PRODUKTIONSVERFAHREN ZUR SERIELLEN HERSTELLUNG DÜNNWANDIGER, DREIDIMENSIONALER BAUTEILE MIT TEXTILER BEWEHRUNG

Th. Friedrich, Novacret AG, Zürich

Zusammenfassung

Bauteile aus Textilbeton sind meist dünnwandige und dreidimensional geformte Baukörper. Ihre Verwendung ist in Kombination mit der üblichen Stahlbetontechnik zu sehen. Dank deren extremen Dünnwandigkeit sind auch Betonbauteile möglich, die derzeit in Kunststoff oder Metall gefertigt werden. In dieser Funktion sind die neuen Betonbauelemente in großer Stückzahl gefragt, die nur in serieller Fertigung kostengünstig herstellbar sind. Die Erhärtung des Betons bedarf jedoch dank der chemischen Reaktion des Zements einer bestimmten Zeitspanne. Es muss also gelingen, den Beton in kürzester Zeit so ausreichend formstabil zu machen, dass die Verweilzeit in der Schalung auf ein Minimum begrenzt bleibt. Das hier vorgestellte Verfahren nutzt die Dehydrierung, um den anfänglich flüssigen Beton durch Verdichten mit Druck zu entwässern und in einen erdfeuchten Zustand zu überführen, der unmittelbar aus der Form genommen werden kann. Zusätzlich gelingt es, die gesamten Vorgänge wie Einschalen, Befüllen, Entwässern und Ausschalen vollständig zu automatisieren. Damit ist eine automatische Fertigung in großer Stückzahl von dünnwandigen Bauteilen möglich.

1. DÜNNWANDIGE, DREIDIMENSIONALE BAUTEILE AUS BETON

Einige Anwendungen im traditionellen Konstruktionsbeton lassen sich vorteilhaft mit dünnwandigen, oftmals dreidimensionalen Bauteilen kombinieren, um dem fertigen Bauteil weitergehende Funktionen zuzuweisen. Diese dünnwandigen Baukörper übernehmen weniger eine tragende Funktion als vielmehr eine temporäre Aufgabe mit klar definierten Belastungszuständen von geringer Intensität. Gedacht ist dabei an Baukörper, die als integrierte Schalung wirken. Bauteile mit gleichzeitiger Dämmfunktion werden in Zukunft vermehrt bei Baukonstruktionen gebraucht. Auch hier leisten dünnwandige Betonbauteile in Verbindung mit der erforderlichen Dämmung als Sandwichkonstruktionen wertvolle Hilfe. Der textilbewehrte Feinbeton schützt die Dämmung und als Sandwichelement erzeugt er eine hohe Elementsteifigkeit.

Analog den Körpern aus Kunststoff oder Blech lassen sich solche auch als feingliedrige Elemente aus Feinbeton erstellen, wenn diese entsprechend mit Kurzfasern oder mit einer textilen Bewehrung verstärkt sind.
Zur Verdeutlichung derartiger Produkte können einige bereits marktreife Bauelemente genannt werden:

Bild 1: Aussparungskasten

Bild 2: Abschalbrett

a) Integrierte Schalungselemente mit und ohne Rippenstruktur an einer oder beiden Aussenflächen. Mit Vorteil lassen sich diese Platten mit weiterer Technik wie Rohrkreisläufe für Heiz- und Kühlsysteme versehen, um weitergehenden Nutzen für die Gebäudeinstallation zu liefern.
b) Aussparungselemente für Rohrdurchführungen in Decken und Wänden mit entsprechender Dichtmöglichkeit auch für Brandlasten (Bild 1).
c) Abschalbretter mit Perforierungsmöglichkeiten zur Nutzung einer durchgehenden Bewehrung (Bild 2).
d) In Konkurrenz zu Kunststoff oder Blech sind Verwahrkästen aus Leichtbeton mit nur unwesentlich größeren Wandabmessungen realisierbar (Bild 3).
e) In Kombination mit einer Dämmung oder direkt als Dämmbauteil in Leichtbeton mit einer Rohdichte von ca. 0.50 kg/m3 sind Randabschalungen oder Fensterlaibungen mit der entsprechend wünschenswerten Geometrie herstellbar (Bild 4).

