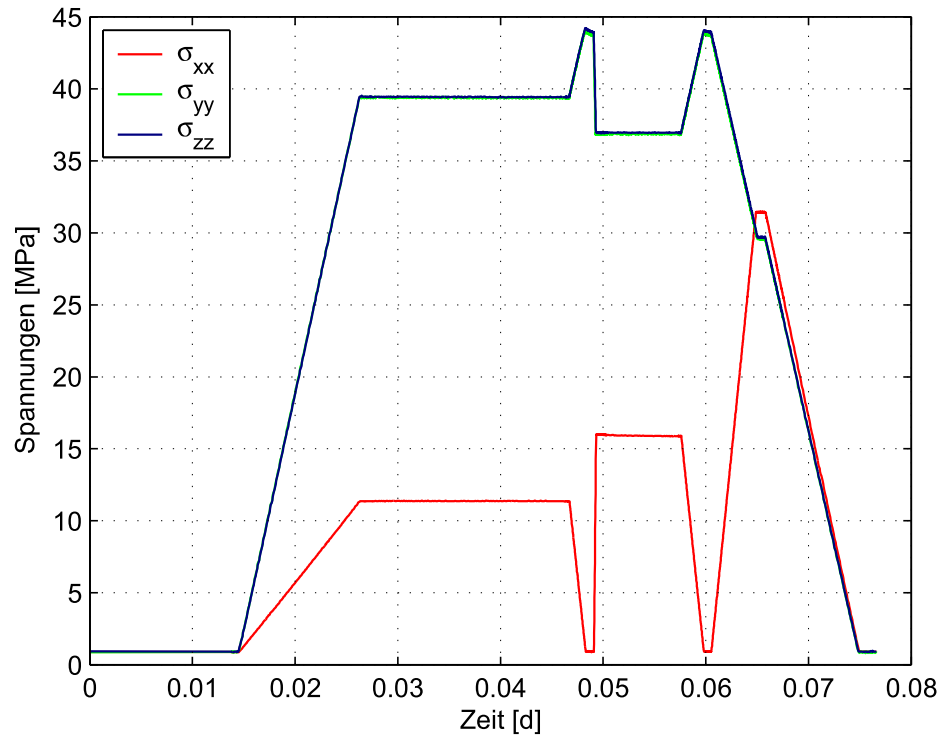


Abb. A08a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/01 Versuchsführung (Extension)

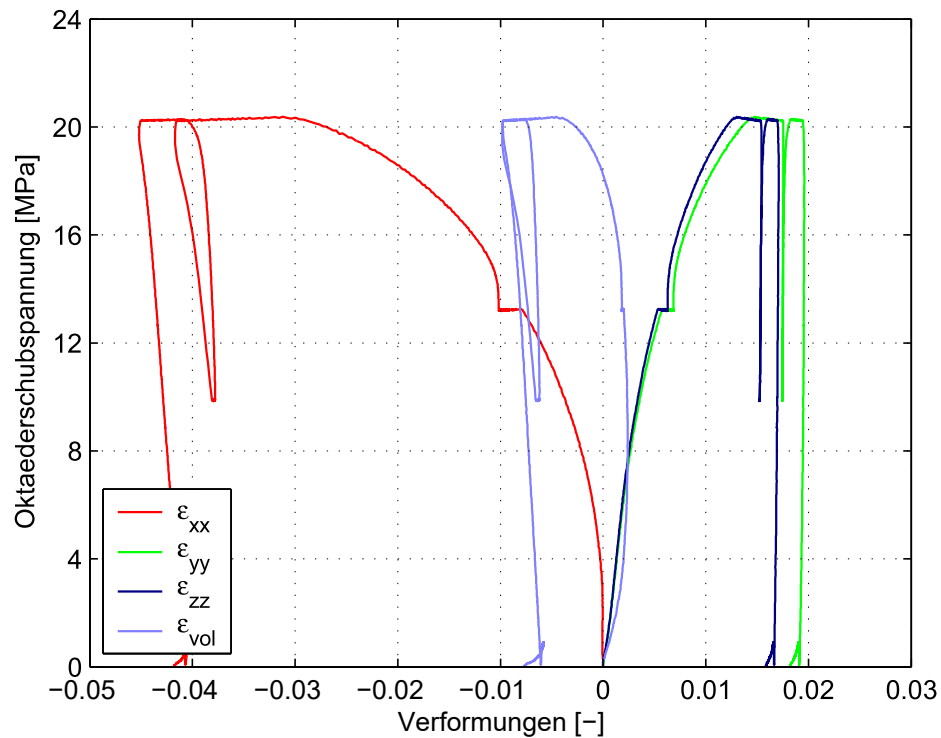


Abb. A08b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/003/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

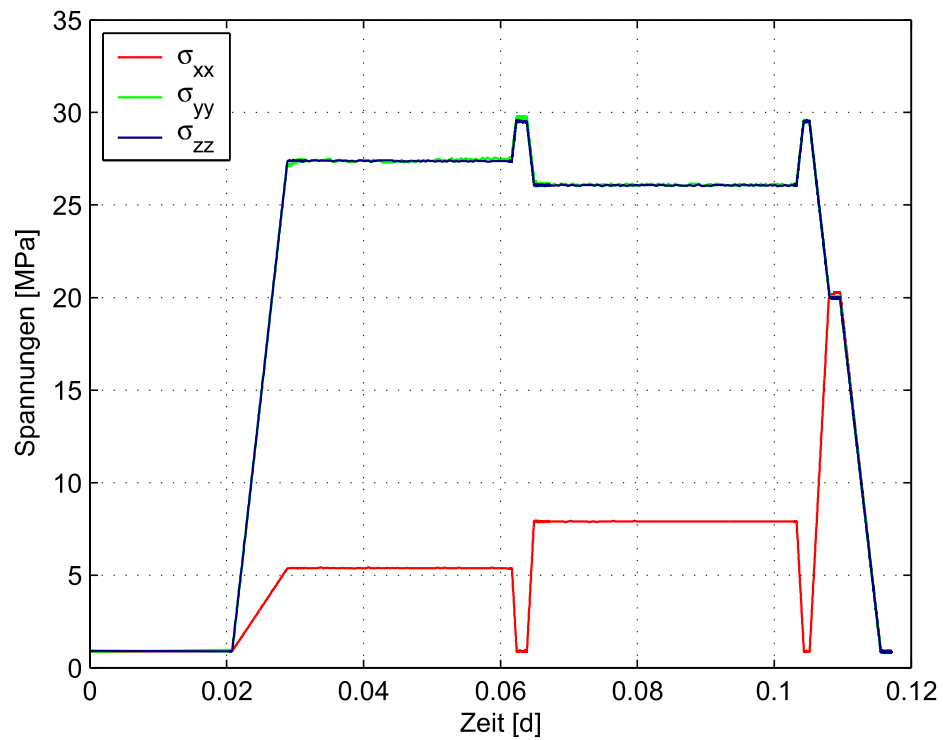


Abb. A09a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/04 Versuchsführung (Extension)

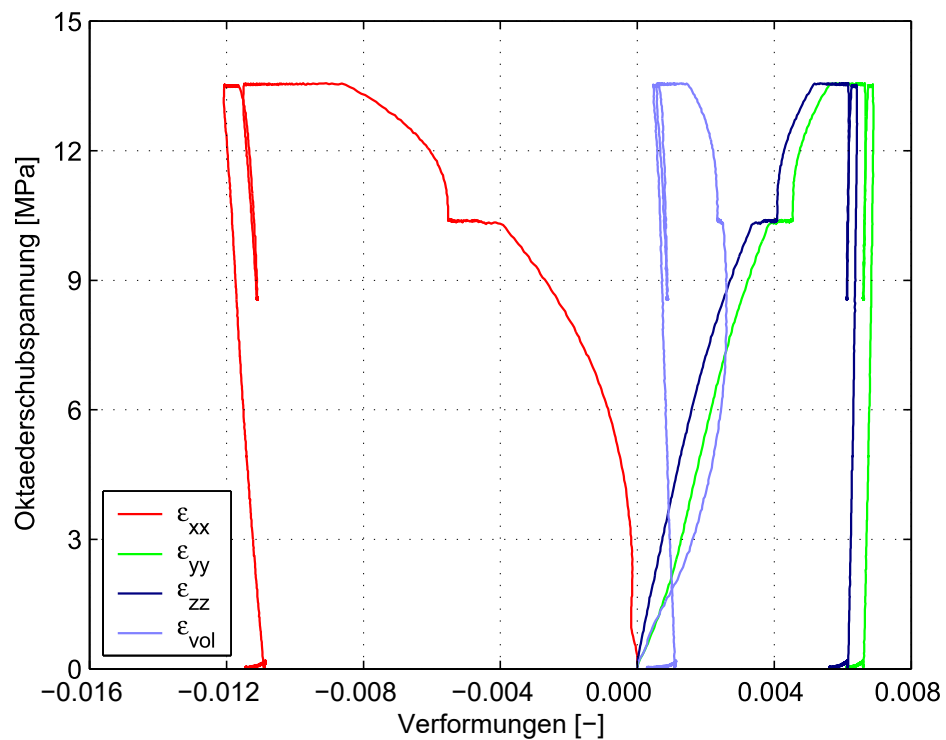


Abb. A09b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

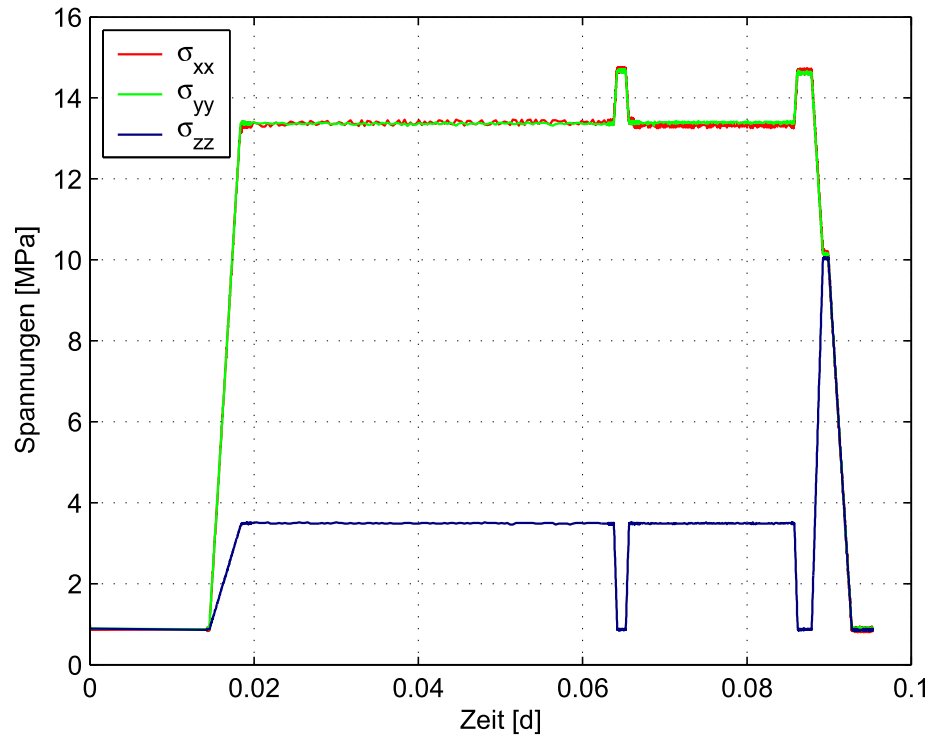


Abb. A10a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/03 Versuchsführung (Extension)

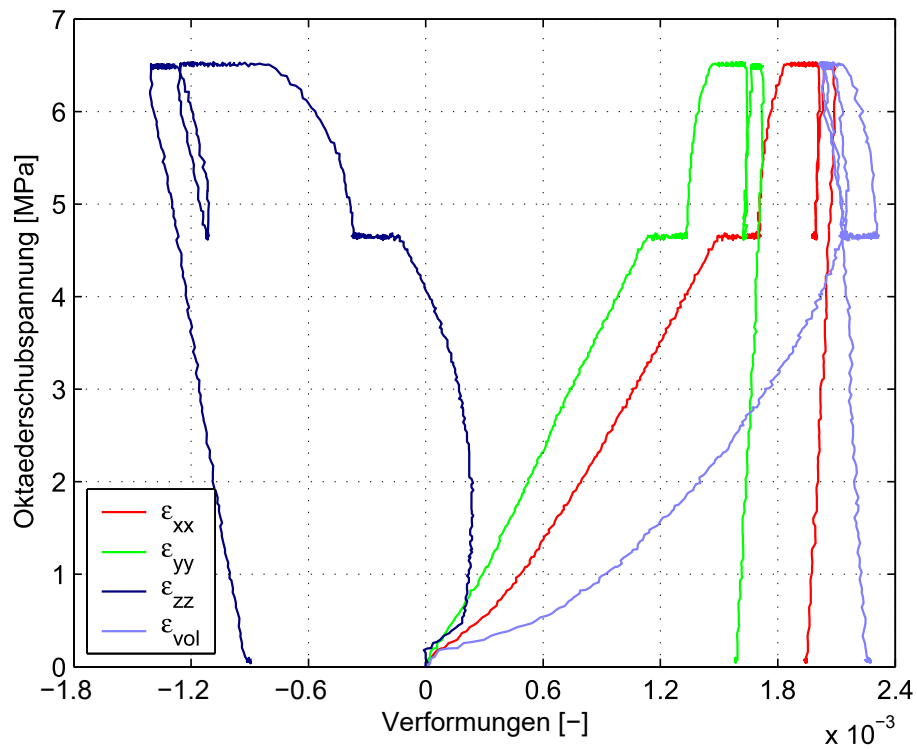


Abb. A10b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

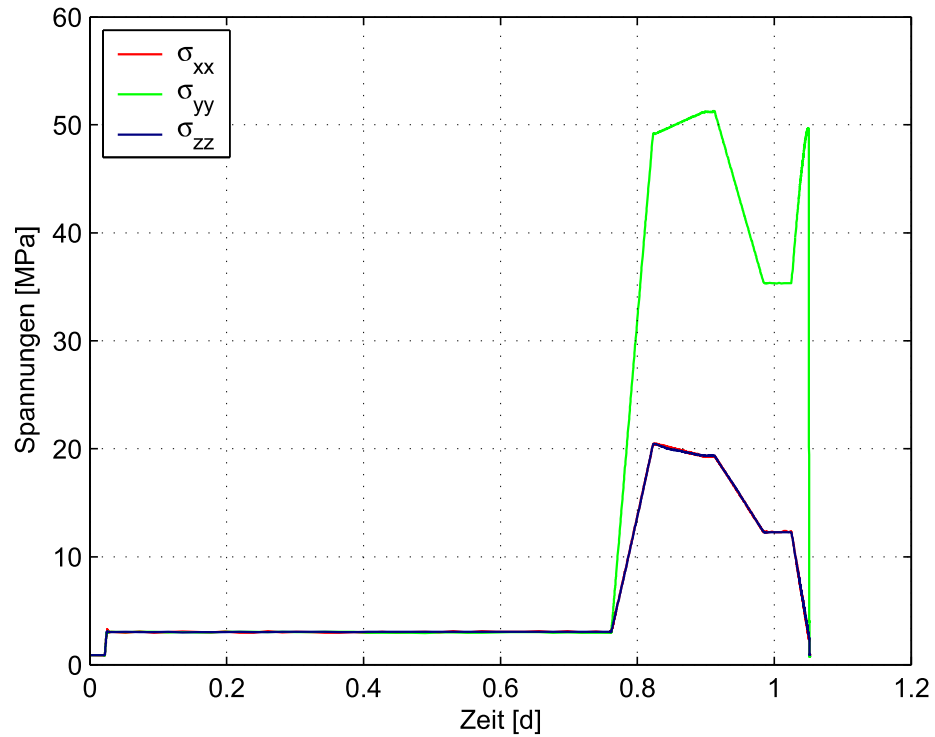


Abb. A11a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/01 Versuchsführung (Kompression)

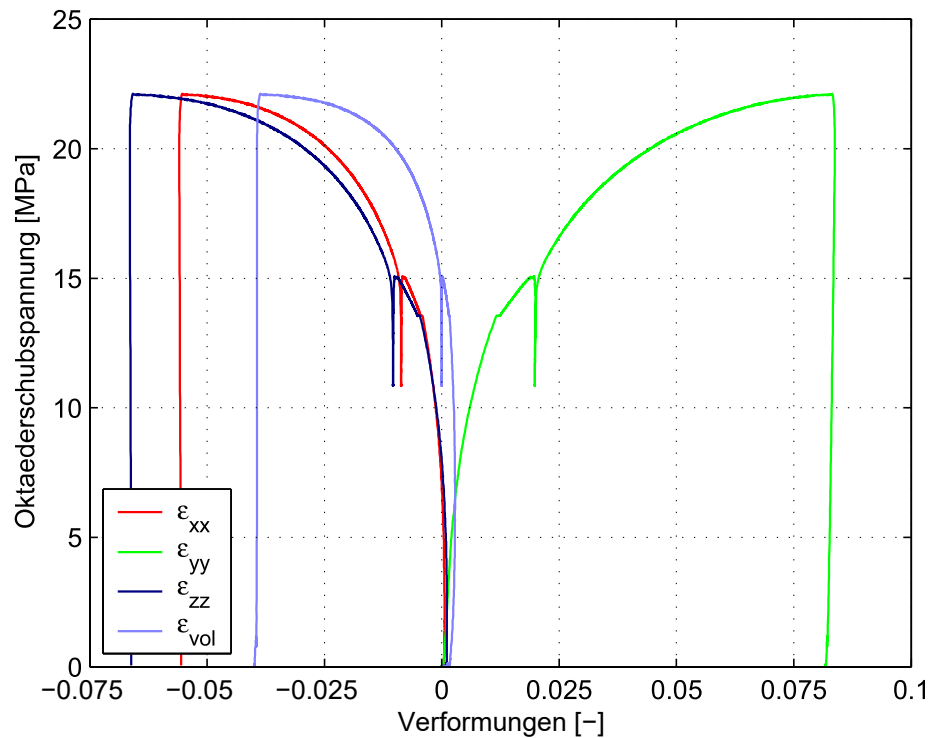


Abb. A11b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

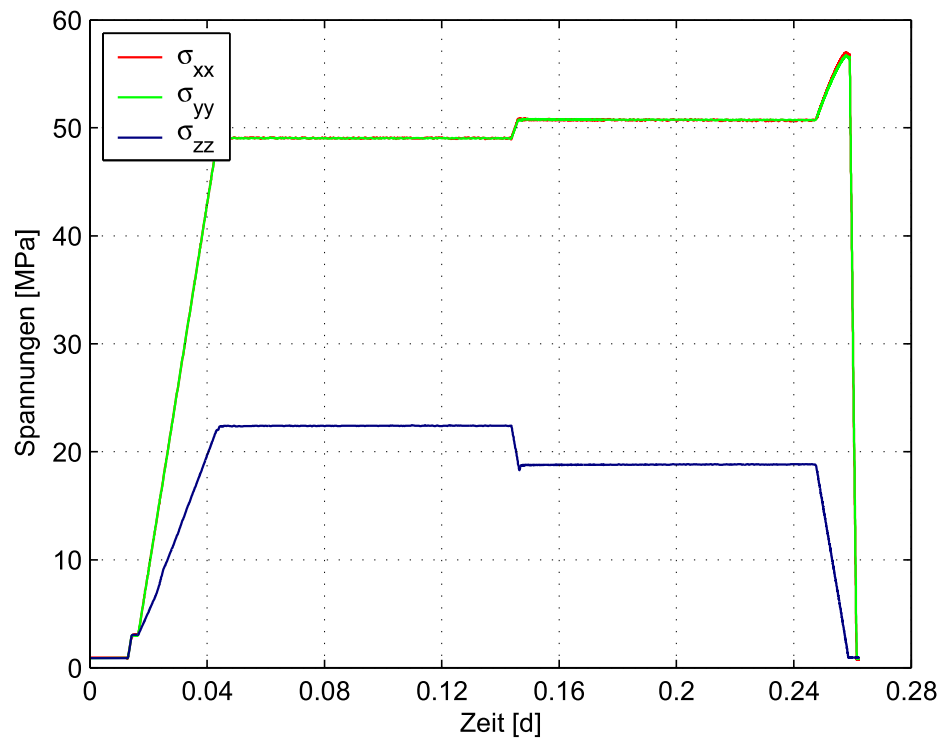


Abb. A12a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/02 Versuchsführung (Extension)

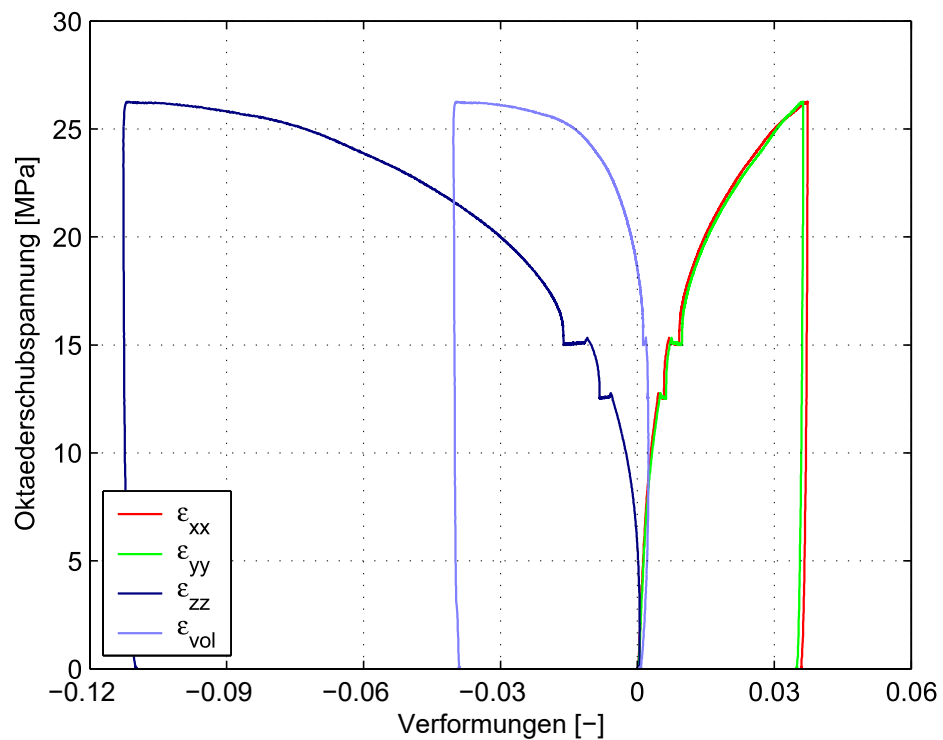


Abb. A12b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

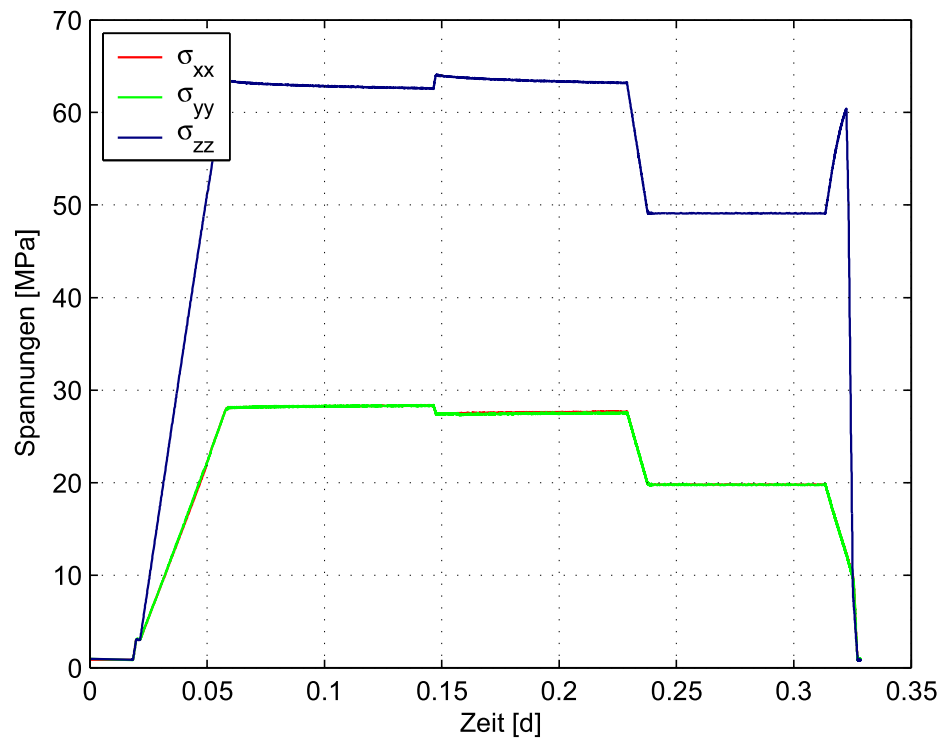


Abb. A13a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/008/03 Versuchsführung (Kompression)

