

Forschungsbericht Nr. 2362

Untersuchungen eines kunststoffgebundenen Straßenoberbaus

(Terra Elast AG)

1. ALLGEMEINES

Die Fa. Terra Elast AG stellt Boden- und Fahrbahnbeläge aus kunststoffgebundenen Gesteinskörnungsgemischen her. Hierbei kommen gebrochene Gesteinskörnungen unterschiedlicher Korngrößen und als Bindemittel Polyurethane oder Epoxidharze zur Anwendung. Zur Untersuchung der Eignung eines zweischichtigen gebundenen Oberbaus für Verkehrsflächen mit anteiligem Schwerverkehr wurde in Vorversuchen aus einer breiten Palette von Deckschicht- und Tragschichtmischungen je eine Mischung ausgewählt, um im weiteren Verlauf mit unterschiedlichen Methoden relevante Kennwerte und Einsatzmöglichkeiten zu ermitteln.

Die Durchführung der Versuche erfolgte zwischen März und Mai 2007 am Prüfamnt für Bau von Landverkehrswegen der TU München, Baumbachstraße 7, 81245 München.

2. VERSUCHSMATERIAL

Der zur Untersuchung stehende Oberbau zeichnet sich vor allem durch sein enormes Wasserschluckvermögen aus, was durch einen großen Hohlraumgehalt im verdichteten Zustand erreicht wird. Somit kann gegebenenfalls auch bei großen Regenereignissen eine Oberflächenentwässerung entfallen, was eine Herstellung von Verkehrsflächen ohne Neigung ermöglicht.

Für die Voruntersuchungen wurden sechs verschiedene Varianten von Tragschicht- und drei Varianten von Deckschichtarten in Form von Probewürfeln mit Kantenlänge 20 cm geliefert. Hierbei war das Bindemittel variiert (Epoxidharz und zwei Typen Polyurethan), sowie der Korngrößenbereich bei den Tragschichtarten 16/22 mm bzw. 8/11 mm. Die Proben der Deckschicht waren mit dem Mineralstoff Granit der Korngröße 1/3 mm ausgeführt.

Vergleichbar mit Verfahren des Asphaltstraßenbaus wird bei der Herstellung Gesteinskörnung und Bindemittel in einer Trommel gemischt und das Mischgut am Einbauort auf eine Schottertragschicht aufgebracht und verdichtet. Die Herstellung der Proben für die durchgeführten Versuche erfolgte beim AG abweichend davon in Holzschalungen (manuelle Verdichtung). Mit dieser Methode sammelt sich bei einigen Tragschichtproben in der Holzschalung überschüssiges Bindemittel an der Unterseite des Probekörpers. Beim üblichen Einbau dringen überschüssige Bindemittelmengen laut Aussage des AG in die ungebundene Schottertragschicht ein. Diese Abweichung wurde in Kauf genommen, um ebene und planparallele Oberflächen der Proben zu ermöglichen. Anhang 1 zeigt Bilder mit den Proben der Vorversuche.

3. VORVERSUCHE ZUR AUSWAHL DER OBERBAUKONSTRUKTION

An aus den Würfelproben gezogenen Bohrkernen \varnothing 150 mm wurde die Frequenzabhängigkeit und die Beeinflussung der Steifigkeit durch wiederholte Belastung unter einaxialem Druck untersucht. Mit den Voruntersuchungen ergaben sich zum Teil stark unterschiedliche Materialeigenschaften der insgesamt 9 Varianten. Mit dem Ziel, bei der abschließenden Dimensionierung Schichtdicken anzustreben, welche in der Größenordnung von Oberbaukonstruktionen aus Asphalt liegen, konnten für einige Varianten weiterführende

Untersuchungen entfallen. So lieferten Tragschicht-Varianten mit Korngrößen 16/22 mm unabhängig vom gewählten Bindemittel tendenziell geringe Steifigkeiten, was wohl auf den sehr großen Hohlraumgehalt zurück zu führen war. Bei Tragschicht-Konstruktionen mit Korngröße 8/11 mm lieferte die Variante mit Bindemittel Epoxidharz die am ehesten geeigneten Kennwerte, die Untersuchungen mit den weiteren Varianten dieser Korngröße ergaben geringe Steifigkeiten. Eine Deckschichtart mit UV-beständigem Polyurethan lieferte Materialeigenschaften, mit welchen der Einsatz zur Rißsanierung bei Verkehrsflächen ohne Schwerverkehr möglich wäre. Eine weitere Deckschichtart mit Bindemittel Epoxidharz zeigte eine deutliche Versteifung infolge wiederholter Belastung.

Alle untersuchten Konstruktionen zeigten bei Raumtemperatur im Frequenzbereich von 3 Hz bis 30 Hz nur geringe bis keine Abhängigkeit von der gewählten Belastungsfrequenz.

Mithilfe der Messergebnisse aus den Vorversuchen wurde für einen zweischichtigen Oberbau die Deckschichtart mit der Bezeichnung „TE 20 H2 K PU Granit WKW 1/3 PU NUV“ (im Weiteren: „DS 1/3 PU“) und die Tragschichtart „TE 02 G2 K EP Naturschotter 8/11 EP NUV“ (im Weiteren: „TS 8/11 EP“) für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG ZUR BESTIMMUNG VON KENNWERTEN

Mit Blick auf die Belastungen von Verkehrsflächen und die resultierenden Spannungsverläufe bedarf es unterschiedlicher Nachweise, um Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Oberbaus dauerhaft sicherzustellen. Neben der schadensfreien Abtragung von Verkehrslasten muss für einen fugenlosen Einbau auch eine ausreichende Sicherheit gegen thermische Beanspruchungen gewährleistet sein.

Die Materialeigenschaften Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und Biegezugfestigkeit sowie die Kennwerte E-Modul und Querdehnzahl wurden an der Deckschicht „DS 1/3 PU“ und der Tragschicht „TS 8/11 EP“ getrennt ermittelt. Die Untersuchung der ausreichenden Tragfähigkeit gegenüber hohen lokalen Druckspannungen erfolgte an Probekörpern der zweischichtigen Konstruktion. Mit Blick auf einen speziellen Einsatz des Oberbaus auf einem Betriebsgelände mit hohen Belastungen durch Staplerverkehr (hohe Kontaktspannungen unter „Staplern“ und „Ameisen“ mit kleinen Radaufstandsflächen) wurde hierbei auch die

Tragfähigkeit der oberflächennahen Bereiche gegenüber Kontaktspannungen geprüft, die deutlich über die Beanspruchungen unter Schwerlastverkehr hinaus gehen.

Im Versuch zur Dauerbiegezugfestigkeit wurde die Tragschicht in mehreren Versuchen über jeweils 3 Millionen Lastspiele mit einer Zugspannung an der Schichtunterseite von 1,6 N/mm² beaufschlagt, womit Belastungen simuliert wurden, welche auch die hohen Beanspruchung durch Schwerverkehr abdecken. [Heft 26 der Schriftenreihe „Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München“]

A. DRUCKFESTIGKEIT

Die Versuche zur Würfeldruckfestigkeit der Deckschicht und der Tragschicht erfolgten in Anlehnung an die DIN EN 12390-3 (Prüfung von Festbeton – Druckfestigkeit von Probekörpern). Die Abmessungen der Probewürfel wurden entsprechend vorliegender Erfahrungen ausreichend groß gewählt. (Bei „zu kleinen“ Proben wird die ermittelte Druckfestigkeit zu stark von der Gesteinsfestigkeit des Materials bestimmt.) Die zugrunde gelegte Norm gibt für die Belastungsgeschwindigkeit einen Bereich zwischen 0,2 bis 1,0 N/(mm² * s) vor. Mit der in den Versuchen gewählten Geschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{s)}$ wurde hinsichtlich möglicher viskoser Gerüstumlagerung der ungünstigste Fall gewählt.

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit an den Tragschichtproben (8/11 mm) wurden Würfel mit Kantenlänge 150 mm geschnitten, d.h. die an einigen gelieferten Proben festgestellte Bindemittelhaut war nicht mehr vorhanden. Die Bestimmung der Druckfestigkeit des Deckschichtmaterials (1/3 mm) erfolgte an Probewürfeln mit 88 mm Kantenlänge.

In den Tabellen 1 und 2 sind die ermittelten Werte zusammengestellt.

Probe Nr.	max. Druckkraft [kN]	Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]
1	272	12,1
2	314	14,0
3	292	13,0
4	331	14,7
5	272	12,1
Mittelwert	296	13,2 N/mm²

Tabelle 1: Würfeldruckfestigkeit (150 x 150 x 150 mm³) der Tragschicht TS 8/11 EP

Die „Probenreste“ nach dem Versuch entsprechen dem typischen Bruchkörper aus einaxialer Bruchbelastung (siehe Bilder in Anhang 2). Die Bruchfläche zeigt einen „Mischbruch“ aus Bindemittel- und Gesteinsversagen mit hauptsächlich gebrochenen Gesteinsflächen.

Probe Nr.	max. Druckkraft [kN]	Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]
1	96,3	12,4
2	92,6	12,0
3	95,2	12,3
4	85,8	11,1
5	108,0	14,0
Mittelwert	95,6	12,3 N/mm²

Tabelle 2: Würfeldruckfestigkeit (88 x 88 x 88 mm³) der Deckschicht DS 1/3 PU

Auch die Proben der Deckschicht haben nach dem Versuch die typische Bruchform (siehe Bilder in Anhang 3). Bei diesem feinen Material kann keine Aussage gemacht werden, ob es sich hauptsächlich um Versagen im Gestein oder im Bindemittel handelt.

B. ZUGFESTIGKEIT

Für den fugenlosen Einbau des Oberbaus ist mit Versuchen zum Widerstand gegen Rissbildung infolge Verkürzung bei Temperaturabfall eine ausreichende Zugfestigkeit vor allem für die Deckschicht nachzuweisen, da an der Oberfläche die größten Temperaturschwankungen auftreten.

Für den einaxialen Zugversuch wurden aus gelieferten Probepplatten des Deckschichtmaterials „DS 1/3 PU“ Balken mit quadratischen Abmessungen 60 x 60 mm und einer Länge von 200 mm zugeschnitten. Der spannungsfrei in eine Zugprüfeinrichtung eingebaute Balken wird in Längsrichtung bis zum Zugbruch belastet. Die für den Bruch notwendige Zugkraft wird während dem Versuch kontinuierlich aufgezeichnet. Mit Dehnungsmessstreifen (DMS), welche zuvor längs und quer zur Zugrichtung auf die Oberfläche appliziert wurden, sind der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl des Materials zu bestimmen. Die DMS werden jeweils auf den gegenüberliegenden Seiten der Probe angebracht, um mögliche Beeinflussung der Messwerte aus Biegebeanspruchung zu kompensieren. Anhang 4 zeigt Bilder des Zugversuchs.

Mit einer Laststeigerung von 0,15 kN/s wurde der Zugversuch in Stufen mit zwischenzeitlicher Entlastung durchgeführt. In der jeweils sechsten Belastung wurde die Last bis zum Bruch gesteigert. Die Bruchfläche dieses feinkörnigen Materials lässt keine Aussage über die Art des Bruches (Gesteinsbruch, Bindemittelbruch) zu. Anhang 5 Bild 9 zeigt die Bruchfläche.

Das untersuchte Deckschichtmaterial zeigt bis zum Bruch einen linearen Spannungs-/Dehnungsverlauf, wie in den Anlagen 1.1 bis 1.6 dargestellt. Über das Verhältnis von Spannung zu Dehnung wird der E-Modul bestimmt, die Querdehnzahl ergibt sich aus dem Verhältnis von Querdehnung zu Längsdehnung. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse.

Versuch Nr.	E-Modul [N/mm ²]	Querdehnzahl
1	6140	0,20
2	5880	0,22
3	5688	0,20
4	5725	0,24
5	5985	0,23
6	5900	0,22
Mittelwert	5886	0,22

Tabelle 3: E-Modul und Querdehnzahl aus Zugversuchen an Probepbalken der Deckschicht.

Mit Steigerung der Zugbelastung bis zum Versagen ergibt sich die Zugfestigkeit des Deckschichtmaterials zu $\sigma_z = 3,1 \text{ N/mm}^2$.

Unter Ansatz der ermittelten Zugfestigkeit von $\sigma_z = 3,1 \text{ N/mm}^2$ und eines temperaturunabhängigen E-Moduls von 5900 N/mm^2 kann die Sicherheit gegen Rissbildung aus thermisch induzierter Spannung abgeschätzt werden. Setzt man einem Temperaturdehnkoeffizient des Materials von $\alpha_T = 1 \times 10^{-5}$ an und unterstellt einen möglichen Temperaturabfall von $\Delta T = 30 \text{ °K}$ gegenüber der Temperatur beim Einbau bzw. bei der Aushärtung, ergibt sich eine Temperaturspannung von $\sigma_T = 1,8 \text{ N/mm}^2$. Somit hat das Deckschichtmaterial eine ausreichende Sicherheit gegen thermische Rissbildung, um einen fugenlosen Einbau zu befürworten.

C. BIEGEZUGFESTIGKEIT

Die RStO fordert für ungebundene Schottertragschichten einen Bettungsmodul E_{v2} von 120 bis 150 N/mm^2 . Darüber angeordnete, gebundene Tragschichten mit deutlich höherer Steifigkeit erfahren unter den Verkehrslasten Biegebeanspruchungen, welche an deren Unterseite als radiale Zugspannung wirken. Bei nicht ausreichender Biegezugfestigkeit kommt es zur Rissbildung an der Unterseite. Solche Risse pflanzen sich kontinuierlich bis zur Oberseite der Befestigung fort und es kommt zum Tragfähigkeitsabfall.

Neben der statischen Biegezugfestigkeit ist hierbei die Zeit-Biegezugfestigkeit unter wiederholter Belastung von großer Bedeutung. Bei Asphaltbefestigungen nimmt mit steigender Lastwechselzahl die Ermüdung zu und somit die Steifigkeit ab. Bei reinelastischen Baustoffen wie Beton spricht man dagegen von einer Dauerfestigkeit. Diese wird durch eine Grenzspannung beschrieben, welche beliebig oft ertragen werden kann. Für Asphalttragschichten, welche einen mit der untersuchten Tragschicht vergleichbaren E-Modul aufweisen, gelten Erfahrungswerte, wonach eine Zeit-Biegezugfestigkeit von etwa $2,5 \text{ N/mm}^2$ über 10^4 Lastspiele (LS), $1,5 \text{ N/mm}^2$ über 10^5 LS und $1,0 \text{ N/mm}^2$ über 10^6 LS besteht.

In Anlehnung an DIN EN 12390-5 (Prüfung von Festbeton – Biegezugfestigkeit von Probekörpern) wurden Biegezugversuche mit Zweipunkt-Lasteintragung an Balken ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$) des Tragschichtmaterials durchgeführt. Gemäß Norm entspricht der Abstand der beiden Lasteintragungslinien der Breite des Probekörpers d (150 mm) und der Abstand der Auflagerrollen ist $3d$ (450 mm). Es wurden Dauerbiegezugversuche durchgeführt sowie die Biegezugfestigkeit der Tragschicht ermittelt. Anhang 5 Bild 10 zeigt den Versuchsaufbau.

Im Biegeversuch mit 2-Punkt-Lasteintragung ergibt sich eine Biegezugfestigkeit von 2,5 N/mm². Nach dem Dauerversuch mit Zugspannungen an der Balkenunterseite von 1,6 N/mm² über 3 Mio. LS wird an weiteren Proben eine nahezu identische Biegezugfestigkeit (im Mittel: 2,3 N/mm²) erreicht, die Dauerschwellbelastung verursachte keine signifikante Ermüdung. Anhang 6 Bild 11 zeigt die Bruchflächen des Probekörpers. Die anteiligen Brüche durch die Gesteinskörnung sprechen für eine hohe Festigkeit des Bindemittels und gute Haftung zum Gestein.

Mit den aufgezeichneten Messwerten kann über das aufgebrachte Biegemoment und das Widerstandsmoment des Balkens der E-Modul der Tragschicht bestimmt werden. Die Anlagen 2.1 bis 2.6 zeigen die statischen Eichungen (Dehnung gegenüber Biegemoment) im Biegezugversuch. Daraus ergibt sich ein E-Modul der Tragschicht von im Mittel 7646 N/mm² (siehe Tabelle 4 für die Ergebnisse der Einzelversuche). In Anlage 3.1 bis 3.3 sind die Veränderungen über die Lastwechselzahl im Dauerversuch dargestellt. Demnach erfährt der Tragschichtbalken über 3 Mio. LS keine signifikante Ermüdung. Es sind zwar geringe plastische Verformungen (0,05 mm in Balkenmitte) zu erkennen, die Schwingweite der elastischen Biegeverformung und somit die mechanischen Eigenschaften bleiben jedoch konstant.

Versuch Nr.	E-Modul [N/mm ²]
1	7859
2	7570
3	7610
4	7350
5	8263
6	7225
Mittelwert	7646

Tabelle 4: Elastizitätsmodul der Tragschicht aus Eichkurven der Biegezugversuche

Mit den Dauerschwellversuchen konnte gezeigt werden, dass das untersuchte Tragschichtmaterial hinsichtlich Biegezugfestigkeit keine Ermüdung und trendmäßig ein mit Beton vergleichbares Verhalten aufweist (Dauerfestigkeit).

D. DRUCK- UND SCHERFESTIGKEIT DES ZWEISCHICHTIGEN OBERBAUS

Zusätzlich zu vertikalen Druckspannungen wird der steife, gebundene Oberbau an den Rändern der Lastfläche durch Scherspannungen beansprucht. Unter hohen Kontaktspannungen kann es zum plötzlichen Versagen der Befestigung kommen. Für den Nachweis des ausreichenden Widerstandes gegen hohe vertikale Kontaktspannungen wurden vom AG zwei Probekörper des zweischichtigen Gesamtaufbaus mit Abmessungen 50 x 50 cm mit 4 cm Deckschicht- und 20 cm Tragschichtdicke geliefert. (Auch diese Probekörper hatten an der ebenen Unterseite eine etwa 1 cm dicke Schicht des angestauten Bindemittels.) Im Unterschied zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit können in diesem Versuchsaufbau infolge der Lastausbreitung größere Kontaktspannungen abgetragen werden. Der Versagensfall in Form von „Durchstanzen“ der Deckschicht ist somit ein anderer als die reine Druckfestigkeit.

