

Industrieböden aus vorgespanntem Beton

Th. Friedrich

Domostatik GmbH Düsseldorf, Deutschland

Vortrag gehalten an der Veranstaltung: "Beton Seminare '98" - Bundesverband der Deutschen Zementindustrie E.V. ; Bauberatung Zement Wiesbaden; Februar 1997

und veröffentlicht in den Tagungsunterlagen "Informationen der Bauberatung Zement"
Bundesverband der Deutschen Zementindustrie E.V.

INDUSTRIEBÖDEN AUS VORGESPANNTEM BETON

Th. Friedrich

Domostatik GmbH Düsseldorf, Deutschland

1.0 Einleitung

Auf eindruckliche Weise wird in [1] ausgeführt, dass eine Bewehrung in einer Betonplatte die Tragfähigkeit nicht vergrößern kann, solange die Platte im ungerissenen Bereich verbleibt. Der Widerstand eines Plattenquerschnittes für ungerissene Bereiche ermittelt sich anhand der zulässigen Betonzugspannungen. Die Beanspruchungen der Platte aus Lasten (verteilte Flächenlast und Einzellasten) und Verformungen (Schwinden, Temperatur) dürfen nicht größer als der zulässige Widerstand sein, dann verbleibt der Querschnitt im ungerissenen Zustand. Solange diese Bemessungsregeln gültig sind, lässt sich der Widerstand einer Platte vergrößern durch eine dicke Platte, eine bessere Betonqualität oder durch das Aufbringen einer zusätzlichen Druckspannung aus Vorspannung. Bereits mit einer leichten Druckvorspannung kann somit der Biegewiderstand im ungerissenen Zustand nicht unwesentlich vergrößert werden. Eine zentrische Druckspannung von 0.5 N/mm^2 vergrößert den Biegewiderstand bereits in der Größenordnung von ca. 20%. Wiederum in [1] wird dafür plädiert, dass eine Vorspannbewehrung weit sinnvoller ist, als eine normal bewehrte Betonplatte. Die Vorteile einer leichten Vorspannung sind bekannt und können eindrucksvoll dargelegt werden. Die Umsetzung in konkrete Projekte ist jedoch in Deutschland weit weniger verbreitet, als dies von den Vorteilen her erscheint. Die Ursachen für die mangelnde Akzeptanz ist in der allgemeinen Ablehnung der Vorspannung sowohl von Seiten der planenden Ingenieure als auch der ausführenden Firmen zu sehen. In anderen Ländern (USA, Asien) gehört diese Bauweise zum Stand der Technik und hat eine weite Verbreitung. Unter dem Gesichtspunkt neuer Entwicklungen im Vorspannbereich sowie die Verwendung von glasfaserverstärktem Beton werden neue technisch und wirtschaftlich interessante Anwendungen möglich. Damit wird die Anwendung erleichtert und erlaubt qualitativ hochstehende Bauteile zu erstellen.

2.0 Beanspruchungen

Bei Bodenplatten gilt es klar zu unterscheiden zwischen Beanspruchungen aus Lasten (Flächen- und Einzellasten) und solchen aus Verformungen (Dehnungen und Krümmungen infolge Schwinden und Temperatur). Erst wenn die Verformungen behindert werden, entwickeln sich Spannungen.

2.1 Beanspruchungen aus Lasten

Flächenlasten werden über die Betonplatte i.d.R. direkt in den Untergrund abgeleitet und verursachen keinerlei Beanspruchungen. Ist die Unterlage jedoch weich (schlechter Baugrund oder Isolierung) kann eine punktuelle Flächenlast kleinere Biegebeanspruchungen verursachen.