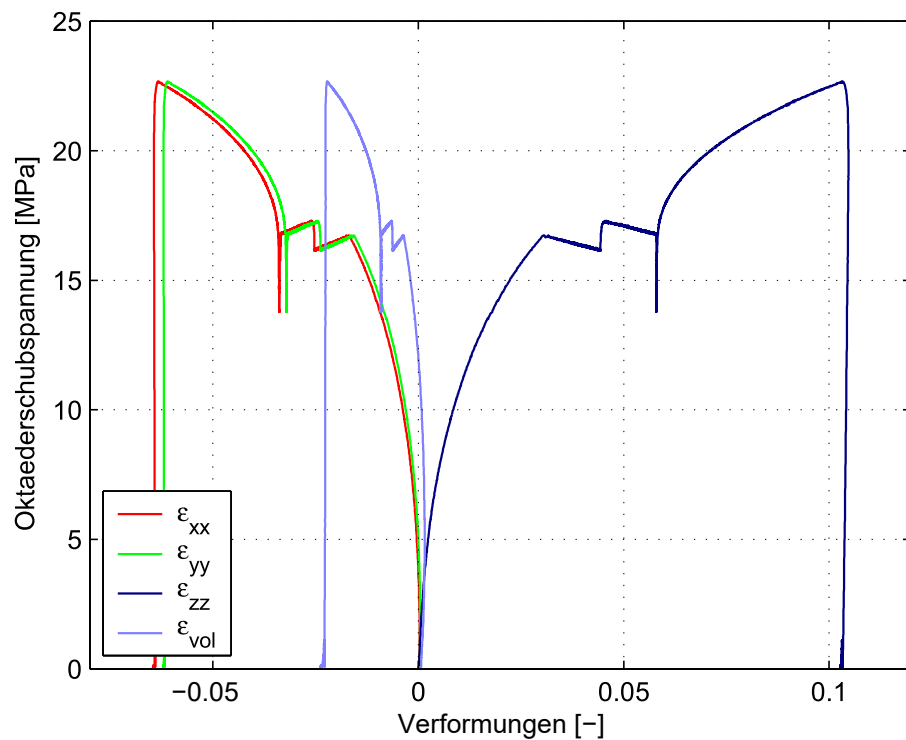


Abb. A13b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/008/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

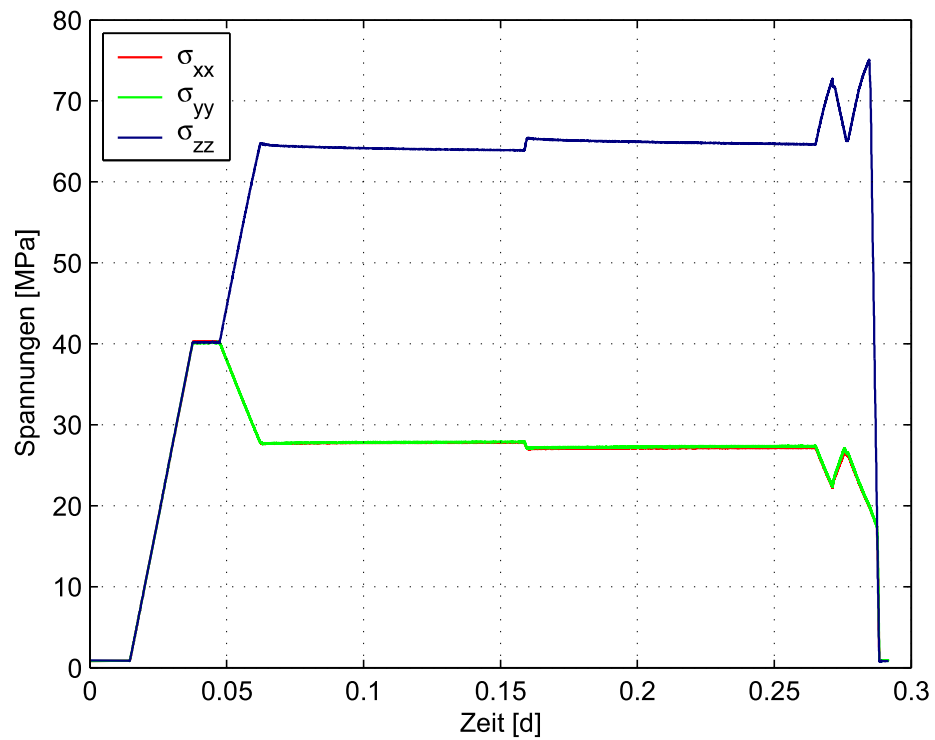


Abb. A14a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/01 Versuchsführung (Kompression)

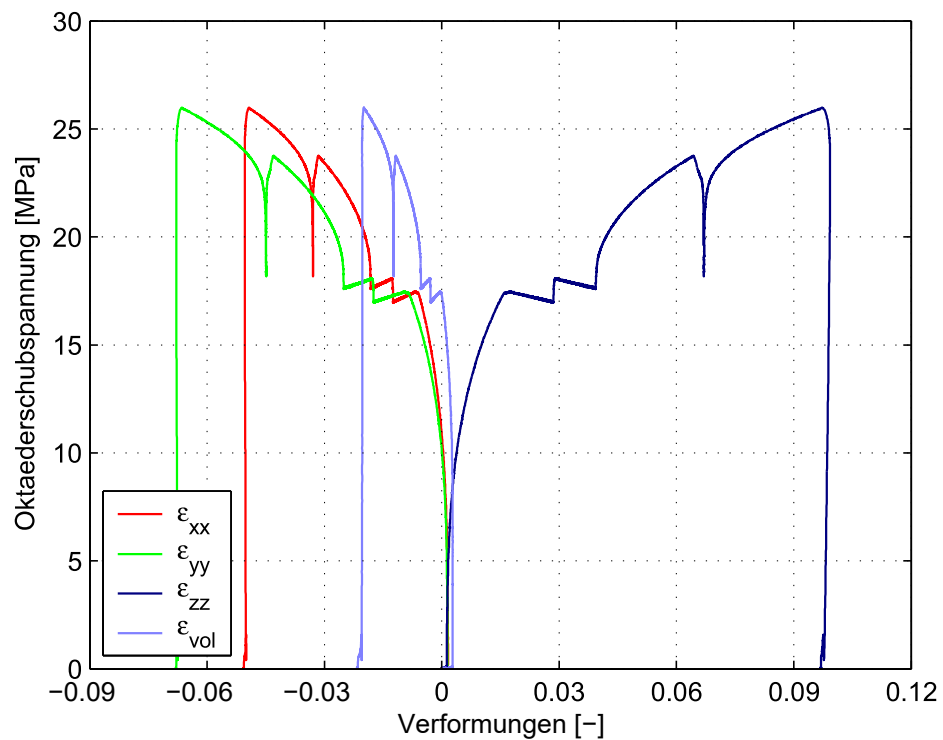


Abb. A14b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

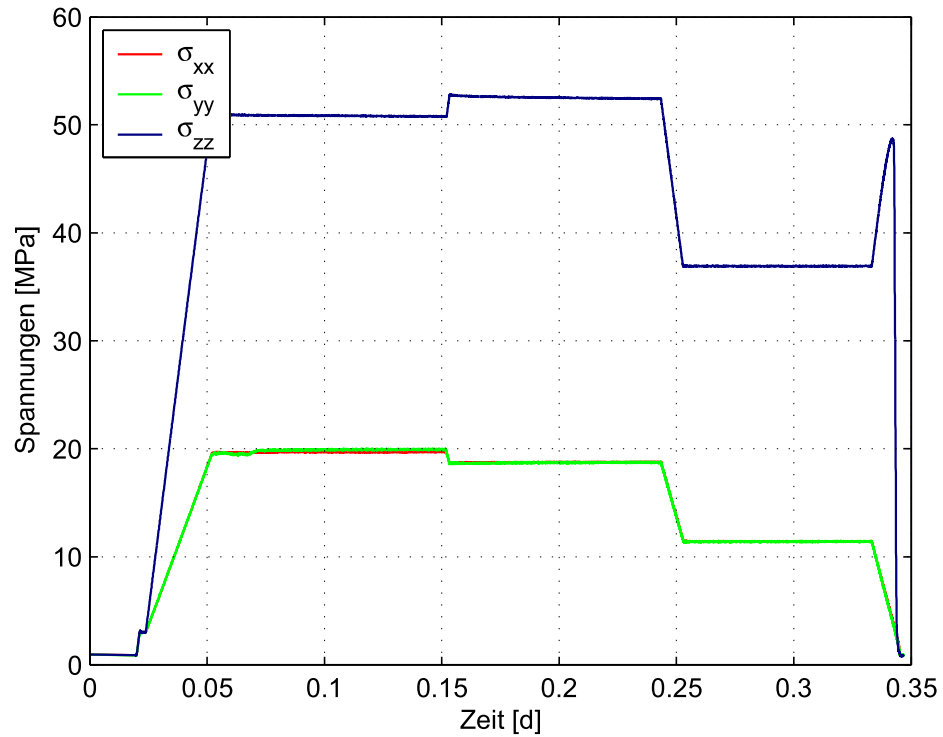


Abb. A15a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/02 Versuchsführung (Kompression)

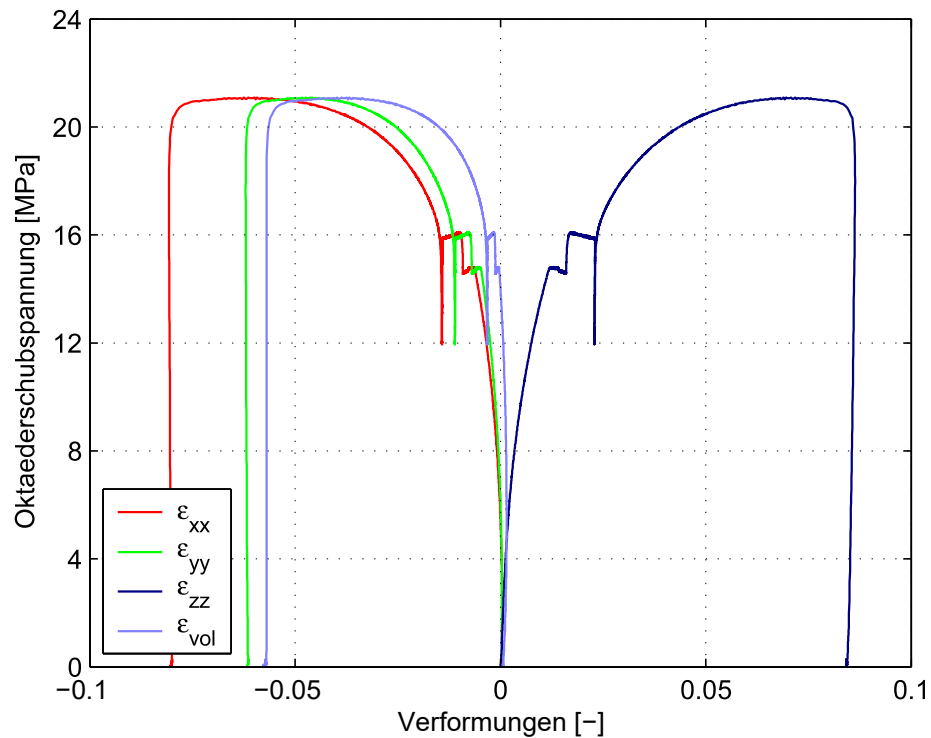


Abb. A15b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

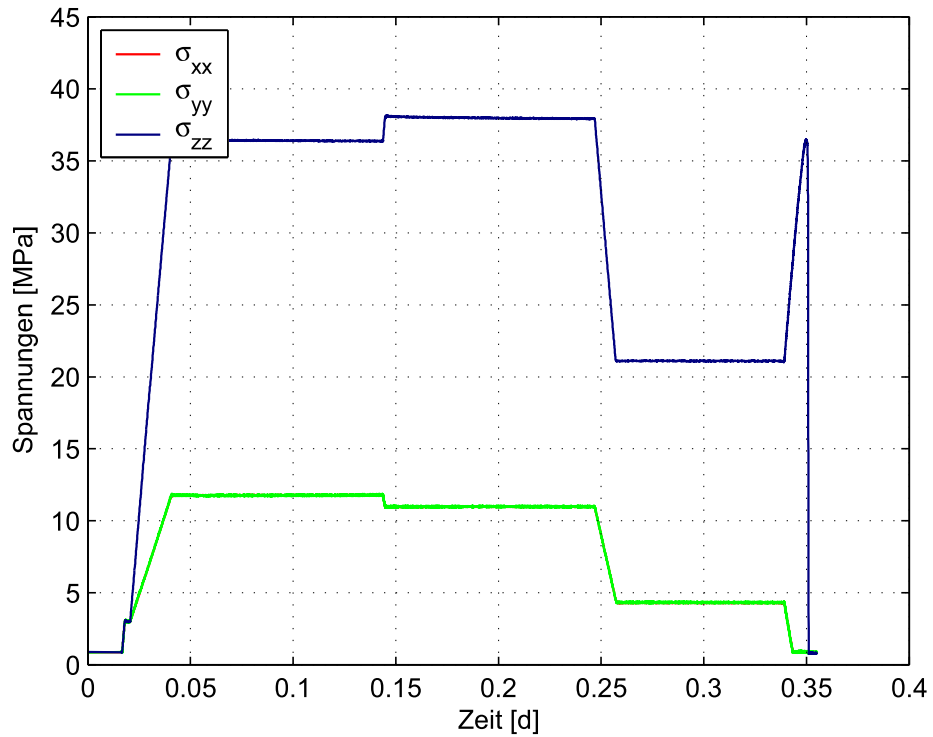


Abb. A16a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/03 Versuchsführung (Kompression)

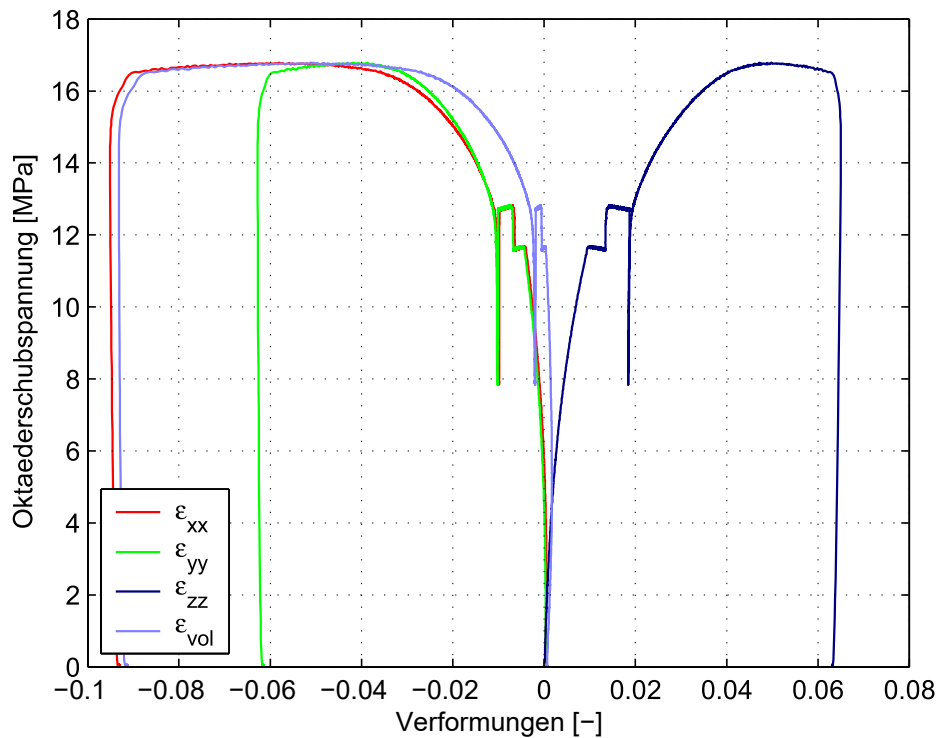


Abb. A16b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/010/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

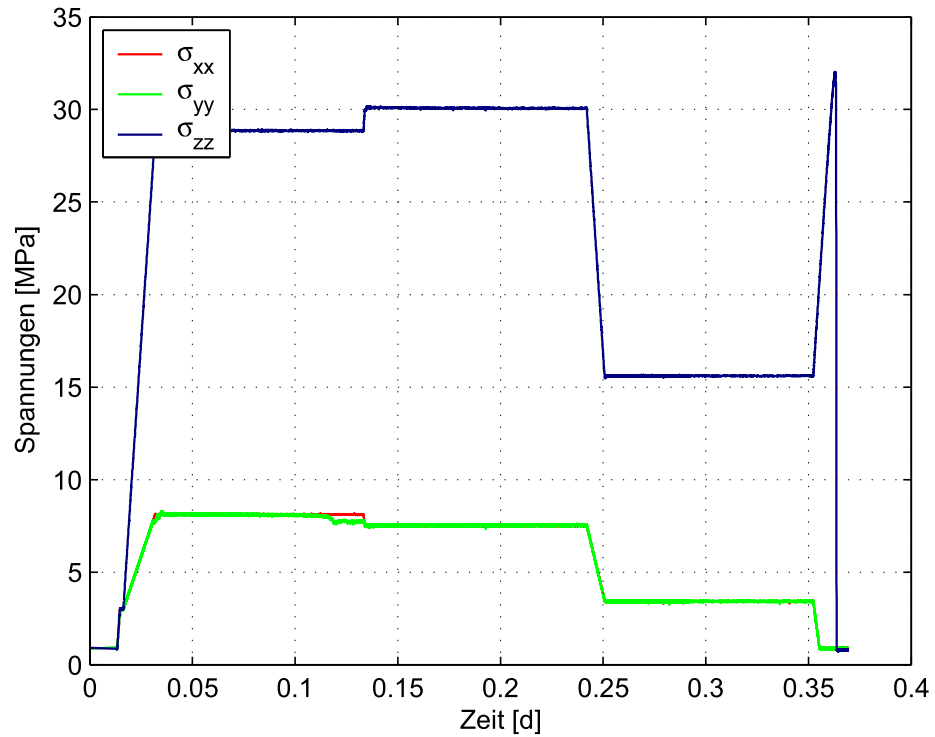


Abb. A17a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/001/01 Versuchsführung (Kompression)

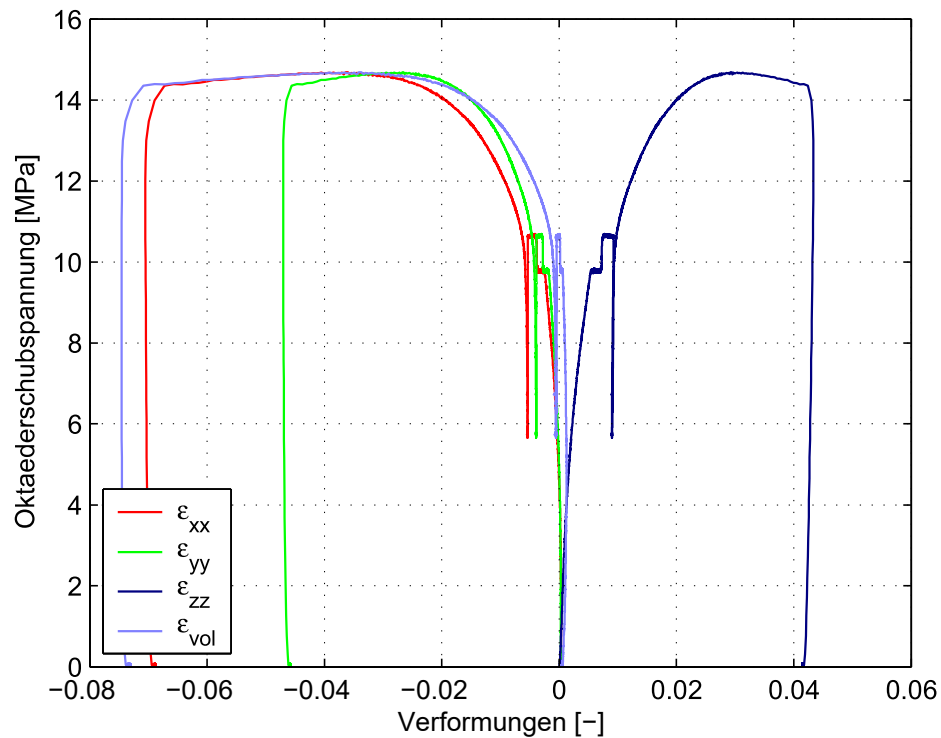


Abb. A17b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/001/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