Die Kontaktspannungen an der Oberfläche ergeben sich aus der Größe der Vertikallast und den Abmessungen der Kontaktfläche. Verkehrsflächen werden durch schweren LKW-Verkehr mit Kontaktspannungen von bis zu 1,2 N/mm² beansprucht. LKWs tragen ihre Lasten über große Reifenaufstandsflächen ab. Industrielle Betriebsflächen, auf welchen mit Flurförderzeugen Waren umgeschlagen werden, sind infolge der meist kleinen Reifenaufstandsflächen von Staplern durch weit höhere Kontaktspannungen beansprucht. Laut Informationen des AG ist der zur Untersuchung stehende Oberbau unter anderem für ein Firmengelände vorgesehen, auf welchem Kontaktspannungen unter 1,6t-Staplern bis 3,2 N/mm² (Vollgummibereifung) und unter 1,2t-Ameisen bis zu 4,2 N/mm² (Kunststoffbereifung) auftreten.

Um diese verschiedenen Einsatzbereiche abzudecken, wurden die Versuche in einzelnen Laststufen (an einem Probekörper) durchgeführt. Unter Ansatz eines Faktors von 1,2 für dynamische Radlastschwankungen wurden in der Versuchsdurchführung die Angaben des AG zu den auftretenden Radlasten übernommen. In den Laststufen 1 bis 3 wurde die Bereifung durch Zwischenschaltung einer steifen Gummimatte simuliert. In Laststufe 4 wurde die Belastung über eine Druckfläche aus Hartkunststoff aufgebracht, entsprechend der Bereifung von Ameisen. Mit einer Lastfläche von 90 x 90 = 8100 mm² in Laststufe 1 und 2 beginnend wurde für die folgenden Laststufen die Lastfläche entsprechend den tatsächlichen Verhältnissen gewählt (Laststufe 3 (Stapler): 120 x 30 = 3600 mm², Laststufe 4 (Ameise): 60 x 20 = 1200 mm²).

Laststufe 1:	Oberspannung $\sigma = 1,2 \text{ N/mm}^2$	2 Mio. LS
Laststufe 2:	Oberspannung $\sigma = 2,4 \text{ N/mm}^2$	1 Mio. LS
Laststufe 3:	Oberspannung $\sigma = 3,8 \text{ N/mm}^2$	1 Mio. LS
Laststufe 4:	Oberspannung $\sigma = 5,0 \text{ N/mm}^2$	1 Mio. LS

Die Dauerschwellversuche wurden mit einer Belastungsfrequenz von $f = 10 \text{ Hz}$ durchgeführt. Die Unterspannung σ_u wurde jeweils auf $0,1 \times \sigma$ festgelegt. Zur Simulation des Untergrundes mit einem Bettungsmodul von $E_{v2} = 120 \text{ N/mm}^2$ wurde der Probekörper im Versuch auf eine gelochte Gummimatte gelagert.

Vor Versuchsbeginn und nach jeder Laststufe wurde die Oberfläche hinsichtlich Ebenheit untersucht. Tragfähigkeitsverluste hätten deutliche Deformationen der Oberfläche zur Folge. Bis Abschluss der Laststufe 4 des Dauerschwellversuchs konnten keine Oberflächendeformationen oder Risse im Belag festgestellt werden. Die Lasten wurden schadensfrei vom Oberbau abgetragen. Die Bilder 13 bis 16 in Anhang 7 und 8 zeigen den Versuchsaufbau und die unverformte Oberfläche nach der Versuchsdurchführung.

Im anschließenden Dauerstandversuch wurde über 3,5 Tage bei Raumtemperatur eine Spannung von $\sigma = 5,0 \text{ N/mm}^2$ (entsprechend Laststufe 4) statisch aufgebracht, womit viskoses Kriechen untersucht wurde. Anlage 4.1 zeigt den asymptotischen Zeit/Verformungsverlauf. Die Gesamtverformung nach 3,5 Tagen liegt bei ca. 0,1 mm. Der untersuchte Oberbau hat bei Raumtemperatur auch unter ausgesprochen hohen Kontaktspannungen keine nennenswerten viskosen Verformungsanteile.

Bei Asphaltbefestigungen ist viskoses Verformungsverhalten stark temperaturabhängig. Um mögliche Einflüsse aus Temperatur zu untersuchen, wurde der Dauerstandversuch bei erhöhter Temperatur fortgesetzt. Hohe Oberflächentemperaturen von 48°C werden bei Asphaltbefestigungen an sehr heißen Sommertagen unter direkter Sonneneinstrahlung erreicht. Da der zur Untersuchung stehende helle Belag deutlich weniger Wärmestrahlung absorbiert als dunkle Asphaltflächen, sind hier geringere Maximaltemperaturen zu erwarten.

Laut Aussage des AG kommen die Ameisen mit harter Kunststoffbereifung und den höchsten Kontaktspannungen ausschließlich in Lagerhallen zum Einsatz, wo die Maximaltemperaturen deutlich niedriger anzusetzen sind, als unter freiem Himmel.

Mit dem im Dauerstandversuch mit Temperaturbelastung gewählten Lastfall wurden die Kontaktspannungen unter Ameisen in Verbindung mit Oberflächentemperaturen von 40°C untersucht. Für diesen Dauerstandversuch wird kein Dynamikfaktor angesetzt.

Kontaktspannung = 4,2 N/mm² Lastfläche: 20 x 60 mm $T_{OK} = 40^{\circ}\text{C}$

Die Heizeinrichtung wird über ein Thermoelement an der Oberfläche gesteuert. Mit weiteren Thermoelementen wird der Temperaturgradient über die Dicke der Befestigung aufgezeichnet (OK, -5cm, -12 cm). Bei Konstanthaltung der hohen Oberflächentemperatur steigt die Temperatur in tieferen Lagen mit der Zeit an.

In Anlage 4.2 sind die gemessenen Deformationen und erzeugten Temperaturgradienten über die Zeit dargestellt. Die Verformungen sind mit 0,14 mm nach 16 Stunden größer als im Dauerstandversuch bei RT nach ebenfalls 16 Stunden (0,07 mm), jedoch absolut gesehen sehr gering. Der anschließende Abkühlvorgang auf RT bei konstanter Last zeigt einen Rückgang der Deformation. Dies deutet darauf hin, dass die gemessene Einsenkung auch Anteile aus Temperaturdehnung der nicht belasteten Oberfläche hat.

Die Deformationsmulde lässt keinen Riss oder Bruch der Deckschicht am Rand der Lastfläche erkennen. Somit ist sie die Folge einer hervorgerufenen Nachverdichtung innerhalb der Deckschicht. Der Vergleich der Versuche bei RT und bei erhöhter Temperatur zeigt, dass das Verformungsverhalten unter hohen statischen Lasten von der Temperatur beeinflusst ist, die absoluten Verformungen jedoch sehr gering sind.

Abschließend wurden an den Probekörpern des zweischichtigen Aufbaus bei Raumtemperatur Versuche durchgeführt, in welchen die Kontaktspannung kontinuierlich bis zum Versagen gesteigert wurde. Hierbei wurde deutlich, dass die Befestigung bei zügiger Laststeigerung ($v = 2 \text{ kN/s}$ bei Lastfläche „Stapler“) höhere Spannungen abtragen kann als beim Halten einer niedrigeren Spannung über längere Zeit. Es ist also zu unterscheiden zwischen plötzlicher Zunahme der Deformation (keine weitere Laststeigerung möglich) und der zeitabhängigen Kriechverformung unter statischer Last.

Im Versuch mit kontinuierlicher Laststeigerung wurde der Moment, in welchem die Last-Verformungskurve eine Krümmungsänderung erfährt, als Versagensfall betrachtet (siehe

Anlage 5.1 und 5.2). Dieser lag im Mittel bei einer Kontaktspannung von 21,7 N/mm² und damit weit oberhalb realer Spannungen unter Fahrzeugreifen. Bild 17 in Anhang 9 zeigt beispielhaft den Versagensfall.

Im Versuch zur zeitabhängigen Kriechverformung wurde die Oberspannung für 1 Minute gehalten und anschließend wieder entlastet. Mit einer Oberspannung von 7,5 N/mm² beginnend wurde die Maximallast in Stufen gesteigert. Die Anlagen 6.1 bis 6.5 zeigen beispielhaft Kraft-Verformungskurven. Demnach ist beim Halten der Oberlast eine Kriechverformung erkennbar, mit der Entlastung gehen nur die elastischen Verformungsanteile wieder zurück. Diagramm 1 zeigt, dass die elastischen und viskosen Verformungsanteile von der gewählten Oberlast beeinflusst sind. Mit höherer Oberspannung wächst der Kriechanteil an der Maximalverformung. Die gleichzeitige Abnahme des elastischen Verformungsanteils lässt auf eine Nachverdichtung während der Laststeigerung schließen.

Tabelle 5 zeigt die plastischen Oberflächendeformationen nach der Entlastung in Abhängigkeit der Oberspannung.

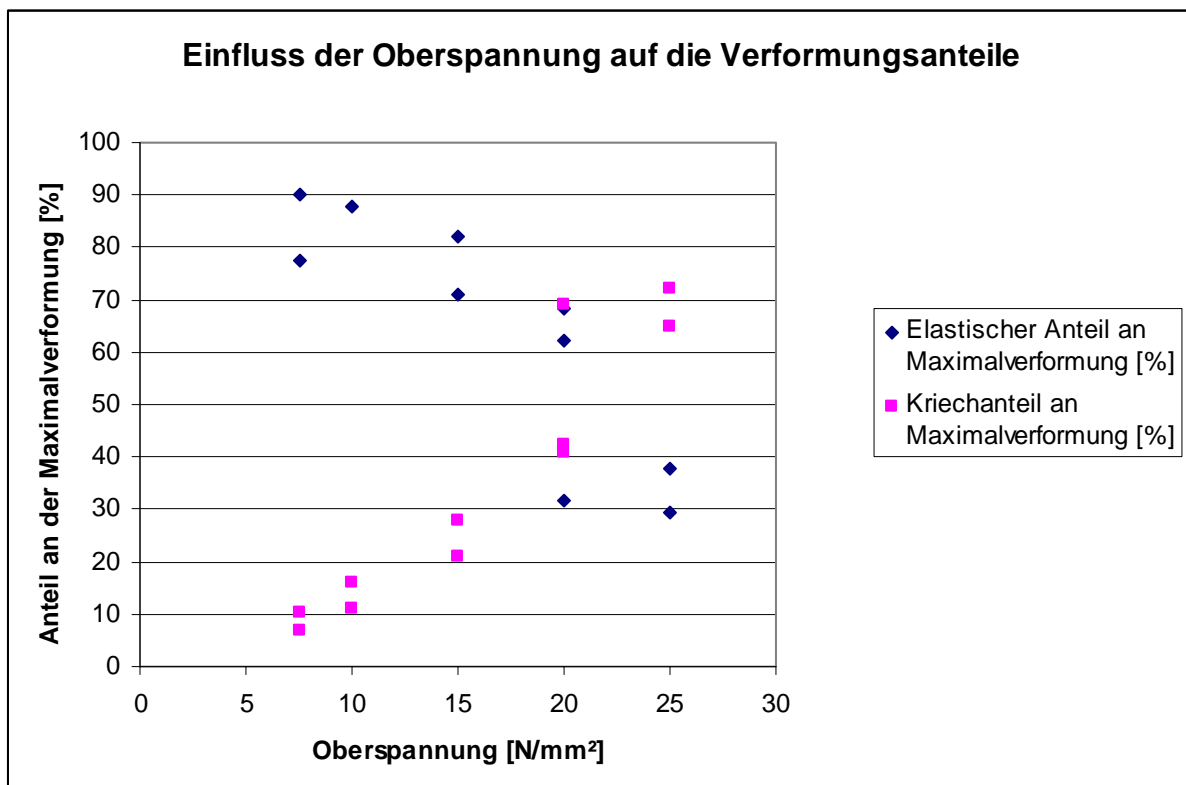


Diagramm 1: Elastische und viskose Verformungsanteile bei hohen Kontaktspannungen.

Oberspannung [N/mm ²]	Bleibende Verformung nach Entlastung [mm]
7,5	0,055
7,5	0,020
10,0	0,134
10,0	0,029
15,0	0,092
15,0	0,061
20,0	0,215
20,0	0,193
25,0	1,495
25,0	1,132

Tabelle 5: Bleibende Deformation nach Entlastung, Oberspannung für 1 Minute gehalten.

Die Werte machen deutlich, dass bei kurzzeitiger Belastung ab einer Oberspannung von 20 N/mm² die Deformationen deutlich anwachsen. Bei Belastung über mehrere Stunden liegt diese Spannung niedriger. Während im Dauerstandversuch über 3,5 Tage mit 5 N/mm² ein asymptotischer Verformungsverlauf festgestellt wurde (Verformung klingt ab), zeigt ein weiterer Versuch (Anlage 7.1 und 7.2) mit 15 N/mm² Kontaktspannung über 15 Stunden eine kontinuierliche Zunahme der Deformation. Mit 5 N/mm² sind jedoch die aus Verkehr zu erwartenden Belastungen sicher abgedeckt.

5. FOLGEVERSUCHE

In den in diesem Bericht beschriebenen statischen und dynamischen Untersuchungen wurden mit servohydraulischen Prüfzylindern einaxiale Belastungen aufgebracht. Diese Vorgehensweise ist geeignet, um Materialkennwerte und das Ermüdungsverhalten des gebundenen Oberbaus zu untersuchen. Sie kann jedoch keine definitive Aussage zum Verhalten unter dem rollenden Rad liefern. Der abrollende Reifen kann Abrieb oder lokale Abplatzungen an der Oberfläche hervorrufen, welche mit den bisher durchgeführten Versuchen nicht erfasst werden. Hierfür ist der Überrollprüfstand ein geeignetes Mittel, da er die Situation unter dem rollenden Rad ausgesprochen realitätsnah abbildet.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Fa. Terra Elast AG stellt Boden- und Fahrbahnbeläge aus kunststoffgebundenen Gesteinskörnungsgemischen her. Hierbei kommen gebrochene Gesteinskörnungen unterschiedlicher Korngrößen und als Bindemittel Polyurethane oder Epoxidharze zur Anwendung. Das große Wasserschluckvermögen dieser gebundenen Befestigungen kann einen Einbau ohne Neigung der Oberfläche ermöglichen.

Aus unterschiedlichen Deckschicht- und Tragschichtarten wurden für weiterführende Untersuchungen eines zweischichtigen gebundenen Oberbaus für Verkehrsflächen zwei Mischguttypen ausgewählt. An diesen wurden mit unterschiedlichen Methoden relevante Kennwerte ermittelt.

Das gewählte Deckschichtmaterial ist eine polyurethanegebundene Körnung 1/3 mm mit der Bezeichnung „TE 20 H2 K PU Granit WKW 1/3 PU NUV“. Die Tragschicht 8/11 mm ist mit Epoxidharz gebunden („TE 02 G2 K EP Naturschotter 8/11 EP NUV“).

Mit den Versuchen wurde für die Deckschicht ein Elastizitätsmodul von $E = 5900 \text{ N/mm}^2$ und für die Tragschicht $E = 7650 \text{ N/mm}^2$ bestimmt.

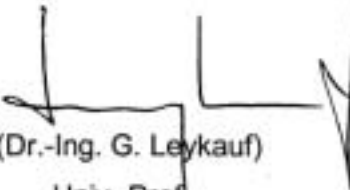
Im Würfeldruckversuch wurde für die Tragschicht eine mittlere Druckfestigkeit von $13,2 \text{ N/mm}^2$, für die Deckschicht $12,3 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Hinsichtlich der Gefahr thermischer Rissbildung wurde die Zugfestigkeit der Deckschicht bestimmt. Mit einer Zugfestigkeit von $3,1 \text{ N/mm}^2$ bestehen bei temperaturunabhängigem E-Modul von 5900 N/mm^2 keine Bedenken gegen einen fugenlosen Einbau des Materials.

Unter großen Radlasten werden an der Unterseite der gebundenen Tragschicht hohe radiale Zugspannungen aktiviert. Zum Nachweis des ausreichenden Widerstandes gegen diese Spannungen wurden Biegezugversuche mit Tragschichtbalken bei RT durchgeführt. Die Versuche ergaben eine mittlere Biegezugfestigkeit von $2,4 \text{ N/mm}^2$. Desweiteren wurde in Dauerschwellversuchen mit einer Biegezug-Oberspannung von $1,6 \text{ N/mm}^2$ über jeweils 3 Mio. Lastspielen festgestellt, dass die Tragschicht keine signifikante Ermüdung erfährt.

In Dauerstandversuchen und Dauerschwellversuchen bei Raumtemperatur am zweischichtigen Aufbau unter außerordentlich hohen Kontaktspannungen von 5 N/mm^2 blieb

die Oberfläche nahezu unverformt (Deformationsmulde: 0,1 mm) und zeigte einen asymptotischen Verformungsverlauf über die Zeit. Unter zusätzlicher Temperaturbelastung ($T_{OK} = 40^{\circ}\text{C}$) war die Verformung geringfügig stärker. Bei der Laststeigerung bis zum Versagen der Deckschicht konnten Spannungen bis 20 N/mm^2 schadensfrei aufgebracht werden (kurzzeitige Belastung). Dagegen zeigt die Oberfläche bei Konstanthaltung einer Oberspannung von 15 N/mm^2 , welche deutlich über den Beanspruchungen aus Verkehr liegt, zeitabhängige Kriechverformung.

