

## **UNTERSUCHUNGSBERICHT**

### **Anheben von erdgegründeten Stahlbetonbauteilen mittels PUR-Hartschaum-Injektionen**

Bericht über die Durchführung des Feldversuches  
am 7.01.1998 in Braunschweig

Die Untersuchung wurde im Auftrag  
der Firma FloorLift aus Lelystad/Niederlande durchgeführt.

Bericht erstattet von

*Dr.-Ing. M. Teutsch*

*Dr.-Ing. K. Herrmann*

*Dipl.-Ing. O. Hemmy*

Der Bericht umfaßt 33 Seiten.

Dieser Untersuchungsbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden.

Eine Veröffentlichung - auch auszugsweise - bedarf in jedem  
Einzelfall der schriftlichen Genehmigung.

Es existiert zusätzlich ein zusammenfassender Kurzbericht

**Inhaltsverzeichnis**

1. Einleitung	2-3
2. Versuchsprogramm	3
3. Feldversuch	4-16
3.1 Beschreibung der anzuhebenden Baukörper	4-5
3.2 Zielsetzung	5-6
3.3 Versuchsdurchführung	6-13
3.3.1 Versuchskörper 1	6-9
3.3.1.1 Vorbereitung	
3.3.1.2 Injektion	
3.3.1.3 Höhenlage des Versuchskörpers nach der Injektion	
3.3.2 Versuchskörper 2	9-11
3.3.2.1 Vorbereitung	
3.3.2.2 Injektion	
3.3.2.3 Höhenlage des Versuchskörpers nach der Injektion	
3.3.3 Versuchskörper 3	12-13
3.3.3.1 Vorbereitung	
3.3.3.2 Injektion	
3.3.3.3 Höhenlage des Versuchskörpers nach der Injektion	
3.4 Bohrkernentnahme	13-15
3.4.1 Allgemeines	
3.4.2 Versuchskörper 1	
3.4.3 Versuchskörper 2	
3.4.4 Versuchskörper 3	
3.4.5 Zusammenfassung	
3.5 Pressungen unterhalb der Versuchskörper	16
4. Charakterisierung des eingesetzten Polyurethan-Hartschaumsystems	16-24
4.1 Untersuchungen an den Flüssigkomponenten	16-18
4.1.1 Dichte	
4.1.2 Isocyanatgehalt	
4.1.3 Hydroxylzahl	
4.1.4 Infrarotspektroskopische Untersuchung	
4.2 Untersuchungen am erhärteten Stoff	18-24
4.2.1 Druckfestigkeit	
4.2.2 Maßänderung bei Wärme- und Kältezufuhr	
5. Zusammenfassung	24-25
6. Literaturverzeichnis	25

## 1. Einleitung

Die Firma FloorLift aus Lelystad in den Niederlanden hebt Bodenplatten aus Beton, die sich unplanmäßig abgesenkt haben, mit Hilfe von Polyurethan (PUR)-Hartschaum an. Die Hauptanwendungsgebiete liegen in der Sanierung von Industriefußböden sowie im Bereich von abgesackten Bodenplatten und Fundamenten und im Straßen- und Autobahnbau. Das Verfahren nutzt die Eigenschaften der eingesetzten Grundmaterialien Polyol und MDI-Isocyanat bei definierter Vermischung. Es kommt zu einer starken chemischen Reaktion (Polymerisation), bei der neben einer Wärmeentwicklung eine starke Volumenvergrößerung des miteinander reagierenden noch nicht erhärteten Materials zu beobachten ist. Das Expansionsvermögen (bis zu dreißigfache Vergrößerung des Volumens der Ausgangsmaterialien bzw. bis zu 40 to./m<sup>2</sup> entstehender Expansionsdruck laut Angaben des Herstellers [1,2]) der reagierenden Grundmaterialien macht sich das Verfahren zunutze, um abgesackte Bodenplatten auf ein gewünschtes Niveau anzuheben oder auch Hohlräume zu füllen, um eine Stabilisierung von gefährdeten Baukörpern oder Bodenplatten zu erreichen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren erfolgt die Anhebung bei dieser Methode unabhängig vom Pumpendruck.

Alle erforderlichen Gerätschaften und Materialien zur Durchführung von Anhebungen werden von der Firma FloorLift auf einem Lastkraftwagen (Bild 1) mitgeführt, d.h. es handelt sich hierbei um ein autarkes Fahrzeug, das einen eigenen Stromgenerator sowie alle erforderlichen Pumpvorrichtungen und Schläuche (bis 70 m Länge) zur Förderung und Injektion der Grundmaterialien besitzt. Die Ausgangsstoffe Polyol und MDI-Isocyanat werden ebenfalls auf dem Lkw in 1000-Liter-Containern transportiert. In zwei voneinander getrennten Schläuchen werden die beiden Grundmaterialien mit einem Druck von ca. 75 bar vom Lkw zum Einsatzort gepumpt.



Bild 1: Arbeitsfahrzeug der Fa. FloorLift als mobile Einsatzstation

Polyol und MDI-Isocyanat reagieren erst in einer Mischkammer innerhalb der Injektionspistole am Schlauchende. Unmittelbar danach wird das Gemisch in flüssiger Form zwischen Plattenunterseite und Baugrund gepumpt. Dort beginnt das Material zu Schäumen und breitet sich aufgrund des vorhandenen Platzmangels in die benachbarten Hohlräume aus. Nachdem das Gemisch am Rand zu Erstarren beginnt, ist die seitliche Ausdehnung behindert. Das schäumende Material im inneren Bereich des Injektionsgutes beginnt nun, sich in vertikaler Richtung auszudehnen, verdichtet dabei zunächst den anstehenden Untergrund solange, bis die Last der Bodenplatte durch die sich steigenden Expansionskräfte überwunden wird und der Baukörper langsam in die gewünschte Richtung nach oben gehoben wird. Die Erhärtung des Gemisches zu PUR-Hartschaum dauert ca. 30 Sekunden. Unmittelbar vor dem Erreichen der vorgesehenen Höhe wird die Injektion unterbrochen, da sich danach noch Anhebungen bis 3 mm ergeben können [2]. Dies wiederum ist abhängig von der anzuhebenden Last.

Der Arbeitsablauf für das Verfahren sieht folgendermaßen aus:

1. Pumpschläuche zum Einsatzort transportieren
2. Einmessen des anzuhebenden Bauteils mit einem Laser-Nivelliergerät
3. Durchbohren der Bodenplatte mit einem Bohrdurchmesser von 12 mm



4. Einsetzen eines Kupferrohres als Injektionsstutzen
5. Aufsetzen der Injektionspistole auf den Stutzen
6. Vermischung der 2 Grundkomponenten in der Injektionspistole
7. Injektion des flüssigen Gemisches unter die Bodenplatte in zeitlich kurzen Abständen bei ständiger Höhenkontrolle der Platte
8. Wiederholen des Vorganges aus 7.) bis gewünschte Höhenlage erreicht ist (ggf. können bestehende Bohrlöcher mehrmals verwendet werden, indem sie aufgebohrt werden)
9. Erneutes Einmessen der Bodenplatte
10. Entfernen der Injektionsrohre
11. (in Sonderfällen Kontrolle der Ausfüllung der Hohlräume durch Bohrkernentnahmen und Sondierungen).

## 2. Versuchsprogramm

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig wurde ein Versuchsprogramm ausgearbeitet, das die Eignung des Verfahrens im praktischen Gebrauch belegen sollte. Hierzu wurden drei unterschiedliche Bauteiltypen (Behälterausschnitt, Platte, Wand-Bodenplatten-Konstruktion) ausgewählt. Die Versuchskörper befinden sich auf dem Freigelände des iBMB (Bild 2).



Bild 2: Versuchsfeld auf dem Freigelände des iBMB der TU Braunschweig

Die Aufgabe für die Firma FloorLift bestand darin, ein vom iBMB vorgegebenes Anhebeniveau unter Einhaltung einer vorher festgelegten maximal zulässigen Maßabweichung zu erreichen. Diese Feldversuche sollten belegen, daß das von der Firma FloorLift angebotene Verfahren imstande ist, mit einer für den Bausektor hohen Genauigkeit abgesenkte Bauteile auf das Ursprungsniveau wieder anzuheben und damit zu sanieren. Zusätzlich sollten folgende Charakteristika des Verfahrens überprüft werden:

- Transport des Füllgutes
- Mischung der Grundkomponenten und deren Reaktion
- Einbringung der reagierenden Materialien unter den Baukörper
- Untersuchung des erhärteten PUR-Hartschaums anhand von Bohrkernen durch Labor-Untersuchungen vom iBMB
- Sichtkontrolle der Bohrkern auf größere Fehlstellen in der PUR-Schicht
- Zeitaufwand und mögliche Komplikationen.

### 3. Feldversuch

#### 3.1 Beschreibung der anzuhebenden Baukörper

Als Versuchskörper dienten drei Bauteile von abgeschlossenen Versuchsvorhaben des iBMB. Diese befinden sich im Freien auf dem iBMB-Betriebsgelände. Als Versuchskörper 1 wurde die im Bild 3 dargestellte Bodenplatte mit daraufstehender im Grundriß L-förmig angeordneter Wandkonstruktion und den Abmessungen 2,5 x 6,0 x 1,7 m ausgewählt.