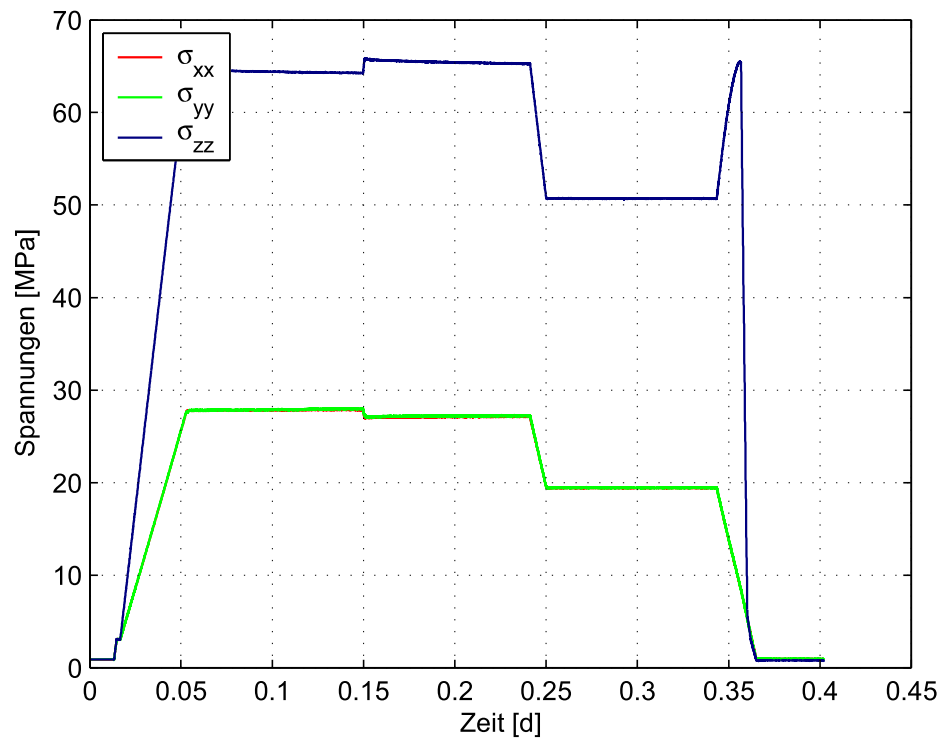


Abb. A18a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/007/04 Versuchsführung (Kompression)

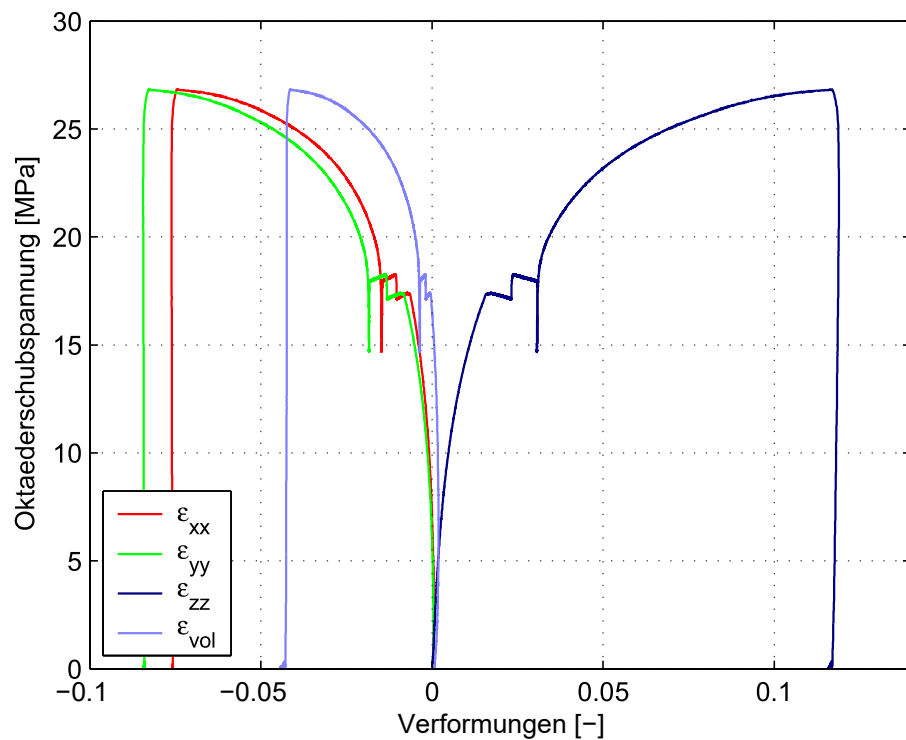


Abb. A18b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/007/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

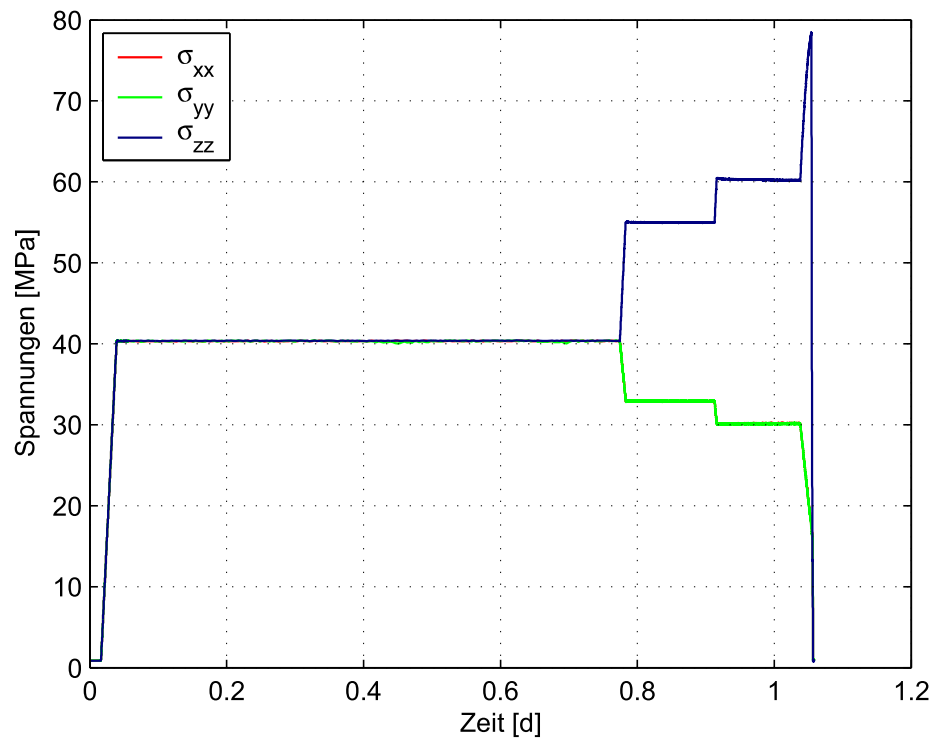


Abb. A19a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/001/02 Versuchsführung (Kompression)

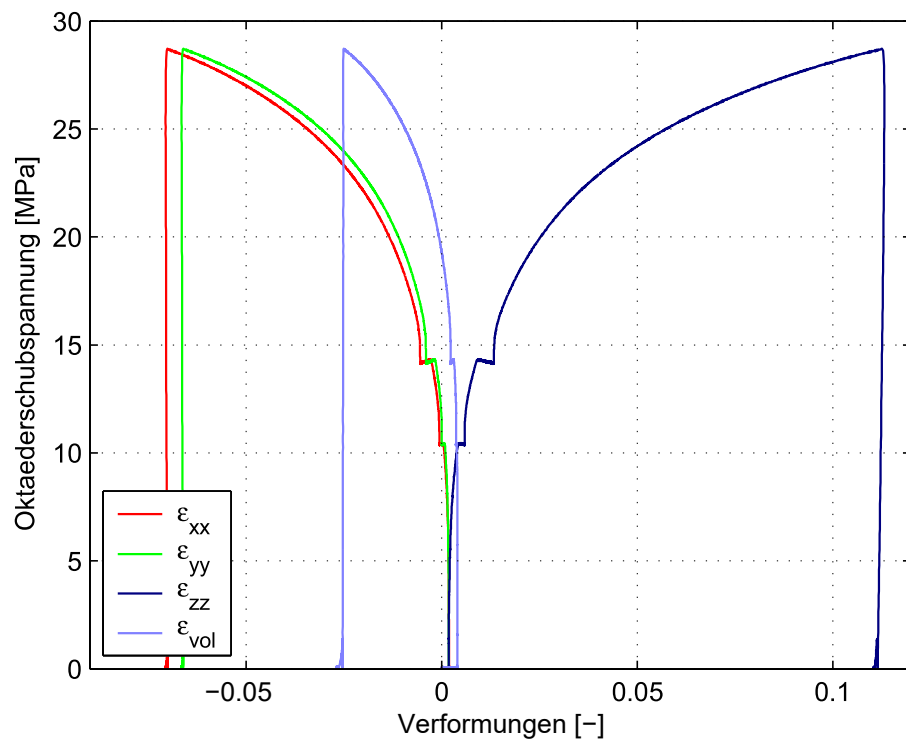


Abb. A19b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/001/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

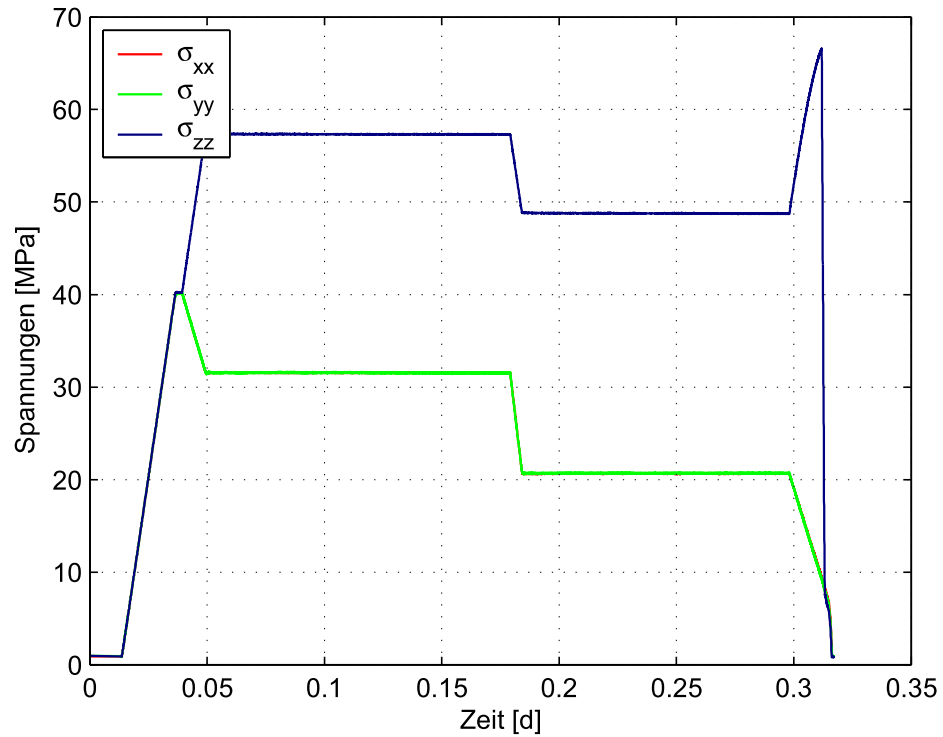


Abb. A20a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/02 Versuchsführung (Kompression)

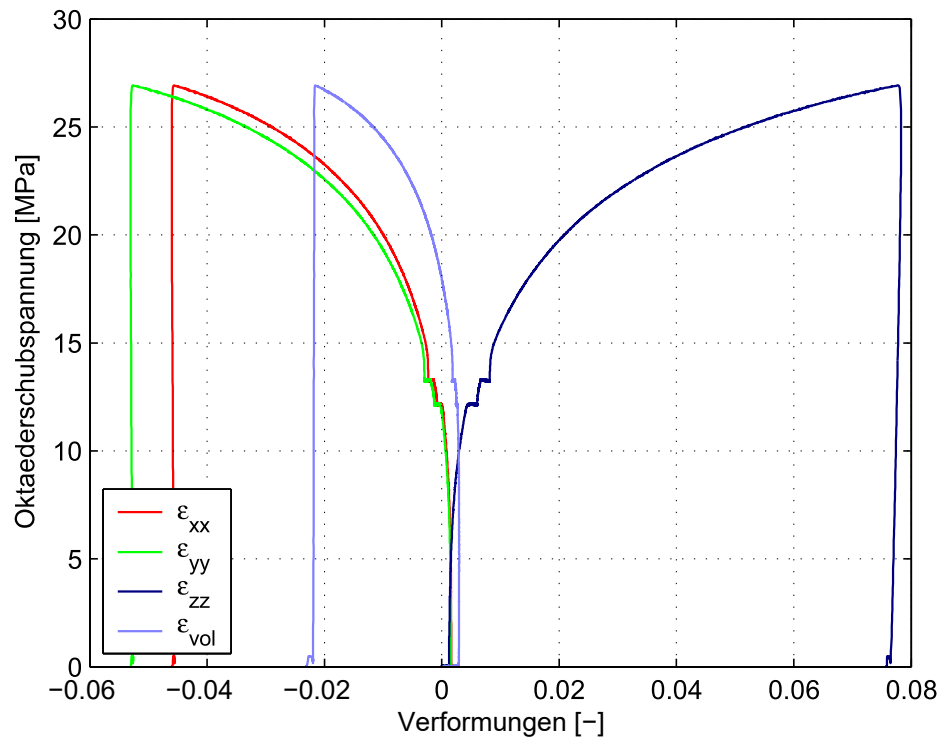


Abb. A20b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

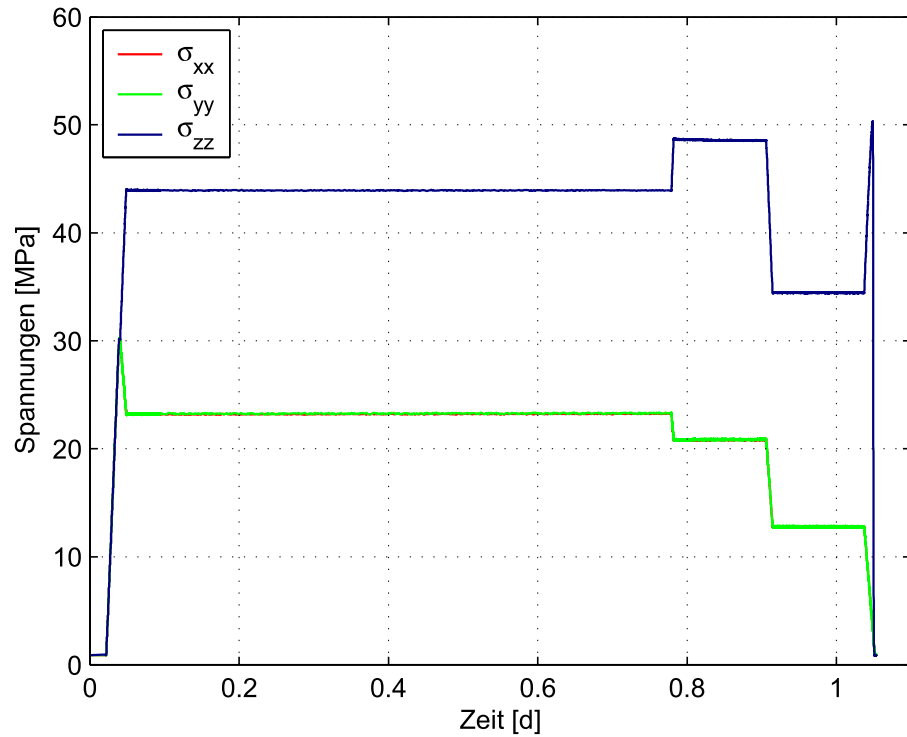


Abb. A21a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/03 Versuchsführung (Kompression)

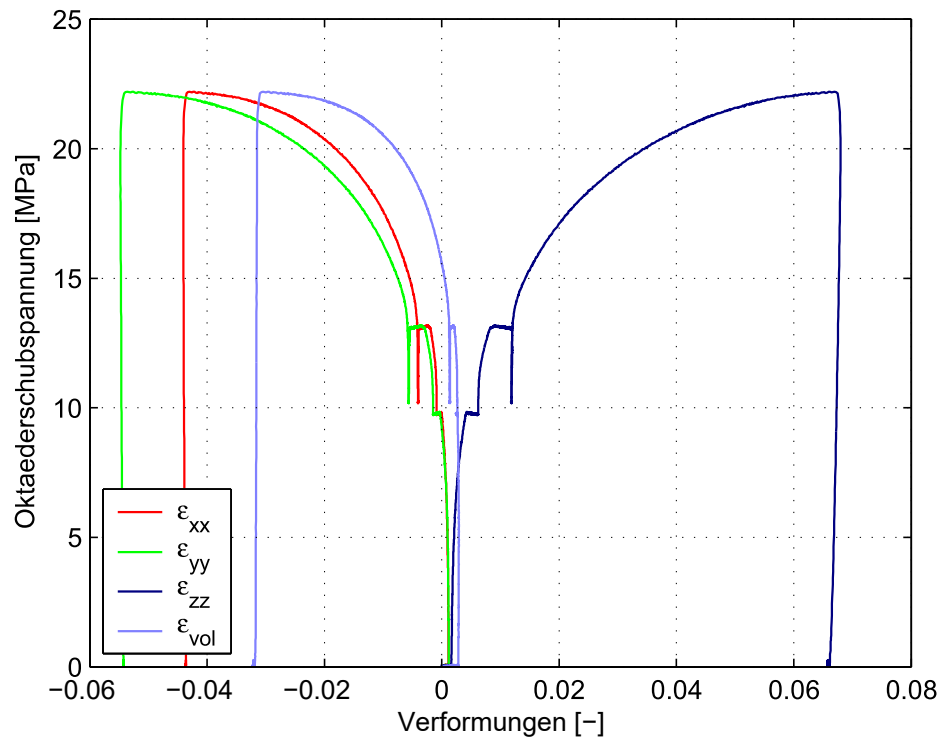


Abb. A21b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

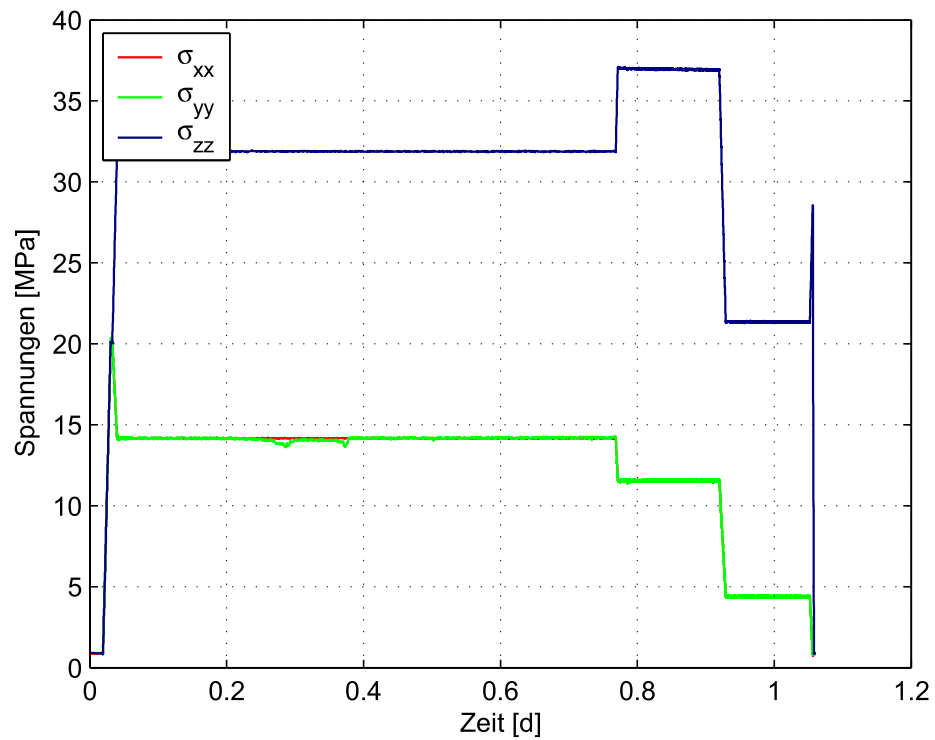


Abb. A22a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/04 Versuchsführung (Kompression)

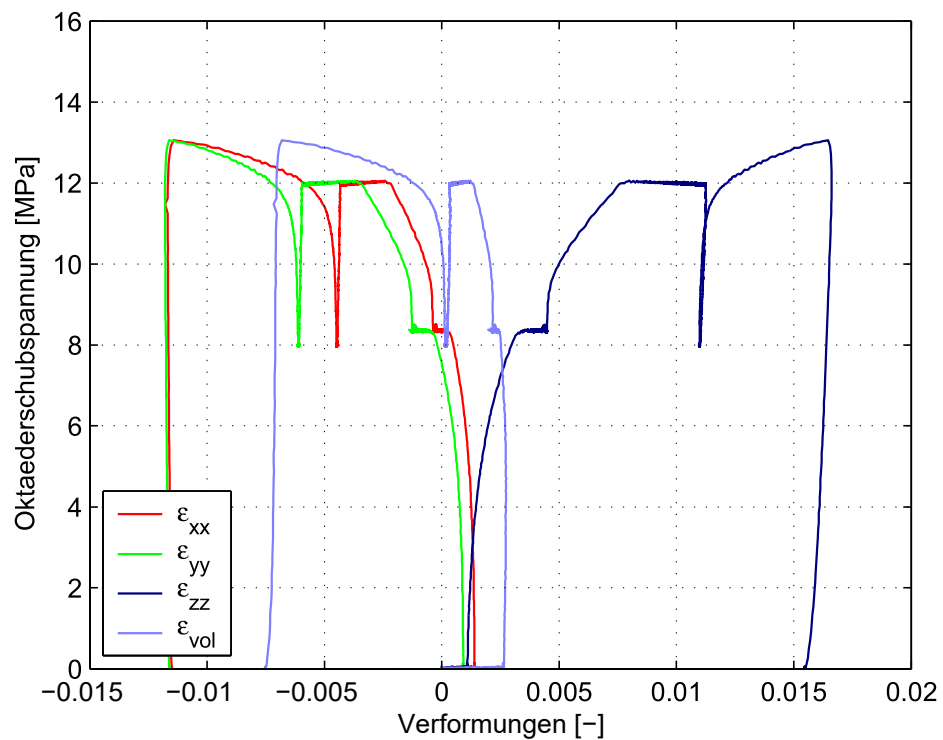


Abb. A22b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

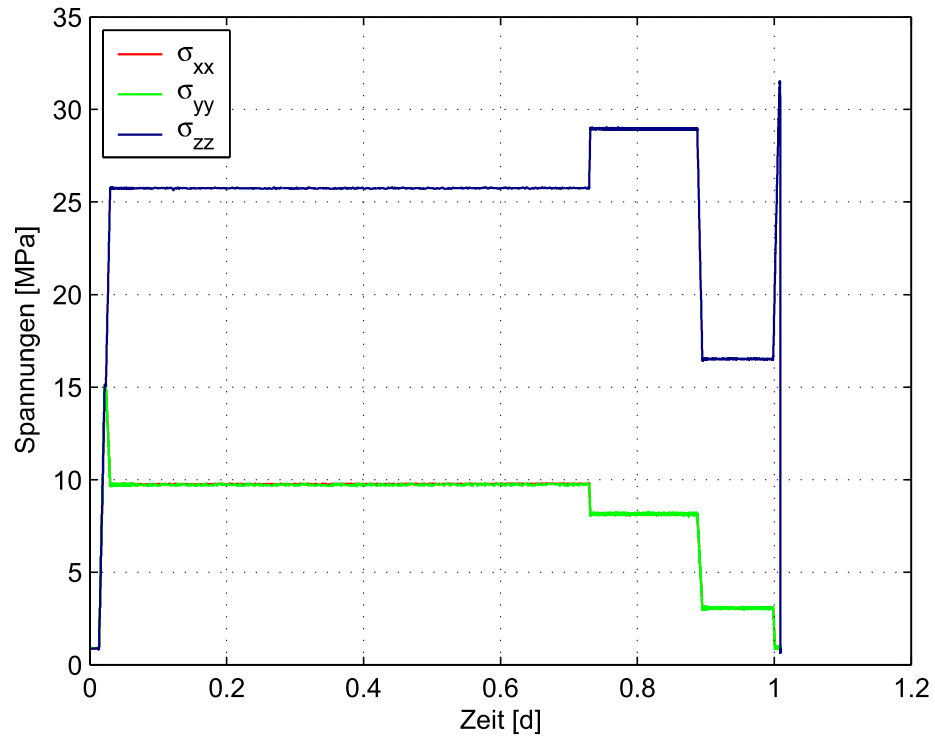


Abb. A23a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/05 Versuchsführung (Kompression)