Die für derartige Anwendungen gewünschte Betonmatrix zeichnet sich durch einen kompakten Kornaufbau mit dichter Struktur aus. Von Vorteil ist eine hohe Verformungsfähigkeit bei geringer Spannungsintensität und eine niedrige Rohdichte, um die Bauteile für die manuelle Handhabung entsprechend leicht zu halten. Beide Anforderungen lassen sich i.d.R. mit Zuschlägen aus Leichtfüllstoffen erfüllen.
Bei dem möglichen Anwendungsgebiet derartiger dünnwandiger Bauteile ist schnell auszumachen, dass es sich um Elemente mit großer Stückzahl handelt, die um entsprechend kostengünstig zu sein, auch rationell gefertigt werden müssen. Rationelle Fertigung im Betonbereich bedeutet geringer Lohnanteil und intensive Nutzung einer kostenträchtigen Schalung.

Bild 3: Verwahrkasten Bewehrungs-anschluss

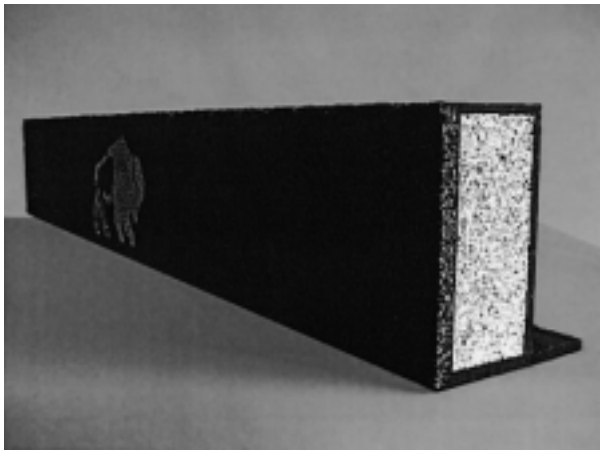

Bild 4: Randabschalung mit Dämmung

2. ANFORDERUNGEN AN EINE KOSTENGÜNSTIGE FERTIGUNG

Um den vorgenannten Anforderungen gerecht zu werden, muss eine wie auch immer gestaltete dreidimensionale Schalungsform automatisch mit flüssiger Betonmatrix gefüllt und entschalt werden. Die Verweildauer der Betonmatrix in der Schalung muss auf ein Minimum reduziert werden. Aus Verarbeitungsgründen muss eine sehr flüssige Matrix verwendet werden, um innerhalb der dünnwandigen Schalung in alle Bereiche zu gelangen. Am effizientesten erfolgt diese Befüllung durch Injektion des Materials unter entsprechendem Druck. Diese flüssige Matrix muss jedoch so rasch als irgend möglich erhärten, um die Schalung schnellst möglich wieder frei zu bekommen. Wenn dies gelingt, kann auch die aufwendigste Geometrie für die Schalung erstellt werden und über die Mehrfachnutzung dennoch zu einem geringen Kostenanteil pro Produkt führen. Es muss somit gelingen, die Erhärtung zu beschleunigen, bzw. eine ausreichende Grünstandfestigkeit innerhalb kurzer Zeit zu erreichen.
Mehrere Möglichkeiten bzw. Verfahren sind bislang mit mehr oder weniger Erfolg eingesetzt wurden:

a) Beschleunigung der Erhärtung durch Wärmebehandlung;
b) Verwendung von chemischen Zusätzen, die ebenfalls eine Erhärtung beschleunigen;
c) Dehydrieren, um den flüssigen Beton in einen erdfeuchten Zustand zu überführen. In diesem Zustand bleibt der Beton auch nach dem Ausschalen in seiner Form stabil. Analog arbeiten die Produktionsverfahren für die Stein-, Rohr- und Palisadenfertigung, indem jedoch von Beginn an eine erdfeuchte Matrix in die Form eingepresst wird. Diese Möglichkeit lässt sich jedoch bei dünnwandigen Bauteilen nicht realisieren, da die erdfeuchte Matrix nicht in die engen Schalungsabschnitte gelangt.