Bild 3: Versuchskörper 1 (Behälterausschnitt)

Die Wand und Bodenplatte sind zentrisch vorgespannt und durch eine bituminöse Gleitschicht von einem 50 cm starken HGT (hydraulisch gebundene Tragschicht)-Fundament getrennt. Die Konstruktion stellt ein Viertel eines Auffangbehälters dar.

Der Versuchskörper 2 besteht aus einer Bodenplatte aus Stahlfaserbeton und den Abmessungen 1,0 x 50,5 x 0,15 m. Die Bodenplatte ist auf einer PE-Folie und 15 cm locker gelagertem Sand mit anschließender Frostschutzschicht gebettet (Bild 4). In dem anzuhebenden Bereich (20 m) ist die Platte mit einer zentrischen Betonstahlbewehrung versehen.



Bild 4: Versuchskörper 2 (Bodenplatten, im Vordergrund links)

Als dritten und letzten Versuchskörper wurde die im Bild 5 dargestellte Winkelkonstruktion ausgewählt. Sie besteht aus einer 1,50 m breiten Bodenplatte mit im Grundriß mittig angeordneter aufgehender Wand mit den Abmessungen 1,5 x 19,5 x 1,70 m und ist auf einer hydraulisch gebundenen Tragschicht gebettet, auf



der noch zwei ähnliche Versuchskörper gegründet sind (Bild 3). Der Versuchskörper ist im Wand- und Bodenplattenbereich zentrisch vorgespannt.

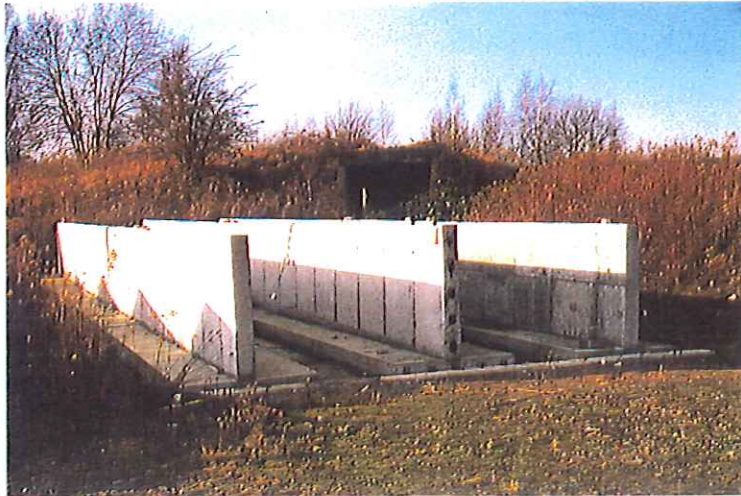


Bild 5: Versuchskörper 3 (Wand-Bodenplatten-Konstruktion, mittleres Bauteil)

### 3.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung für Versuchskörper 1 bestand darin, den gesamten Körper, ausgehend von einem zuvor einnivellierten Meßpunkt auf der Bodenplatte um 50 mm anzuheben (Bild 6), so daß alle vier Meßpunkte die gleiche Höhenlage im Endzustand besitzen. Der Versuchskörper sollte nicht nur um 50 mm angehoben werden, sondern auch dessen eventuelle Schiefelage im Nullzustand beseitigt werden.

Für Versuchskörper 2 hingegen war gefordert, daß ein 20 m langes Teilstück dieser insgesamt 50 m langen Fahrbahn in der Mitte um 50 mm angehoben werden sollte. Der geforderte Gradient ist im Bild 6 dargestellt. Im Gegensatz zu Versuchskörper 1 sollte hier die mögliche Schiefelage der Bodenplatte aus dem Ursprungszustand beibehalten werden.

Der Versuchskörper 3 sollte im Endbereich punktuell um 50 mm angehoben werden. Die angestrebte Position der Konstruktion nach Abschluß der Anhebung ist im Bild 6 zu sehen. Für diesen Versuch sollte der Gradientenverlauf zwischen Anfangs- und Endpunkt nicht verfolgt bzw. ein geradliniger Verlauf zwischen diesen Punkten nicht erzielt werden.

Für alle drei Versuchskörper wurde vom iBMB eine Maßabweichung vom geforderten Anhebeniveau von  $\pm 5$  mm als Zielvorgabe gemacht. Das eingesetzte Nivelliergerät zur Kontrolle der Anhebehöhen arbeitete mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm.

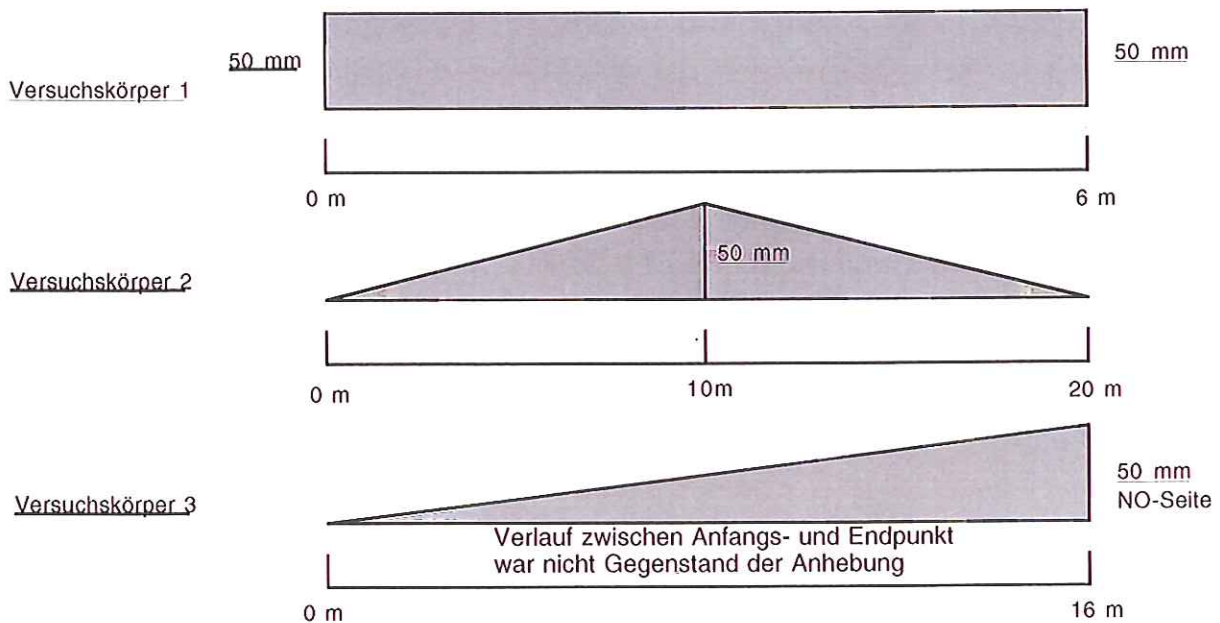


Bild 6: Vorgabe des Anhebeprofils der Versuchskörper durch das iBMB

### 3.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche fanden am 7. Januar 1998 auf dem Gelände des iBMB statt. Bei regnerischem Wetter und Temperaturen von ca. 6° C führten zwei Mitarbeiter der Firma FloorLift die Anhebungen der Betonkörper durch. Ergänzend zu den Kontrollmessungen der Firma FloorLift über das Nivelliergerät wurde vom iBMB eine einfache Kontrolle über Holzpfähle an ausgewählten Punkten durchgeführt. Vor Versuchsbeginn wurde die relative Lage zwischen Holzpfahl und Versuchskörper entweder am Pfahl oder am Betonkörper festgehalten (Bild 7 und Bild 19).

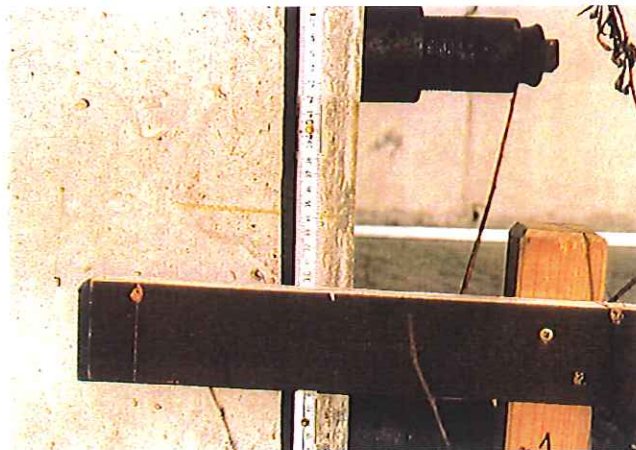


Bild 7: Kontrollpfahl 1 am Versuchskörper 1

#### 3.3.1 Versuchskörper 1

##### 3.3.1.1 Vorbereitung

Vor Beginn der Injektion wurde die Höhe des Versuchskörpers durch Nivellement bestimmt (Bild 8).





Bild 8: Einnivellieren des Versuchskörpers 1 vor Injektionsbeginn

Mit Hilfe eines Laser-Nivelliergerätes wurden vier ausgewählte Eckpunkte der Platte (Bild 14) eingemessen. Der Meßpunkt 3 wurde für die Durchführung des Versuches als Referenzpunkt gewählt. Nach der Einmessung der Punkte wurde die Injektion vorbereitet: Mit einer Bohrmaschine wurde ein ca. 70 cm tiefes Loch mit einem Durchmesser von 12 mm durch die Bodenplatte gebohrt (Bild 9). Anschließend wurde ein Kupferrohr als Injektionsstutzen eingebracht (Bild 10).