Einzellasten infolge rollendem Verkehr oder infolge Einbauten verursachen lokale Biegebeanspruchungen und demzufolge Zugspannungen an der Ober- bzw. Unterseite der Platte. Dabei gilt es klar zu unterscheiden zwischen Einzellasten innerhalb der Platte (Mitte) und solchen an den Rändern der Platte (Rand- und Ecklasten). Die Beanspruchungen der Einzellasten am Rand sind mehr als doppelt so groß wie diejenigen in der Plattenmitte. Demzufolge werden die Einzellasten am Plattenrand bestimmend für die Dimensionierung der Platte. Daraus lässt sich neben den üblichen, ein weiterer Nachteil der gefügten Platten ableiten. Kleine durch Fugen begrenzte Plattenfelder werden ausschliesslich

durch die maximale Beanspruchung des Randes bestimmt. i.d.R. ist oftmals aus diesen Gründen eine zusätzliche durchgehende schlaffe Bewehrung erforderlich. Bei grossen fugenlosen Platten ist der Anteil der Randbeanspruchung bezogen auf die gesamte Fläche gering und macht sich somit kaum bemerkbar. Für diese lokal hochbeanspruchten Plattenbereiche ist gegebenenfalls eine schlaffe Bewehrung einzulegen, während der Rest unbewehrt bleibt. Fugenlose Platten begrenzen die maximalen Beanspruchungen aus Lasten auf ein Minimum.

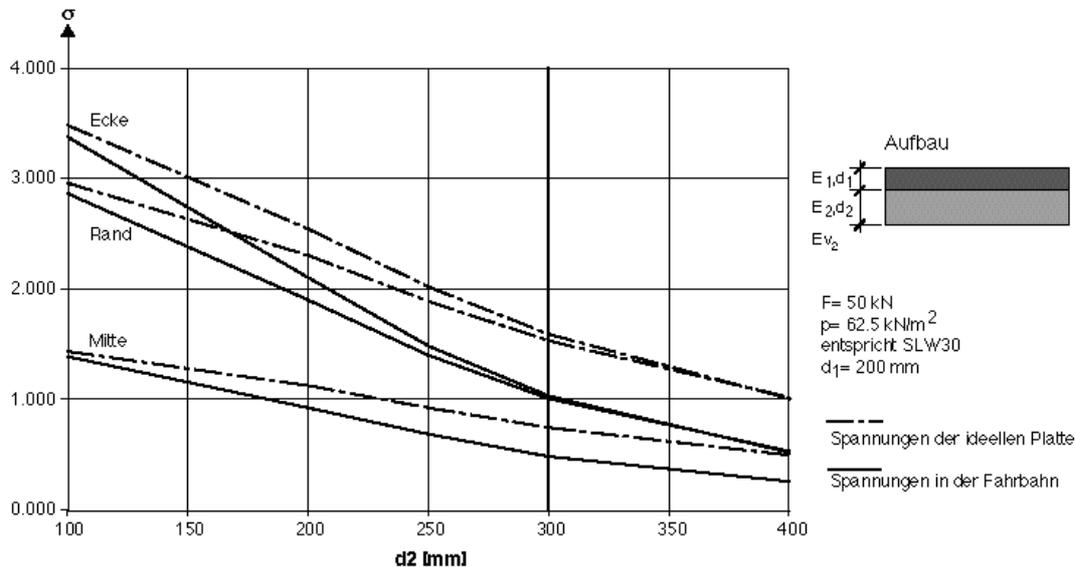


Bild 1: Einfluss der Tragschicht auf die Beanspruchungen der Betonplatte

Die Beanspruchungen der Betonplatte lässt sich durch einen entsprechenden Aufbau des Untergrundes beeinflussen und reduzieren. Das Mehrschichtsystem bestehend aus Baugrund, Tragschicht und Betonplatte wirkt zusammenhängend und verteilt die Last auf die mehreren Schichten. Demzufolge kann durch eine entsprechende Steifigkeit der Tragschicht die Beanspruchung in der Betonplatte reduziert werden [Bild 1]. Im Extremfall dient die obere Betonplatte nur noch als hoch elastische Schicht um die Rissefreiheit und die Dichtigkeit zu gewährleisten, während die Tragschicht die Beanspruchungen übernimmt.