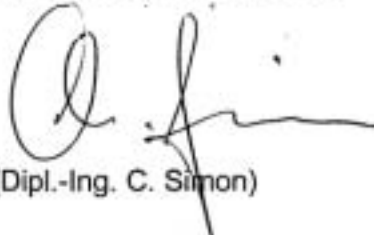
Mit den durchgeführten Versuchen wurden Kennwerte ermittelt, mit welchen die Tragfähigkeit der Konstruktion unter schwerem LKW-Verkehr (hohe Radlasten) wie auch unter Flurförderzeugen (hohe Kontaktspannungen) bestätigt wird. Für die speziellen Beanspruchungen der oberflächennahen Zone unter dem rollenden Rad (Abrieb) erscheint es sinnvoll, Versuche am Gesamtaufbau im Überrollprüfstand durchzuführen.



(Dr.-Ing. G. Leykauf)
Univ.-Prof.

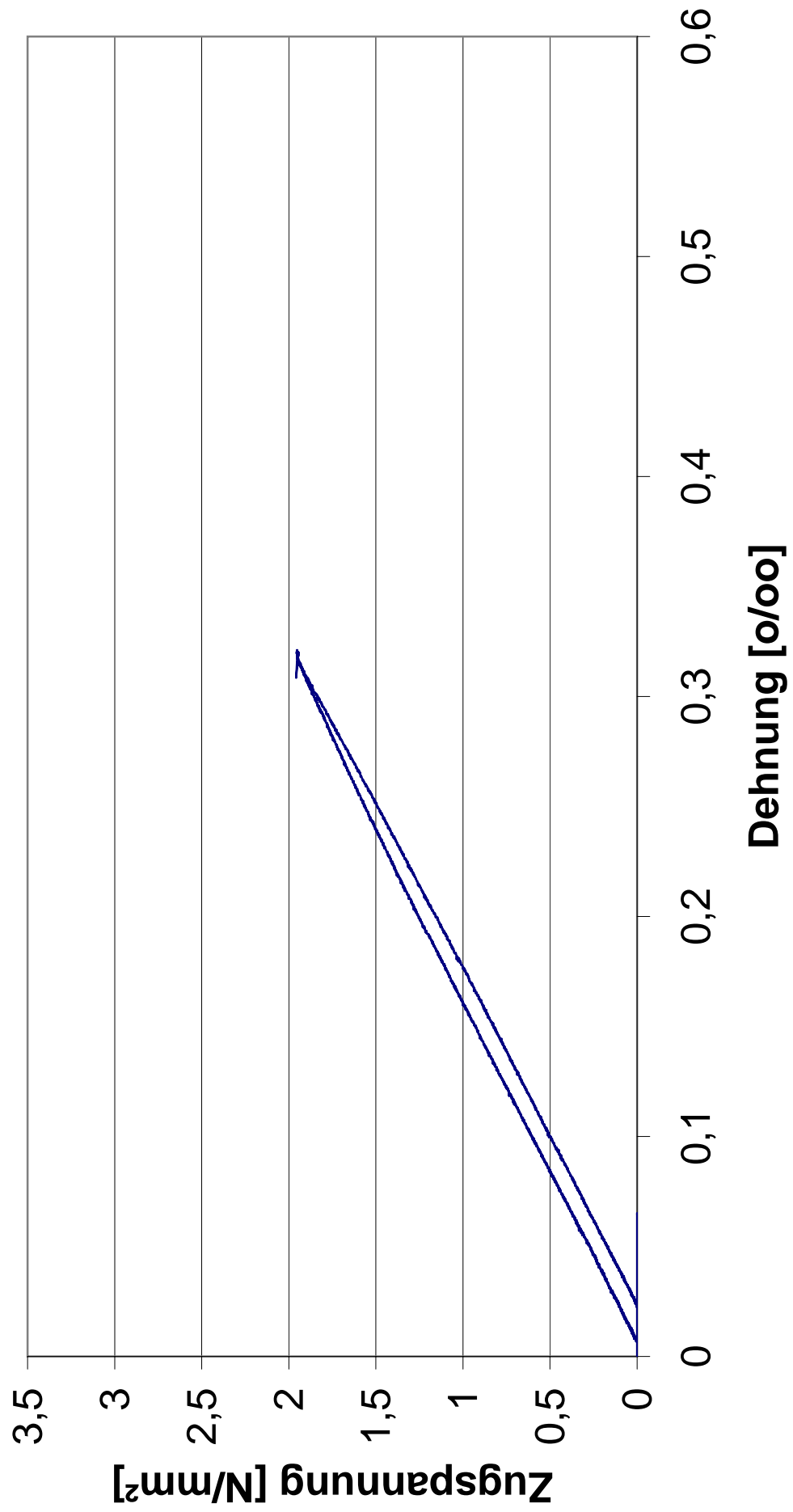


Für die Durchführung und
Auswertung der Versuche:

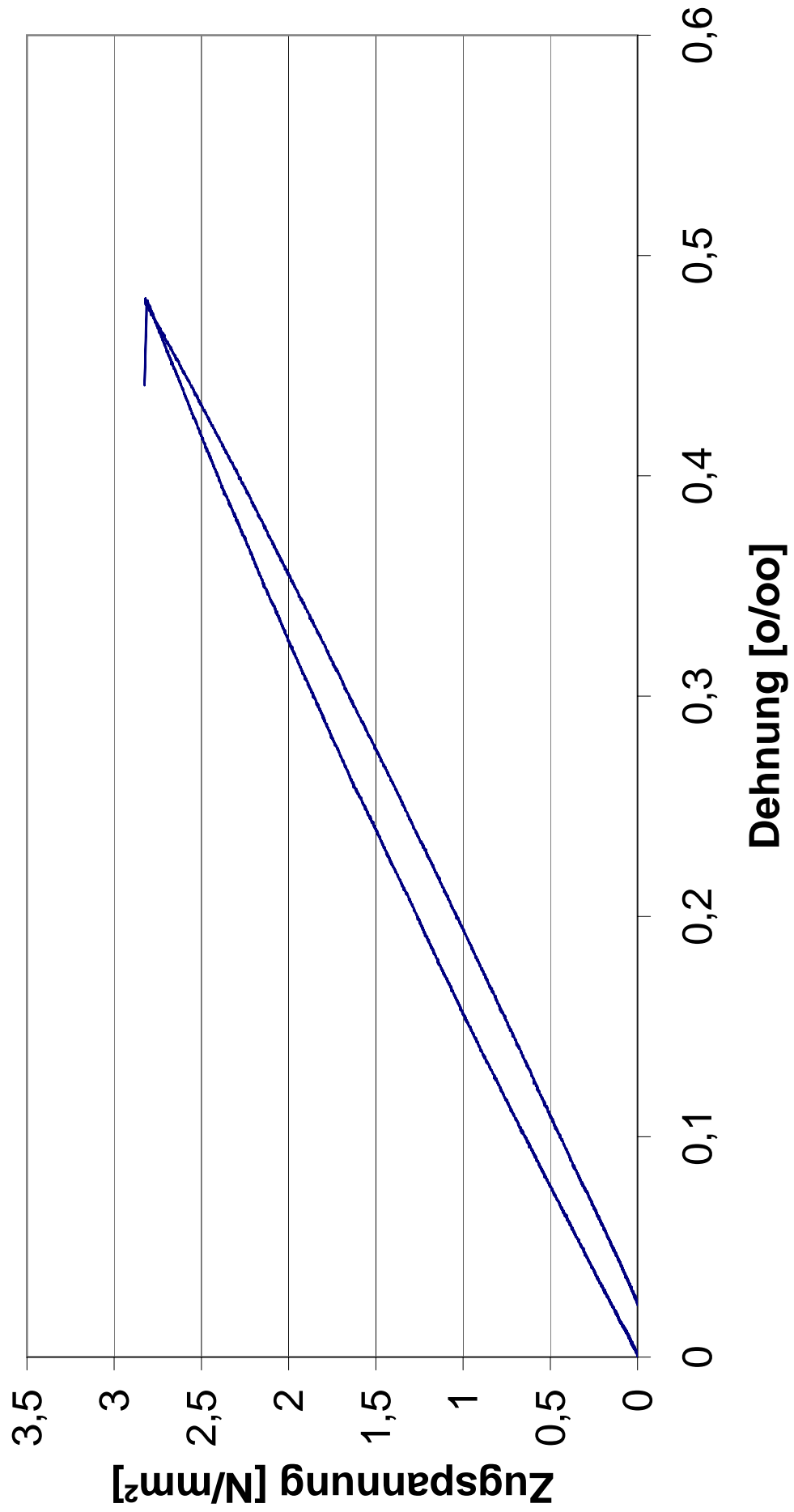


(Dipl.-Ing. C. Simon)

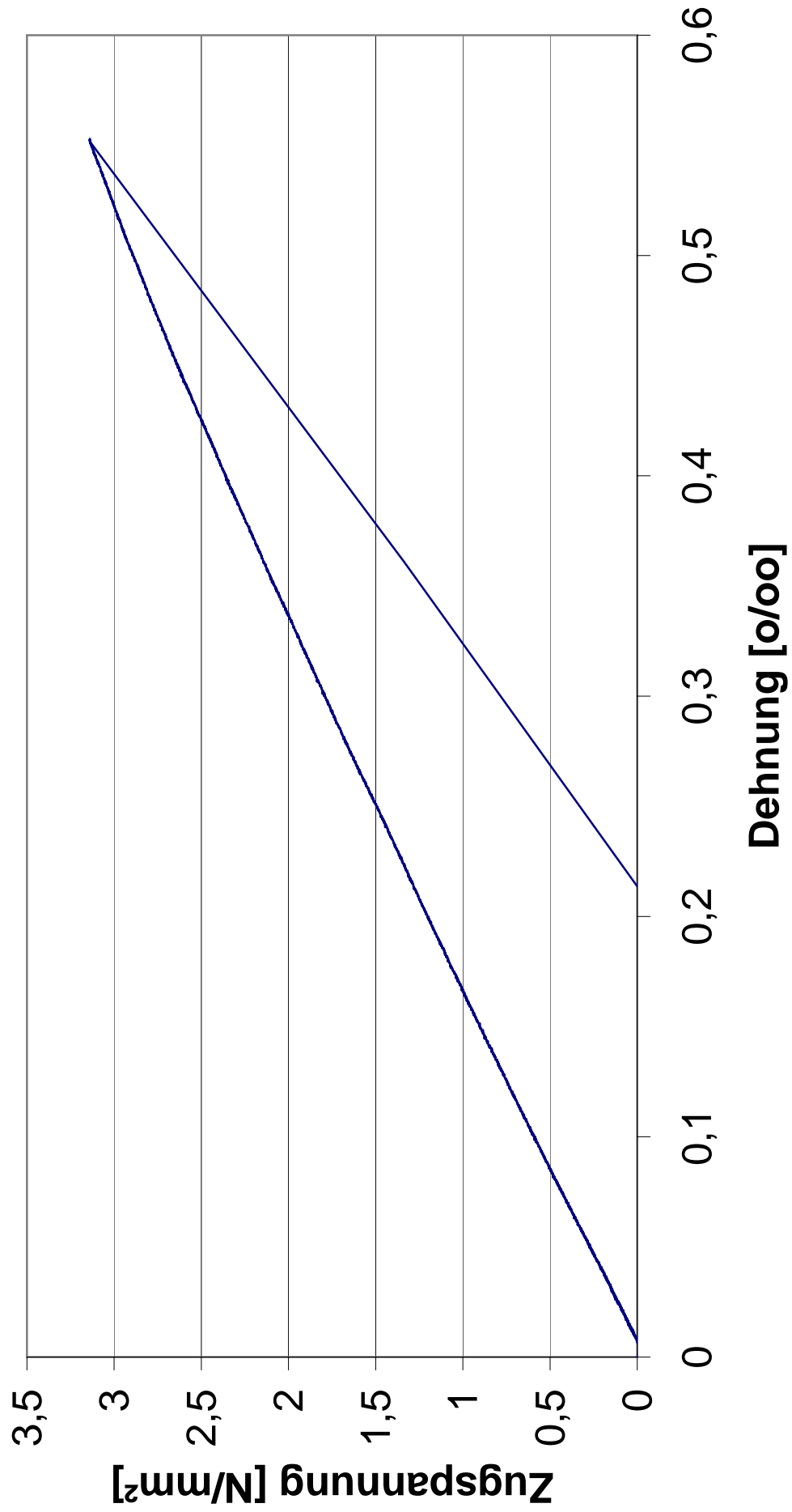
Zugversuch 1 an Deckschichtbalken



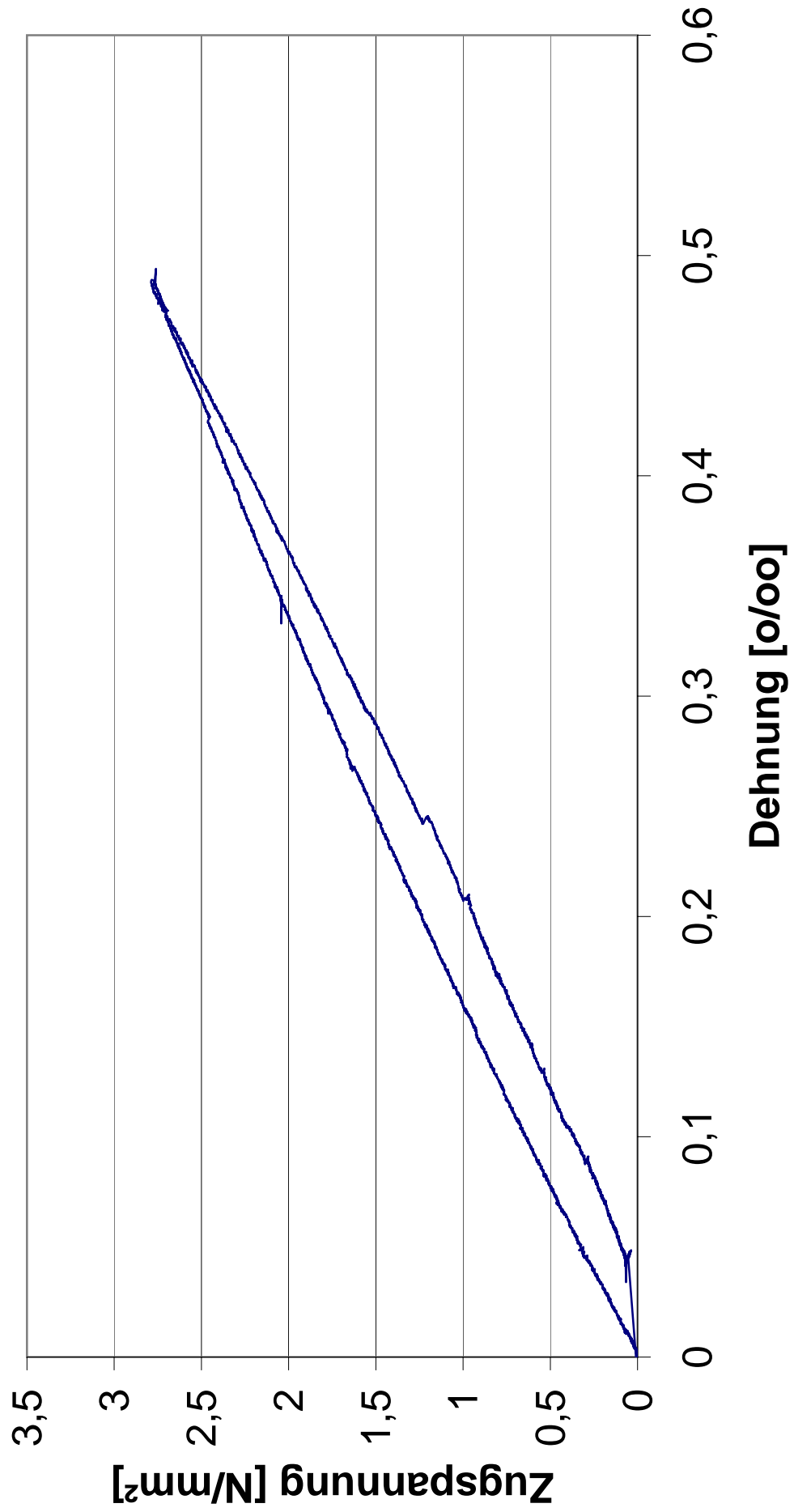
Zugversuch 2 an Deckschichtbalken



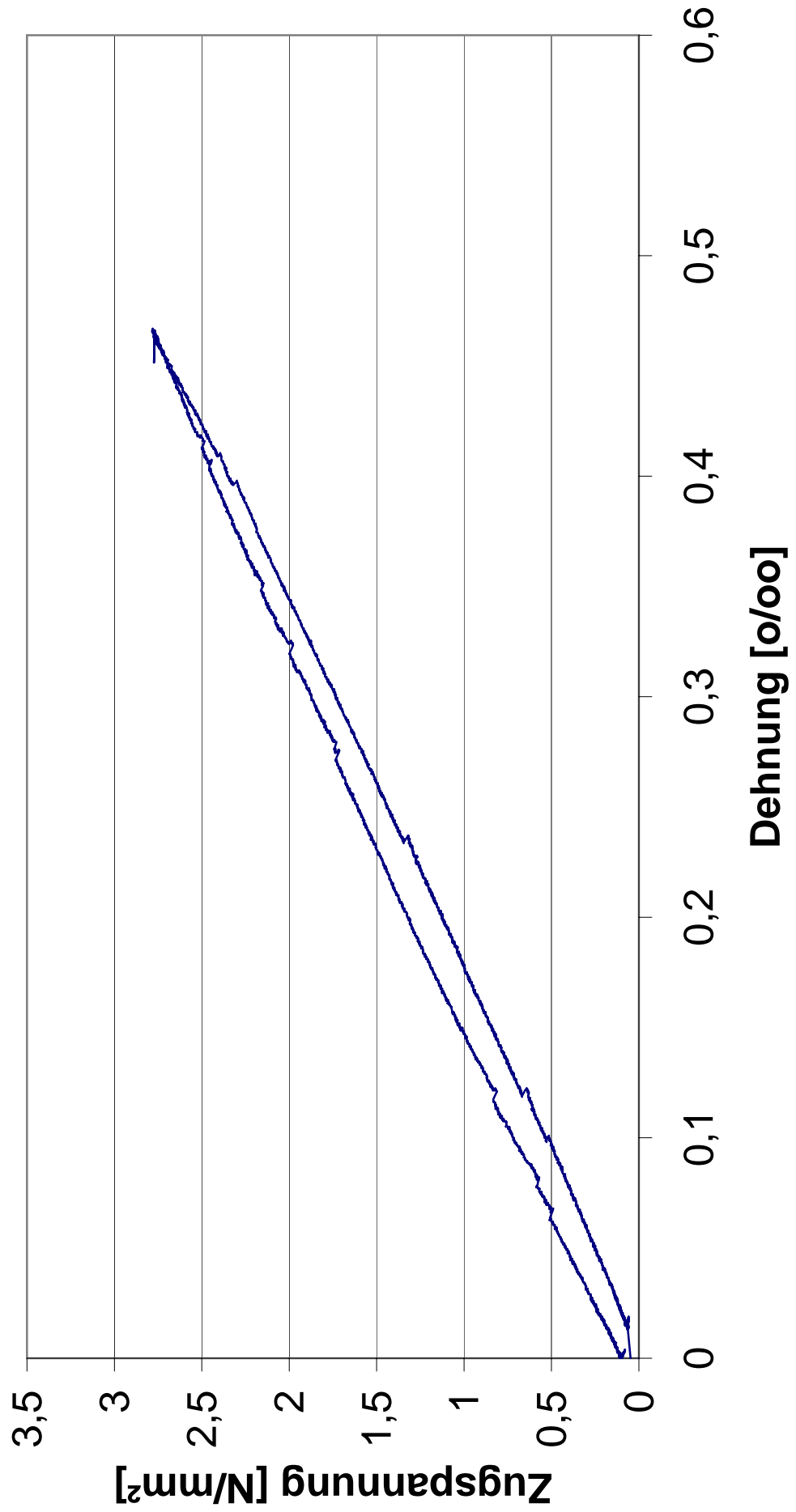
Zugversuch 3 an Deckschichtbalken bis Bruch