Bild 9: Durchbohren der Bodenplatte von Versuchskörper 1



Bild 10: Kupferrohr als Injektionsstutzen



### 3.3.1.2 Injektion

Ausgehend vom Referenzpunkt Meßpunkt 3 sollte die gesamte Platte um ein 50 mm höherliegendes Niveau gleichmäßig angehoben werden. Die Injektion erfolgte mit Hilfe einer Injektionspistole (Bild 11), die auf den Injektionsstutzen aufgesetzt wurde. In den Zuführungsschläuchen herrschte während der Injektion ein Innendruck von ca. 75 bar und im Bereich unterhalb der Bodenplatte von ca. 8 bar.



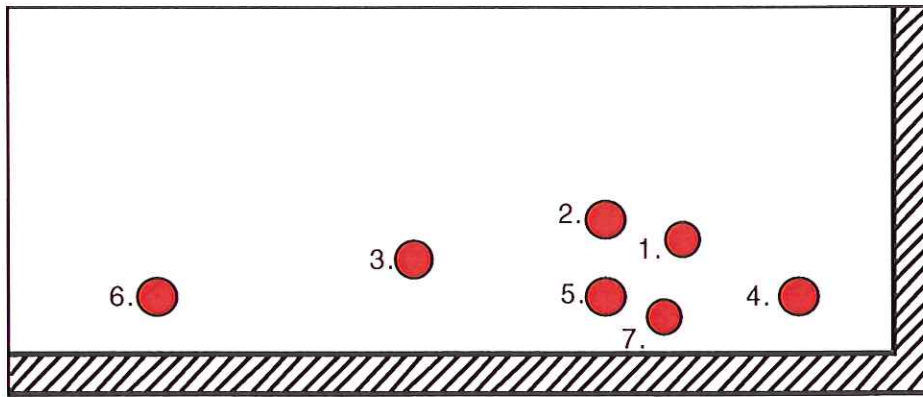
Bild 11: Injektionspistole mit Zuführungsschlauch

Die Injizierung selbst wurde von einem Mitarbeiter ausgeführt. Begleitend zum Vorgang des Injizierens wurde ständig die Höhenlage der Bodenplatte kontrolliert. Nach etwa 10 Minuten war eine Anhebung der Bodenplatte von ca. 8 mm erreicht. Zeitgleich trat im Seitenbereich der längeren Wand (Nordost-Seite) PUR-Hartschaum hervor (Bild 12).



Bild 12: Seitliches Ausweichen von PUR - Hartschaum bei Versuchskörper 1

Die Injektion wurde daraufhin für ca. eine Minute unterbrochen, um ein Aushärten des 2-Komponenten-Hartschaumes zu ermöglichen und, um dann gegen den nun erhärteten Hartschaum verpressen zu können. Dieser Vorgang wiederholte sich sechsmal, so daß insgesamt sieben Bohrungen vorgenommen werden mußten. Es konnten dabei schon injizierte Löcher zu Mehrfachinjektionen herangezogen werden, indem die durch den erhärteten PUR-Hartschaum verschlossenen Löcher wieder aufgebohrt wurden, um erneut injizieren zu können. Die Lage der Injektionspunkte und die zeitliche Abfolge der Bohrungen (ohne Berücksichtigung der Mehrfachbohrungen) sind im Bild 13 dargestellt.



Nord-Ost-Seite

Bild 13: Draufsicht des Versuchskörpers 1 mit der Angabe der Injektionspunkte (Nummerierung entspricht zeitlicher Reihenfolge)

Bei der Injektion im 5. Loch kam es erneut zum Austritt von PUR-Hartschaum auf der gleichen Seite wie beim 1. Loch, jedoch etwas südlich davon. Das gleiche wiederholte sich ein drittes Mal als das 6. Loch injiziert wurde. Zu diesem Zeitpunkt war der Versuchskörper am Meßpunkt 2 etwa um 65 mm angehoben worden. Nach ca. zwei Stunden war der gesamte Anhebevorgang abgeschlossen.

### 3.3.1.3 Höhenlage des Versuchskörpers nach der Injektion

Es wurden alle vier Meßpunkte erneut über das Laser-Nivelliergerät eingemessen. Die Ergebnisse sind im Bild 14 dargestellt. Die maximale Abweichung von der Sollage betrug 3 mm (Meßpunkte 3 und 4).

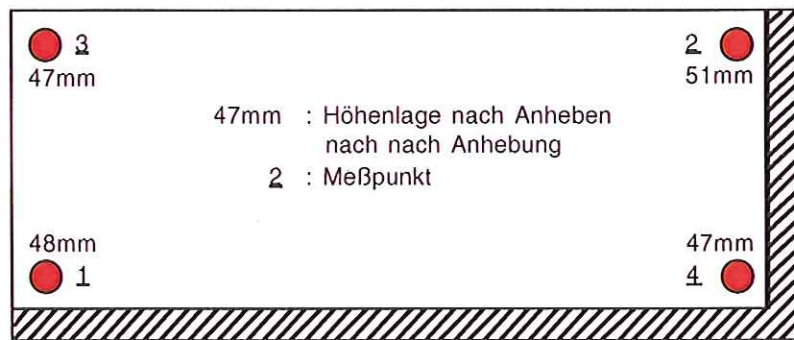


Bild 14: Höhenlage von Versuchskörper 1 nach der Anhebung in den Meßpunkten

### 3.3.2. Versuchskörper 2

#### 3.3.2.1 Vorbereitung

Zur einfachen Höhenkontrolle wurden entlang des freien Randes der Versuchsplatte sechs Meßstellen in Form von Holzpfählen in 5 m-Abständen angeordnet (Bild 15 und 16).



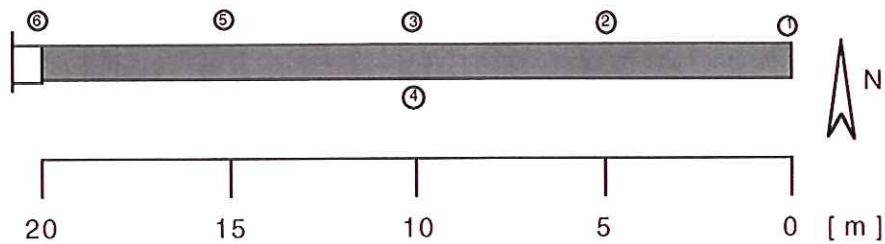


Bild 15: Anordnung der Kontrollpfähle von Versuchskörper 2



Westen

Bild 16: Anordnung der Kontrollpfähle bei Versuchskörper 2

Pfahlköpfe durch das Nivelliergerät eingemessen. Als Referenzpunkt diente ein Punkt auf der vorgelagerten von der Bodenplatte abgetrennten Auflagerbank. Die Höhenlage der Bodenplatte vor der Anhebung wurde in Plattenmitte in 5 m-Abständen einnivelliert. Die Arbeitsvorbereitung erfolgte analog zu derjenigen bei Versuchskörper 1. Die erste Bohrung wurde in der Achse 10 m vorgenommen, an der Stelle mit der geplanten höchsten Anhebung von 50 mm. Die Bohrlänge betrug etwa 15 cm (Plattendicke). Die relative Lage der Holzpfähle zur Bodenplatte wurde an den Pfählen markiert. Zusätzlich wurden die

### 3.3.2.2 Injektion

Durch die Injektion sollte das im Bild 6 dargestellte Niveau erreicht werden. Dabei sollte diesmal keine gleichmäßige Anhebung aller Plattenpunkte um ein konstantes Maß bezüglich eines vorher festgelegten Referenzpunktes vorgenommen werden, sondern die eventuell vorhandene ursprüngliche Schiefelage beibehalten werden. Jeder Punkt sollte nach Anhebung um ein Absolutmaß unabhängig von dem Niveau der übrigen Punkte angehoben worden sein. Da die Platte lediglich eine Breite von 1 m aufwies und die Seitenkanten freilagen, also nicht in das vorhandene Erdreich eingebunden waren, mußten die Injizierungen in zeitlich kurzen Intervallen durchgeführt werden. Andernfalls wäre ein erhebliches seitliches Ausweichen der noch nicht erhärteten gelartigen PUR-Hartschaummasse zu erwarten gewesen. Nach ca. zehn Minuten wurde das zweite Loch im Abstand von etwa 1,50 m zum ersten Loch gebohrt. Danach erfolgte eine dritte Bohrung ebenfalls im Abstand von 1,50 m vom ersten Bohrloch, allerdings in Richtung des anderen Plattenendes. Insgesamt waren elf Bohrlocher erforderlich, um die geforderte Anhebung zu erreichen. Die genaue Lage der Bohrlocher und eine der zeitlichen Abfolge entsprechende Nummerierung kann Bild 17 entnommen werden.