2.2 Beanspruchungen aus Verformungen

Dehnungen und Krümmungen werden in der Betonplatte durch Schwinden und Temperatur (Hydratationswärme, Wärmeeinstrahlung) hervorgerufen. Infolge dieser Einwirkungen will sich die Platte ausdehnen, bzw. zusammenziehen und nach oben oder nach unten verwölben. Werden diese Verformungen behindert, entstehen zentrische bzw. Biegespannungen in der Platte. Zur Begrenzung der zentrischen Spannungen sind sämtliche Einbauten innerhalb der Platten-

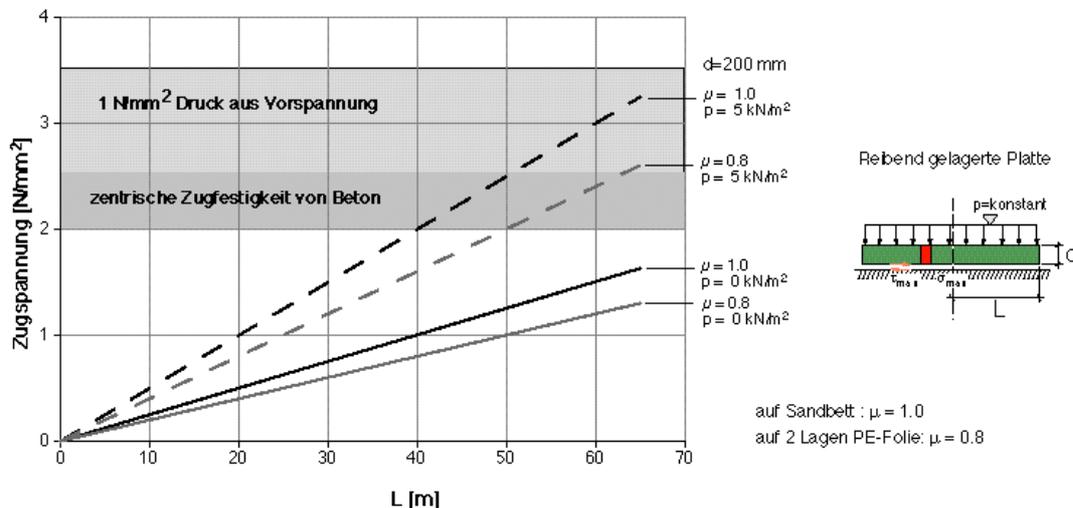


Bild 2: Normalkräfte in der Platte infolge Reibung

fläche von dieser abzutrennen. Somit verbleibt die Behinderung der Platte durch den Untergrund. Zu diesem Zweck wird i.d.R. eine Gleitschicht in Form von unterschiedlichen Materialien unterhalb der Platte eingebaut. Entsprechend dem Reibungskoeffizienten des Materials baut sich bei der Verformung der Platte eine Reibkraft und somit eine Zugkraft (Verkürzen = Schwinden) bzw. Druckkraft (Ausdehnen = Temperatur) in der Platte auf. Diese Zugkraft ist abhängig von der Reibung, der Auflast und der Plattenlänge, jedoch unabhängig von der Grösse der Verformungen [Bild 2]. Maximale zentrische Beanspruchungen in der Platte sind somit von der jeweiligen Lagerungsart her im voraus bestimmbar.

Verwölbungen durch unterschiedliche Verformungsgradienten können nicht ungehindert wirken, da entsprechend der Verformung das Eigengewicht aktiviert wird und somit vergleichbar einer Kragarmlagerung der Platte Beanspruchungen geweckt werden. Verwölbungen entstehen durch Temperatureinwirkung an der Oberfläche und durch unterschiedliches Austrocknen über den Querschnitt.