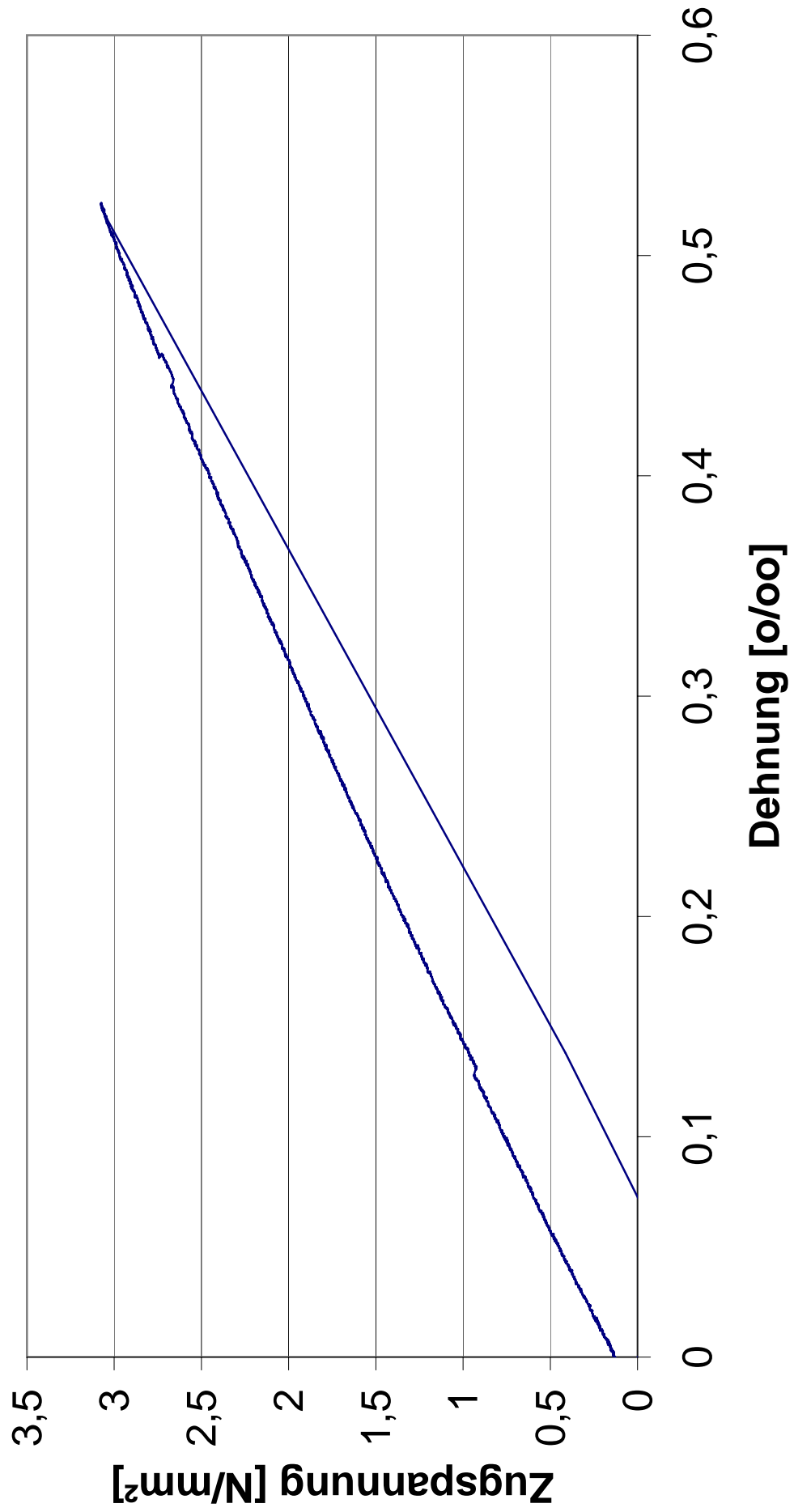
Zugversuch 4 an Deckschichtbalken



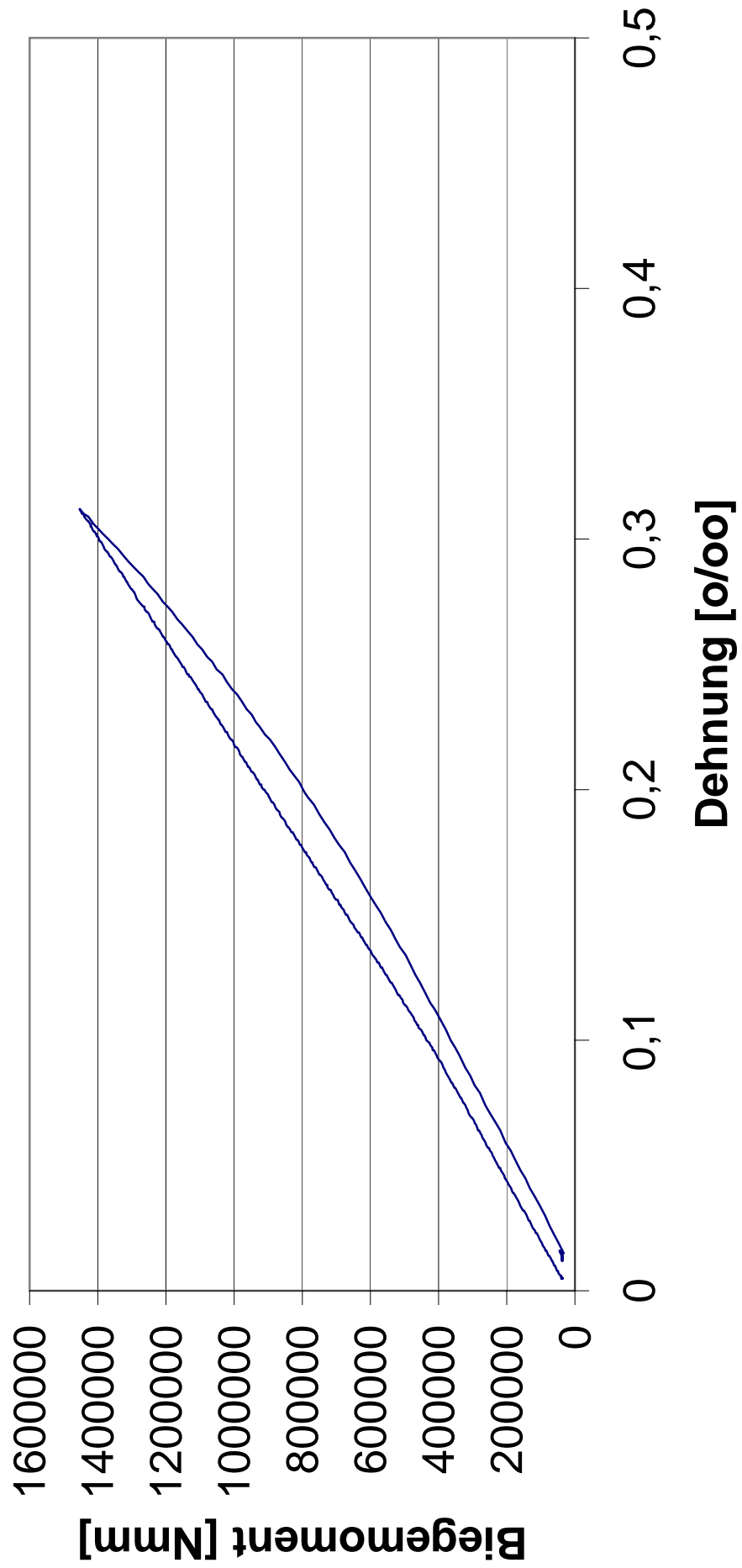
Zugversuch 5 an Deckschichtbalken



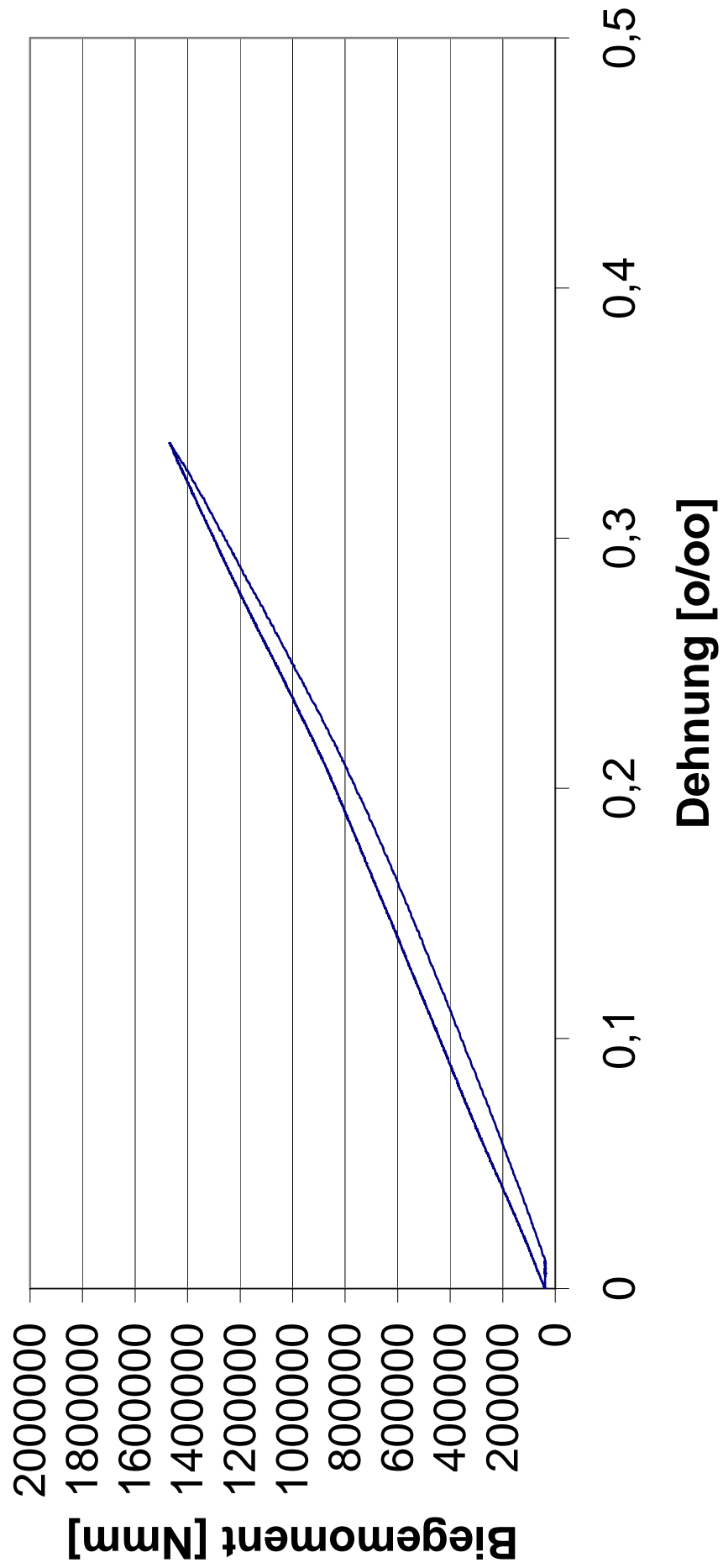
Zugversuch 6 an Deckschichtbalken bis Bruch



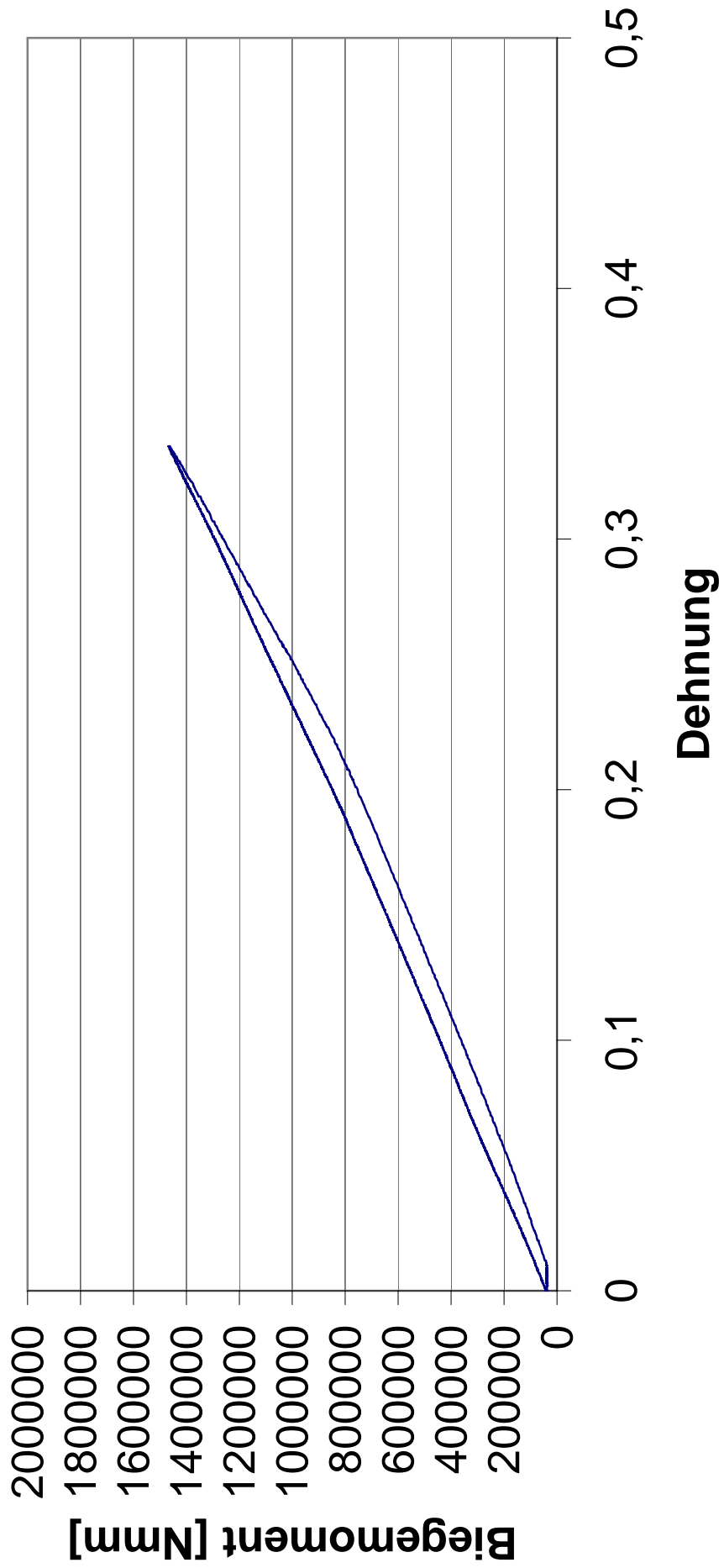
Dauerschwellversuch 1 an Tragschicht-Biegebalken Voreichung