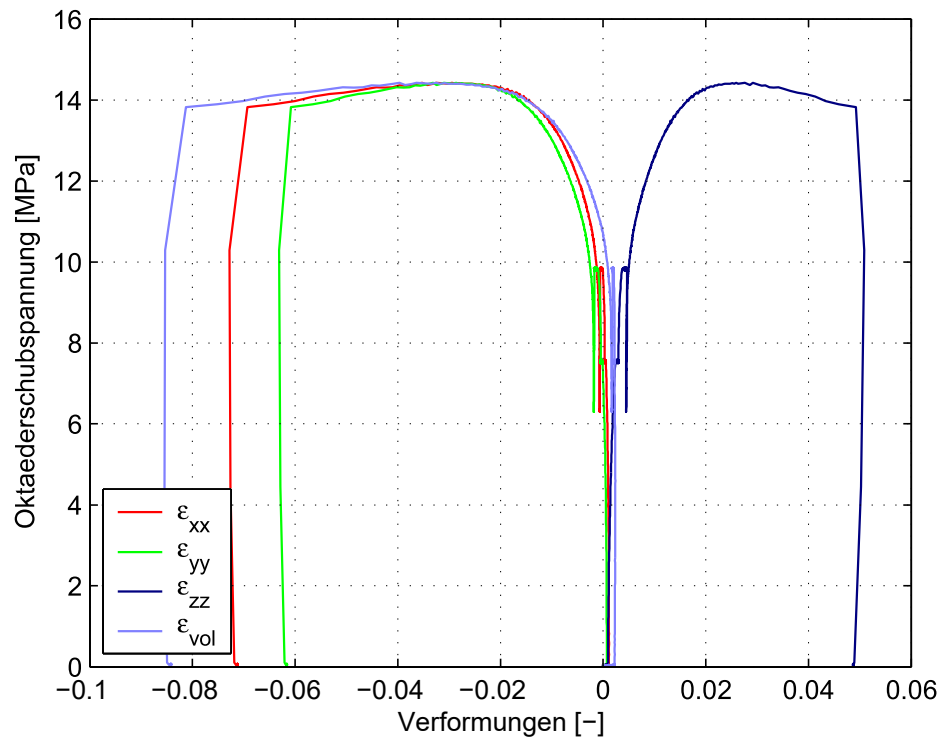


Abb. A23b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/006/05 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

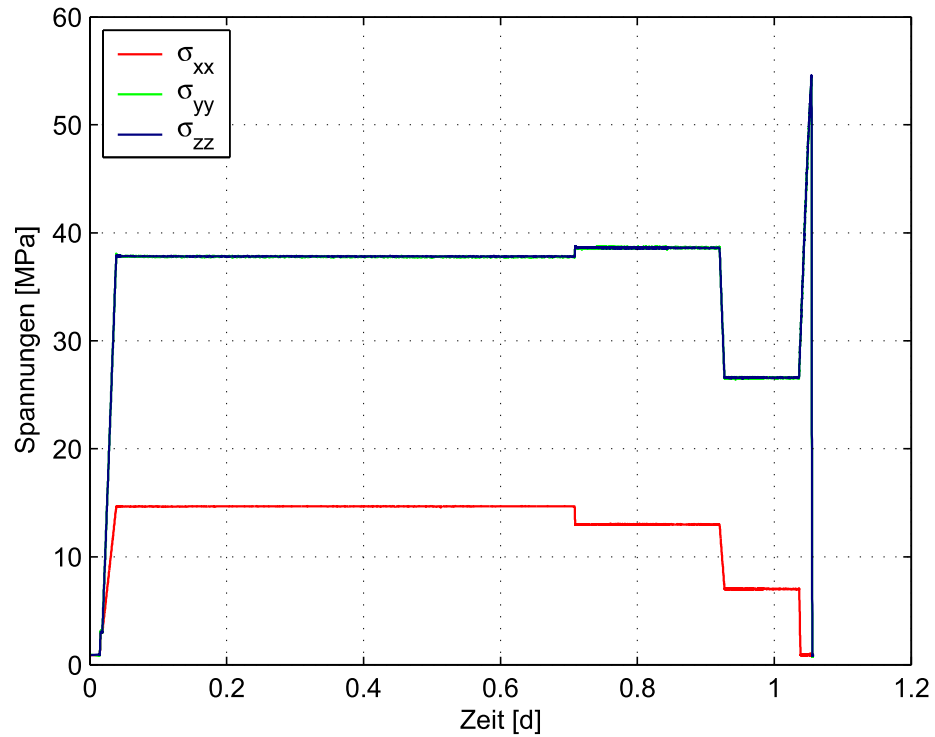


Abb. A24a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/01 Versuchsführung (Extension)

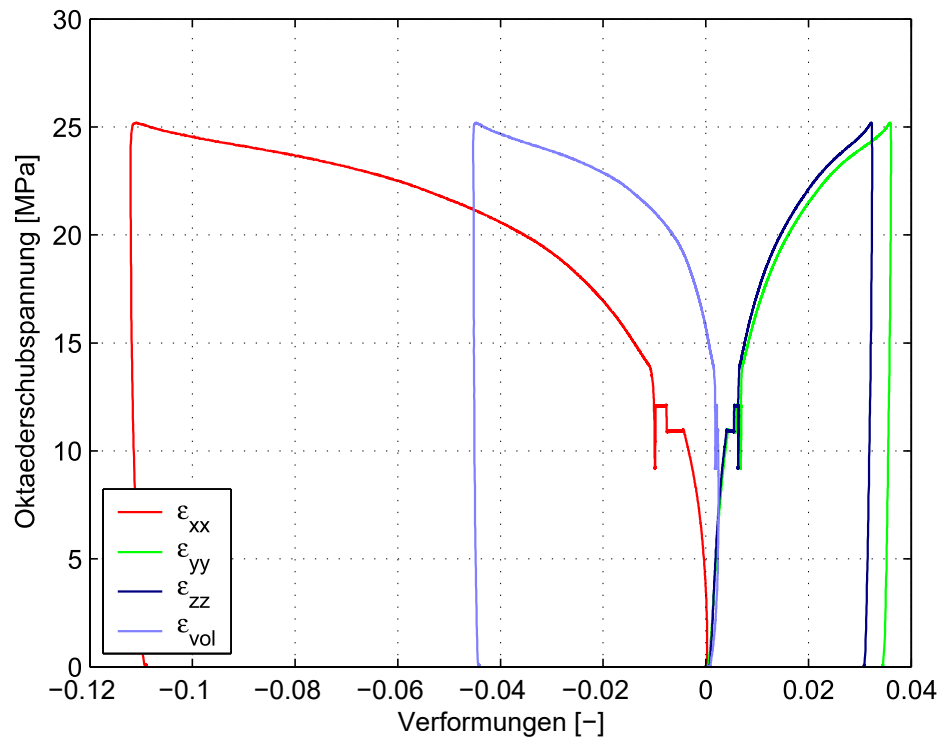


Abb. A24b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

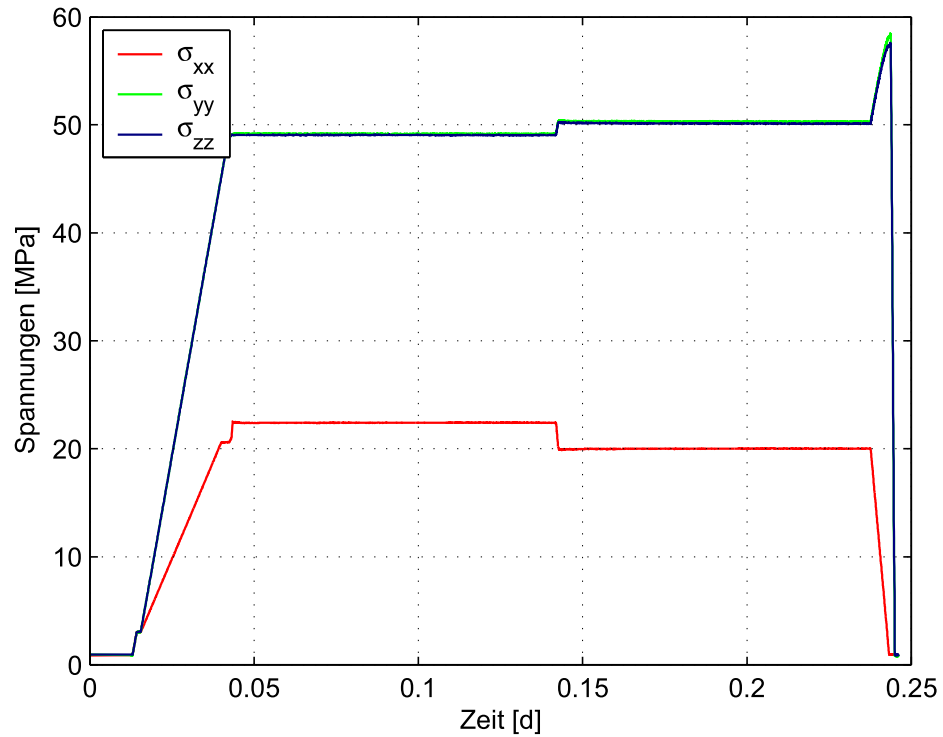


Abb. A25a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/02 Versuchsführung (Extension)

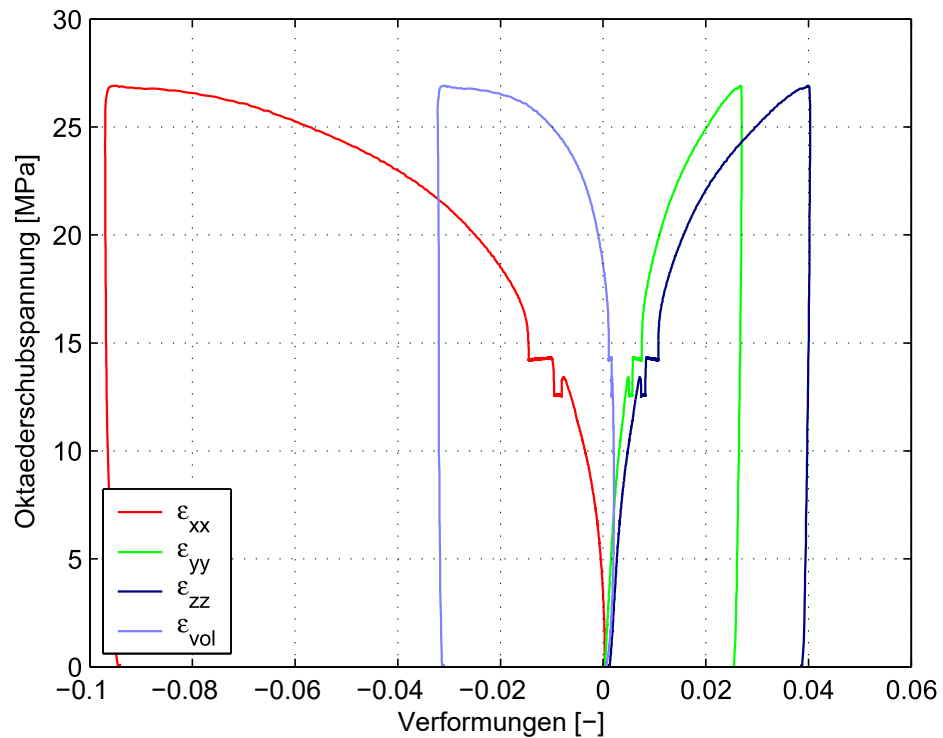


Abb. A25b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

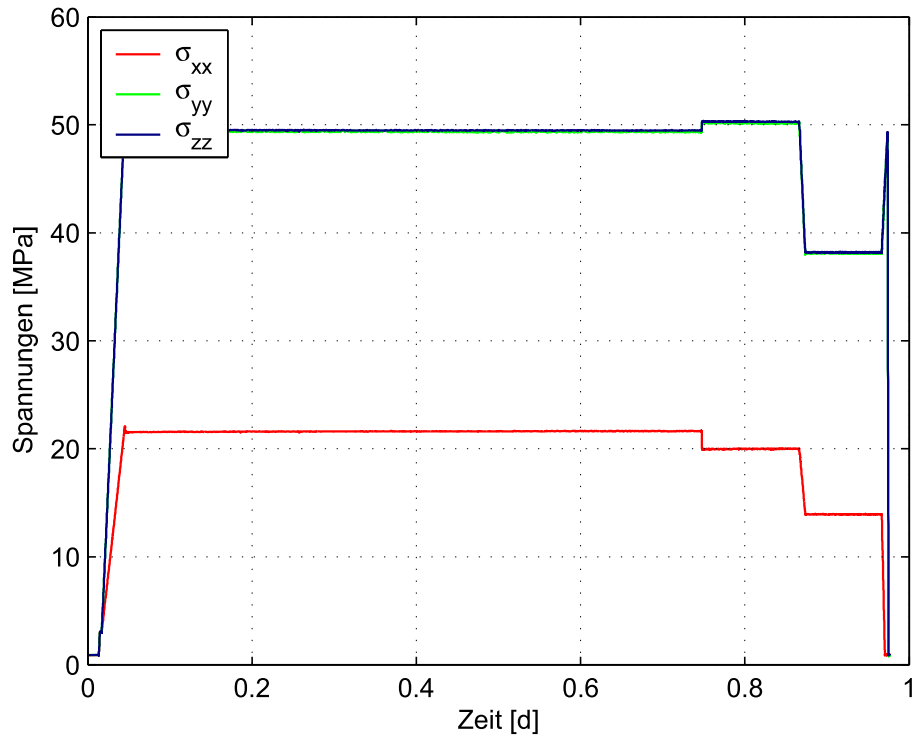


Abb. A26a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/03 Versuchsführung (Extension)

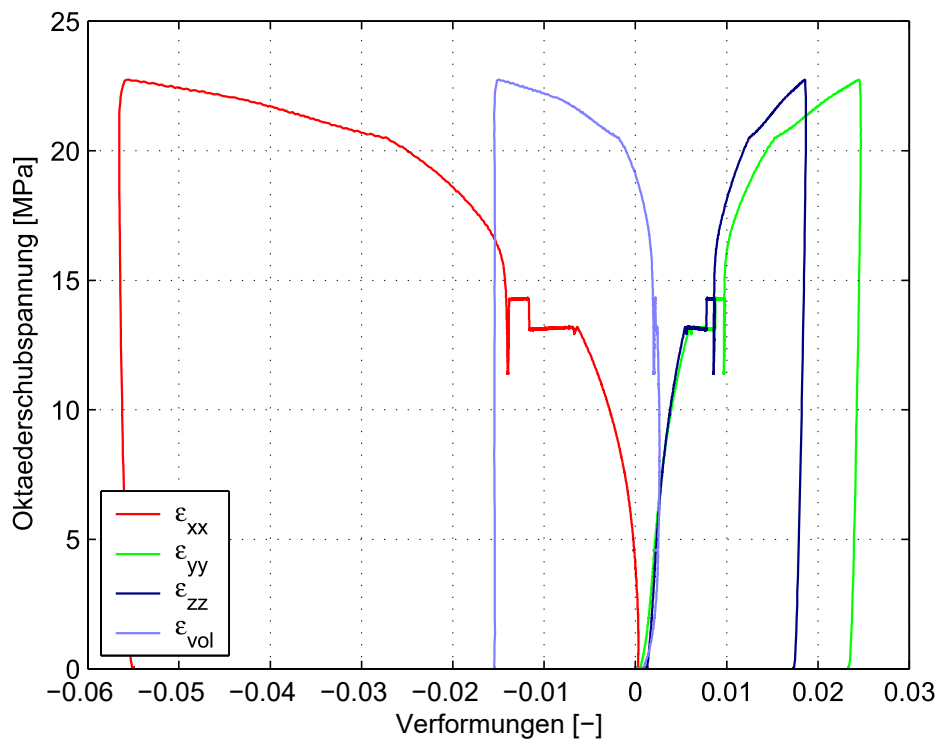


Abb. A26b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

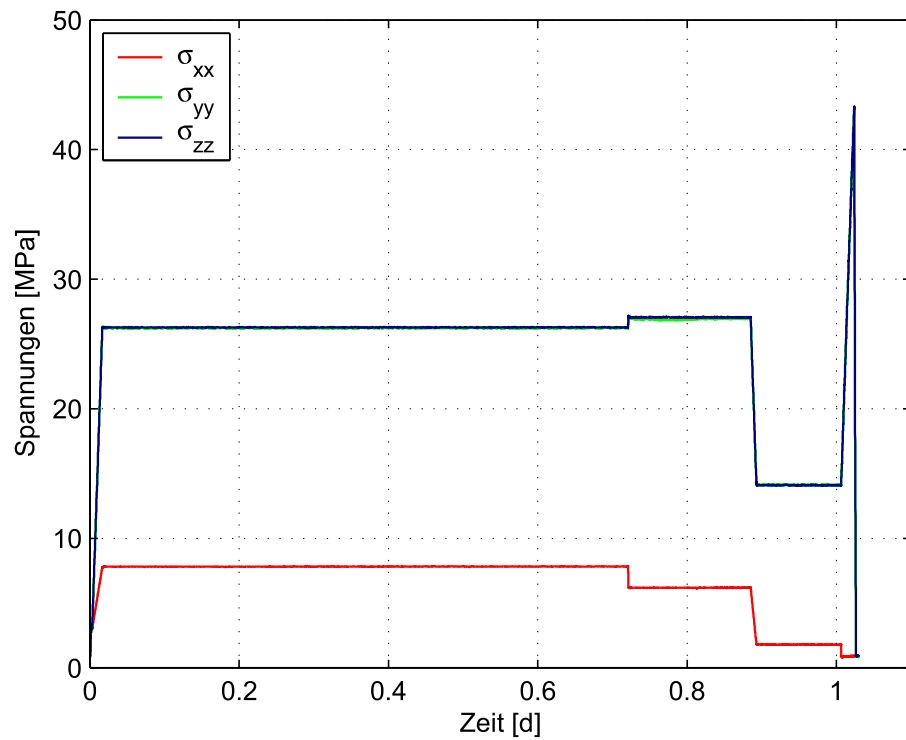


Abb. A27a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/05 Versuchsführung (Extension)

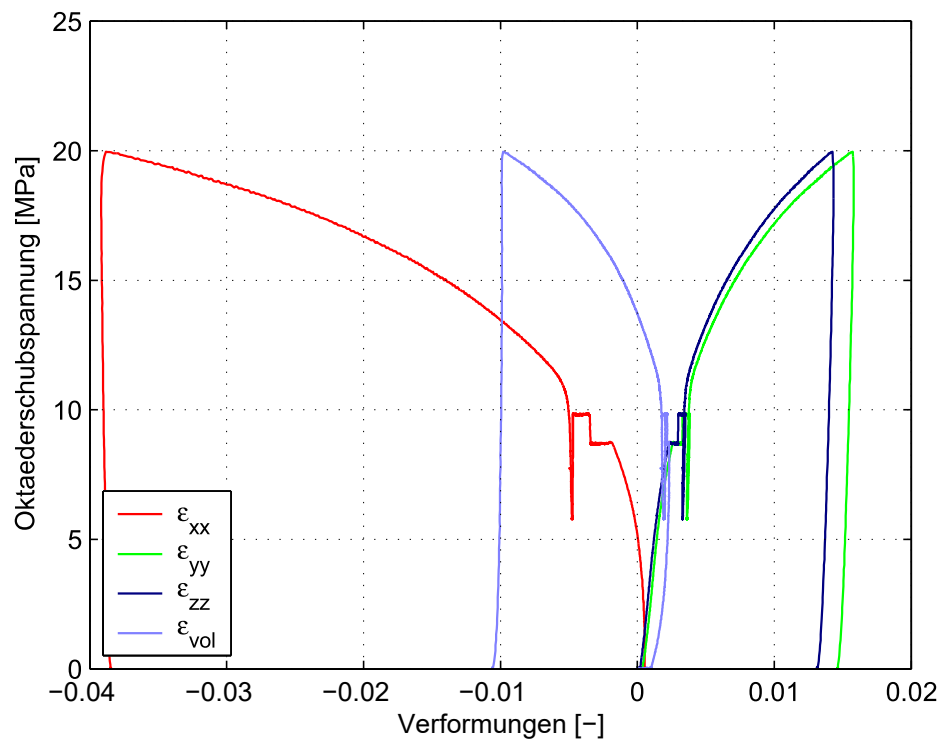


Abb. A27b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/05 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