Entsprechend der über einen zeitlichen Abschnitt aufgebauten Verformung und der durch Behinderung hervorgerufenen Beanspruchung wird diese durch die Kriechfähigkeit des Betonmaterials relaxiert. Somit tritt die Beanspruchung in ihrer vollen Auswirkung niemals zutage, da ein Grossteil davon bereits relaxiert ist. Da das Schwinden sich über einen längeren Zeitraum erstreckt, wird seine Wirkung nahezu vollständig über die Kriechfähigkeit des Material abgebaut. Jahreszeitliche Temperaturschwankungen sind ebenfalls diesen Mechanismus unterworfen, während tägliche Schwankungen jedoch nahezu voll wirksam werden.

3.0 Widerstand und Einflussmöglichkeiten

Der Widerstand des Plattenquerschnitts wird bestimmt durch die Kenngrössen des Materials und des Verbundquerschnitts. Die Beanspruchungen müssen kleiner als der Widerstand sein. Um den Widerstand bzw. die Beanspruchungen zu beeinflussen, sind verschiedene Massnahmen möglich. Durch konstruktive Massnahmen (Fugenkonstruktionen) lassen sich die Beanspruchungen reduzieren. Durch die Anwendung einer Vorspannung wird der Widerstand vergrössert. Damit stehen sich die beiden Massnahmen gegenüber, denn entweder werden die Beanspruchungen durch die Ausbildung von Fugen reduziert, oder der Widerstand durch die Vorspannung vergrössert. Somit sind mit der Anwendung der Vorspannung keine Fugen erforderlich.

3.1 Biegezugfestigkeit

Wie eingangs erwähnt wird der Widerstand einer Betonplatte durch die Zugfestigkeit des Betonmaterials bestimmt. Über die Plattenstärke ist die Grösse der Beanspruchungen zu beeinflussen. Die Steifigkeit des gesamten Aufbaus trägt ebenfalls zur Beanspruchungsverteilung mit bei [Bild 1].

3.2 Fugen als konstruktive Massnahmen

Der Widerstand muss den kombinierten Beanspruchungen aus Lasten und Verformungen einerseits und der Kombination aus zentrischer und Biege-spannungen andererseits standhalten. Gelingt es nicht, die maximalen Beanspruchungen zu kontrollieren, so sind durch konstruktive Massnahmen die Auswirkungen einzelner Beanspruchungen zu begrenzen. Eine der meist verwendeten Massnahmen in dieser Hinsicht sind Fugen. Fugen begrenzen die zentrische Verformungen und entsprechend kurze Abstände (kritische Länge) reduzieren die Verwölbungen.

Die üblichen Probleme mit den Fugen in der Nutzung sind bekannt und lassen sich kaum wirksam beseitigen. Die Auswirkung der Fuge als Schwachstelle lassen sich nur und ausschliesslich durch Weglassen der Fugen beseitigen.

3.3 Vorspannung als Widerstandsvergrösserung

Eine wirksamere Massnahme als die Fugen ist die Anwendung der Vorspannung. Mit ihr werden zusätzliche Druckspannungsreserven aufgebaut, die bleibend vorhanden sind. Druckspannungen in der Grössenordnung der halben Betonzugfestigkeit bewirken bereits einen erheblichen Widerstandszuwachs. Mit diesem Zuwachs an Zugfestigkeit lassen sich i.d.R. die Beanspruchungskombinationen kontrollieren. Zudem wirkt die Vorspannung wie eine elastische Feder, so dass sich die bei Überbeanspruchungen entstandenen Risse wieder schliessen und eine minimale Druckzone den Querschnitt wieder verbindet. Ein Versetzen des Querschnittes ist somit ausgeschlossen.

4.0 Dimensionierung der Vorspannung

Entsprechend der Beanspruchungen ist die zusätzliche Druckspannungsreserve aus Vorspannung zu bestimmen. Daraus ermittelt sich über die zu verwendenden Spannkabel deren Anzahl und deren gegenseitiger Abstand. Zu beachten gilt, dass verschiedene Verluste die maximale Grösse der Vorspannung reduzieren.