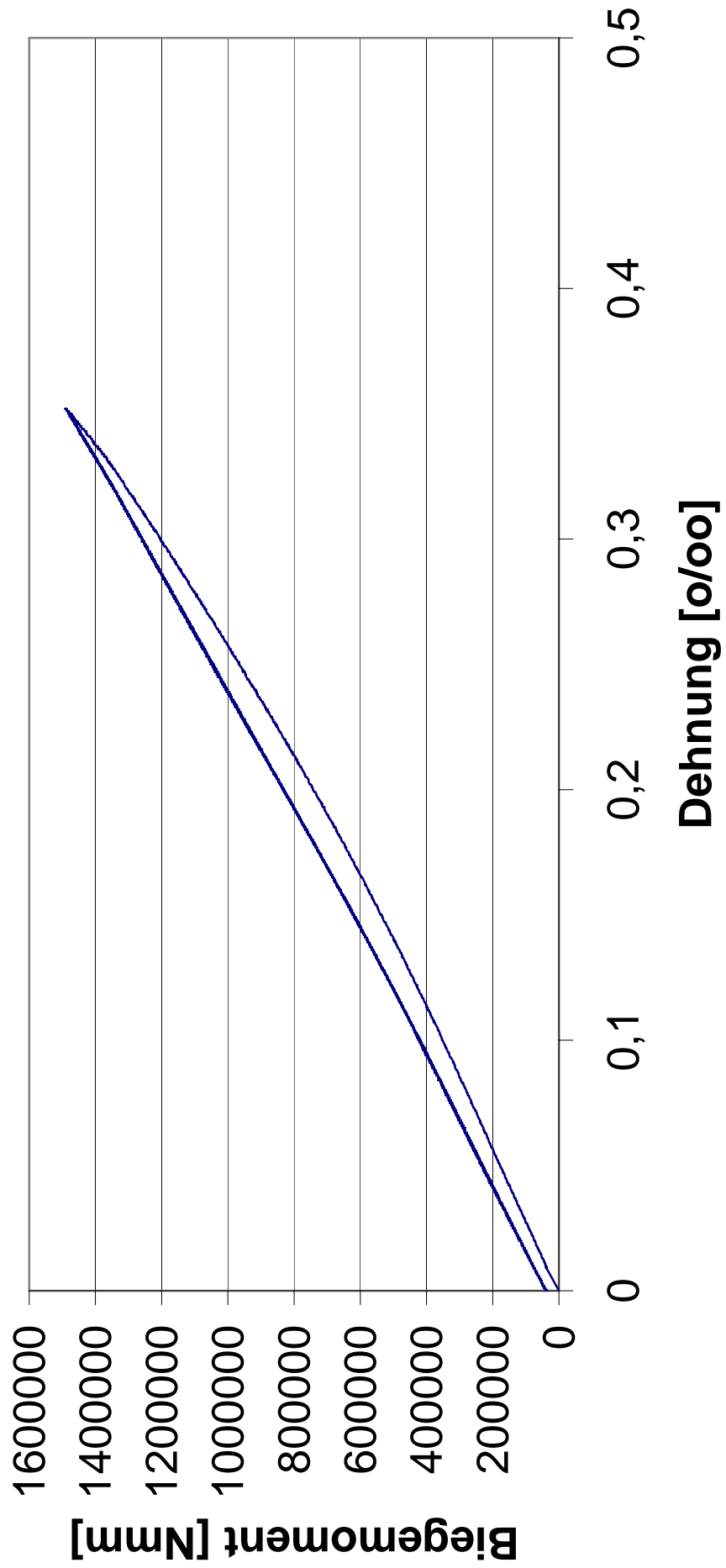
Dauerschwellversuch 1 an Tragschicht-Biegebalken Nacheichung



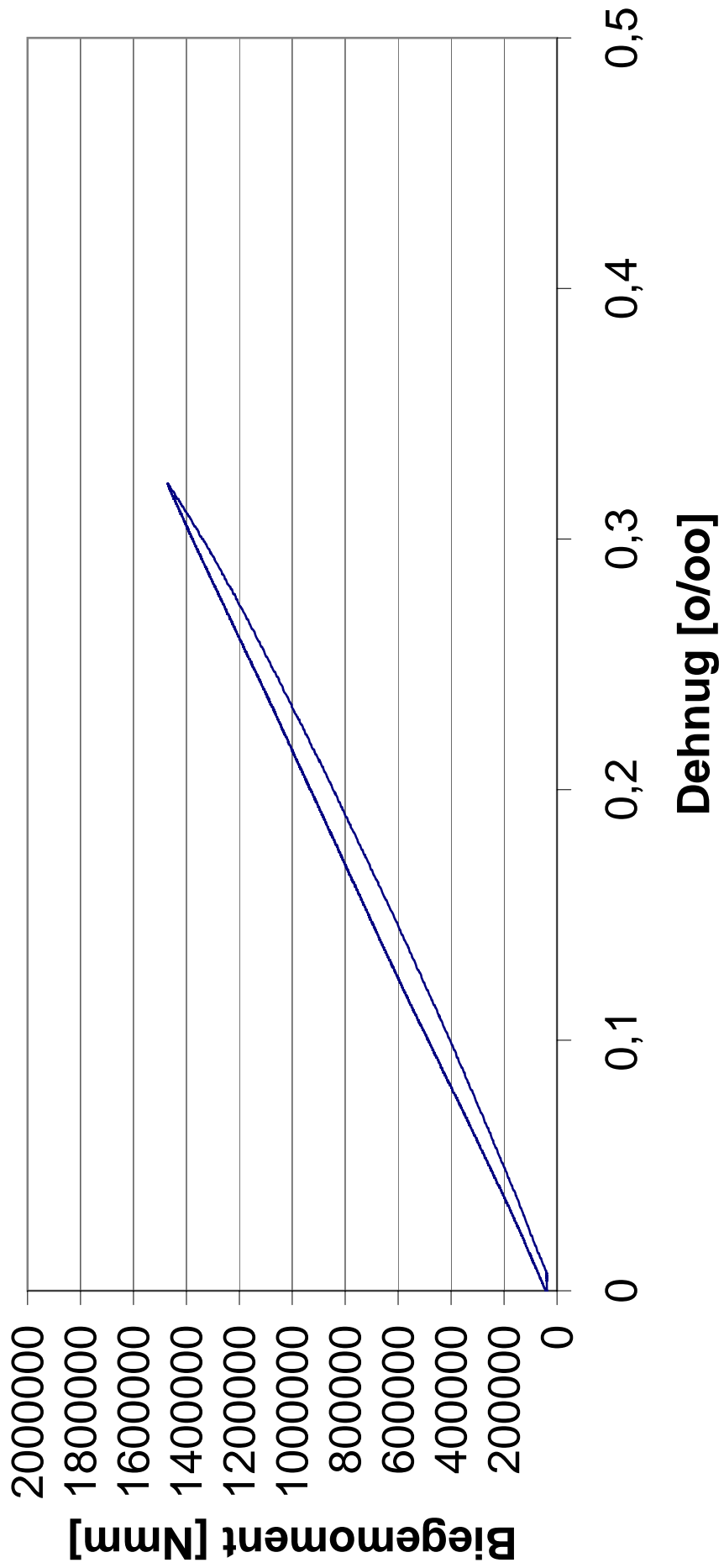
Dauerschwellversuch 2 an Tragschicht-Biegebalken Voreichung



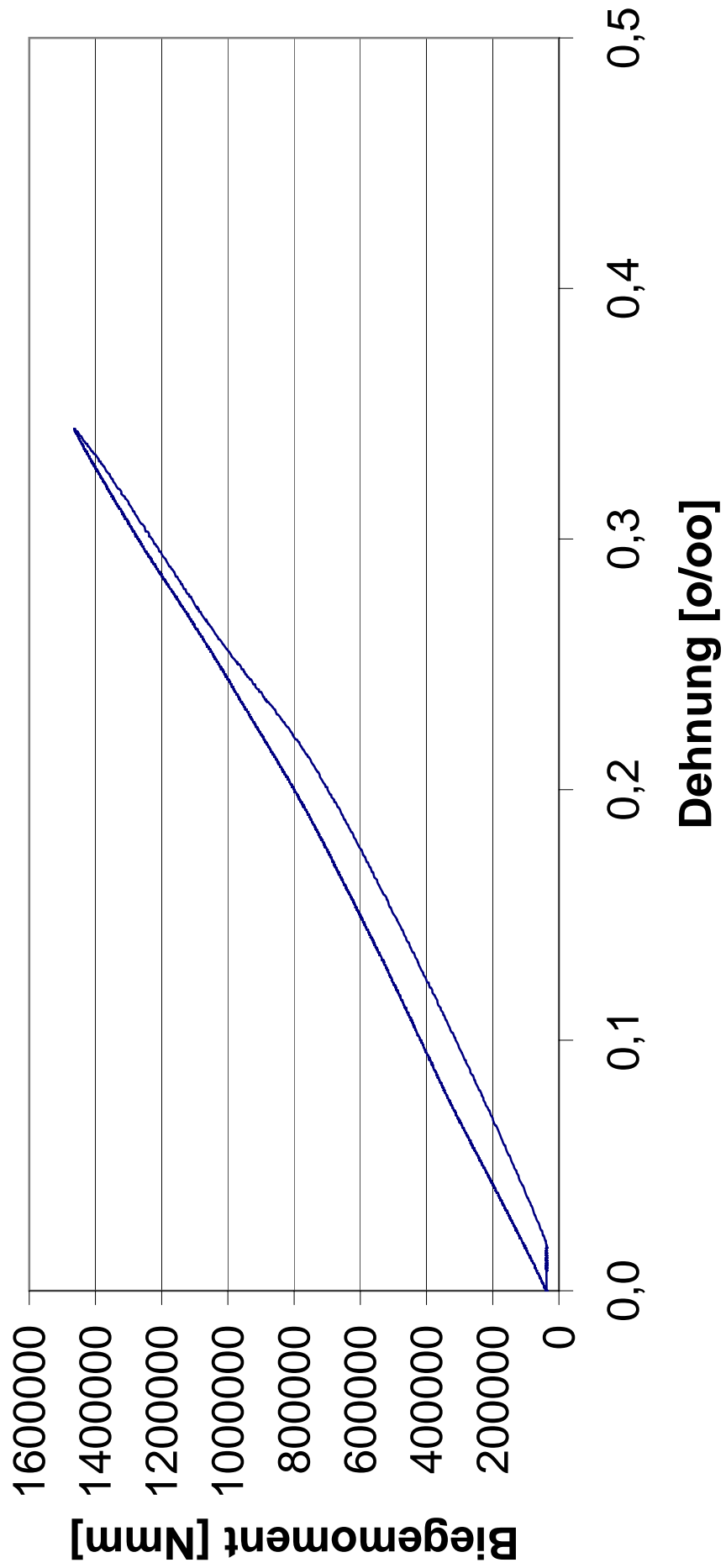
Dauerschwellversuch 2 an Tragschicht-Biegebalken Nacheichung