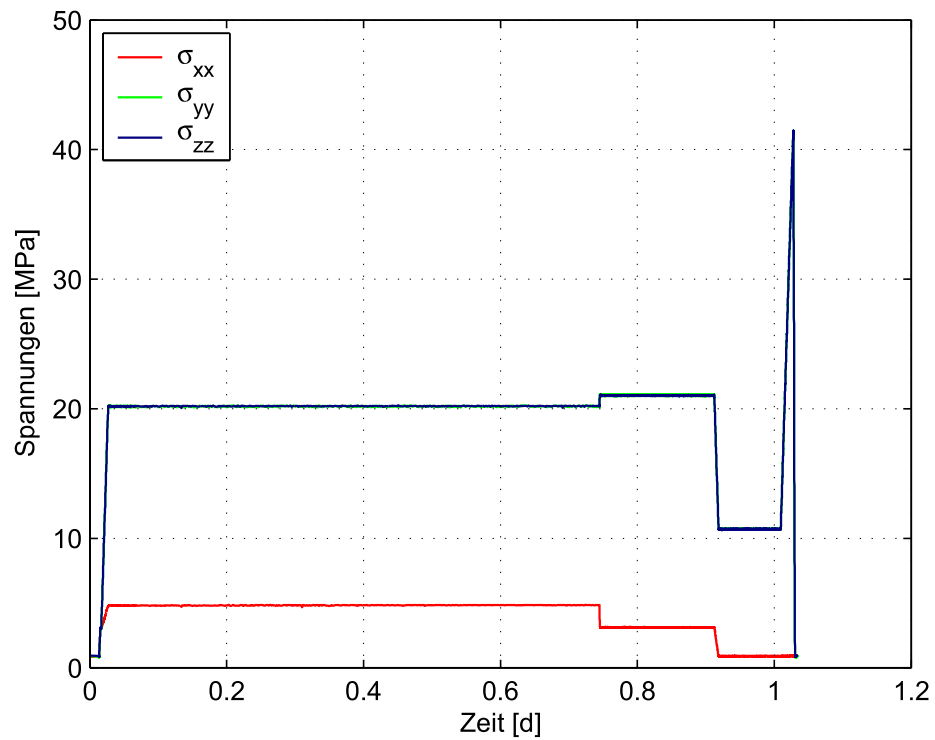


Abb. A28a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/06 Versuchsführung (Extension)

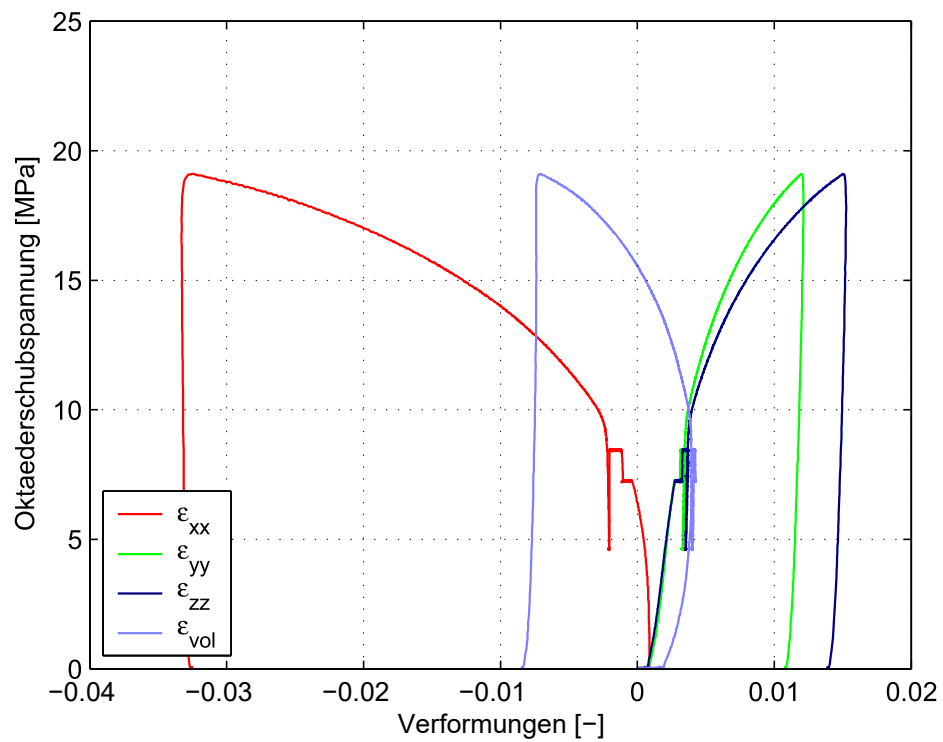


Abb. A28b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/06 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

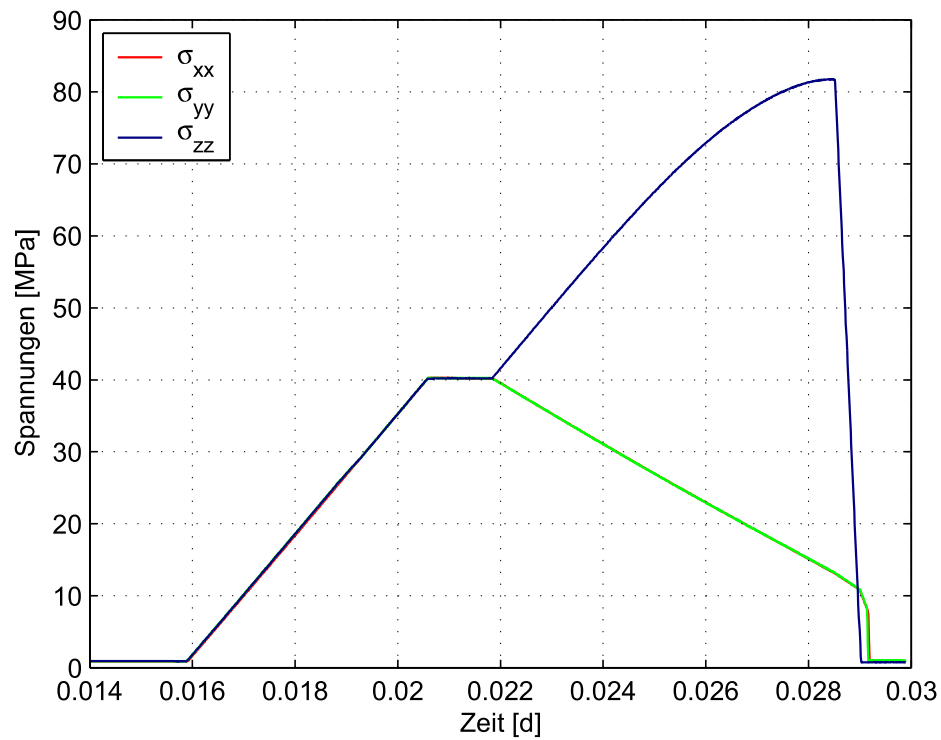


Abb. A29a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/02 Versuchsführung (Kompression)

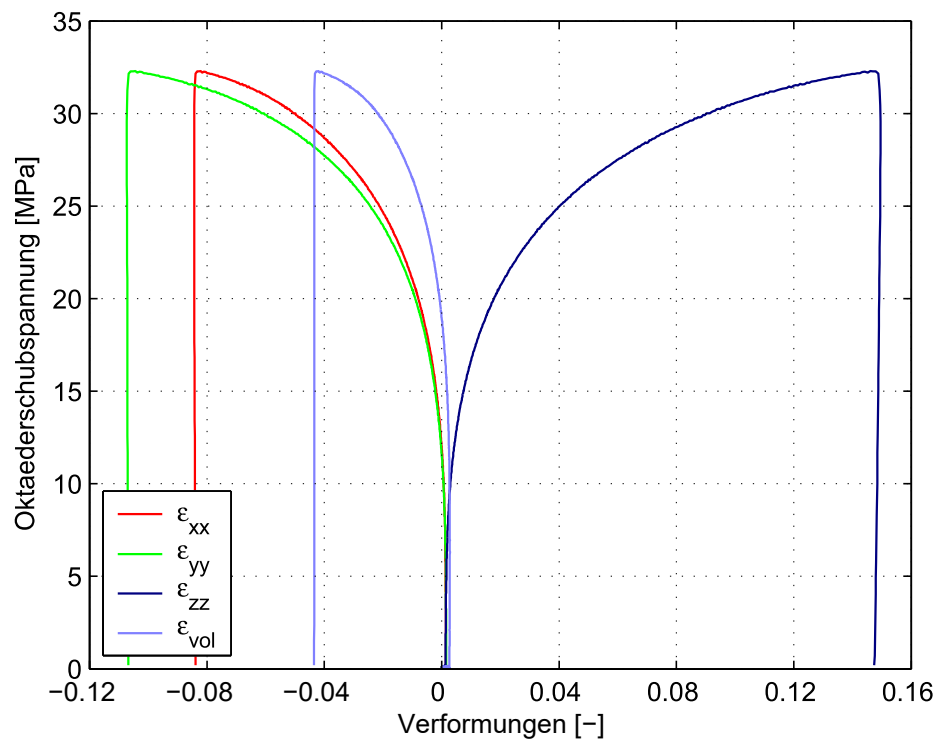


Abb. A29b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

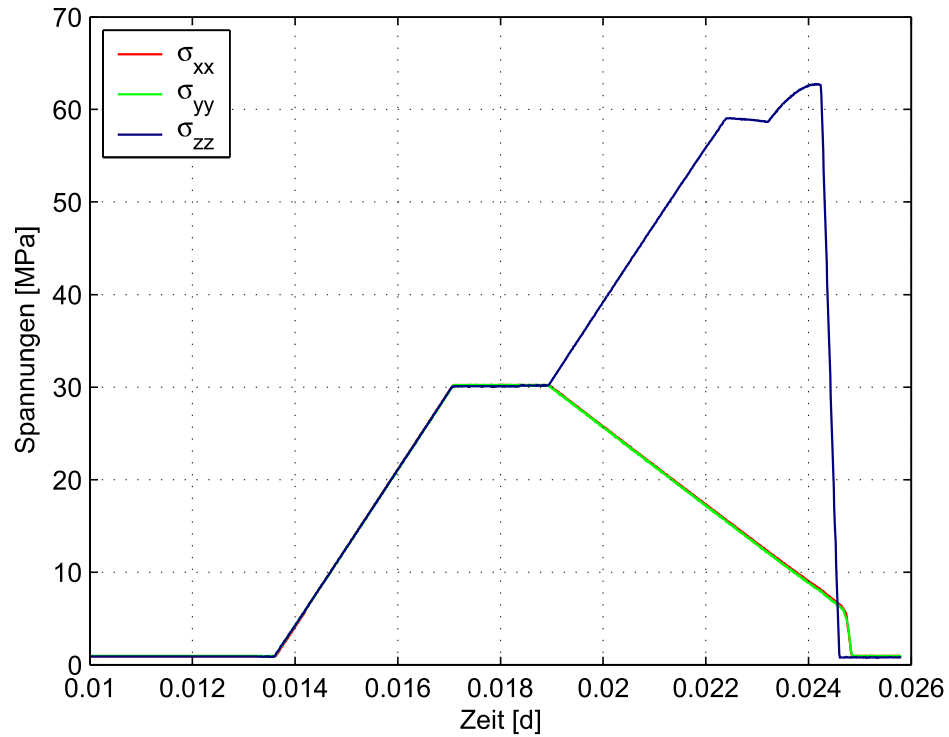


Abb. A30a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/03 Versuchsführung (Kompression)

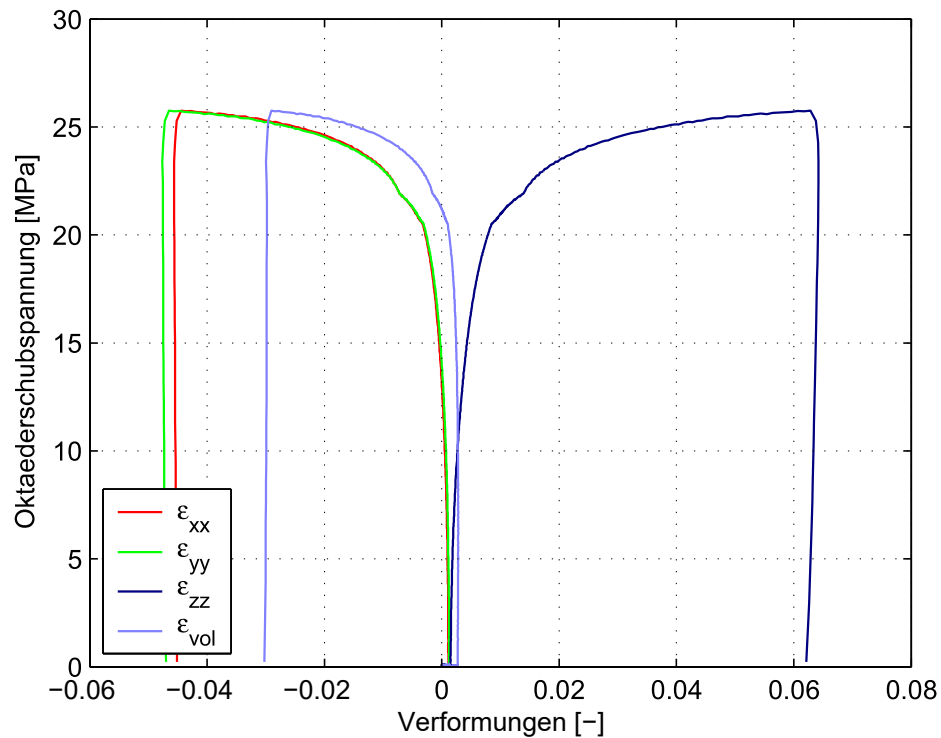


Abb. A30b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

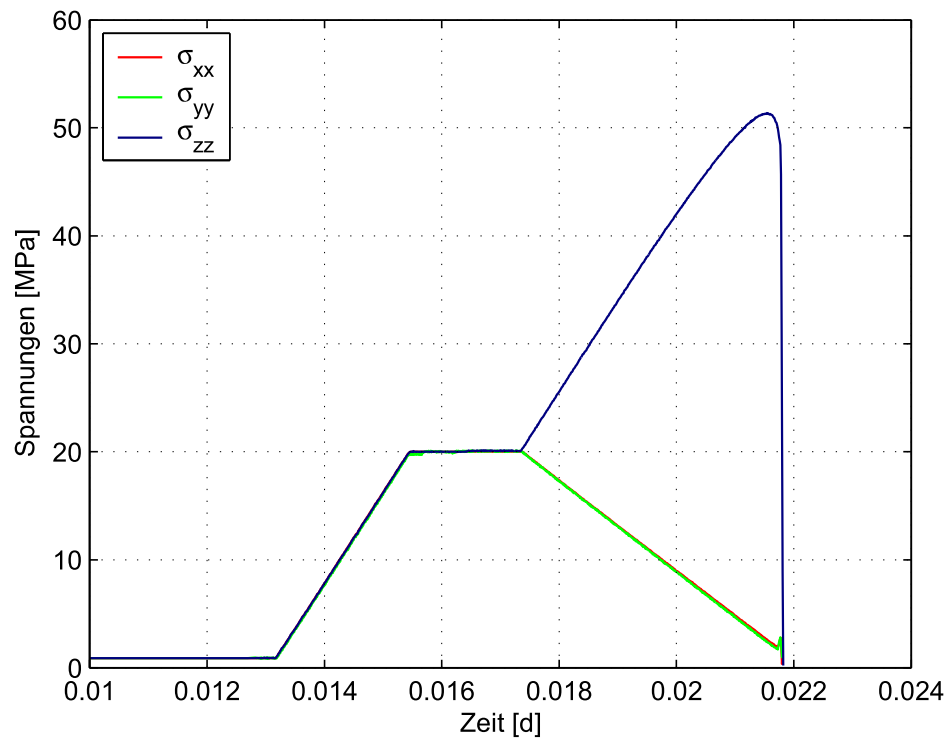


Abb. A31a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/04 Versuchsführung (Kompression)

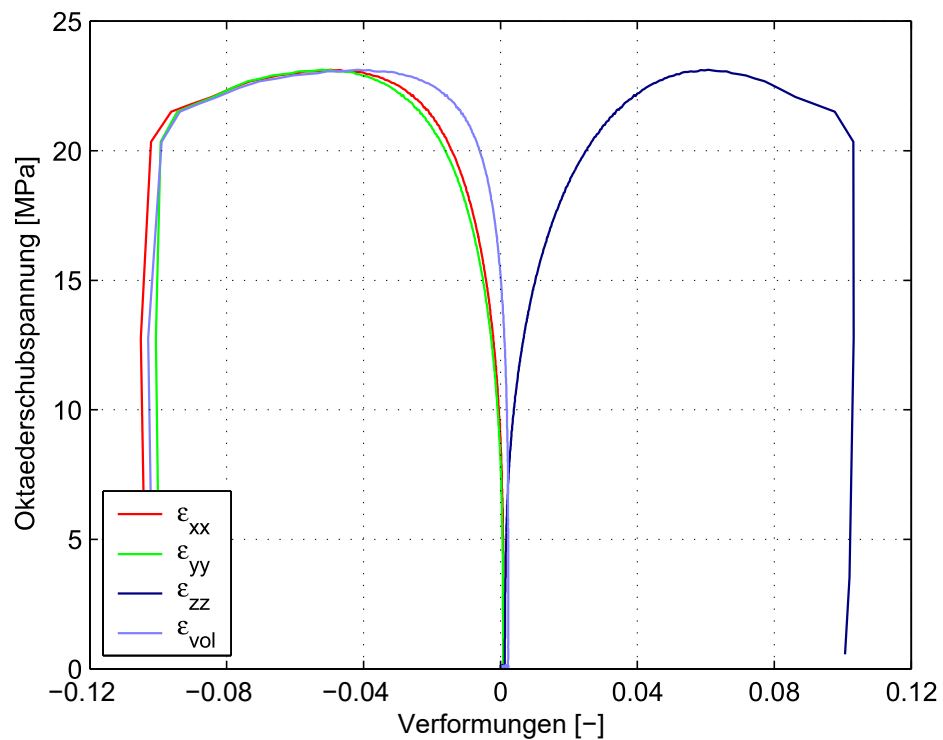


Abb. A31b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/008/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

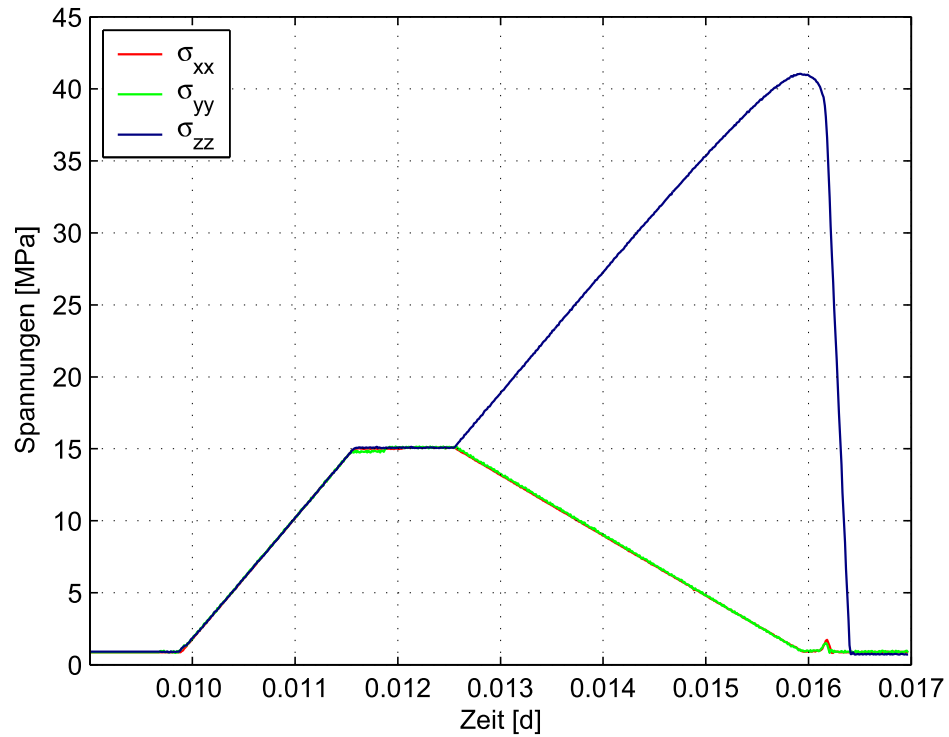


Abb. A32a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/02 Versuchsführung (Kompression)

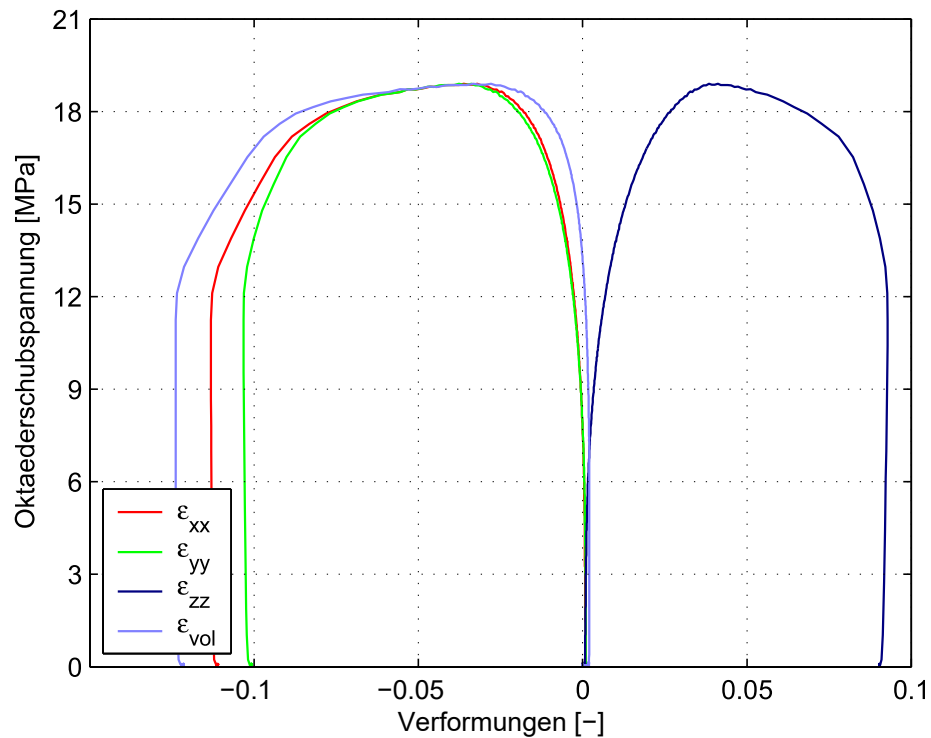


Abb. A32b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

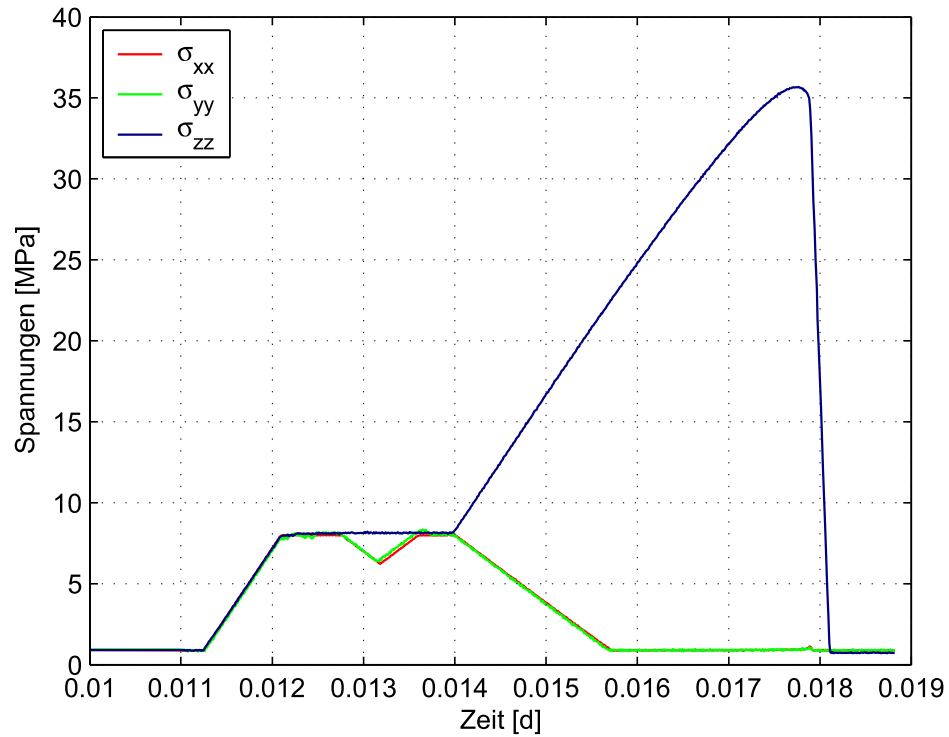


Abb. A33a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/03 Versuchsführung (Kompression)