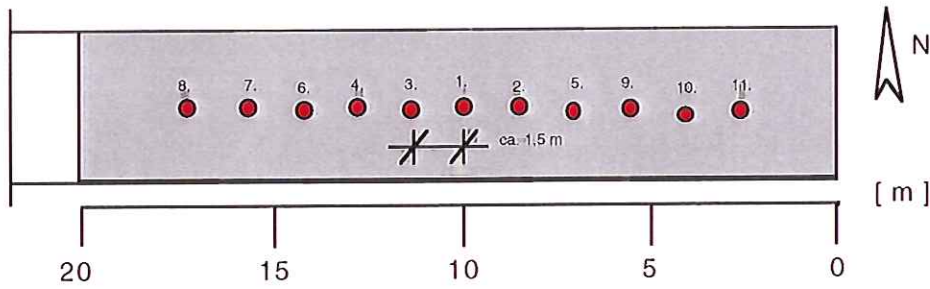


Bild 17: Draufsicht des Versuchskörpers 2 mit der Lage und zeitlichen Abfolge der Injektionspunkte

### 3.3.2.3 Höhenlage des Versuchskörpers 2 nach der Injektion

Nach Abschluß der Injektionsarbeiten wurden alle fünf Meßpunkte in Plattenmitte erneut über das Laser-Nivelliergerät eingemessen. Die Ergebnisse sind im Bild 18 dargestellt.

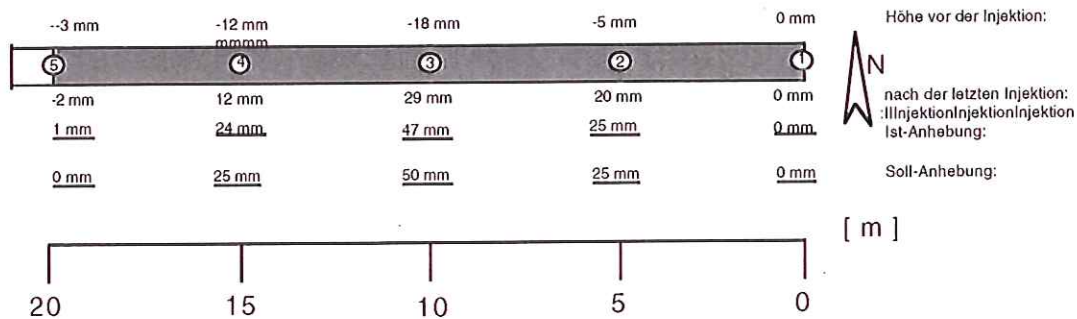


Bild 18: Höhenlage der Platte vor und nach der letzten Injektion

Als maximale Abweichung von der Sollanhebung ergaben sich 3 mm im Meßpunkt 3. Ein erneutes Einmessen der Holzpfähle zeigte, daß die Meßstelle 4 durch den Injizierungsvorgang angehoben war (um 27 mm) und somit der Kontrollmeßpunkt ausfiel. Alle übrigen Meßpfähle wiesen Differenzen von maximal 2 mm auf und konnten somit als Kontrollstelle verwendet werden. Die Veränderungen gegenüber dem Ausgangszustand sind im Bild 19 exemplarisch dargestellt. Bei der Pfahlstelle 2 konnte man eine Höhendifferenz von etwa 27 mm messen. Die Pfahlstelle 5 hingegen wies eine Höhendifferenz von 23 mm auf. Gefordert waren für diese Bereiche 25 mm. Im Bereich der maximalen Anhebung waren nach Abschluß der Arbeiten zwei durchgehende Querrisse zu beobachten.

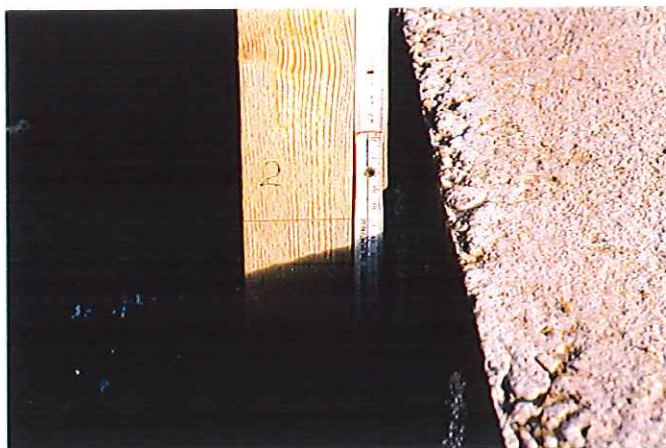


Bild 19: Pfahlstelle 2 nach dem Anheben von Versuchskörper 2



### 3.3.3. Versuchskörper 3

#### 3.3.3.1 Vorbereitung

Für den Versuchskörper 3 konnten keine anschaulichen Kontrollen mittels am Rand gesetzter Holzpfähle durchgeführt werden, da dieser großflächig auf einer ca. 40 cm starken HGT-Schicht gegründet war. Wie bei den vorangegangenen Versuchen wurde auch hier eine Nivellierung der Meßpunkte durchgeführt. Die Meßpunkte, die gemessene Höhe vor und nach der Injektion sowie die Sollhöhe sind im Bild 20 dargestellt.

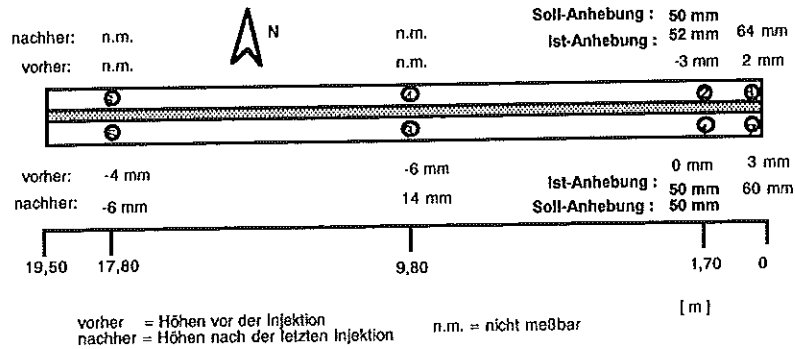


Bild 20: Meßstellen und Meßwerte von Versuchskörper 3 vor und nach dem Anheben (Draufsicht)

Die Meßpunkte 4 und 6 konnten aufgrund des Standortes des Nivelliers nicht eingemessen werden. Als Referenzpunkt bzw. Nullpunkt der Messung diente eine einbetonierte Stahlplatte in der vorgelagerten abgetrennten Stahlbetonwand. Der Endpunkt der Anhebung wurde um ca. 1,70 m vom Endpunkt des Versuchskörpers abgerückt, um ein Ausweichen des PUR-Hartschaumes zu der freien Vorderseite zu vermeiden. Die 1. Bohrung erfolgte im Bereich der Meßstelle 1. Es wurde dabei nicht durch die Platte des Versuchskörpers gebohrt, sondern 20 cm tiefer seitlich vom eigentlichen Bauteil ab Oberkante HGT (Bild 21). Dabei konnte die Bohrtiefe von 60 cm auf 40 cm vermindert werden.

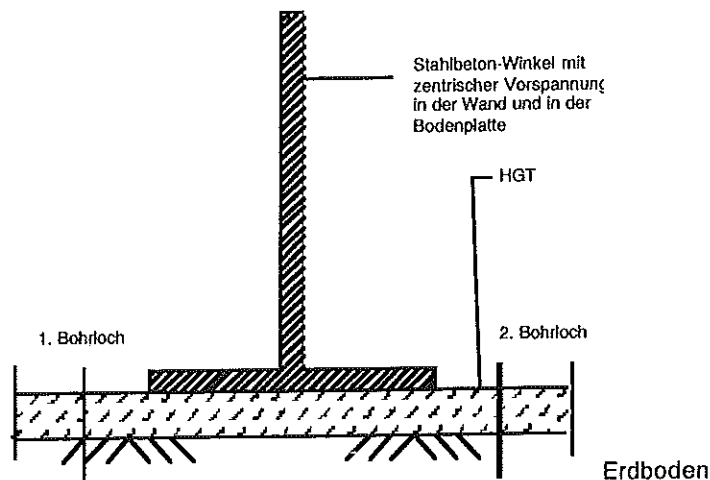


Bild 21: Querschnitt von Versuchskörper 3 mit Anordnung der Bohrlocher

#### 3.3.3.2 Injektion

Die Vorgabe lautete, den Versuchskörper 3 im Endbereich (Meßpunkte 1 und 2) punktuell um 50 mm gegenüber dem unabhängigen Referenzpunkt anzuheben ungeachtet einer möglichen ursprünglichen Schiefelage. Zunächst wurde im Bereich des Meßpunktes 1 eine Injektion vorgenommen. Danach wurde auf der gegenüberliegenden Seite im Bereich der Meßstelle 2 injiziert (Bild 22).



Bild 22: Injektion im Bereich des Meßpunktes 2 von Versuchskörper 3

Dieser Vorgang wiederholte sich dreimal. Im Verlauf der Injektionen kam es wie bei den übrigen Versuchskörpern zum seitlichen Austritt von PUR-Hartschaum. Ebenso konnte man im Lauf der Anhebung eine Rißbildung in der HGT feststellen (Bild 23). Nach ca. einer Stunde war die geforderte Höhe erreicht.