Dauerschwellversuch 3 an Tragschicht-Biegebalken Voreichung

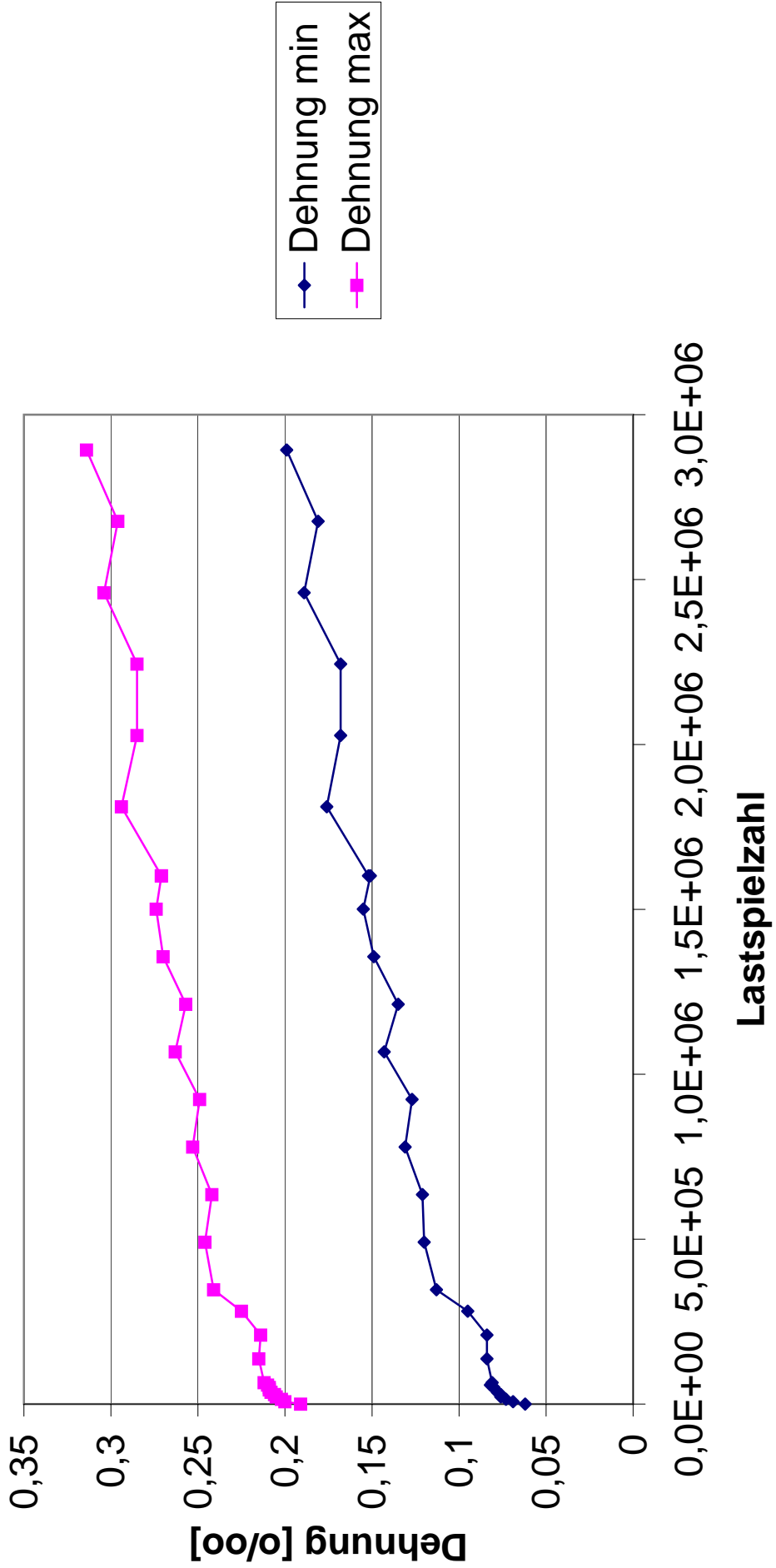


Dauerschwellversuch 3 an Tragschicht-Biegebalken Nacheichung

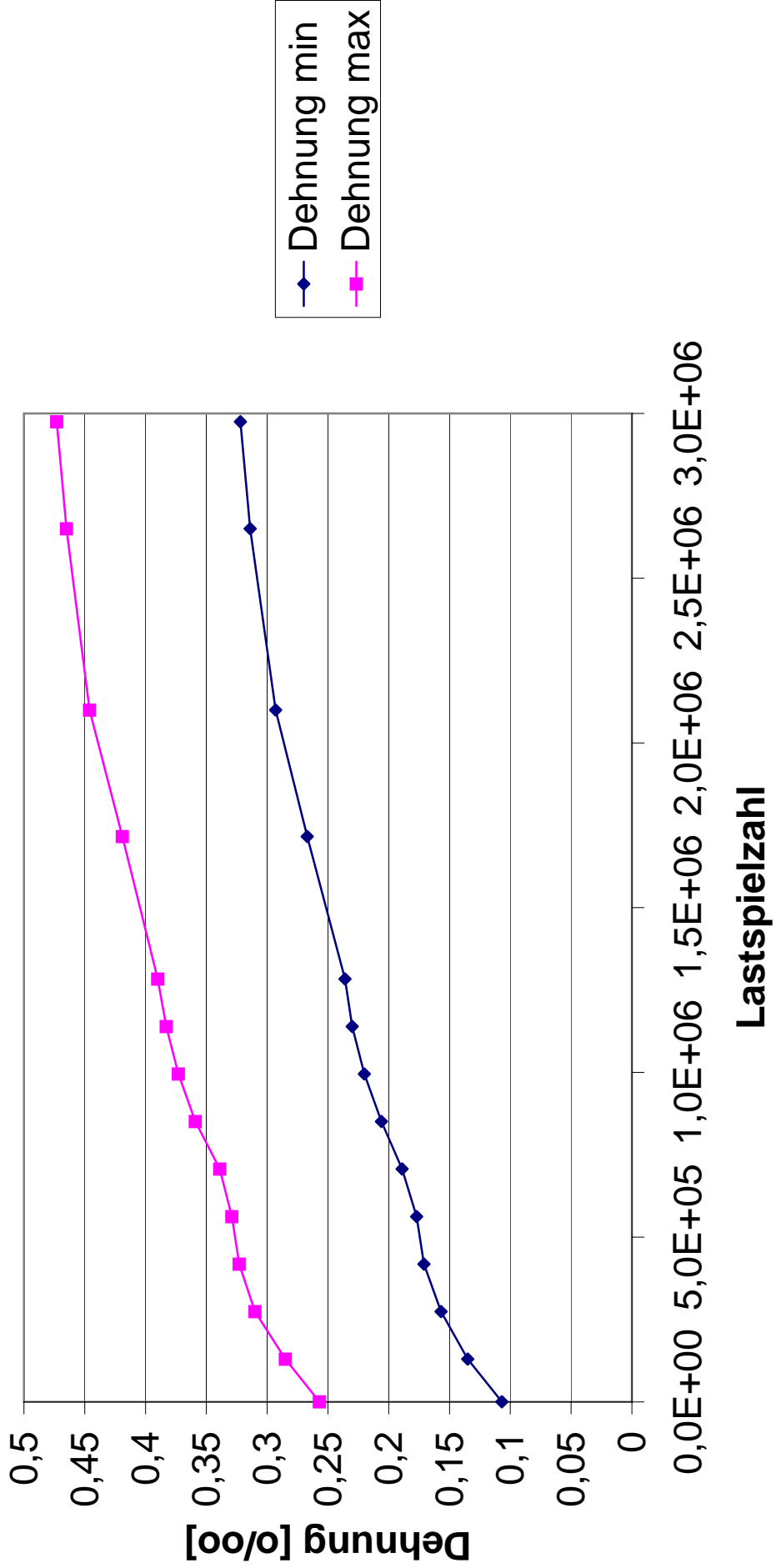


Dauerschwellversuch 1 Biegebalken

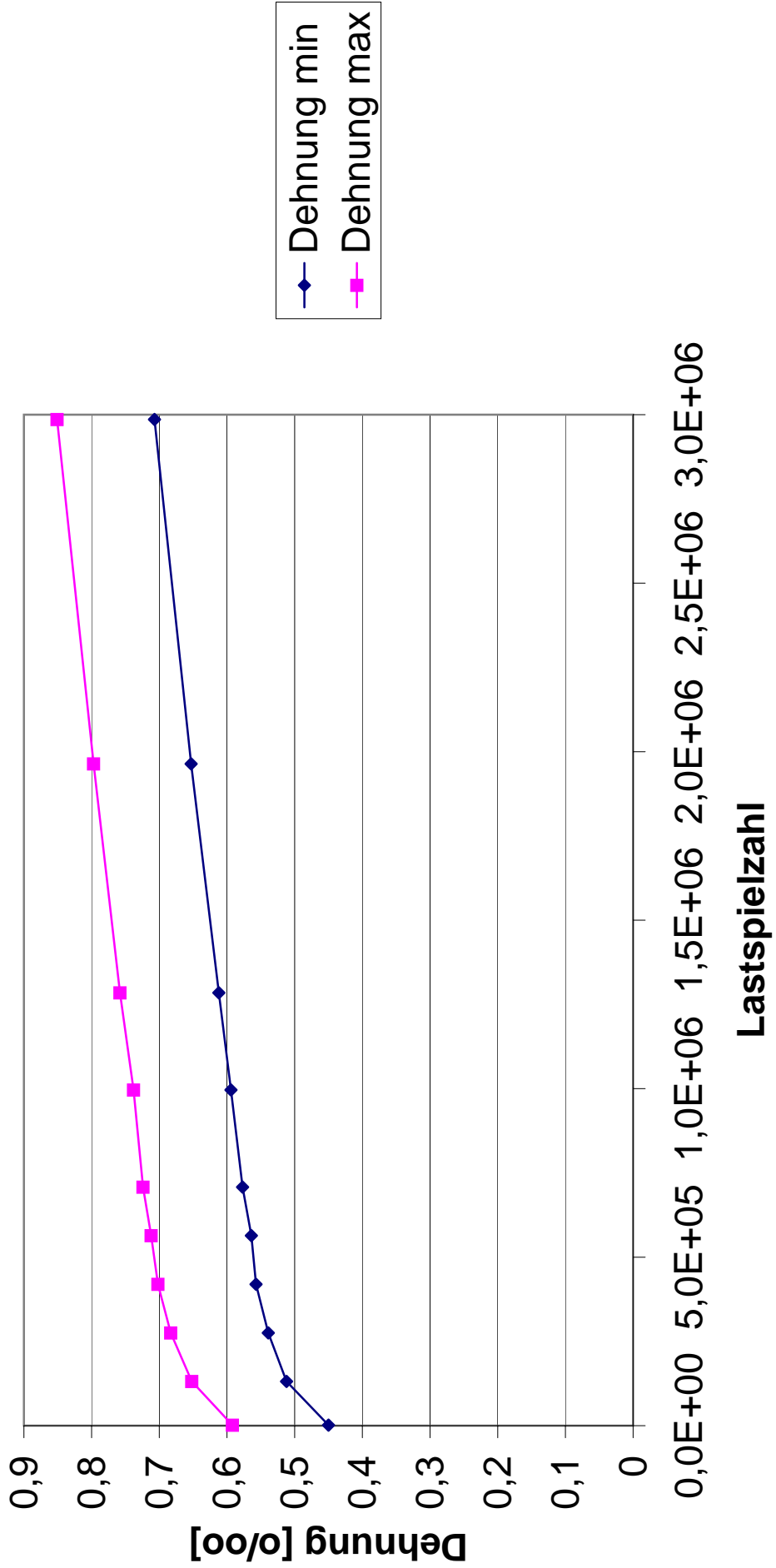
Verlauf der Dehnung über die Lastspielzahl



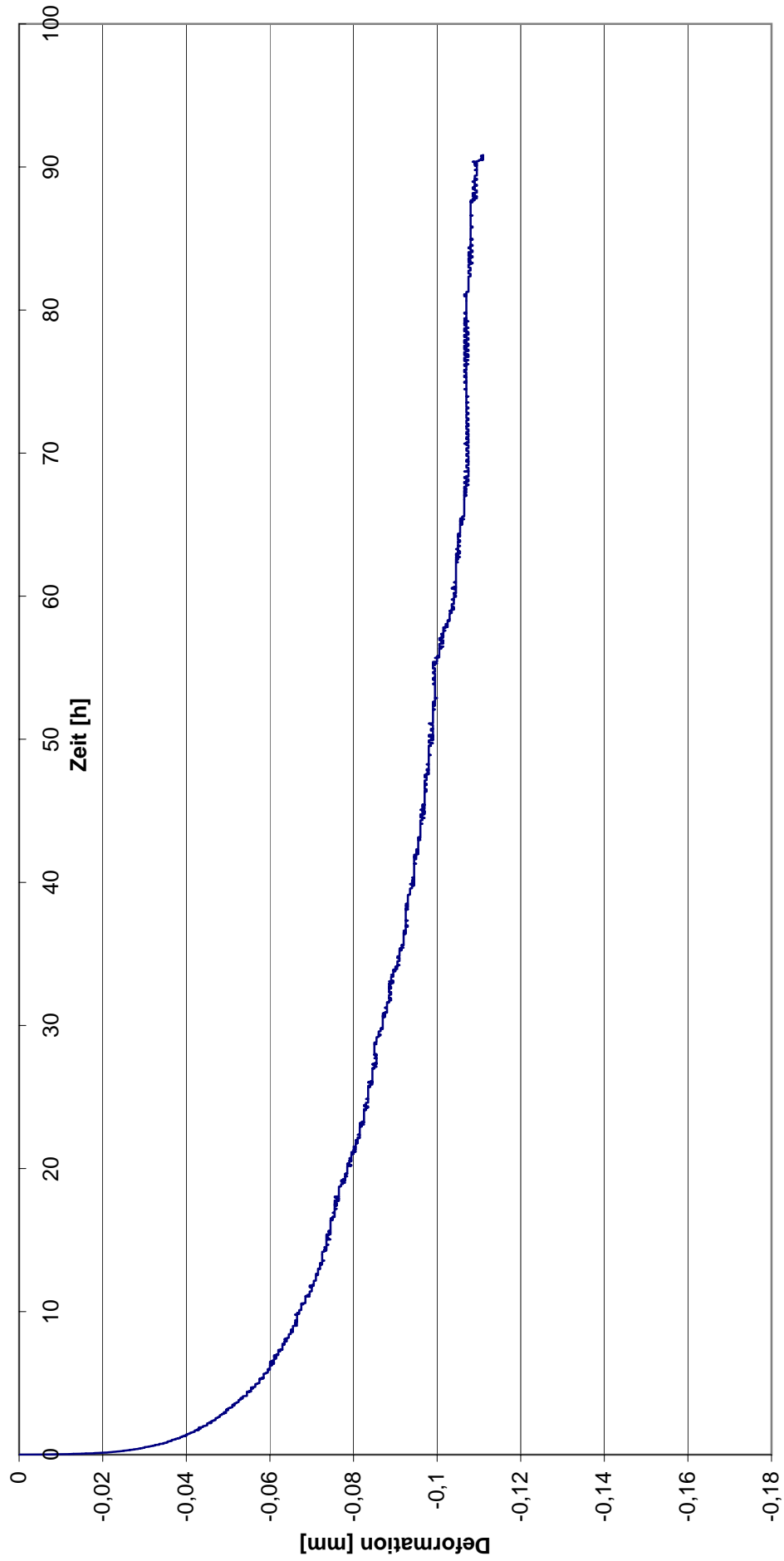
Dauerschwellversuch 2 Biegebalken Verlauf der Dehnung über die Lastspielzahl



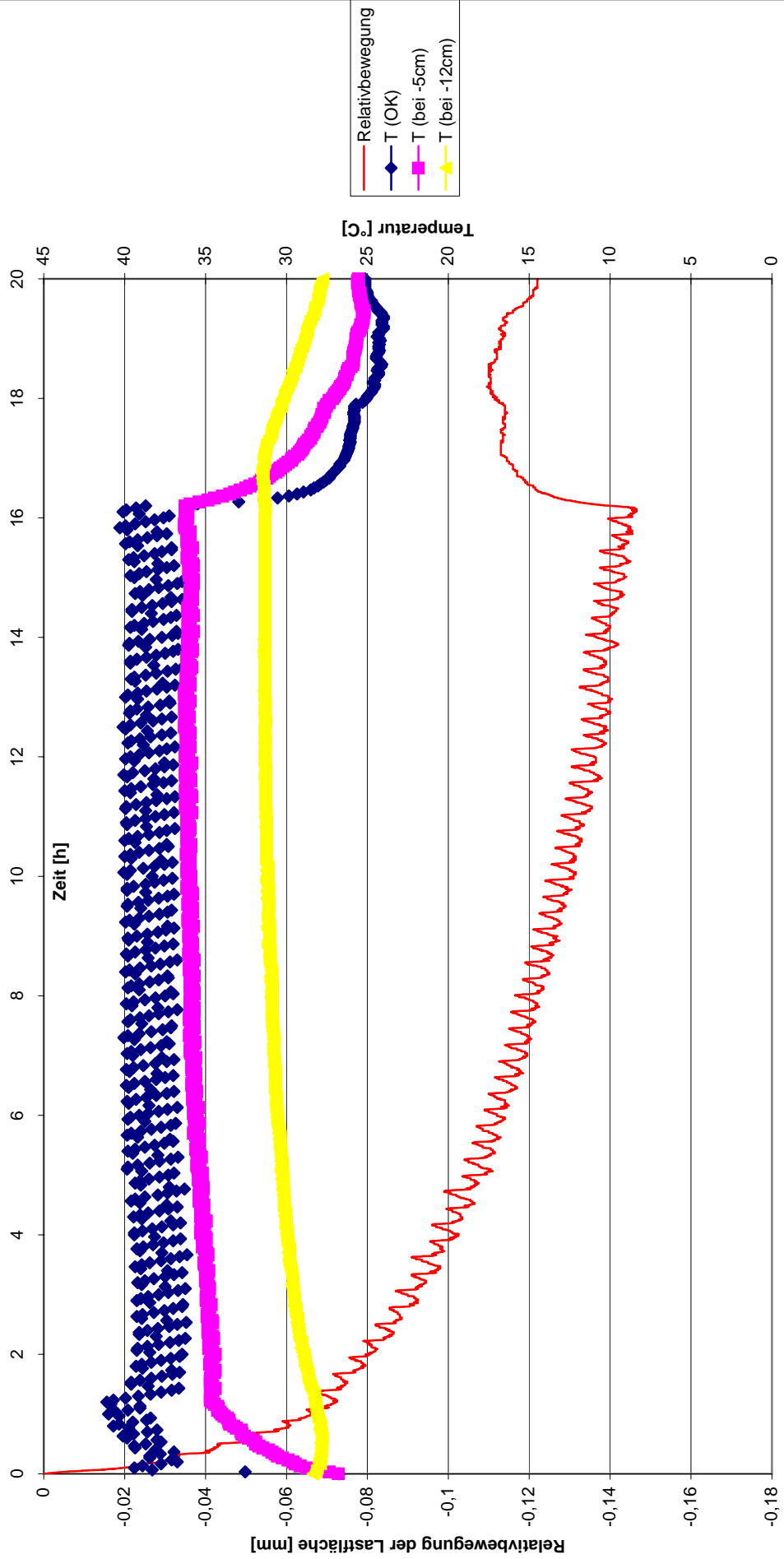
Dauerschwellversuch 3 Biegebalken Verlauf der Dehnung über die Lastspielzahl



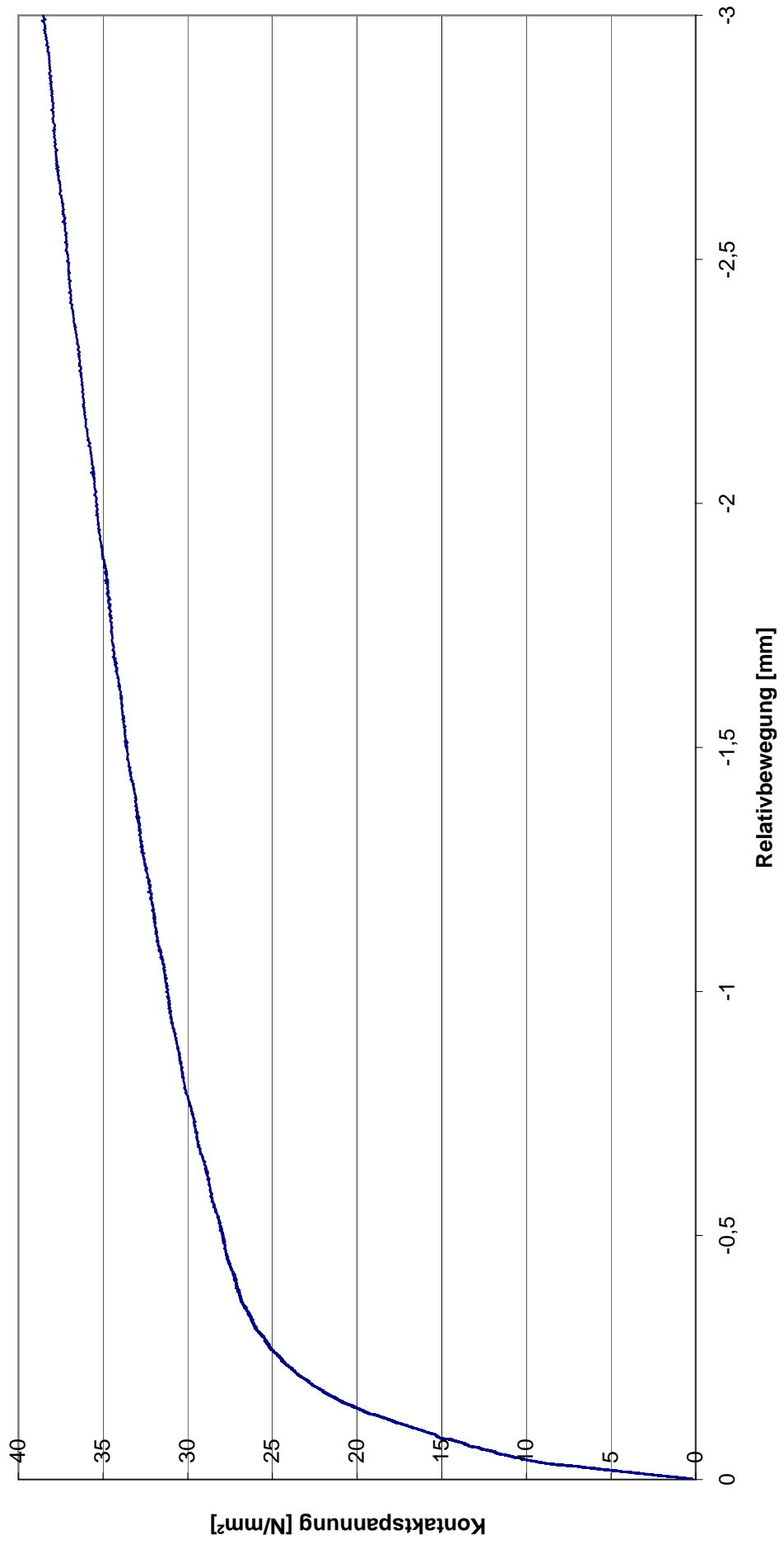
**Dauerstandversuch an zweischichtigem Aufbau
bei 5,0 N/mm² (Lastfläche: 20 x 60 mm) und Raumtemperatur**



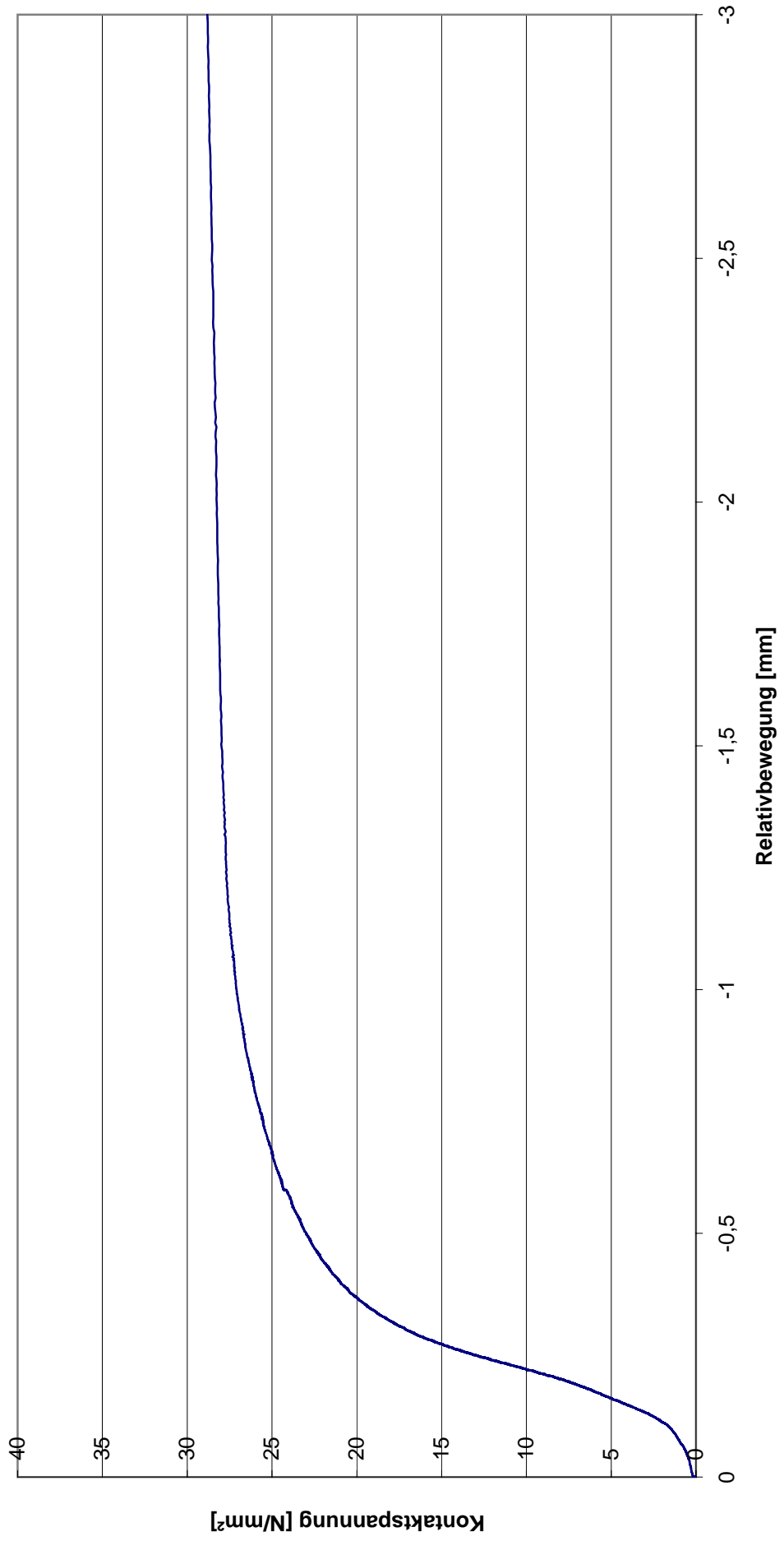
Dauerstandversuch an zweischichtigem Aufbau
bei 4,2 N/mm² (Kontaktfläche: 20 x 60 mm)
und OK-Temperatur 40°C mit anschließender Abkühlung auf RT