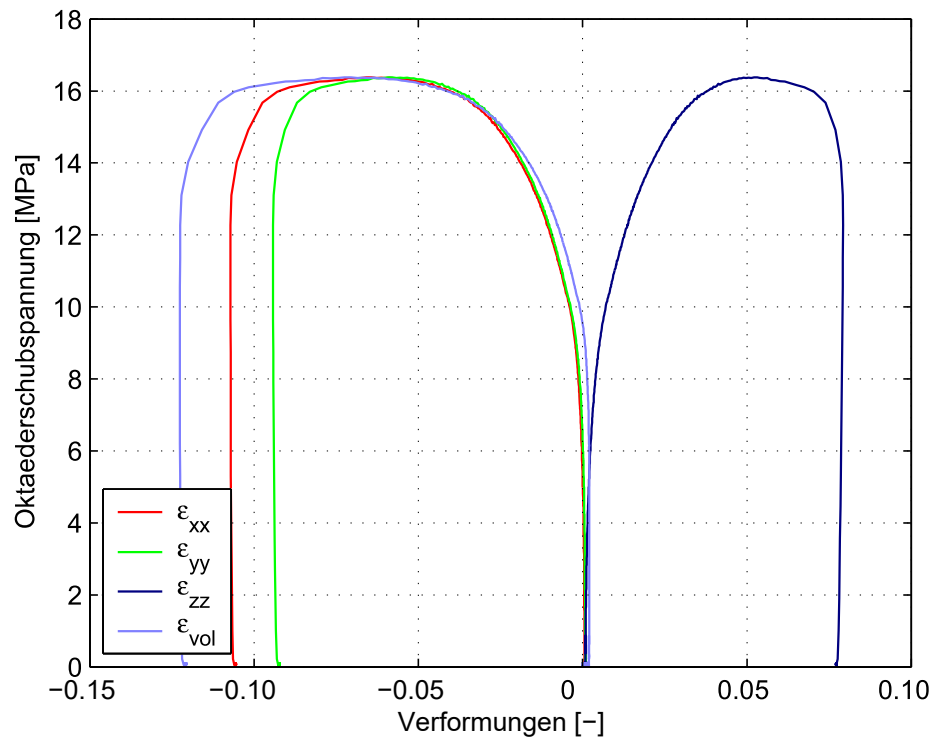


Abb. A33b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

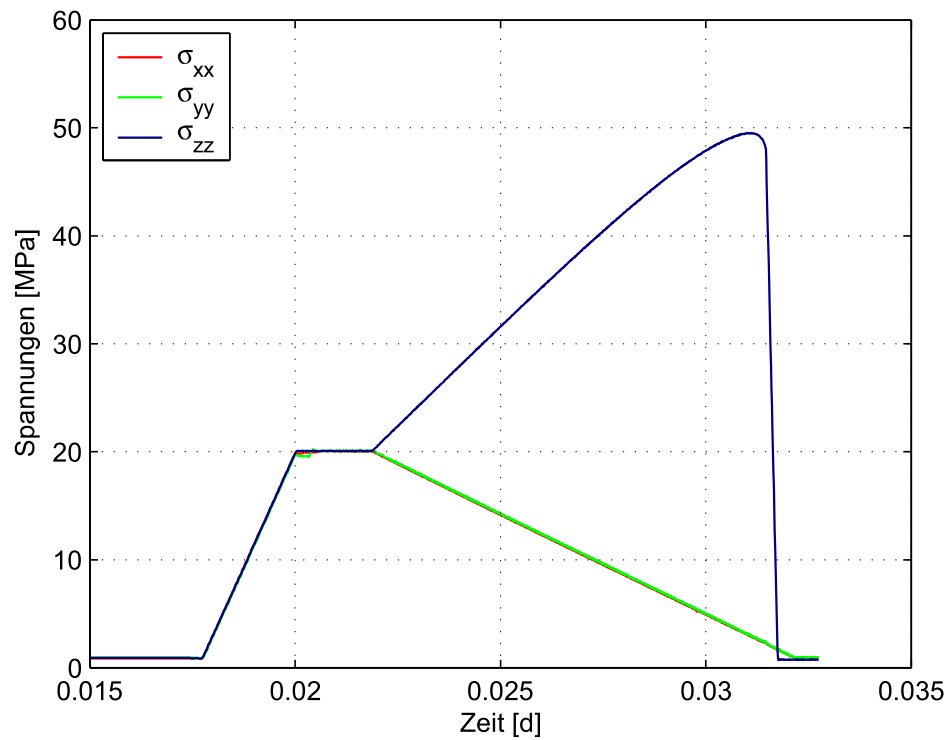


Abb. A34a: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/04 Versuchsführung (Kompression)

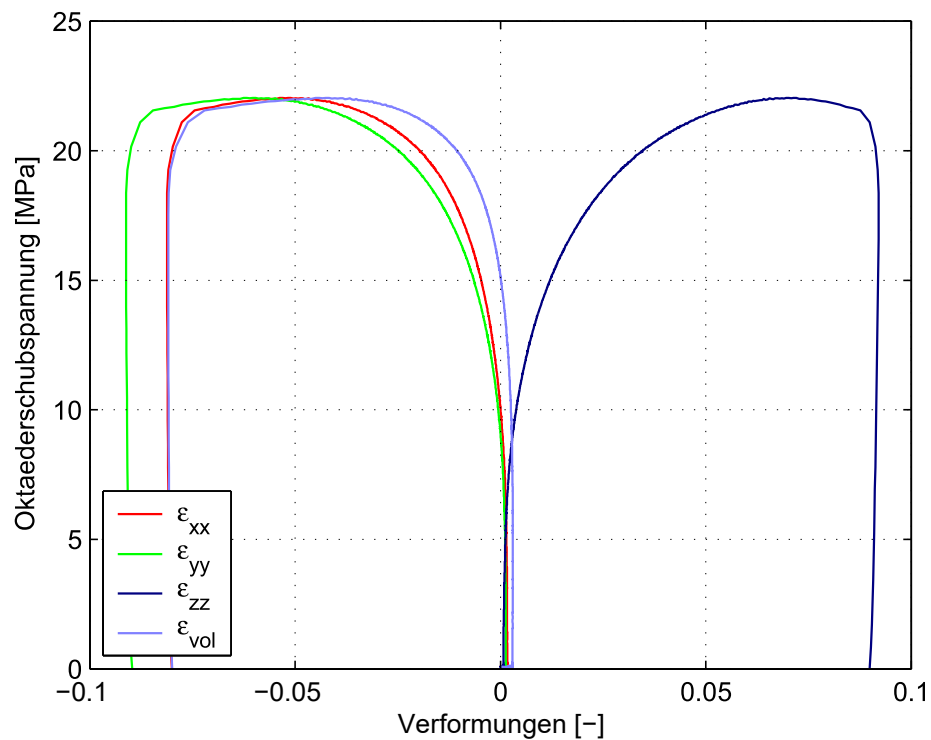


Abb. A34b: Probe: Twenthe-Rijn480/10/010/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

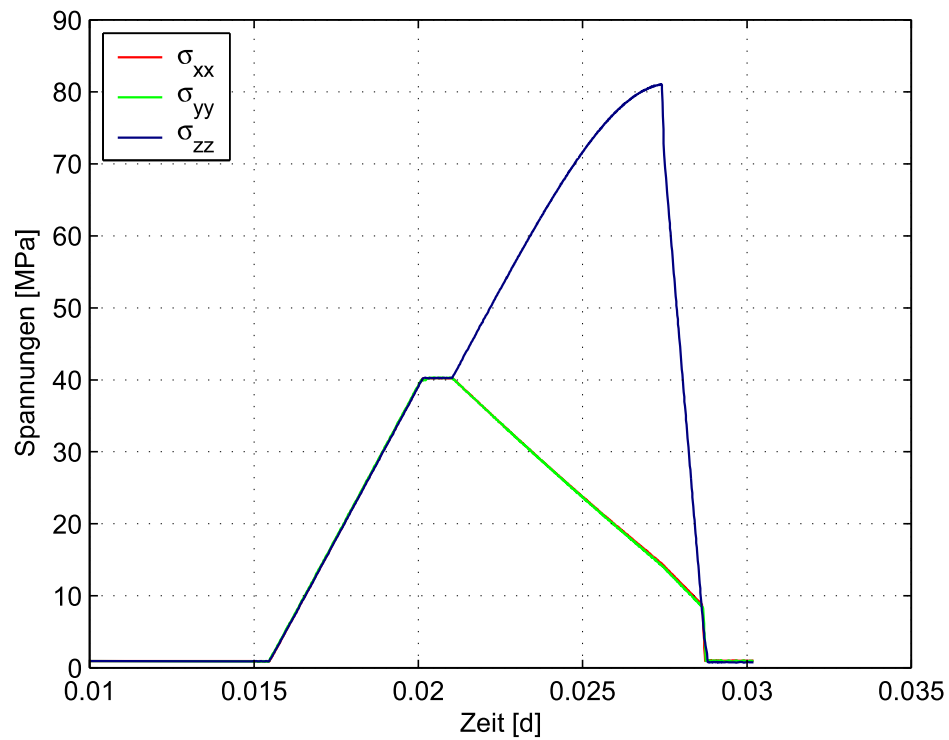


Abb. A35a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/02 Versuchsführung (Kompression)

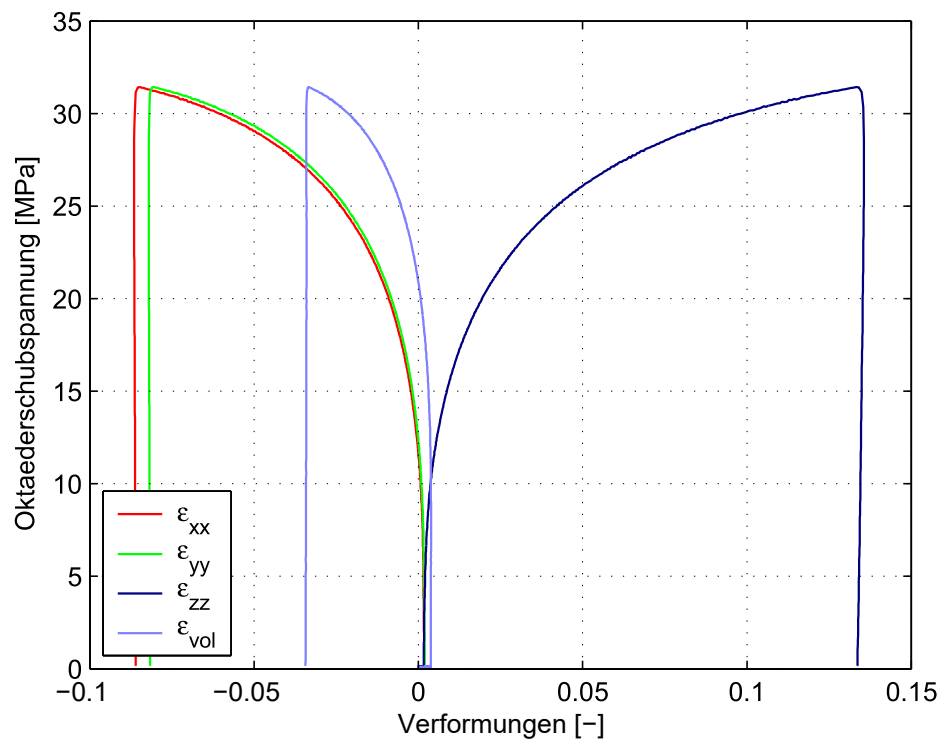


Abb. A35b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

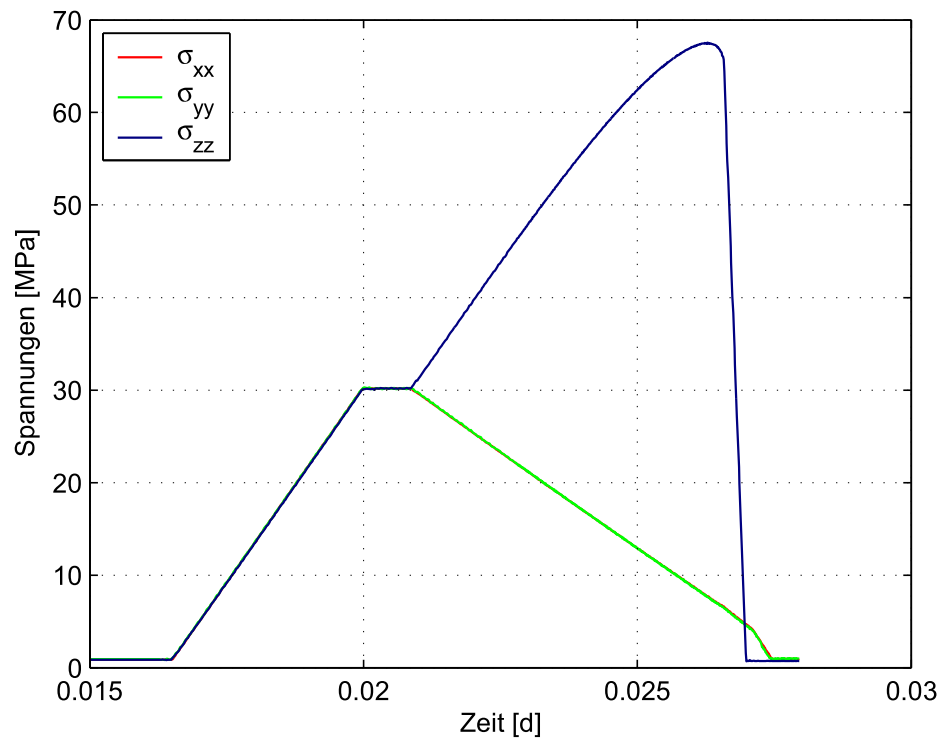


Abb. A36a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/03 Versuchsführung (Kompression)

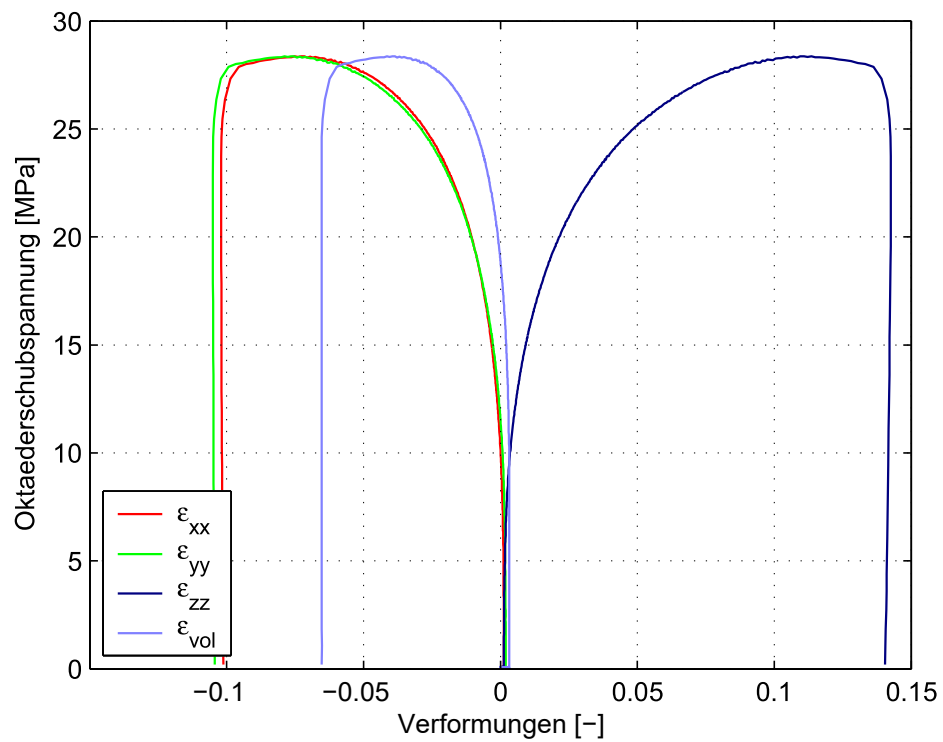


Abb. A36b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

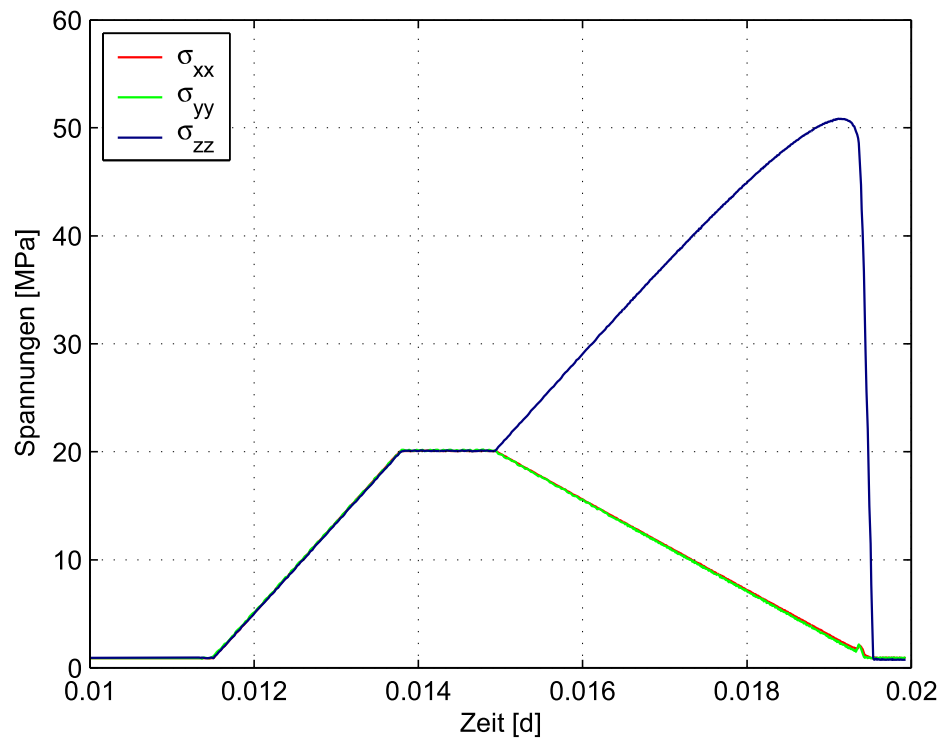


Abb. A37a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/04 Versuchsführung (Kompression)

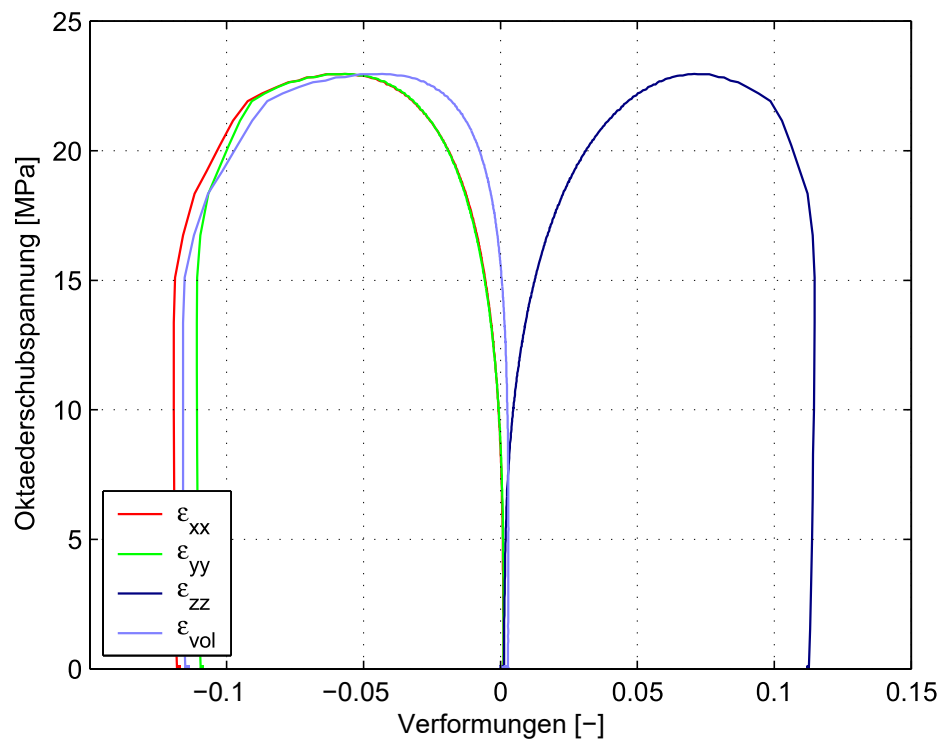


Abb. A37b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/004/04 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