Bild 23: Rißbildung in der HGT von Versuchskörper 3

### 3.3.3.3 Höhenlage des Versuchskörpers 3 nach dem Anheben

Nach Abschluß der Maßnahme wurde erneut ein Einmessen der Meßpunkte vorgenommen. Die Meßwerte sind in Bild 20 enthalten. Die maßgebenden Punkte 1 und 2 waren um 50 bzw. 52 mm angehoben worden. Die maximale Abweichung von der Sollage betrug 2 mm.

## 3.4 Bohrkernentnahme

### 3.4.1 Allgemeines

Nach erfolgter Injektion war eine Untersuchung des Injektionsgutes hinsichtlich seiner Verteilung unter den Versuchskörpern sowie seiner Materialeigenschaften vorgesehen. Hierzu wurden Bohrkernentnahmen vorgenommen. Das Hauptaugenmerk lag auf der weiteren Untersuchung des PUR-Hartschaumes unterhalb der Versuchskörper (siehe Abschnitt 4). Für den Versuchskörper 1 wurden insgesamt vier Bohrkernentnahmen vorgenommen.



### 3.4.2 Versuchskörper 1

Die Bohrkern W1, W2 und W3 wurden aus einem Bereich in der Nähe der Längswand etwa mittig zwischen Meßpunkt 1 und 4 entnommen (Bild 24) und der Bohrkern W4 aus dem Bereich des Meßpunktes 3, um kontrollieren zu können, ob eine gleichmäßige Auflage des Probekörpers nach dessen Anhebung gegeben war. Das Bild 25 zeigt ein entnommenes Bohrprofil.



Bild 24: Bohrprofile W1 bis W4 des Versuchskörpers 1



Bild 25: Bohrprofil W1 des Versuchskörpers 1

Beim Bohrkern W4 fehlte der PUR-Hartschaum im Bohrprofil.

### 3.4.3 Versuchskörper 2

Am Versuchskörper 2 wurden insgesamt  $2 \times 3 = 6$  Bohrkern entnommen. Die Entnahme erfolgte in den Achsen 7 m und 10,30 m mit drei nebeneinanderliegenden Bohrkernen je Bereich (Bild 26). Das Bohrprofil für Bereich 10,30 m ist im Bild 27 dargestellt.



Bild 26: Bohrkernentnahme in Achse 10,30 m des Versuchskörpers 2



Bild 27: Bohrkern aus Achse 10,30 m von Versuchskörper 2

#### 3.4.4 Versuchskörper 3

Beim Versuchskörper 3 bereitete die Entnahme von Bohrkernen Probleme, da die HGT-Fundamentplatte infolge der starken Beanspruchung teilweise entfestigt wurde und somit ein Abrutschen des Bohrkernendes aus der Bohrkronen erfolgte. Aus diesem Grund wurde lediglich ein Bohrkern (R1) im Bereich des Meßpunktes 1 entnommen. Im Bild 28 ist das dazugehörige Bohrprofil dargestellt.



Bild 28: Bohrkern R1 von Versuchskörper 3

#### 3.4.5 Zusammenfassung

Die Bohrkernentnahmen an allen drei Versuchskörpern haben gezeigt, daß die Bauteile in den Bereichen, wo injiziert wurde, einen gleichmäßigen PUR-Hartschaumaufbau aufweisen. Das Einbringen des PUR-Materials unter die Bodenplatten der Versuchskörper hat somit funktioniert. Die Tatsache, daß beim Bohrkern W4 des Versuchskörpers 1 kein Injektionsmaterial vorhanden war, kann einerseits ein Indiz für einen möglichen noch verbliebenen Hohlraum sein, andererseits wäre es auch denkbar, daß das expandierende Injektionsmaterial zu Erdbodenumlagerungen in diesem Bereich geführt hat und somit der Baukörper doch vollflächig auflag. Dies ließ sich zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht abgesichert kontrollieren.



### 3.5 Pressungen unterhalb der Versuchskörper

Die Kennwerte der mit Hilfe der Bohrkern entnommenen PUR-Materialien werden im 2. Versuchsabschnitt ermittelt. Hierzu ist eine Berechnung der vorhandenen Pressung im Bereich unterhalb der Bodenplatten als Einflußparameter notwendig. Für die Berechnung wird eine vollflächige Bettung durch PUR-Hartschaum angenommen (gültig nur für Versuchskörper 1 und 2).

Versuchskörper 1 :	ca 20 kN/m <sup>2</sup> im Mittel
	ca. 50 kN/m <sup>2</sup> im Bereich der aufgehenden Wand
Versuchskörper 2 :	ca 5 kN/m <sup>2</sup> im Mittel
Versuchskörper 3 :	ca. 400 kN/m <sup>2</sup> im Bereich der aufgehenden Wand

### 4. Charakterisierung des eingesetzten Polyurethan-Hartschaumsystems

Bei dem im Rahmen des Feldversuchs eingesetzten Polyurethan- Hartschaumsystem mit der Produktbezeichnung „RESIFOAM AL 643/10“ handelt es sich um ein zweikomponentiges, rein wassergetriebenes Polyurethansystem, das durch die chemische Reaktion der flüssigen Komponenten auf Basis von Polyol (Komponentenbezeichnung: RESINOL AL 643) und MDI-Isocyanat (Komponentenbezeichnung: URESTYL 10) entsteht. Die Komponenten werden wegen der hohen Reaktivität maschinell mit einer zweikomponenten Misch- und Dosieranlage mit nachstehenden Mischungsverhältnissen verarbeitet:

	RESINOL AL 643	URESTYL 10
Volumenteile	100	136
Gewichtsteile	100	155

Tabelle 1: Mischungsverhältnisse des eingesetzten PUR-Systems

Zur Charakterisierung der im Feldversuch eingesetzten Materialien umfaßte der Auftrag sowohl Identitätsprüfungen an den Flüssigkomponenten als auch Untersuchungen am erhärteten System. Für die Versuchsdurchführung wurden während des Feldversuchs jeweils 10 Liter der o.g. Flüssigkomponenten aus auf dem LKW befindlichen 1000-Liter-Containern in Eimer abgefüllt. Darüber hinaus standen vor Ort injizierte und erhärtete PUR-Hartschaumproben aus entnommenen Bohrkernen (siehe Abschnitt 3.4) zur Verfügung.

#### 4.1 Untersuchungen an den Flüssigkomponenten

Im Rahmen der Identitätsprüfungen wurden an den entnommenen Flüssigkomponenten „RESINOL AL 643“ und „URESTYL 10“

- Dichte,
- Isocyanatgehalt (URESTYL 10) und
- Hydroxylzahl (RESINOL AL 643)

bestimmt und die Komponenten infrarotspektroskopisch untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind nachfolgend aufgeführt.

##### 4.1.1 Dichte

Die Dichte wurde gemäß DIN 51 757 [5], Verfahren B, an den Flüssigmustern der Einzelkomponenten ermittelt. Alle Messungen erfolgten als Doppelbestimmung im Normalklima DIN 50014-23/50-2 [9].

Probenmaterial	Einzelwerte [g/cm <sup>3</sup> ]	Mittelwert [g/cm <sup>3</sup> ]
RESINOL AL 643	1,0792 / 1,0794	1,079
URESTYL 10	1,2380 / 1,2383	1,238

Tabelle 2: Dichte der Einzelkomponenten

#### 4.1.2 Isocyanatgehalt

Die Bestimmung des Isocyanatgehaltes der Materialkomponente URESTYL 10 erfolgte gemäß DIN 53 185 [6].

Probenmaterial	Einzelwerte [% NCO]	Mittelwert [% NCO]
URESTYL 10	31,0 / 31,1 / 31,1	31,1

Tabelle 3: Isocyanatgehalt

#### 4.1.3 Hydroxylzahl

Die Bestimmung der Hydroxylzahl wurde an der Komponente RESINOL AL 643 gemäß DIN 53 240 durchgeführt .

Probenmaterial	Einzelwerte [mg KOH/g]	Mittelwert [mg KOH/g]
RESINOL AL 643	343 / 345 / 341	343

Tabelle 4: Hydroxylzahl

#### 4.1.4 Infrarotspektroskopische Untersuchung

Die beiden Materialien „RESINOL AL 643“ und „URESTYL 10“ sind jeweils ohne weitere Vorbehandlung auf 3 mm dicke ZnSe-Probenräger aufgebracht und anschließend spektroskopiert worden. Die Schichtdicke wurde jeweils so gewählt, daß die Anforderungen der DIN 51 451 [8] bezüglich der Extinktionsverhältnisse eingehalten werden.

Die Aufnahme der Spektren erfolgte auf einem Perkin-Elmer FTIR-Gerät vom Typ Spectrum Explorer 2000 im Wellenzahlbereich von 4000 cm<sup>-1</sup> bis 600 cm<sup>-1</sup>.