4.1 Verluste aus Kriechen und Schwinden.

Durch die zeitlichen Verformungseigenschaften des Betons entzieht sich der Beton der konstanten Beanspruchung durch Verkürzung infolge Schwinden und durch Kriechen unter konstanter Druckbeanspruchung. Infolge der geringen Druckspannungen aus Vorspannung ist deren Auswirkung auf die Verluste gering. Bei den eingangs erwähnten Druckspannungen aus Vorspannung in der Grössenordnung von $1.0 - 2.0 \text{ N/mm}^2$ belaufen sich die Verluste auf ca. $10.0 - 15.0\%$.

4.2. Verlust aus Reibung mit dem Baugrund

Analog dem zuvor erwähnten Mechanismus des Schwindens werden durch die Verkürzung der Platte durch Vorspannung Reibungskräfte geweckt, die eine Zugspannung in der Platte hervorrufen [Bild 2]. Somit wird die am Plattenende vollständig vorhandene Spannkraft entlang der Platte abgebaut. In Abhängigkeit von der Reibung und der Plattenlänge kann die durch Vorspannung erzeugte Druckspannung von z.B. 1.0 N/mm^2 nach einer bestimmten Länge vollständig abgebaut sein.

Mit entsprechenden konzipierten Gleitschichten lassen sich die Beanspruchungen reduzieren. Zu empfehlen sind i.d.R. zwei Lagen PE-Folien.

Beim Nachweis der zulässigen Spannungen über die gesamte Plattenfläche sind die regionalen Auswirkungen des Spannkraftverlustes zu berücksichtigen. Da die grössten Beanspruchungen i.d.R. am Plattenrand aus Lasteinwirkung auftreten, und die Vorspannung am Plattenrand meistens vollständig vorhanden ist, kann der Spannverlust zur Plattenmitte hin in Kauf genommen werden.

5.0 Vorspanntechnik und Ausführung

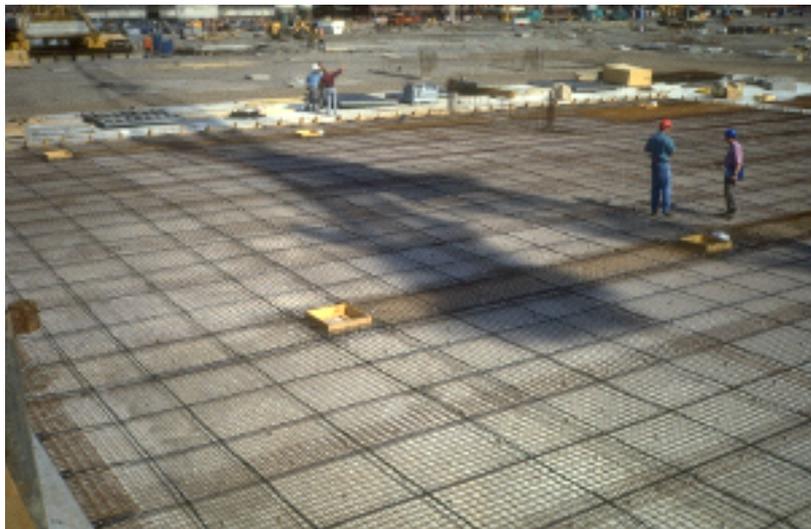


Bild 3: Monolitzen auf Bewehrung verlegt

montieren lassen. Die geringe Spannung hinter der Ankerplatte erlaubt ein frühes Spannen bereits bei einer minimalen Betondruckfestigkeit von $f_c = 20.0 \text{ N/mm}^2$ [Bild 4].