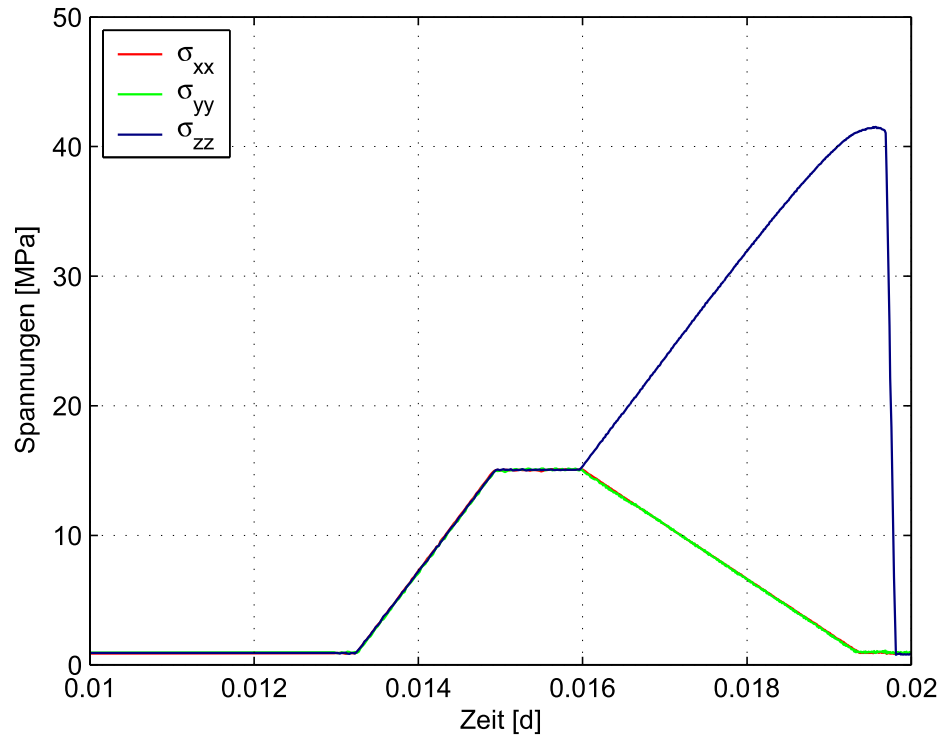


Abb. A38a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/007/01 Versuchsführung (Kompression)

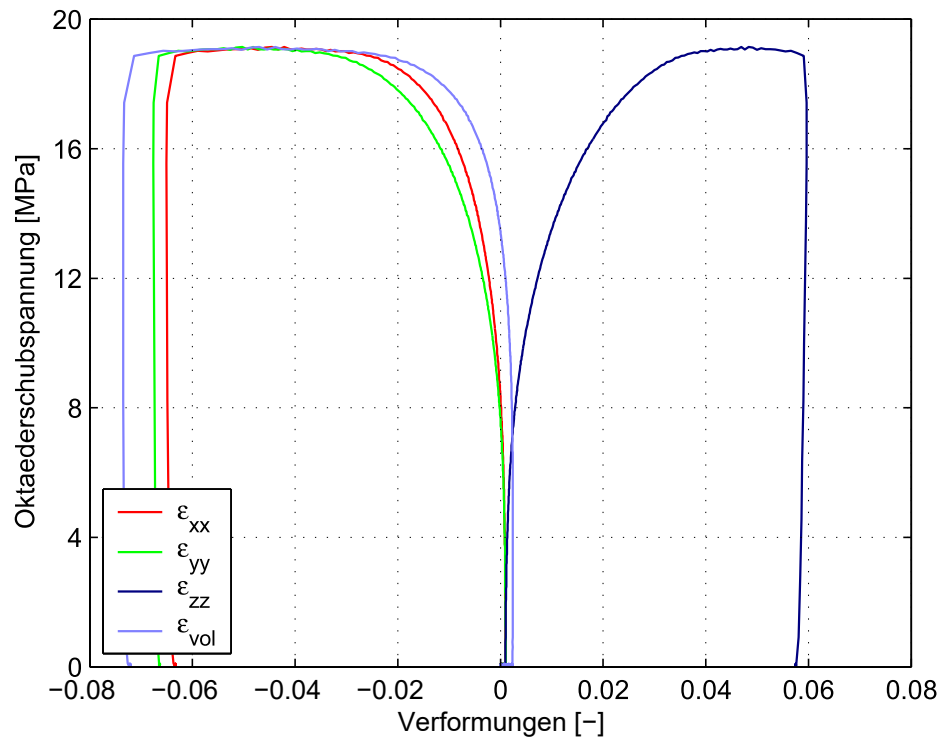


Abb. A38b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/007/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

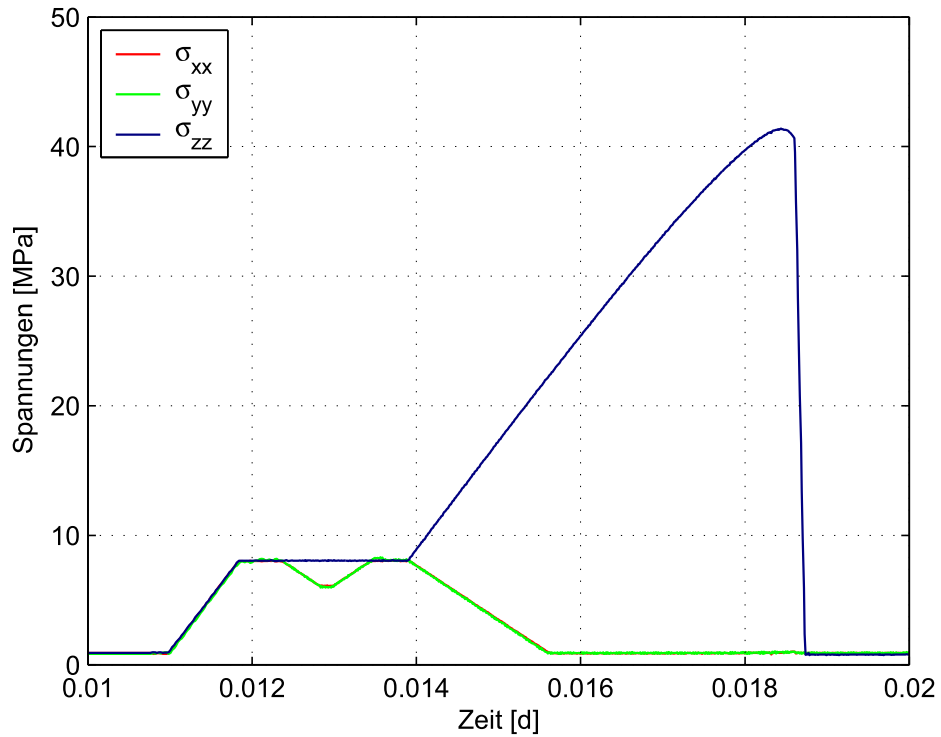


Abb. A39a: Probe: Twenthe-Rijn480/09/007/02 Versuchsführung (Kompression)

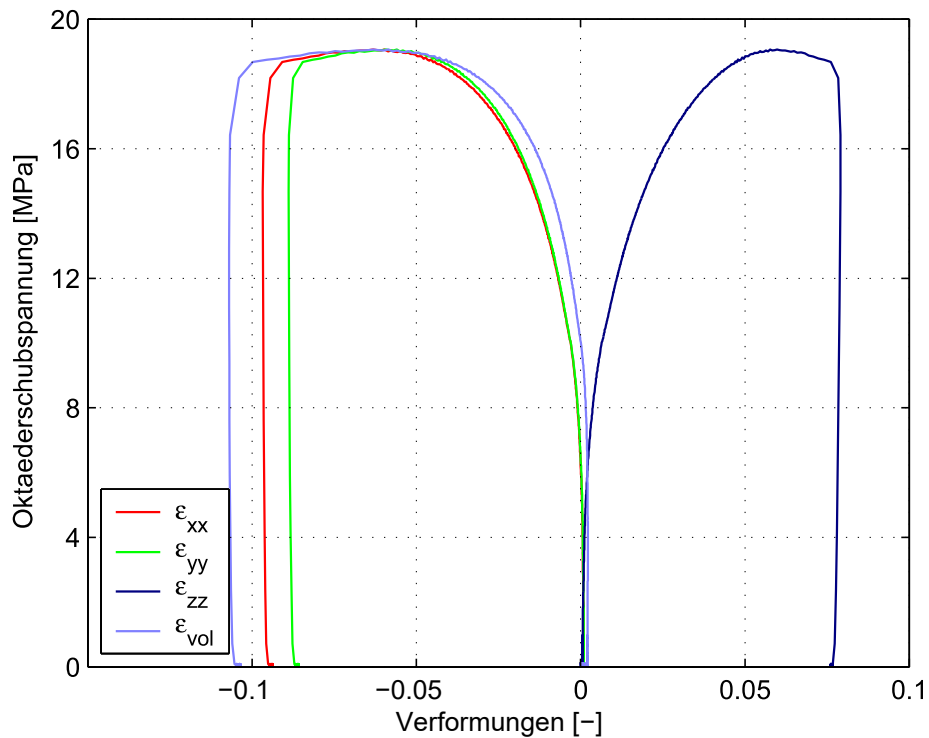


Abb. A39b: Probe: Twenthe-Rijn480/09/007/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

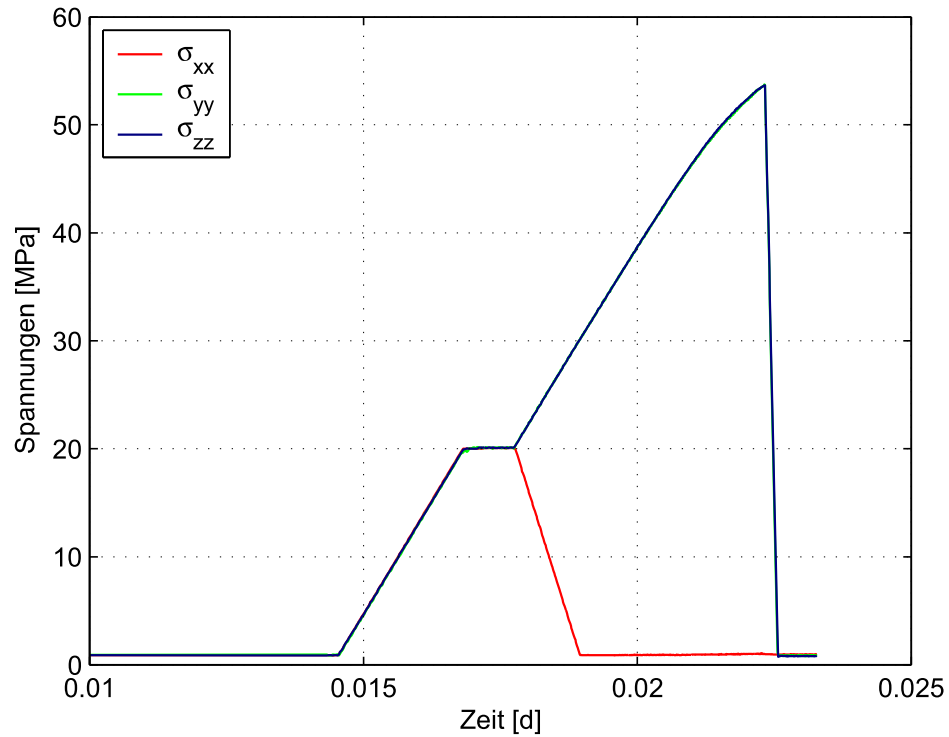


Abb. A40a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/03 Versuchsführung (Extension)

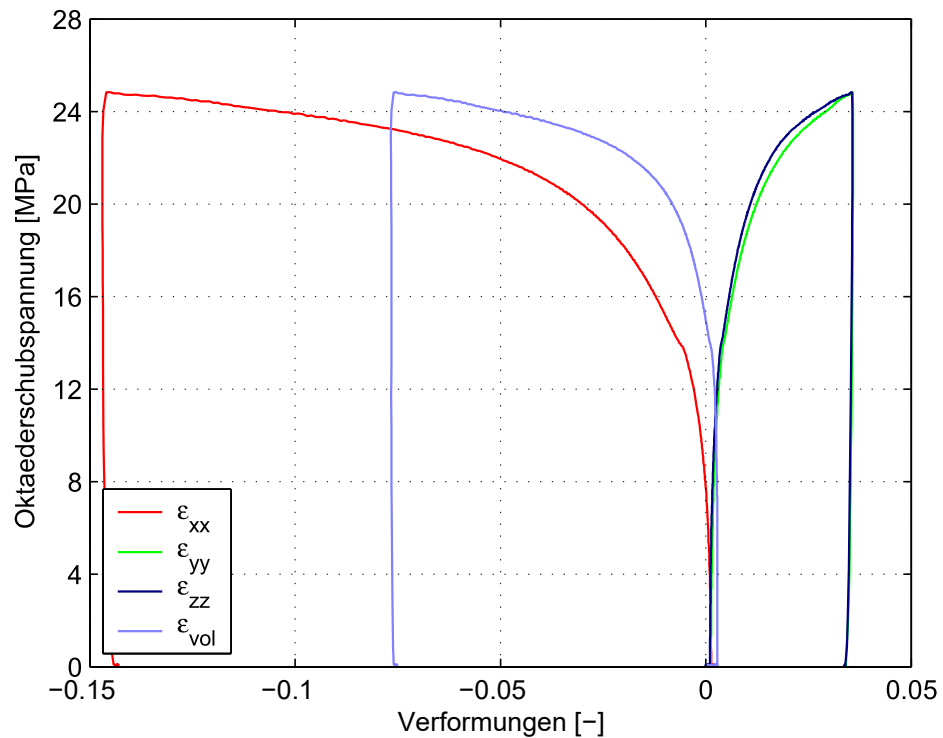


Abb. A40b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/03 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

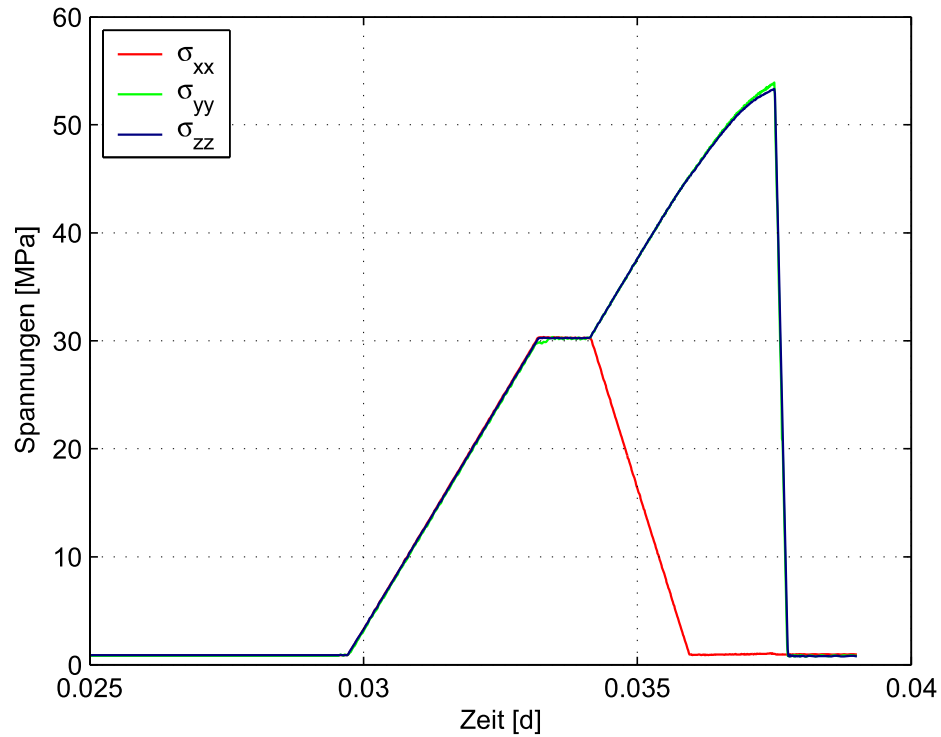


Abb. A41a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/02 Versuchsführung (Extension)

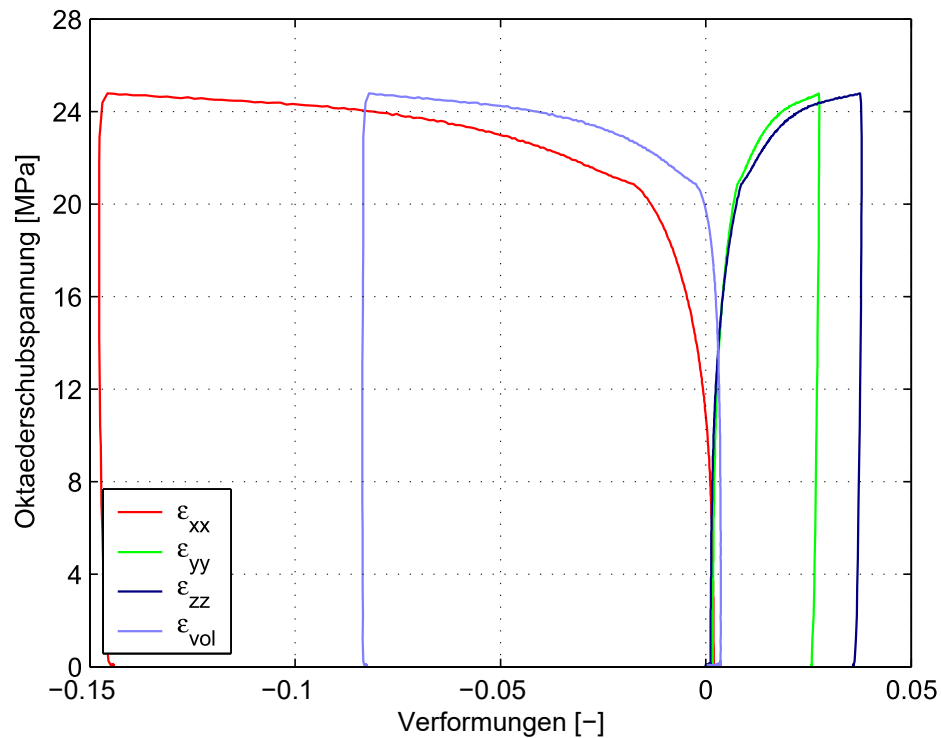


Abb. A41b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

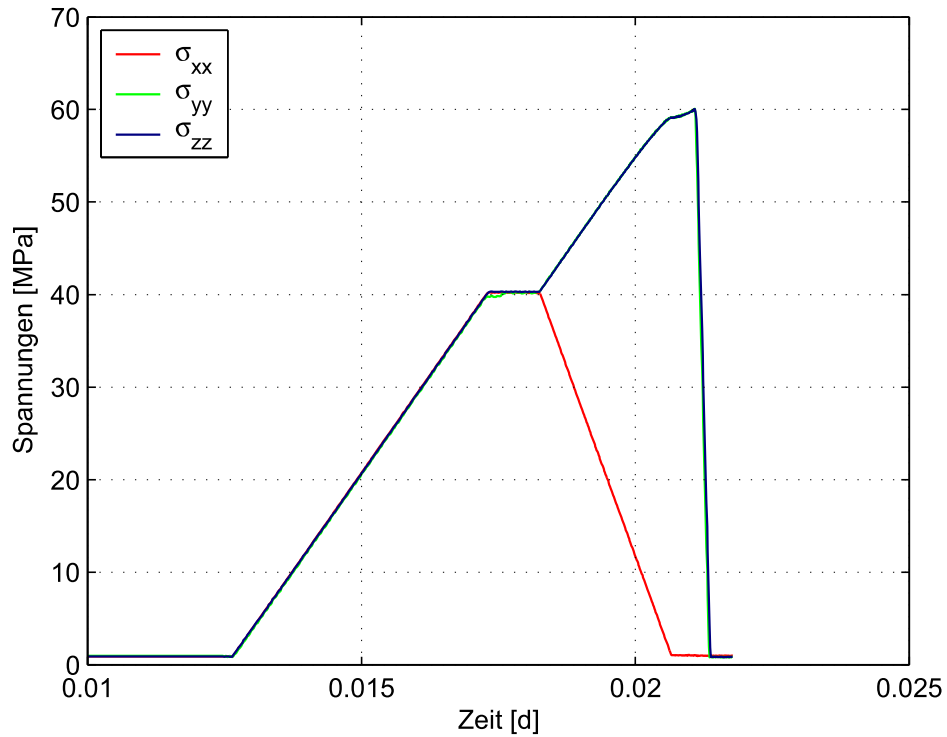


Abb. A42a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/01 Versuchsführung (Extension)

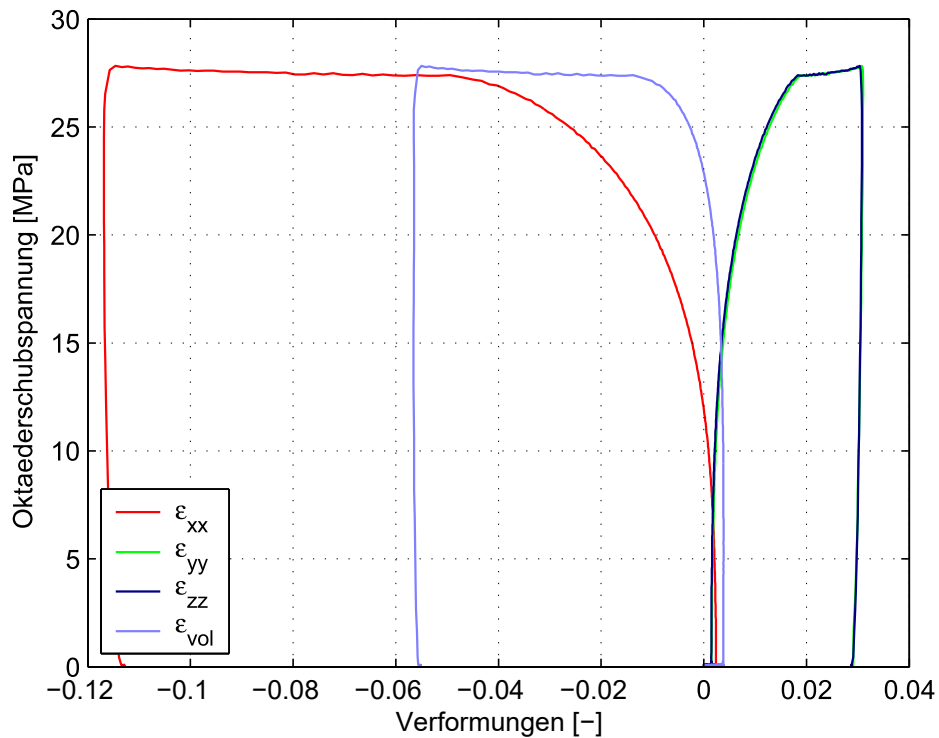


Abb. A42b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

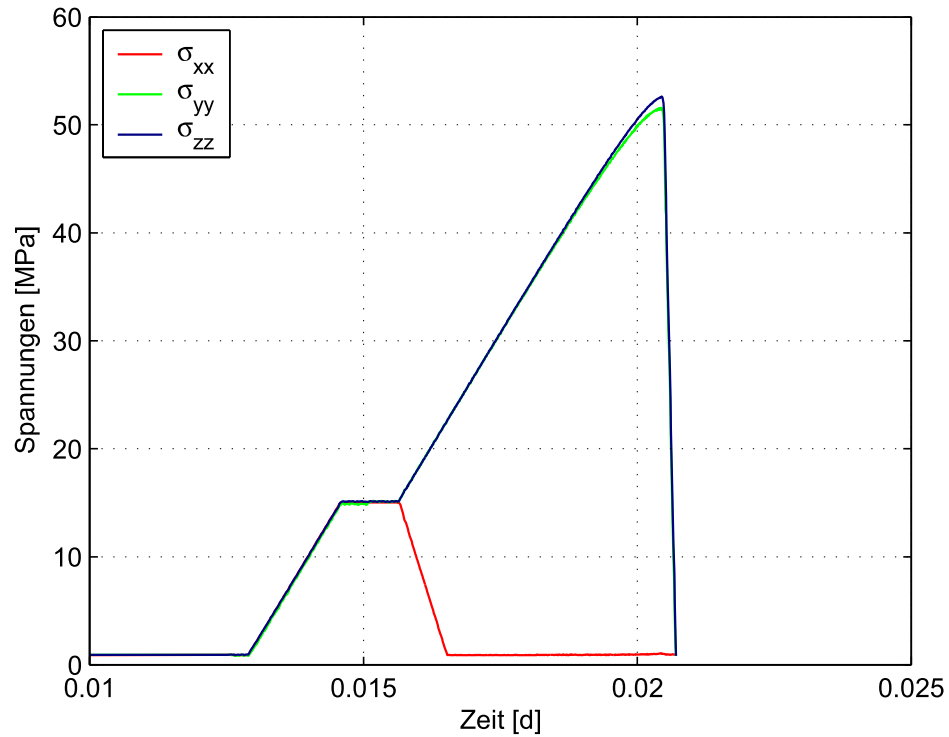


Abb. A43a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/08 Versuchsführung (Extension)