Bei unserer Entwicklung wurde die zuletzt genannte Technik eingesetzt.

3. VERFAHREN ZUR DEHYDRIERUNG

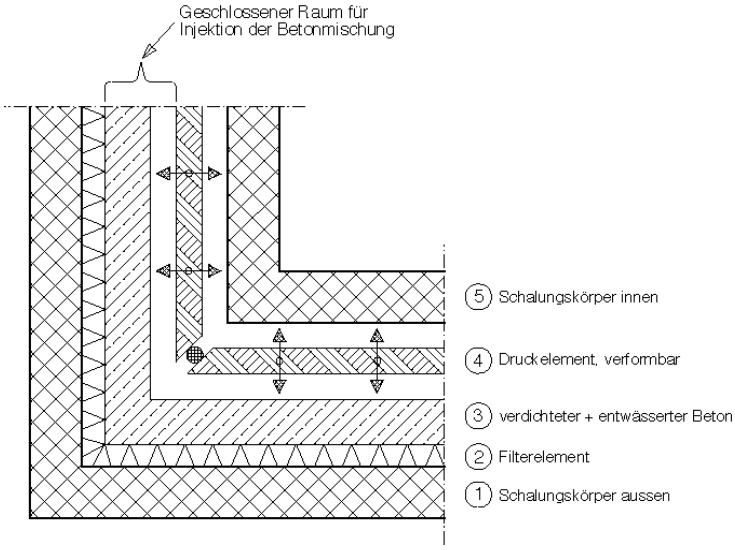

Bild 5: Prinzip: Verdichten und Entwässern

Nachdem die flüssige Betonmatrix in die allseits geschlossene Schalungsform eingefüllt ist, lässt sich die eingeschlossene Flüssigkeit unter kontrollierten Druck setzen. Die Matrix wird verdichtet und das Überschusswasser wird ausgepresst. Gleichzeitig lässt sich das ausgepresste Wasser über die Schalungsoberfläche abführen. Der schematische Vorgang ist in Bild 5 dargestellt.

Unter Berücksichtigung dieser Möglichkeiten lässt sich ein automatisch arbeitender Prozess realisieren, der folgende Randbedingungen erfüllt:

a) In eine beliebig dreidimensional geformte Schalung, die allseits geschlossen ist, wird über eine kontrollierte Injektion das flüssige Betonmaterial eingefüllt. Sämtliche Räume der geschlossenen Schalung, auch die kleinsten Zwickel werden vollständig mit Material gefüllt.

b) Die Oberflächen der Schalungsform sind mit entsprechenden Filterelementen ausgestattet. Die Durchlassöffnungen der Filter sind in ihrer Größe auf die kleinsten Partikel der Matrix abzustimmen, um nicht ein unkontrolliertes Einweichen einzelner Komponenten zu ermöglichen.
Zudem ist die Zusammensetzung der Matrix so auszubilden, dass das für die Hydratation erforderliche Wasser zurückgehalten wird (Wasserrückhaltevermögen einzelner Material-komponenten) und nicht über den Verdichtungsdruck ausgepresst wird. Schlussendlich muss die ursprünglich flüssige Matrix in einen noch erdfeuchten Zustand überführt werden. Mit entsprechenden Zusätze lässt sich dieses Ziel erreichen. Unterstützt wird dieses Verhalten durch die Verwendung von Glasfasern in einer Kombination aus integralen und aus dispersiblen Fasern. Die Fasern tragen in Form einer Drainage zur optimalen Entwässerung bei. Zudem halten sie entlang der großen Faseroberfläche Wasser zurück, dass zur Nachbehandlung der erdfeuchten Matrix genutzt wird. In dieser Funktion wirken die Glasfasern als Prozessfaser. Weiterhin stabilisieren die Fasern die erdfeuchte Matrix und tragen zu deren Formstabilität und -treue nach dem Entschalen bei. Mit dieser Aufgabe beginnt die Wirkung der Faser als Verstärkung.