Um ein leichte zentrische Vorspannung bei den relativ dünnen Platten ($d = 200 - 300 \text{ mm}$) zu erzielen, genügen kleine Kabeleinheiten. Durchgesetzt haben sich für diese Anwendung Monolitzen ohne Verbund mit einer Spannkraft von $P_0 = 180 - 200 \text{ kN}$. Die Spannlitzen haben bereits werksgefertigt einen Korrosionsschutz bestehend aus einer Fettschicht und einer extrudierten PE-Hülle [Bild 3]. Damit entfällt der nachträgliche und aufwendige Injektionsvorgang der Hüllrohre auf der Baustelle. Mit dem Spannen der Litzen sind sämtliche Spezialarbeiten abgeschlossen. Die fertige Litze ist sehr handlich (Durchmesser $\varnothing 20 \text{ mm}$) und lässt sich sehr leicht einbauen. Für diese geringen Spannkräfte sind ebenso kleine Ankerkörper erforderlich, die sich leicht an die Schalung



Bild 4: Verankerung der Monolitze



Bild 5: Abschnittsweises Vorspannen

Die in der Länge i.d.R. bereits konfektionierten Spannglieder werden auf Distanzhaltern und entsprechend dem vorgesehenen Abstand innerhalb des Grundrisses der Platte ausgelegt. Die feste Verankerung ist bereits werkseitig befestigt und muss nur noch in ihrer Höhenlage fixiert werden. Die bewegliche Verankerung wird vorgängig an die Seitenschalung montiert und das freie Ende der Litze durchgeschoben. Zur Sicherung der Kräfteinleitung im Ankerbereich ist eine Spaltzugbewehrung erforderlich. Neuere Entwicklungen sehen vor, den gesamten Ankerbereich als vorgefertigten Ankerkörper aus Faserbeton mit den Abmessungen der endgültigen Deckenplatte zu erstellen und am Deckenrand einzulegen. Damit ist ein noch früheres Vorspannen bei geringen Betondruckspannungen möglich. Entsprechend dem Baufortschritt werden Arbeitsabschnitte mit entsprechenden Arbeitsfugen festgelegt. Die Spannglieder werden i.d.R. an den Arbeitsabschnitten abgespannt und für die weiteren Abschnitte angekoppelt [Bild 5]. Einfach zu handhabende Kupplungen erleichtern diesen Vorgang. Werden die Bauabschnitte im täglichen Rhythmus aneinander betoniert, so empfiehlt sich, die Spannglieder an den Arbeitsfugen ungekoppelt durchlaufen zu lassen und erst nach der Erstellung mehrerer Bauabschnitte gesamthaft vorzuspannen. Werden die einzelnen Bauabschnitte direkt vorgespannt, so empfiehlt sich wegen der Zugänglichkeit der Anker, die Abschnitte jeweils aneinander zu betonieren. Werden Bauabschnitte

zwischen bereits bestehende betoniert, so kann das Aufbringen der Spannkraft über sogenannte Zwischenverankerungen erfolgen, die die beiden bereits verankerten Litzenenden zusammenziehen und verankern.

Zum Spannen der Anker ist i.d.R. hinter der Verankerung ein Platzbedarf von ca. 0.70 m erforderlich. Ist diese Anforderung z.B. wegen der Begrenzung durch seitliche Wände nicht zu gewährleisten, lassen sich die Anker vor dem Plattenende an der Oberseite der Platte spannen.

Im Bereich der Arbeitsfugen mit abgespannten Spanngliedern sind die parallel zur Arbeitsfuge verlaufenden Spannglieder zu konzentrieren und ein Anteil davon erst mit dem nächsten Bauabschnitt vorzuspannen.

Das Aufbringen der Spannkraft für jedes einzelne Spannkabel erfolgt nach einer festgelegten Spannreihenfolge und nachdem die minimale Betondruckfestigkeit erreicht ist.

Zum Spannen sind bei den geringen Spannkraften handliche, leichte Spannpressen erforderlich, die über eine Hydraulikpumpe gesteuert werden. Nach dem Spannen werden die Litzenüberstände abgeschnitten und das Ende der Verankerung mit Fett ausgegossen und mit einem Deckel geschlossen.