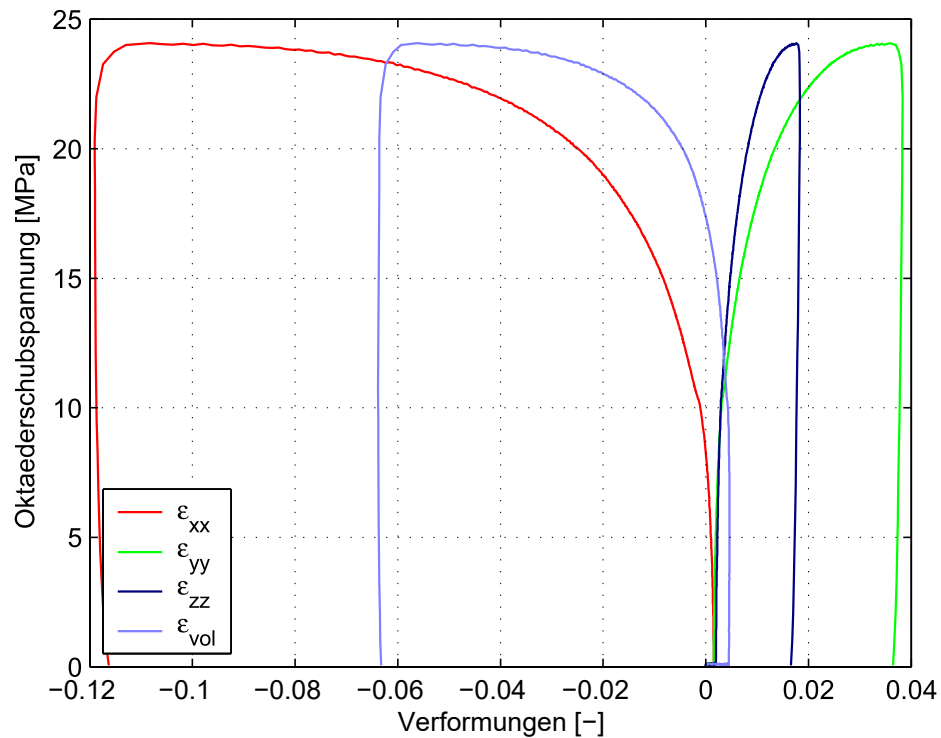


Abb. A43b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/08 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

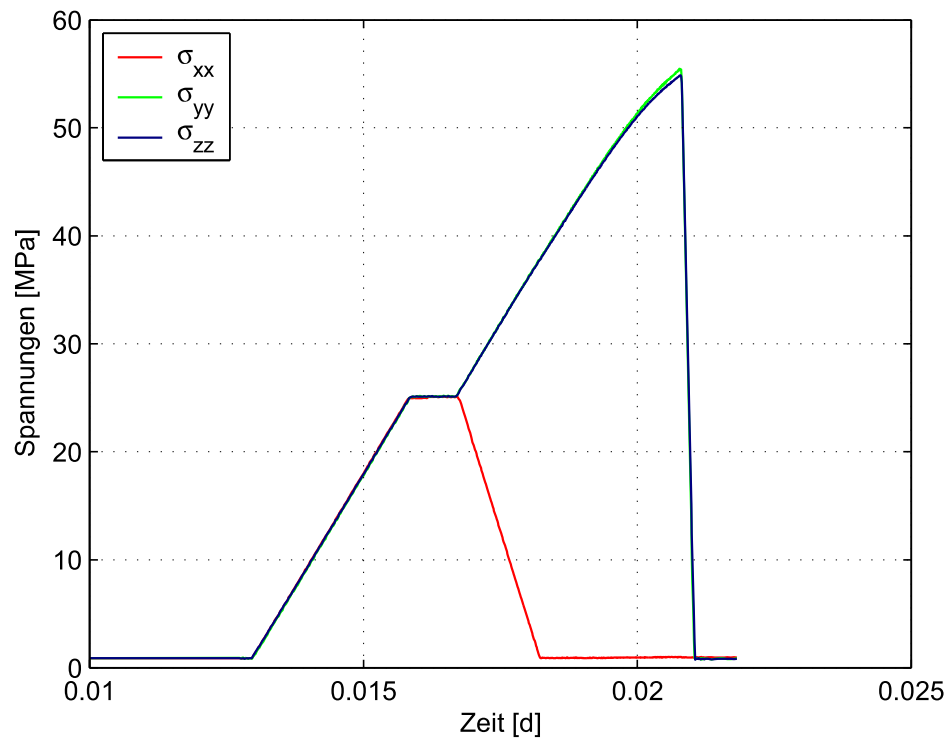


Abb. A44a: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/07 Versuchsführung (Extension)

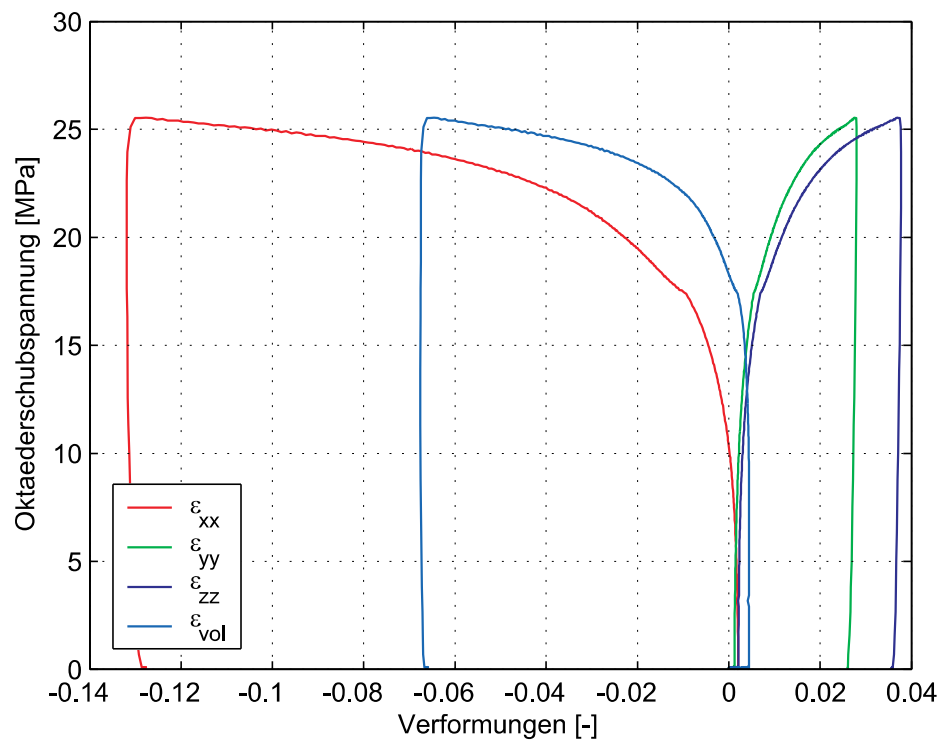


Abb. A44b: Probe: Twenthe-Rijn480/05/001/07 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

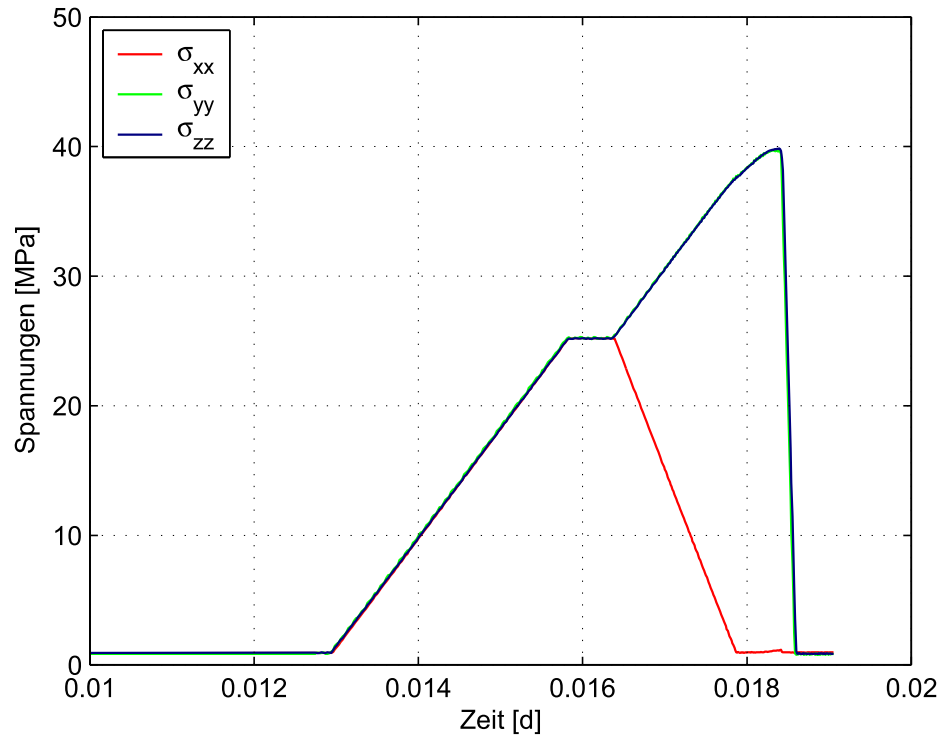


Abb. A45a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/01 Versuchsführung (Extension)

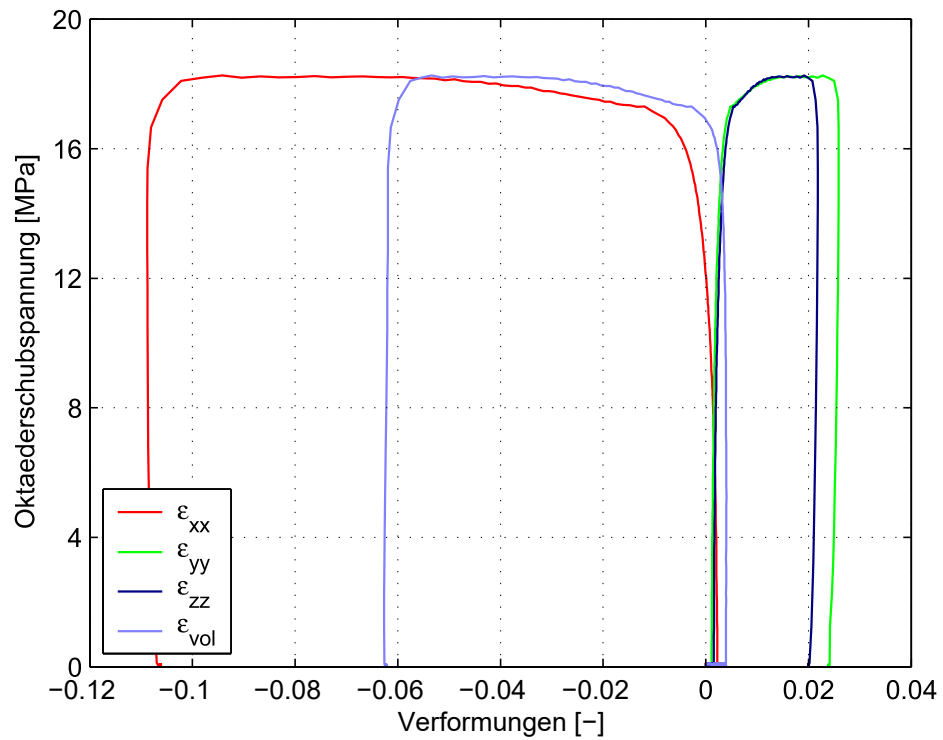


Abb. A45b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/01 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

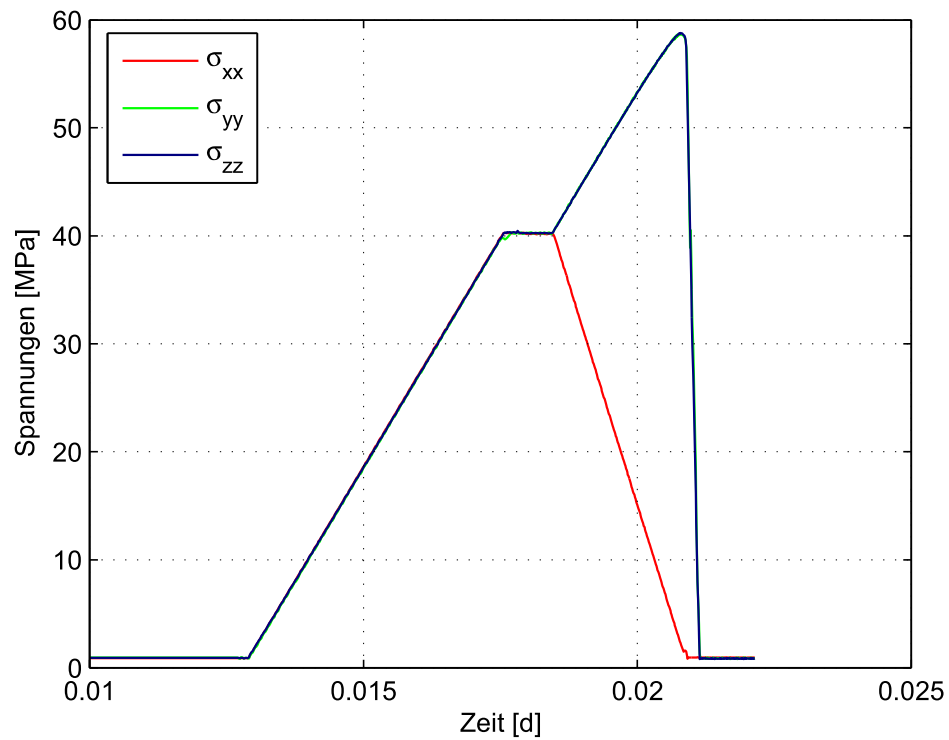


Abb. A46a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/02 Versuchsführung (Extension)

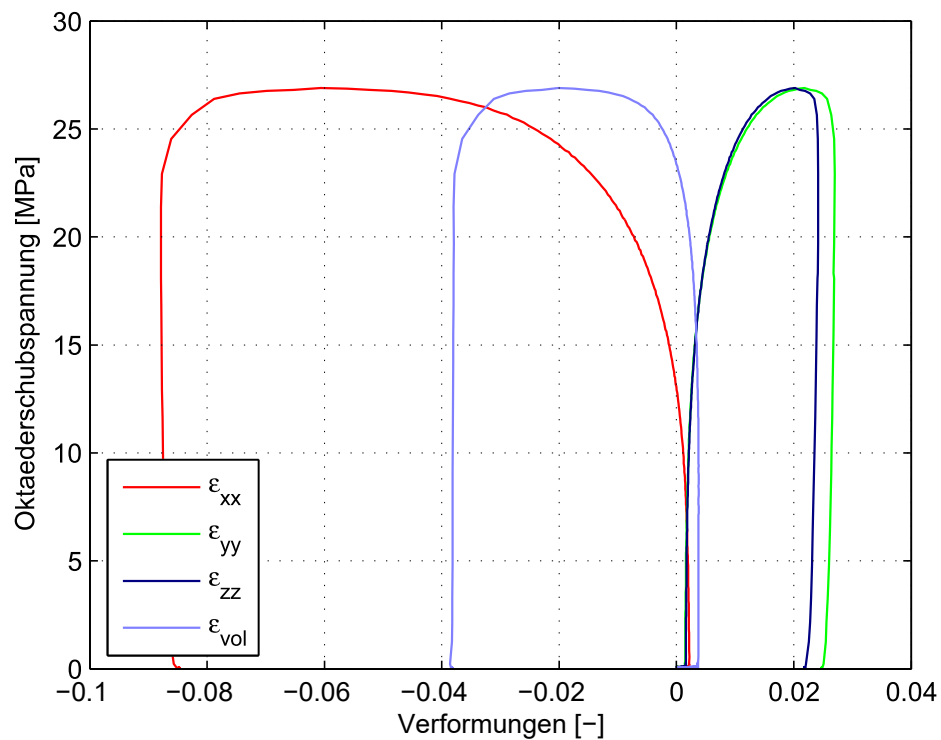


Abb. A46b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/02 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation

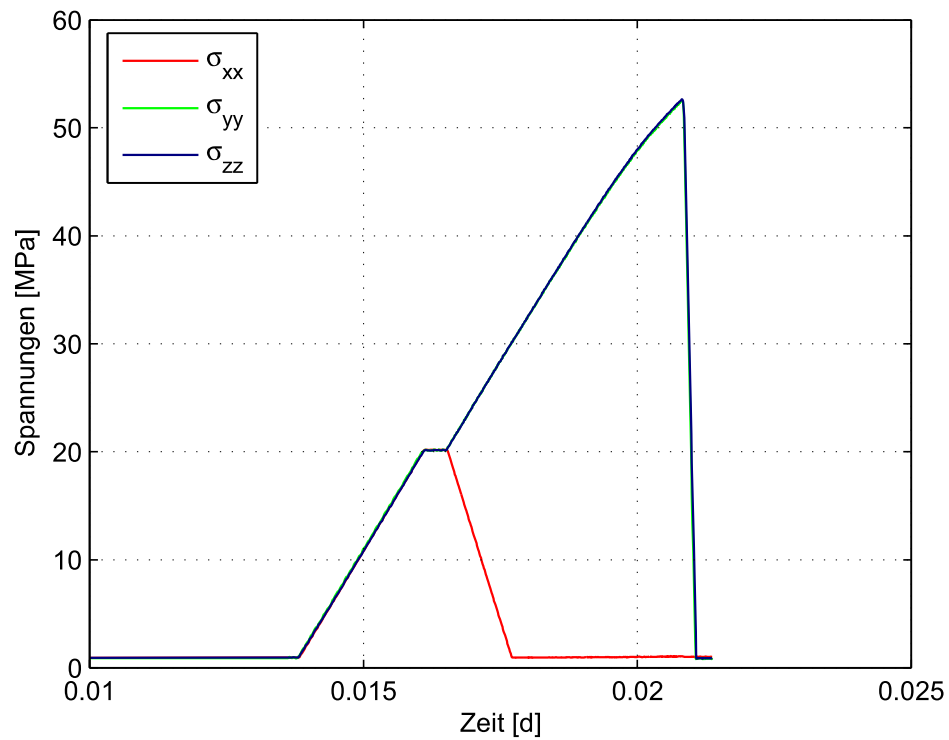


Abb. A47a: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/08 Versuchsführung (Extension)

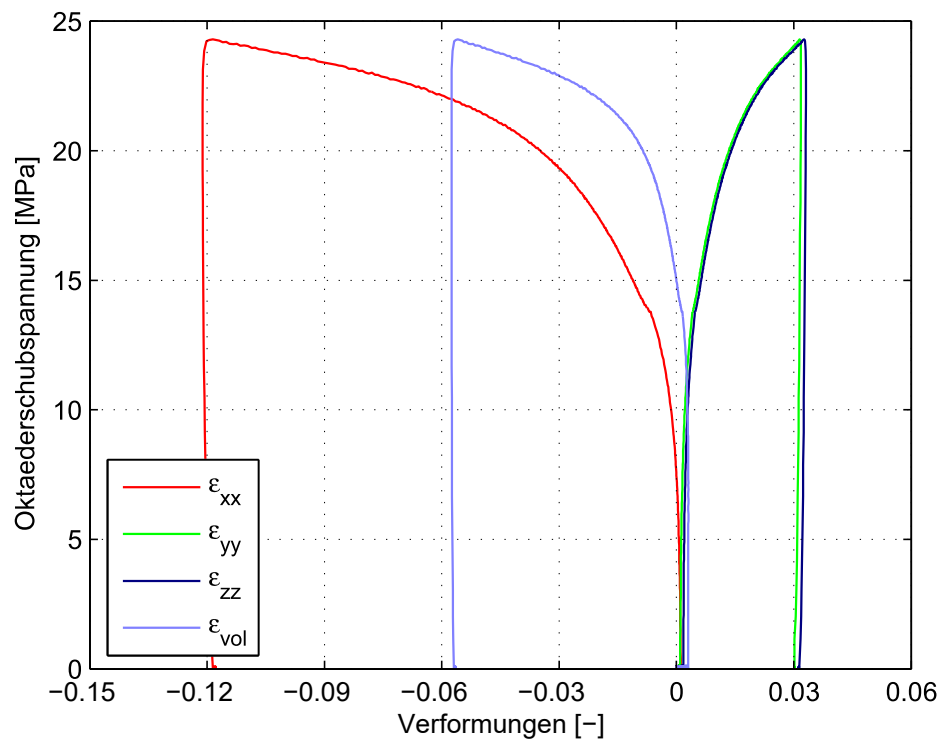


Abb. A47b: Probe: Twenthe-Rijn480/08/002/08 Verformungen in Achsrichtung sowie volumetrische Deformation