c) Ausbilden der einzelnen Druckelemente bzw. -komponenten, die unter kontrollierter Kraft und Verformungssteuerung über große Flächen die flüssige Betonmatrix gleichmässig verdichten und das Überschusswasser auspressen.

d) Die Schalungsform muss so gestaltet sein, dass die einzelnen Schalungselemente konfliktfrei zusammen- und auseinandergefahren werden können, ohne dass der erdfeuchte Betonkörper beschädigt wird.

Um das Prinzip dieses Verfahren zu testen und die Funktionsweise der Verdichtung und Entwässerung zu beurteilen, wurde eine in einer einfachen Schalungsform herstellbare Kastenform, bestehend aus Boden und den vier aufgehenden Wänden gefertigt. Bild 6 zeigt die geschlossene Stahlschalung mit den Anschlüssen für die Injektion und den Druck für die Entwässerung. Mit dieser manuell bedienten Konstruktion ließen sich bereits die wesentlichen Erfahrungen sammeln.

Bild 6: Geschlossener Schalkörper

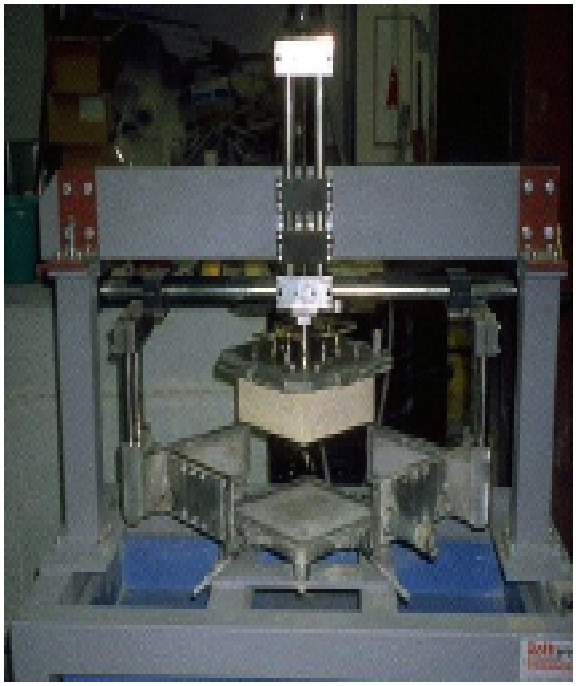

Bild 7: Kastenproduktion: Ausgefahrene Schalung

4. AUTOMATISIERUNG DER EINZELNEN VORGÄNGE ALS GRUNDLAGE FÜR DIE SERIELLE FERTIGUNG

Die gesammelten Erfahrungen ermöglichten den nächsten Schritt, die einzelnen Vorgänge innerhalb eines kontinuierlich ablaufenden Prozesses zu integrieren.
Die einzelnen Vorgänge lassen sich innerhalb einer programmierbaren Steuerung so erfassen, dass ein geordneter Ablauf für die Produktion, und somit ein Taktverfahren entsteht.
Die angemachte Mischung fällt in einen Vorratsbehälter der Pumpe. Diese fördert die erforderliche Menge in die geschlossene und automatisch verriegelte Schalungsform. Der Beton wird verdichtet und entwässert. Das Überschusswasser wird abgeführt. Der erdfeuchte Beton wird druckentlastet, die Schalungsteile lassen sich kontrolliert über Kolbenelemente verfahren,