6.0 Anwendungen

Verlangen die Anforderungen aus der Nutzung der Betonplatte Rissefreiheit, Dichtigkeit und Fugenlosigkeit, so ist die Anwendung einer leichten Vorspannung erforderlich.

Zu dieser Kategorie von Bauobjekten gehören:

- Industrieböden mit Staplerbetrieb und führerlosgesteuerten Transportfahrzeugen;
- Umschlagflächen für wassergefährdende Stoffe;
- Platten für Hochregallager;
- Bodenplatten für Parkflächen;
- Tankstellenflächen;



Bild 6: Fertiger Bauabschnitt einer Bodenplatte mit Arbeitsfuge



Bild 7: Betonplatte für Parkfläche

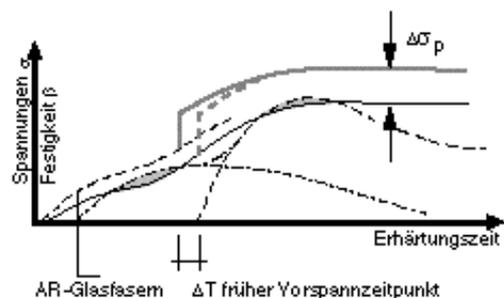


Bild 8: Steigerung des Risswiderstandes durch AR-Glasfasern und Vorspannung

von Flächen bis zu den Kellerplatten von Einfamilienhäusern werden sich dann einfach und zuverlässig mit dem Verfahren Vorspannung in Kombination mit AR-Glasfasern verwirklichen lassen.

[1] G. Lohmeyer: Betonböden im Industriebau - Hallen und Freiflächen.

In diesen Bereichen wurden vorgespannte Betonplatten ausgeführt. Das Spektrum reicht von aus Lasten und/oder Verformungen hochbeanspruchten Platten von unterschiedlichsten Abmessungen [Bild 6,7]. Flächen im Freien als auch innerhalb einer Hallenkonstruktion gehören dazu und entsprechend ist die Beanspruchung aus Verformungen von grossem bzw. geringem Ausmass. Kleine Flächen (20 x 10) für Tankstellenbereiche, Flächen mittlerer Grösse (40 x 80 m) für Hochregallager und grosse Flächen (100 x 230 m) für Parkflächen. Diese Anwendungen konnten fugenlos ausgeführt werden und haben sich hinsichtlich Rissfreiheit bewährt.

Die meisten dieser Flächen wurden teilweise noch mit einer zusätzlichen schlaffen Bewehrung versehen, sei es aus statischen Gründen, oder wie auch geschehen, weil die prüfende Instanz einer unbewehrten Betonplatte nicht zustimmte.

Der Trend heutzutage geht jedoch zu faserbewehrten Betonplatten. In Kombination mit der Vorspannung ist die AR-Glasfaser zu bevorzugen. Die AR-Glasfaser ist in der Lage, die Frührissebildung zu verhindern und die Betondruckfestigkeit zu steigern, um früher vorspannen zu können. Damit ist die Kombination von Vorspannung und AR-Glasfasern ideal, da beide Techniken zu verschiedenen Zeitpunkten Risse verhindern und somit lückenlos vom Zeitpunkt des Einbringens des Betons über die Erhärtungsphase bis zur späteren Nutzung Rissfreiheit gewährleisten können [Bild 8].

Im Bereich der kleinen Flächen ist die jetzige Vorspanntechnik bestehend aus Spannglied mit beidseitiger Verankerung kostenmässig aufwendig und wenig rentabel. Neue Techniken für diesen Bereich werden in Zukunft ebenfalls günstige Verfahren ermöglichen. Damit wird sich der Vorspannung in einem Massengebiet eine interessante Anwendungsmöglichkeit eröffnen. Alle Arten