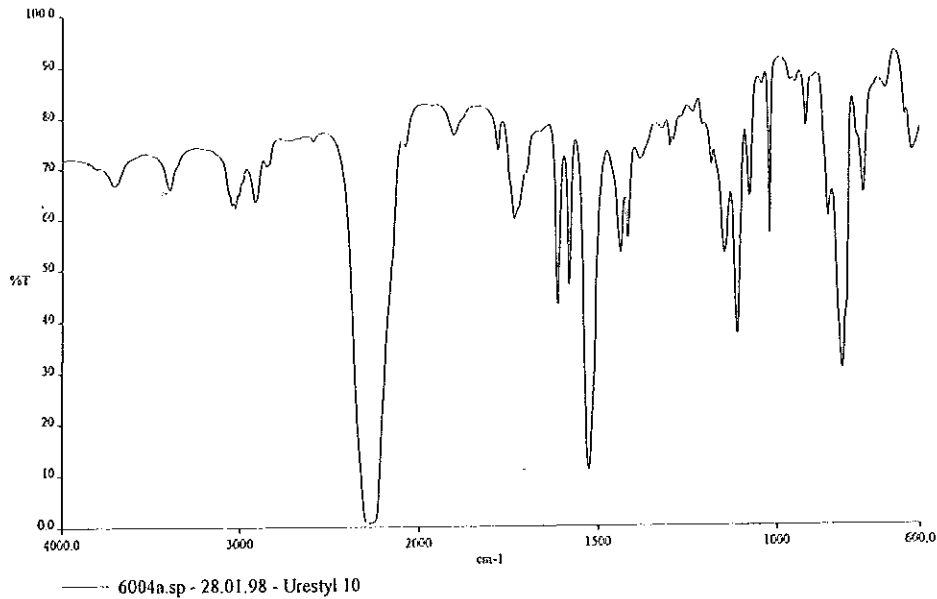


Bild 29: Infrarot-Spektrogramm der Komponente „URESTYL 10“

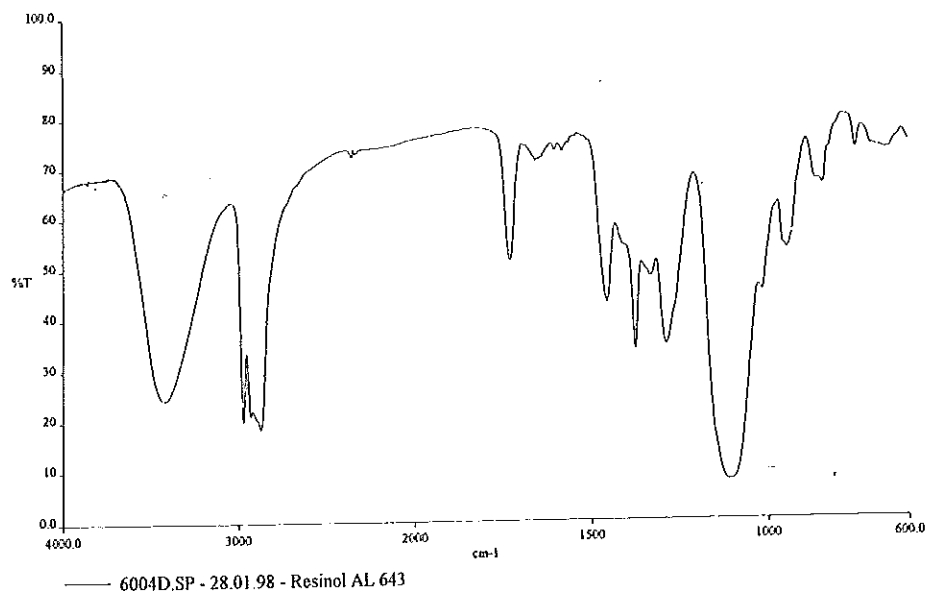


Bild 30: Infrarot-Spektrogramm der Komponente „RESINOL AL 643“

## 4.2 Untersuchungen am erhärteten Stoff

### 4.2.1 Druckfestigkeit

Zur Beurteilung der Festigkeits- und Formänderungseigenschaften des im Feldversuch injizierten und ausgehärteten PUR-Hartschaumes wurden Druckversuche gemäß DIN 53421 [4] durchgeführt.

Insgesamt standen für die Versuchsdurchführung 10 PUR-Proben der aus den Versuchskörpern 1 und 2 entnommenen Bohrkern von 80 mm Durchmesser zur Verfügung; davon 4 PUR-Proben aus Versuchskörper 1 mit Schaumhöhen von ca. 40 mm bis 70 mm und weitere 6 PUR-Proben aus Versuchskörper 2 mit Schaumhöhen zwischen 20 mm und 50 mm.

Während die aus dem Versuchskörper 2 entnommenen Proben offensichtlich wegen der zur Anhebung erforderlichen, vergleichsweise geringen Druckkräfte von ca. 5 kN/m<sup>2</sup> (siehe Abschnitt 3.5) nur andeutungsweise eine Materialschichtung bei einer recht gleichmäßig ausgebildeten Schaumstruktur erkennen ließen, zeigten die aus dem Versuchskörper 1 entnommenen Proben eine mit bloßem Auge erkennbare dichtere Schaumstruktur und eine Materialschichtung von bis zu 8 Schichten. Die sichtbaren Schichten sind auf die erhöhte, zur Anhebung des Versuchskörpers 1 erforderliche Druckkraft von ca. 20 bis 50 kN/m<sup>2</sup> und eine erhöhte Anzahl von Injektionsphasen zurückzuführen. Die unterschiedliche Dichte erforderte die gezielte Entnahme von kleineren Bohrkernen aus Bereichen mit augenscheinlich gleicher Dichte.

Insgesamt wurden für die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit des Hartschaums aus den PUR-Proben längs zur Bohrkernachse 18 zylindrische Prüfkörper mit einem Durchmesser von ebenfalls ca. 18 mm entnommen und anschließend derart zersägt, daß planparallele Zylinder mit einer Höhe von ca. 18 mm entstanden. Die so gewonnenen Proben lagerten vor der Prüfung 14 Tage im Normalklima DIN 50014-23/50-2 [9]. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1,8 mm/min. Nach Erreichen einer Gesamtverformung von 10 % wurde der Versuch abgebrochen.

Um den Einfluß der Temperatur auf das Festigkeits- und Formänderungsverhalten des PUR-Hartschaumes zu erfassen, wurden die Untersuchungen bei -20°C, 23°C und 50°C durchgeführt.

Die aus den gewonnenen Kraft-Verformungsdiagrammen ermittelten Druckspannungen bei 1% und 10 % Stauchung sind zusammen mit der für die einzelnen Prüfkörper ermittelten Dichte in Tabelle 5a und 5b aufgeführt. Während für die Proben aus dem Versuchskörper 2 Dichten zwischen 0,076 g/cm<sup>3</sup> und 0,112 g/cm<sup>3</sup> ermittelt werden konnten, wurde für die Proben aus Versuchskörper 1 mit Dichten zwischen 0,113 g/cm<sup>3</sup> und 0,135 g/cm<sup>3</sup> die bereits makroskopisch festgestellte dichtere Schaumstruktur bestätigt.

Prüf-temperatur [°C]	Proben Nr.	Versuchs- körper	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckspannung in [N/mm <sup>2</sup> ] bei	
				10% Stauchung	1% Stauchung
-20	7	V2	0,112	0,51	0,039
	8	V2	0,076	0,19	0,013
	9	V1	0,135	0,36	0,016
	10	V2	0,104	0,30	0,021
	11	V2	0,095	0,41	0,013
	12	V1	<u>0,122</u>	<u>0,54</u>	<u>0,026</u>
			x= 0,107 s= 0,021	x= 0,39 s= 0,13	x= 0,021 s= 0,010
+23	1	V1	0,127	0,43	0,033
	2	V2	0,111	0,38	0,024
	3	V1	0,135	0,42	0,026
	4	V2	0,092	0,32	0,013
	5	V2	0,108	0,43	0,039
	6	V2	<u>0,101</u>	<u>0,35</u>	<u>0,021</u>
			x= 0,112 s= 0,016	x= 0,39 s= 0,05	x= 0,026 s= 0,009

x: Mittelwert      s: ± Standardabweichung

Tabelle 5a: Im Druckversuch bei 1 % und 10 % Stauchung ermittelte Spannungskennwerte und Prüfkörperdichten



Prüf-temperatur [°C]	Proben Nr.	Versuchs- körper	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Druckspannung in [N/mm <sup>2</sup> ] bei	
				10% Stauchung	1% Stauchung
+50	13	V1	0,125	0,37	0,026
	14	V2	0,091	0,24	0,010
	15	V2	0,108	0,25	0,031
	16	V2	0,084	0,18	0,010
	17	V2	0,112	0,33	0,021
	18	V1	<u>0,113</u>	<u>0,40</u>	<u>0,020</u>
			x= 0,106 s= 0,015	x= 0,30 s= 0,09	x= 0,020 s= 0,008

x: Mittelwert    s: ± Standardabweichung

Tabelle 5b: Im Druckversuch bei 1 % und 10 % Stauchung ermittelte Spannungskennwerte und Prüfkörperdichten

Bild 31 zeigt die in Abhängigkeit von der Prüftemperatur ermittelten Spannungs- Dehnungskurven für Proben mit nahezu gleicher Dichte von ca. 0,112 g/cm<sup>3</sup> (Probe 2,7,17). Den Einfluß der Dichte auf die ermittelten Spannungskennwerte verdeutlichen die Bilder 32 bis 33 in Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Durch die ermittelten Kennwerte wurden Trendlinien gelegt. Die die Abhängigkeit zwischen Druckspannung und Dichte beschreibenden Geradengleichungen sind in den Diagrammen angegeben (y = Druckspannung, x = Dichte).