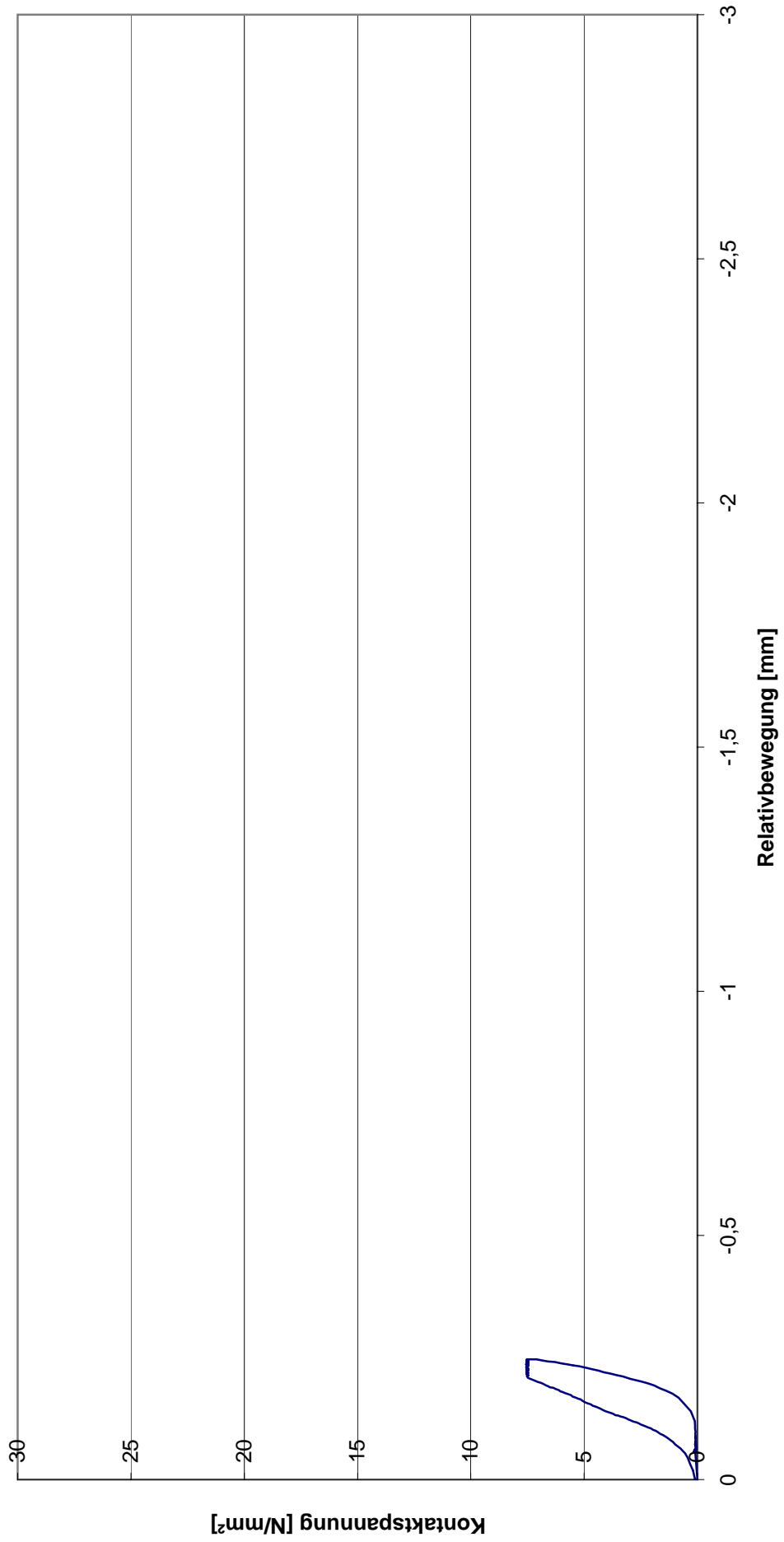
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis Versagen
(Kontaktfläche: 20 x 60 mm)**



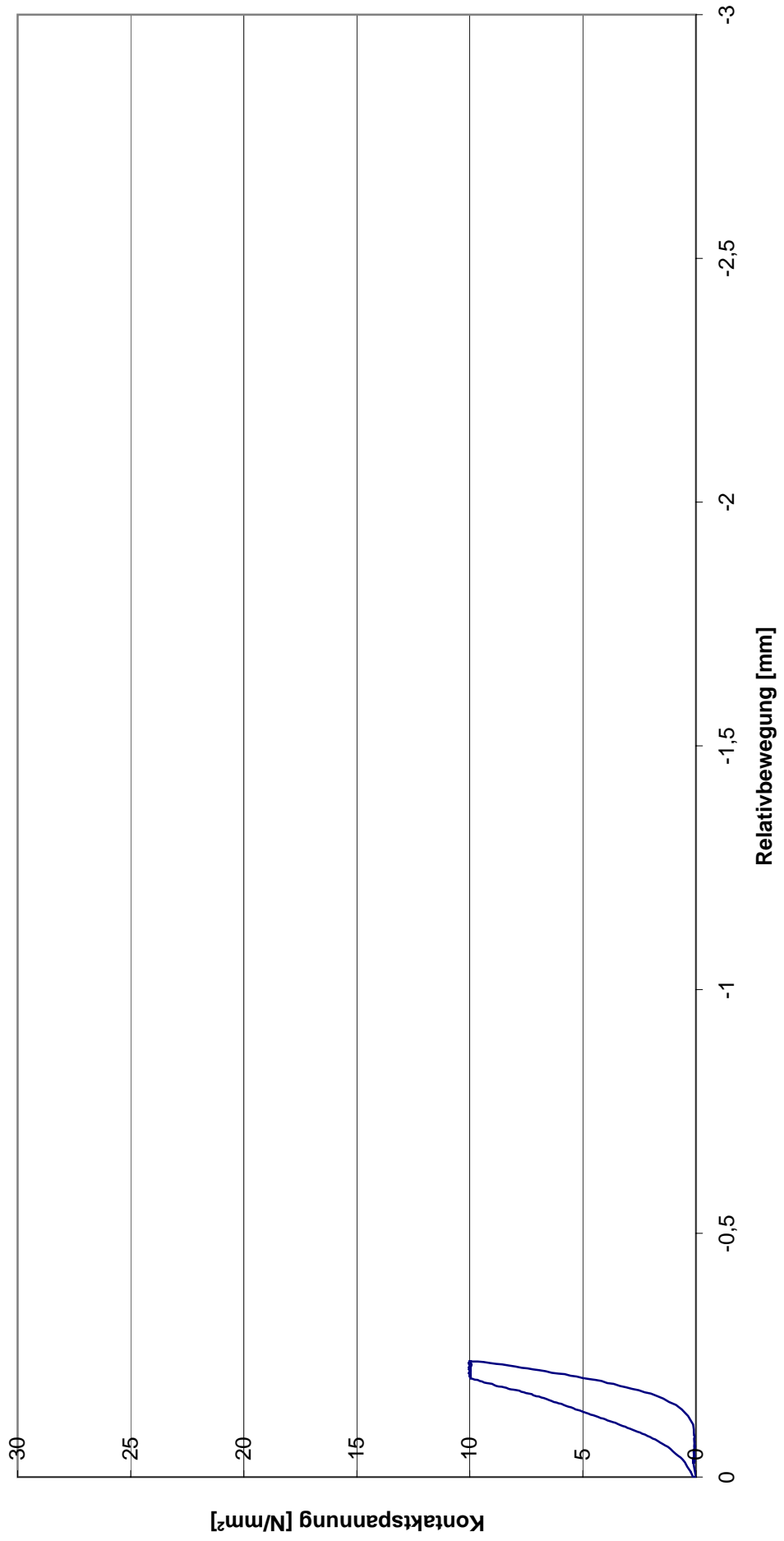
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis Versagen
(Kontaktfläche: 30 x 120 mm)**



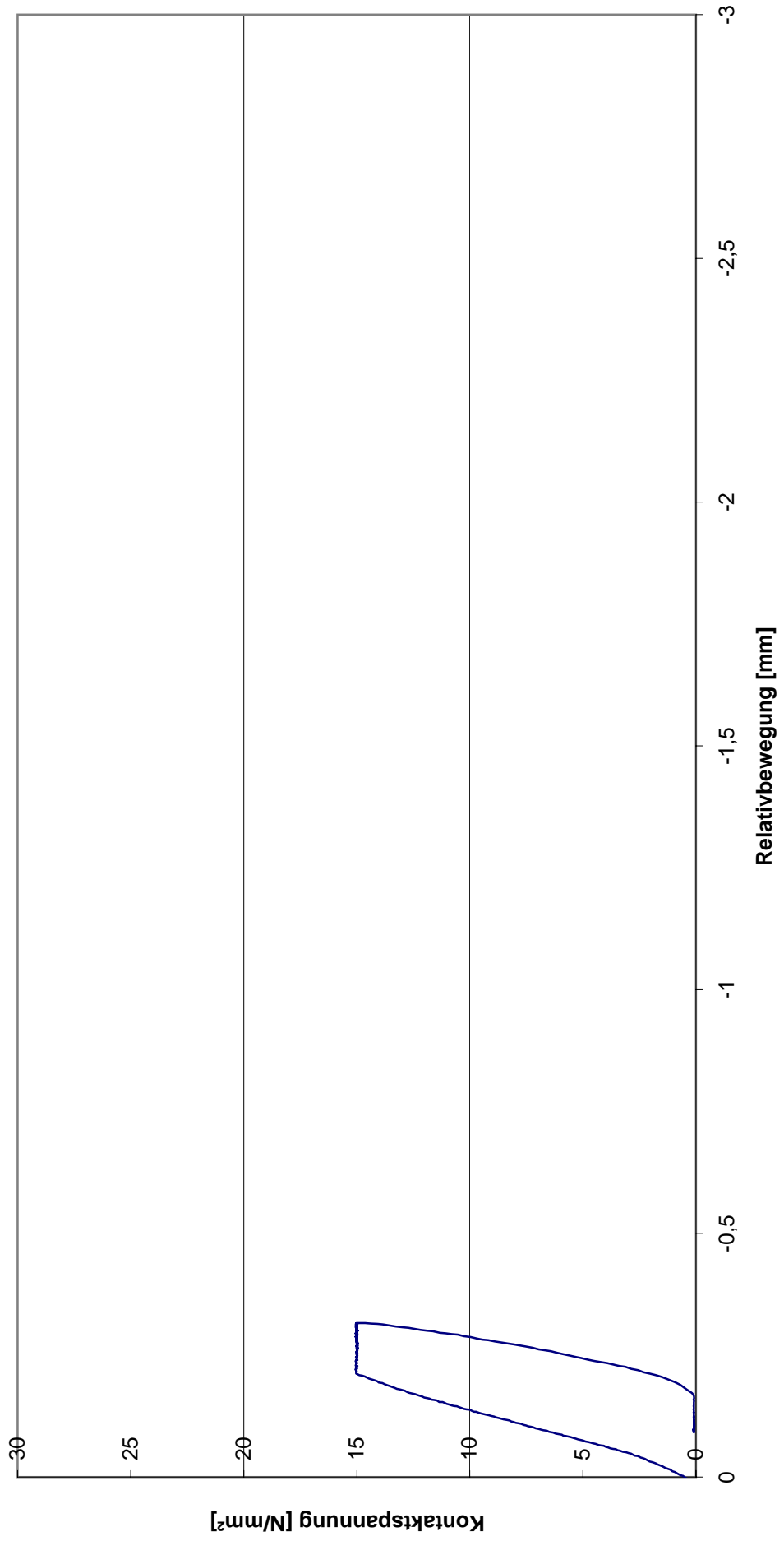
Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 7,5 N/mm² (1 Minute Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)



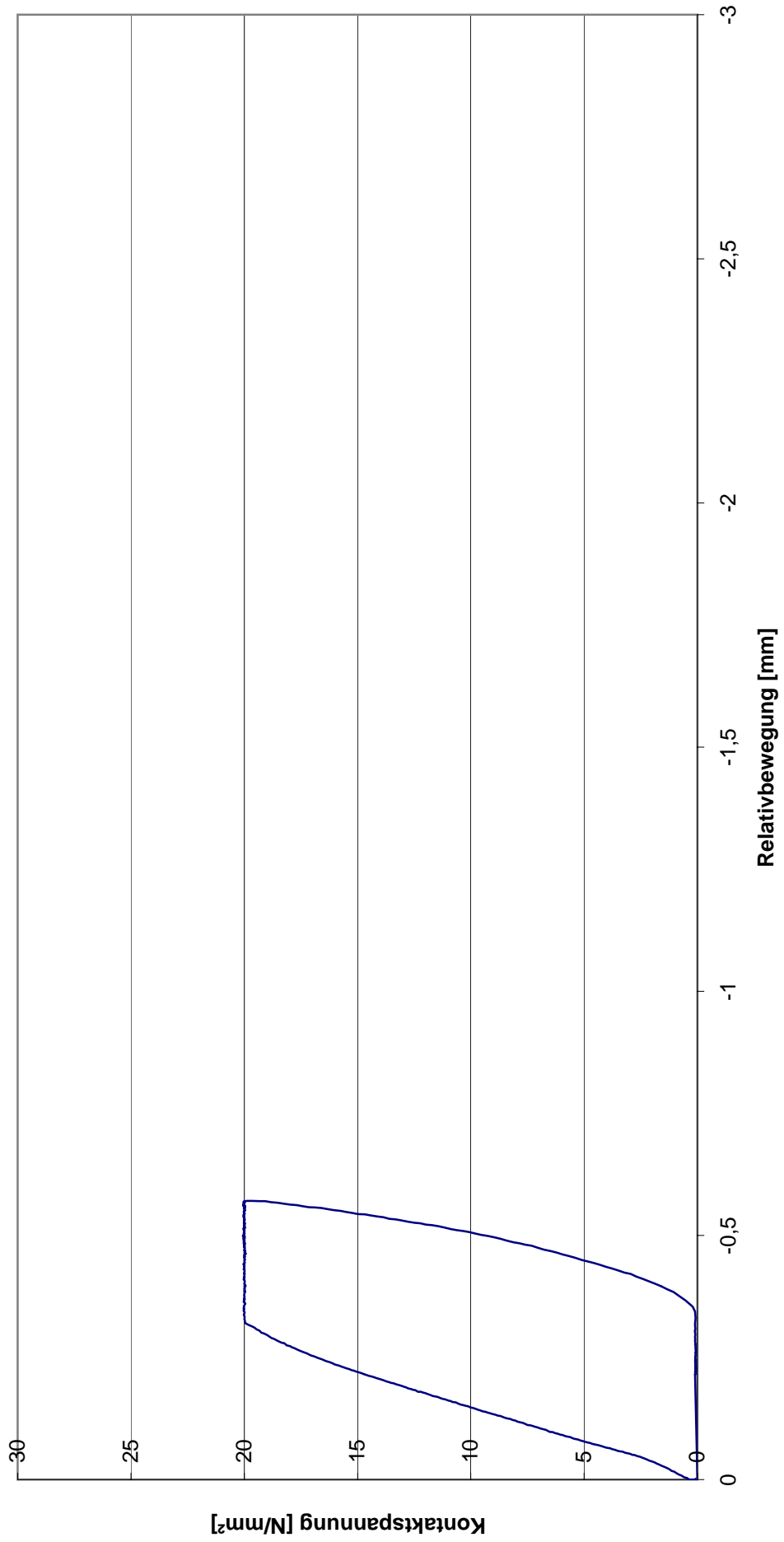
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 10,0 N/mm² (1 Minute Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)**