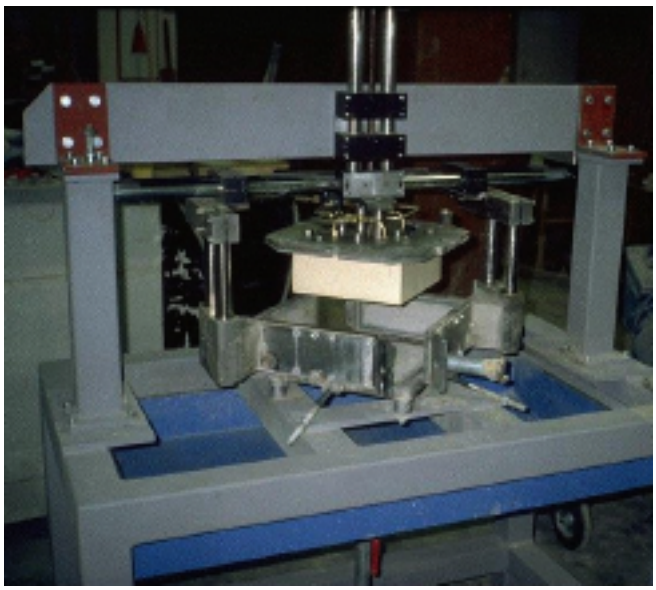

Bild 8: Kastenproduktion: Zusammenfahren der Schalungskörper

Bild 9: Ausgeschalter Kasten in erdfeuchtem Zustand

womit der erdfeuchte Betonkörper allseits von der Schalung befreit wird. Das fertige Produkt wird mit Hilfselementen zur restlichen Aushärtung von der Fertigungsplattform in ein entsprechendes Regalsystem verschoben.

Auf diese Weise entsteht ein Taktverfahren zur seriellen Herstellung dreidimensional geformter Körper aus Feinbeton.

Zu diesem Zweck wurde eine Maschine konstruiert mit den einzelnen Schalungselementen, die entlang geführter Wege kontrolliert verfahren werden können. Bild 7 zeigt die Konstruktion mit der Schalungseinheit für eine zu fertigende Kastenform. Die einzelnen Schalungsteile wie Aussen- und Innenschalung sind auseinandergefahren. In diesem Zustand kann der auf der Plattform stehende erdfeuchte Betonkörper seitlich verfahren werden. Die sichtbare, mittig angeordnete Plattform bildet den Boden des späteren Kastens. Innerhalb der Plattform und in den Wänden der Aussenschalung sind die Filter angebracht. Innerhalb des inneren Schalungskörper, der von oben eingefahren wird, ist die gesamte Mechanik für den aufzubringenden Druck untergebracht.

Über die horizontalen und vertikalen Gestänge wird die äussere bzw. die innere Schalungsform verfahren. Bild 8 zeigt die Konstruktion während des Schliessens der Schalung.

Das Ergebnis dieses Prozesses ist eine Kastenform mit Abmessungen von 25 x 25 cm im Grundriss und seitlichen Wänden mit einer Höhe von 20 cm. Die Stärke von Bodenplatte und Wände beträgt 8 mm. Bild 9 zeigt den Betonkörper in erdfeuchten Zustand unmittelbar nach der Entschalung, bereits auf einer Folie seitlich verschoben. Die Zeitspanne zwischen dem Einbringen der flüssigen Matrix bis zu dem dargestellten Zustand betrug nur wenige Minuten.