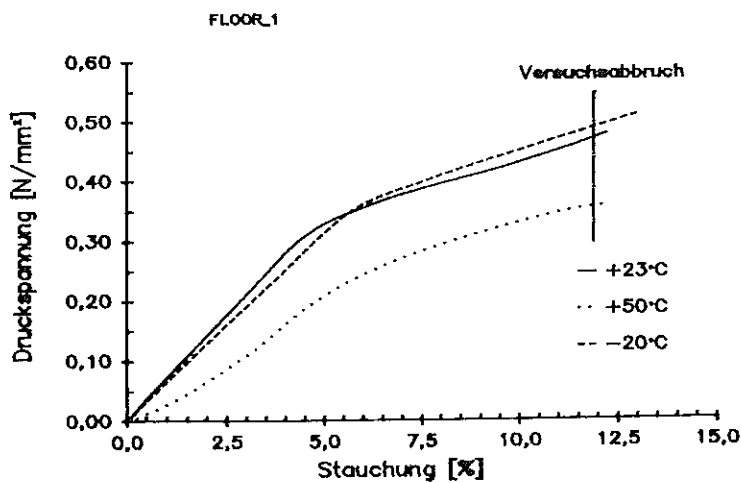
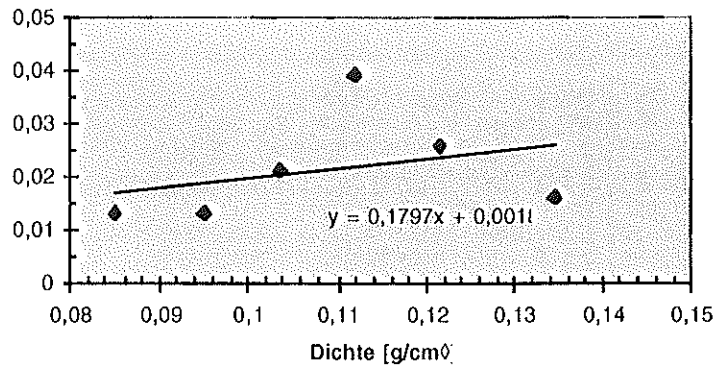
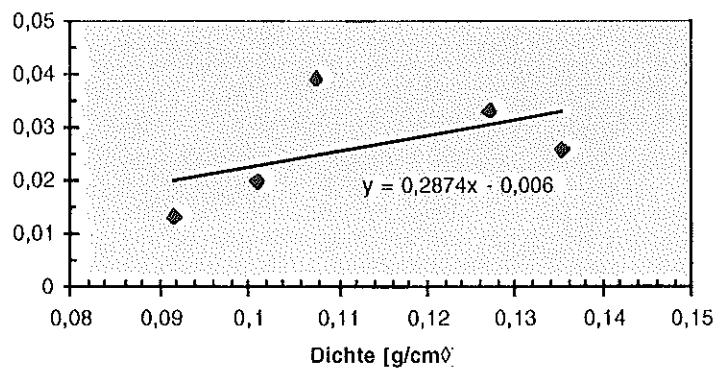


Bild 31: Spannungs- Stauchungskurven untersuchter PUR-Prüfkörper mit nahezu gleicher Dichte von ca. 0,11 g/cm<sup>3</sup> in Abhängigkeit von der Prüftemperatur.

a) Prüftemperatur -20 °C



b) Prüftemperatur 23 °C



c) Prüftemperatur 50 °C

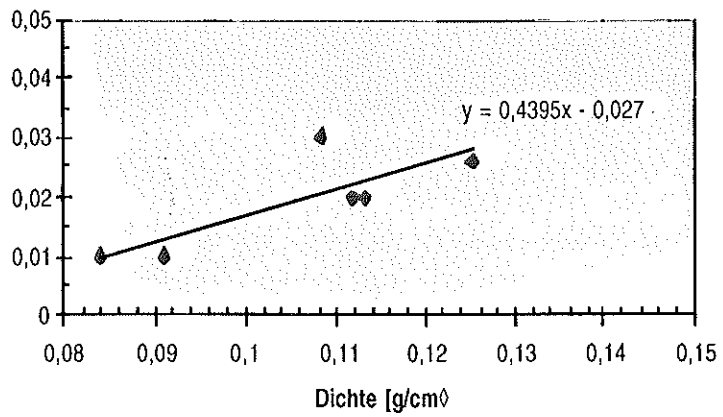
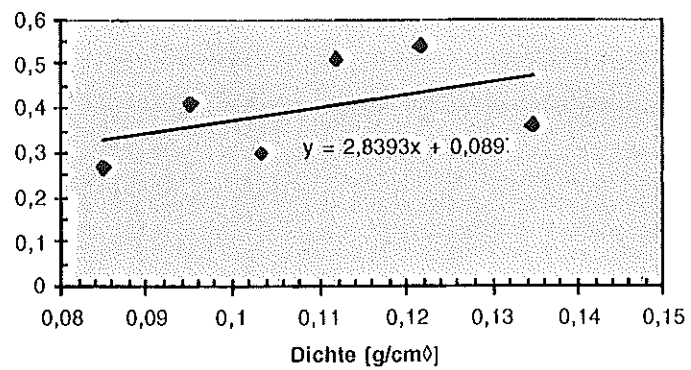


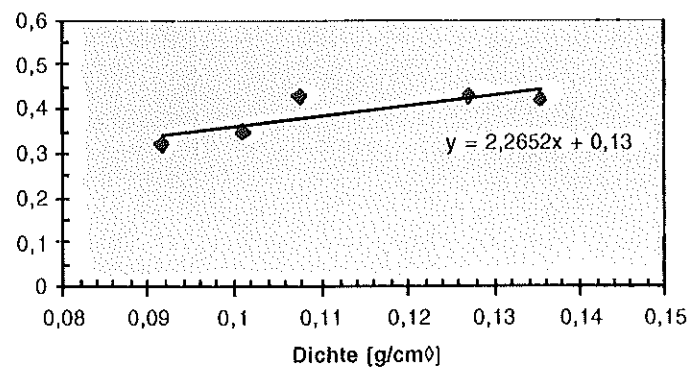
Bild 32: Druckspannung bei 1 % Stauchung in Abhängigkeit von Dichte und Prüftemperatur



a) Prüftemperatur -20 °C



b) Prüftemperatur 23 °C



c) Prüftemperatur 50 °C

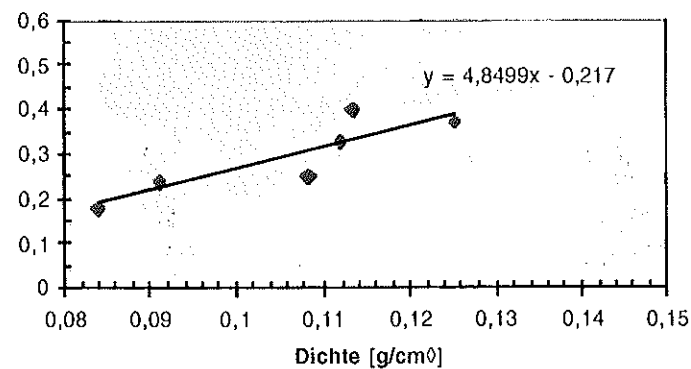


Bild 33: Druckspannung bei 10 % Stauchung in Abhängigkeit von Dichte und Prüftemperatur

#### 4.2.2 Maßänderung bei Wärme- und Kältezufuhr

Die Maßänderung des injizierten PUR-Hartschaums bei Wärme- und Kältezufuhr kann durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  beschrieben werden. Die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgte mittels thermomechanischer Analyse (TMA) an jeweils 2 aus den Bohrkernen der Versuchskörper 1 und 2 parallel zur Bohrkernachse entnommenen quaderförmigen PUR-Probekörpern mit den in Tabelle 6 aufgeführten Prüfkörperabmessungen.

Proben- nummer	Versuchs- körper	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Abmessungen [mm]		
			Breite	Tiefe	Höhe *)
1	V1	0,123	7,11	7,05	7,130
2	V1	0,131	7,10	7,08	7,050
3	V2	0,101	7,16	7,04	6,946
4	V2	0,091	7,05	7,05	7,005

\*) Ausgangshöhen wurden mit TMA bestimmt

Tabelle 6: Abmessungen der untersuchten PUR-Prüfkörper

Bei der TMA wurde unter einer Auflast von 0,05 N die Deformation des Probekörpers bei gleichzeitiger linearer Aufheizung der Probe gemessen. Der untersuchte Temperaturbereich betrug -50°C bis +50°C, die Heizrate 10 K/min. Aus den erhaltenen thermoanalytischen Diagrammen wurden die Ausdehnungskoeffizienten, wie in Bild 34 beispielhaft dargestellt, innerhalb von drei gewählten Temperaturbereichen linear ermittelt und in Tabelle 7 zusammengestellt.