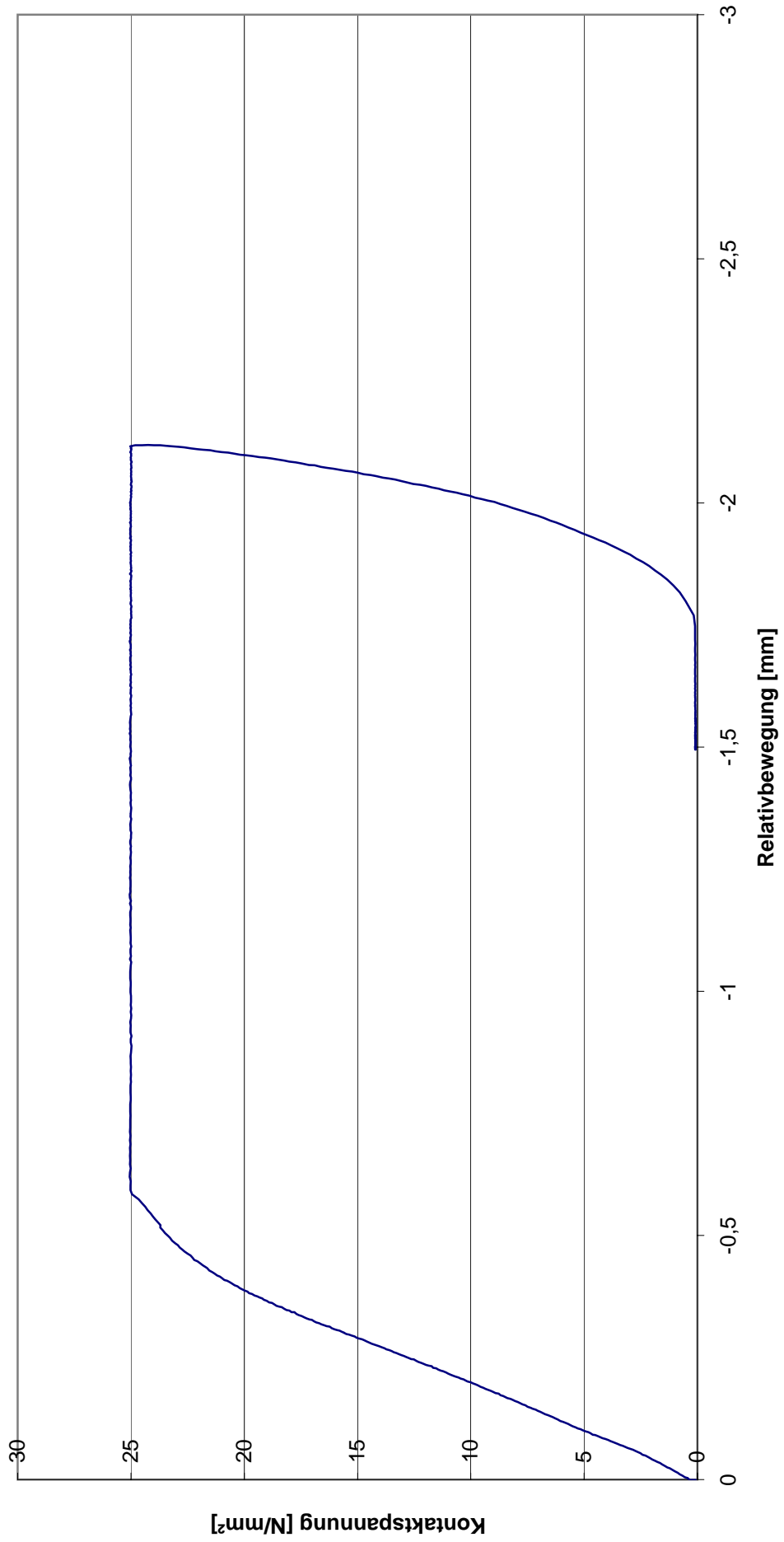
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 15 N/mm² (1 Minute Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)**



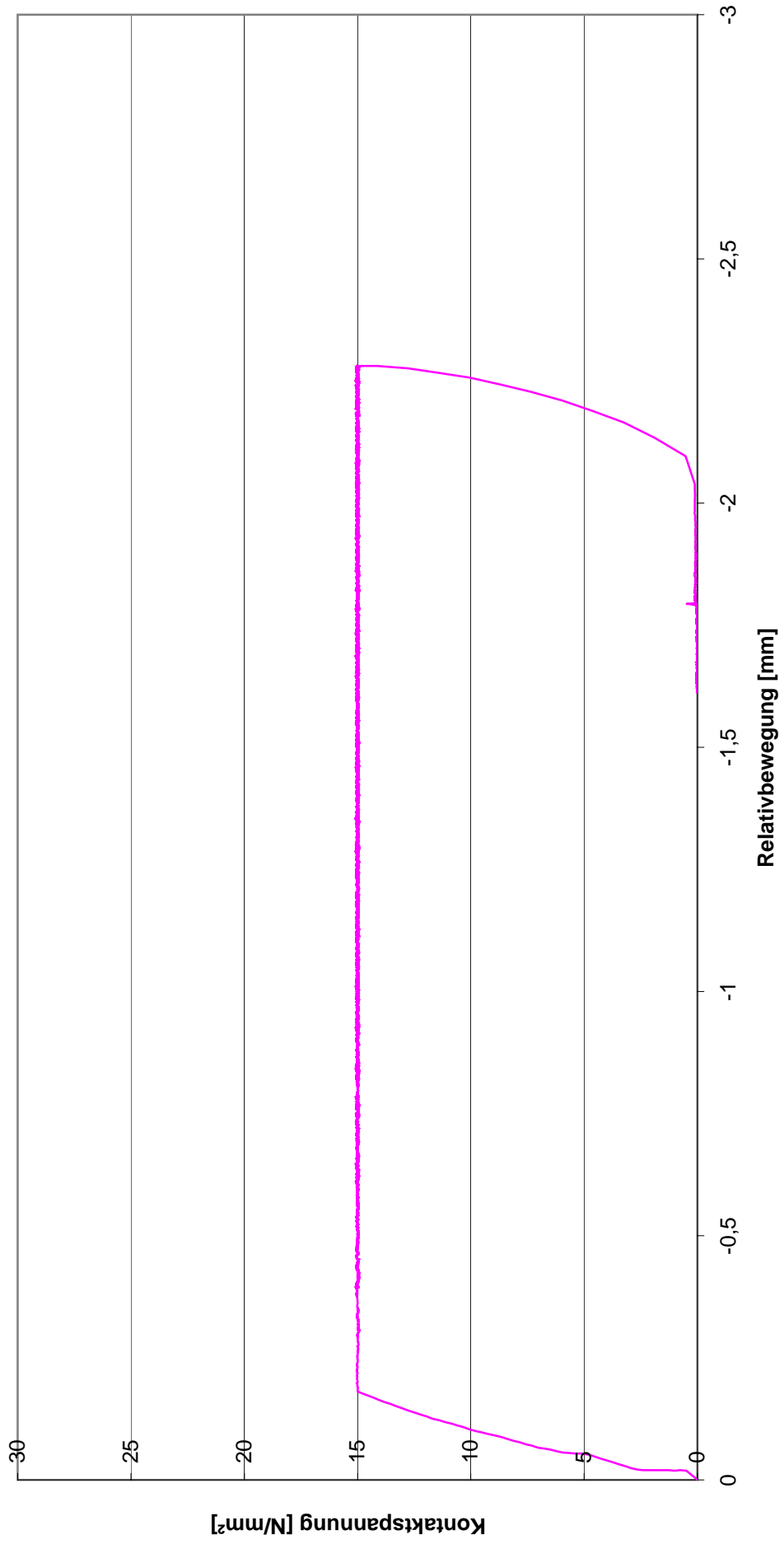
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 20 N/mm² (1 Minute Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)**



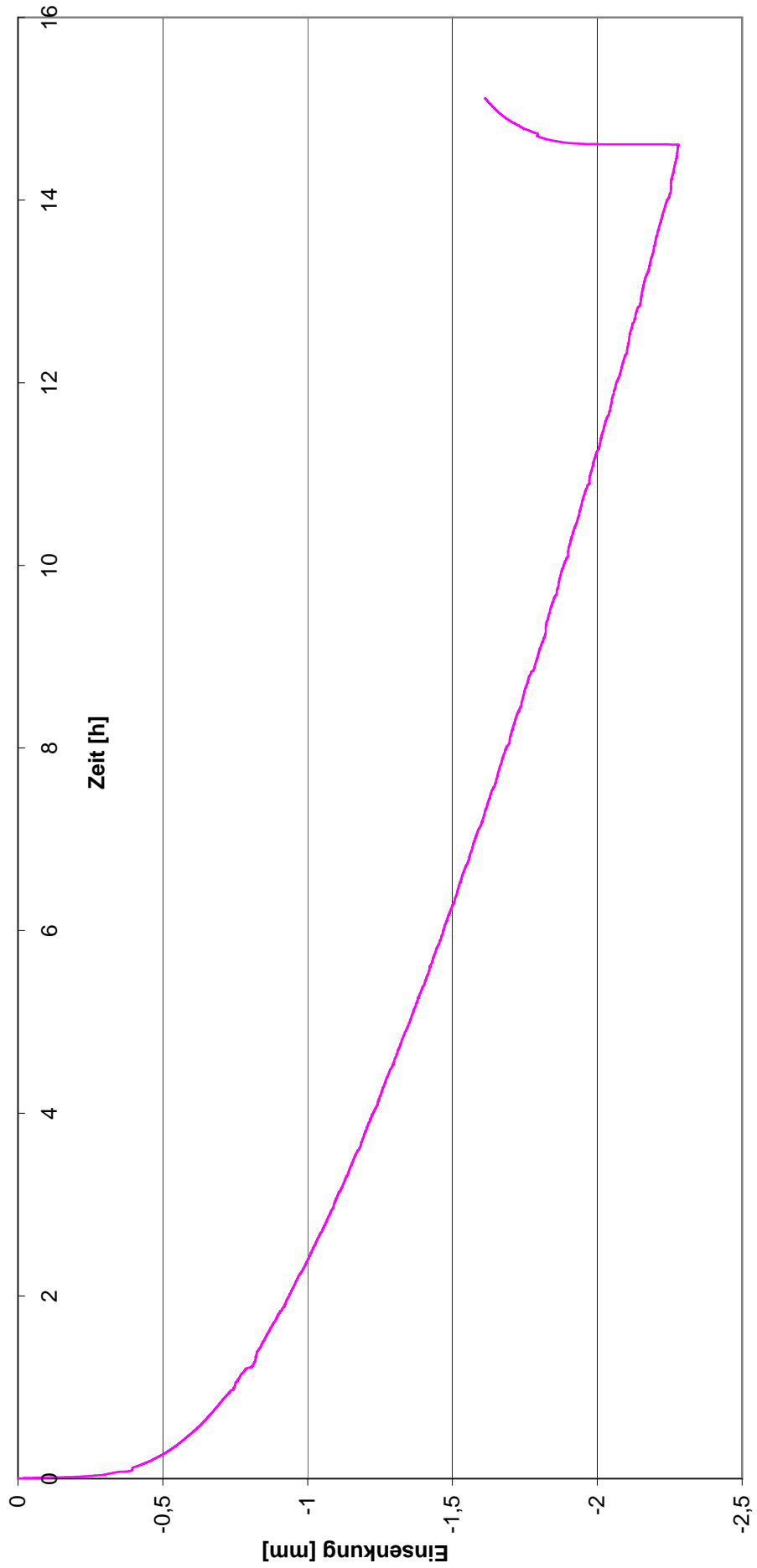
**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 25 N/mm² (1 Minute Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)**



Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 15 N/mm² (15 Stunden Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)



**Zweischichtiger Oberbau
Belastung bis 15 N/mm² (15 Stunden Halten)
Kontaktfläche "Stapler" (30 x 120 mm²)**



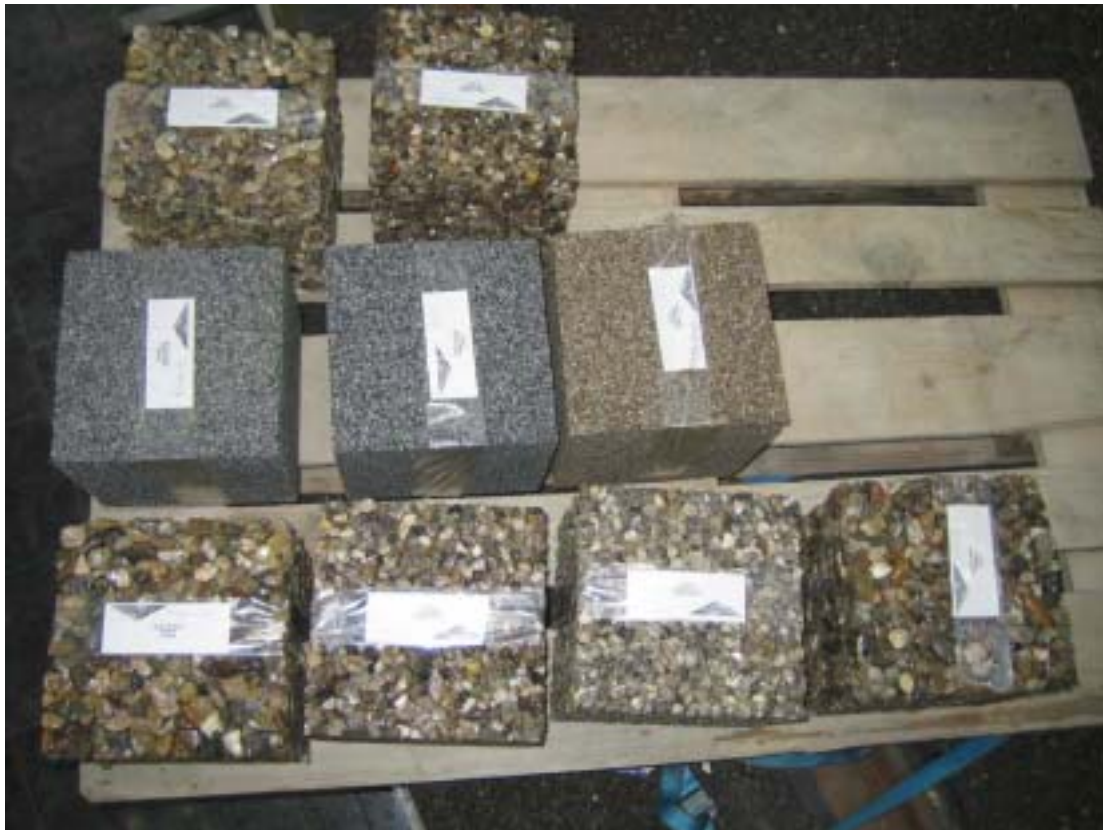


Bild 1: Würfelproben 20 x 20 cm der drei Deckschicht- und sechs Tragschichtvarianten kunststoffgebundener Gesteinskörnungsgemische.



Bild 2: Bohrkern der mit den Vorversuchen gewählten Deckschicht DS 1/3 PU und Tragschicht TS 8/11 EP.



Bild 3: Probewürfel (Kantenlänge: 150 mm) bei der Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit.



Bild 4: Bruchkegel des Probewürfels. Die Bruchfläche zeigt hauptsächlich Gesteinsbrüche. Die Form beschreibt ein „zerbersten“ der Probe.



Bild 5: Form des Bruchkörpers der Deckschichtprobewürfel (Kantenlänge 88 mm).



Bild 6: Der Bruchkegel zeigt „im Kern“ zermalmte Gesteinskörnung. Die feine Körnung 1/3mm erlaubt keine präzise Aussage zur Art des Bruchs.



Bild 7: Versuchsaufbau des einaxialen Zugversuchs an Deckschichtbalken.



Bild 8: Zugbruch des Balkens nahe bei der Einbindung zur Versuchseinrichtung. Infolge der Querschnittsänderung wirken hier zusätzliche Spannungen. Die ermittelte Zugfestigkeit liegt somit „auf der sicheren Seite“.



Bild 9: Bruchfläche eines Probekbalkens der Deckschicht nach dem Zugversuch.



Bild 10: Aufbau des Biegeversuchs mit 2-Punkt-Lasteintragung.



Bild 11: Bruchfläche des Biegebalkens mit hauptsächlich Gesteinsbrüchen.



Bild 12: Probekörper mit applizierten Dehnungsmessstreifen nach Ermittlung der Biegezugfestigkeit.



Bild 13: Versuchsaufbau im Dauerstandversuch an zweischichtigem Oberbau. Die kleine Lasteintragungsfläche (20 x 60 mm) aus Hartkunststoff simuliert die Beanspruchung durch „Ameise“ mit hohen Kontaktspannungen.



Bild 14: Lastfläche (30 x 120 mm) mit Gummiunterlage zur Simulation der Belastung durch Staplerbereifung.



Bild 15: Dauerstandversuch mit zusätzlicher Temperaturbelastung.



Bild 16: Oberfläche des Probekörpers mit minimalen Deformationen (0,1 mm) nach Dauerstandversuch mit Temperaturbelastung.

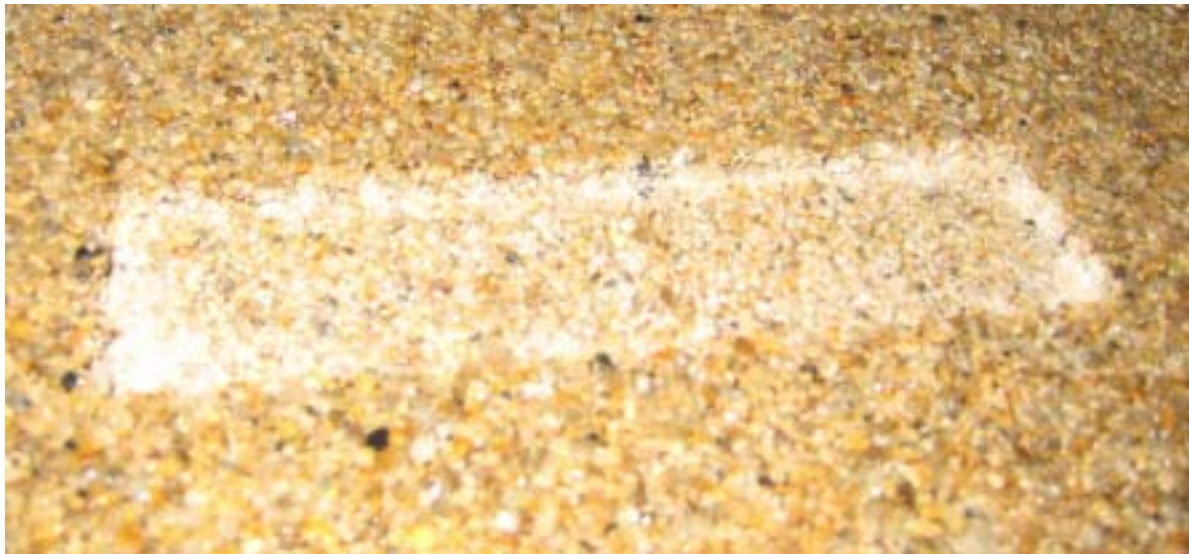


Bild 17: Kontinuierliche Laststeigerung bis zum Versagen der Deckschicht. Die Deformationsmulde ist ein scharfkantiges „Negativ“ der Lastfläche ohne augenscheinliche Beeinflussung der angrenzenden Oberfläche.