Temperatur- bereich [°C]	Proben- nummer	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient [10 <sup>-6</sup> x K <sup>-1</sup> ]
-20 bis 0	1	62
	2	59
	3	62
	4	<u>65</u>
		<b>x = 62</b>
0 bis + 20	1	66
	2	63
	3	64
	4	<u>73</u>
		<b>x = 66</b>
+20 bis +40	1	82
	2	78
	3	87
	4	<u>96</u>
		<b>x = 86</b>

x: Mittelwert      s: ± Standardabweichung

Tabelle 7: Mittels TMA am injizierten PUR-Hartschaum bestimmte Wärmeausdehnungskoeffizienten

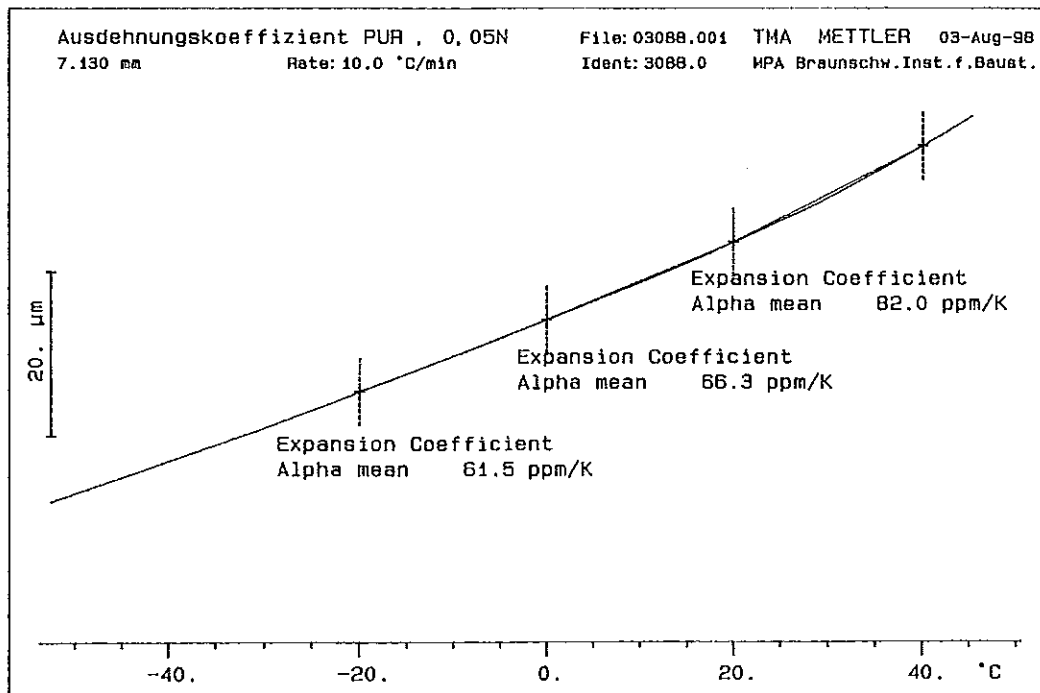


Bild 33: Thermogramm der TMA am injizierten PUR-Hartschaum zur Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (Probe 1)

## 5. Zusammenfassung

Am 7. Januar 1998 hat die Firma FloorLift auf dem Freigelände des iBMB die Eignung ihres Verfahrens mit Hilfe einer unter den Baukörpern injizierten PUR-Schicht, Bauteile anzuheben, demonstriert. Die Versuche wurden an drei unterschiedlichen Bauteiltypen (Platte, Behälterausschnitt, Wand-Bodenplatten-Konstruktion) vorgenommen. Vom iBMB wurde für jeden Prüfkörper ein unterschiedliches Anhebeprofil vorgegeben. Die Untersuchungen zeigen, daß die Firma FloorLift mit großer Genauigkeit die Versuchskörper um das vom iBMB vorgegebene Maß anheben konnte. Die Abweichungen liegen mit  $\pm 3$  mm (das entspricht etwa 6 % des maximalen Anhebemaßes von 50 mm) deutlich unterhalb der vom iBMB zugrundegelegten Toleranzgrenze von  $\pm 5$  mm. In der Norm für Toleranzen im Bauwesen, DIN 18202 [3] sind im Abschnitt 5 Grenzwerte für Ebenheitstoleranzen für Flächen von Decken, Estrichen und Bodenbelägen angegeben. Für flächenfertige Böden mit erhöhten Anforderungen und Meßpunktabständen von 2 bzw. 5 m ergeben sich zulässige Toleranzen von 4,7 bzw. 9,5 mm. Für Versuchskörper 1 ergibt sich eine maximale Ebenheitsabweichung zwischen Meßpunkt 2 und 4 von 4 mm auf ca. 2 m Länge. Diese liegt unterhalb der in der DIN 18202 ausgewiesenen Toleranz für erhöhte Anforderungen von 4,7 mm. Der Versuchskörper 2 erfüllt mit einer maximalen Höhendifferenz von 3 mm auf 5 m ebenfalls die erhöhten Anforderungen der DIN 18202 für flächenfertige Böden. Für den Versuchskörper 3 lassen sich keine Aussagen treffen, da der Baukörper nur punktuell angehoben wurde und somit eine Bezugslänge für den Meßpunktabstand fehlt.

Das eingesetzte Laser-Nivelliergerät arbeitete mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm. Es war nicht möglich, eine Injektion zwischen Bodenplatte und darunterliegender Fundamentplatte (Versuchskörper 1 und 3) durchzuführen, da die nicht vorhandenen Hohlräume dies nicht zuließen. Aus diesem Grund wurde bei allen drei Versuchen im Anschlußbereich Beton - Boden injiziert.

Die Vorzüge des Verfahrens liegen im Bereich der hohen erzielbaren Anhebegenauigkeit sowie der Schnelligkeit (ca. 2 Stunden je Prüfkörper) der Durchführung. Das Verfahren ist als sehr einfach und flexibel hinsichtlich der Gerätschaften und deren Handhabung vor Ort einzuschätzen. Für den näheren



Umgebungsbereich der Injektion (Durchmesser ca. 1 bis 2 m) belegen die Bohrprofile die gleichmäßige Verteilung des PUR-Hartschaumes unterhalb der angehobenen Betonbodenplatten.

Die beobachteten Rißbildungen bei den Versuchskörpern 2 und 3 können als unbedenklich betrachtet werden, da die vorgegebenen Anhebepprofile als Anwendungsgrenzfälle eingestuft werden müssen.

Der vor Ort eingesetzte PUR-Hartschaum läßt sich aufgrund der an den Flüssigkomponenten durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich der Identität nachträglich identifizieren. Die mechanisch-technologischen Untersuchungen zeigten eine Abhängigkeit des Druck-Stauchungsverhaltens von Dichte und Temperatur. Unter Gebrauchstemperatur ist der PUR-Hartschaum in der Lage bei geringer Stauchung von 1%, Druckspannungen in der Größenordnung von 20 kN/m<sup>2</sup> aufzunehmen. Dies liegt im Bereich praxisüblicher Beanspruchungen. Hinsichtlich der Formänderungseigenschaften bei Wärme- und Kältezufuhr konnten für die vor Ort festgestellten Materialstärken (20 mm bis 70 mm) des injizierten PUR-Hartschaumes beispielsweise für eine extreme Temperaturänderung von +20°C auf -20°C ( $\Delta T = 40^\circ K$ ) Längenänderungen von ca. 0,26 % bezogen auf die Schichtstärken festgestellt werden, die unter Berücksichtigung der Anforderungen in der Baupraxis vernachlässigbar klein sind.

Im Rahmen der Auswertung der Feldversuche und der Laboruntersuchungen können wir heute jedoch noch keine wissenschaftliche Aussagen über das Langzeitverhalten des PUR-Hartschaumes sowie über das Verhalten unter dynamischer Beanspruchung treffen. Dazu sind weitere Untersuchungen erforderlich. Über praktische Erfahrungen des FloorLift-Verfahrens liegt eine Referenzliste mit Sanierungsmaßnahmen seit 1990 beim iBMB vor.

Das Verfahren hat den Nachweis der Tauglichkeit hinsichtlich der durch das iBMB gestellten Anforderungen im Feldversuch erbracht.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] SOCOTEC: „URETEK - Verfahren: Hebung abgesackter Betonplatten“, Technischer Untersuchungsbericht, Bericht Nr. 97.0129, St. Quentin en Yveslines, Juni 1997
- [2] SOCOTEC: „URETEK - Verfahren: Hebung abgesackter Betonplatten“, Pflichtenheft, Dossier Nr. AX6510, St. Quentin en Yveslines, Juni 1997
- [3] DIN 18202: Toleranzen im Bauwesen - Bauwerke, Ausgabe 04.97
- [4] DIN 53421: Prüfung von harten Schaumstoffen; Druckversuch; Ausgabe 06.84
- [5] DIN 51757: Prüfung von Mineralölen und verwandten Stoffen; Bestimmung der Dichte; Ausgabe 04.94
- [6] DIN 53185: Anstrichstoffe; Isocyanatharze; Prüfung; Ausgabe 12.74
- [7] DIN 53240-1: Bestimmung der Hydroxylzahl, Ausgabe 12.71
- [8] DIN 51451: Prüfung von Mineralölerzeugnissen und verwandten Produkten; Infrarotspektroskopische Analyse; Ausgabe 09.88
- [9] DIN 50014: Klimate und ihre technischen Anwendungen; Normalklimate; Ausgabe 07.85
- [10] iBMB: Kurzfassung des Abschlußberichtes, iBMB, TU Braunschweig, 08.98