5. VERSTÄRKUNG DER DÜNNWANDIGEN BAUTEILE MIT TEXTILER BEWEHRUNG

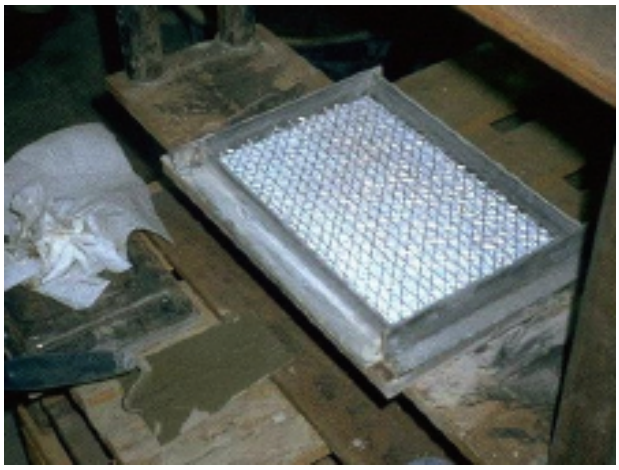

Bild 10: Einlage der Textilbewehrung

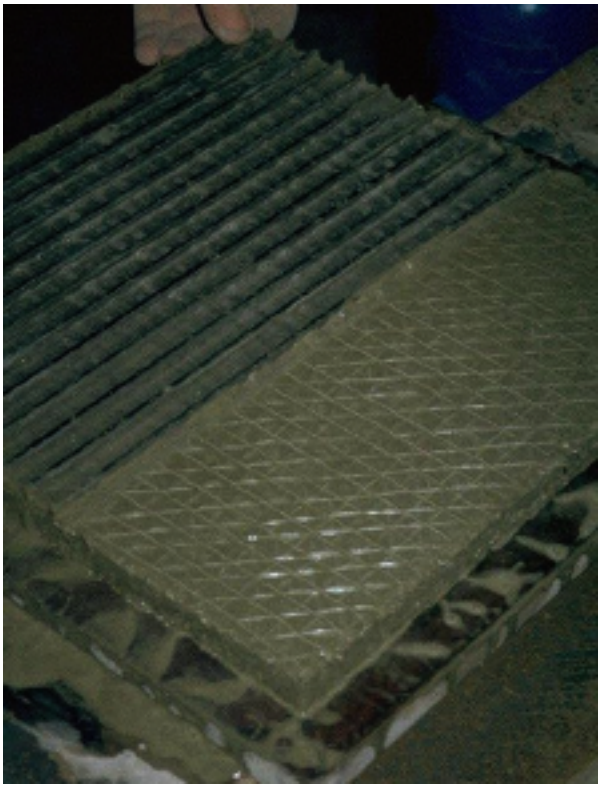

Bild 11: Oberflächennahes Textil - eingebettet

Wie bereits vorgängig erwähnt, dient eine in geringer Dosierung der Feinbetonmatrix beigefügte Glasfaser vorderhand als Prozessfaser, anschließend jedoch als Verstärkungsfaser innerhalb des „grünen Betons“ und schlussendlich in der erhärteten Matrix. Der Festbeton wird dank der Glasfaser zäher und verhilft zu einer großen Schlagzähigkeit, die insbesondere im rauhen Baustellenalltag von großer Bedeutung ist. Zudem vergrößert die Glasfaser die Biegezugfestigkeit und verleiht somit dem Baukörper einem größeren Widerstand.

Eine weitere Steigerung des Widerstandes lässt sich mit der Verwendung einer textilen Bewehrung erreichen. Innerhalb der dünnen Wandungen des Bauteils lässt sich eine für den zwei- bzw. dreidimensionalen Körper konfektionierte textile Bewehrung mit entsprechenden Hilfsmitteln an definierte Orten positionieren. Vorteile für den Prozess und für das fertige Produkt bietet der oberflächennahe Einbau des Textils. An einer Seite der Schalung befestigt, muss das Textil die Verbindung mit der Betonmatrix eingehen. Das vorgestellte Fertigungsverfahren unterstützt diese Möglichkeit, indem die flüssige Matrix in das Textil gepresst wird. Zudem wird der Entwässerungsvorgang dazu genutzt, das Textil ausreichend zu benetzen und mit Zementleim zu umhüllen, um einen ausreichenden Verbund mit dem Beton einzugehen. Bild 10 zeigt die Einlage einer textilen Bewehrung in eine einfache Plattenform. Nachdem die Matrix gepresst wurde, lässt sich die Deckschalung mitsamt dem Filter seitlich über die fertige Bauteiloberfläche entfernen. Erkennbar ist die oberflächennahe textile Bewehrung, die dank dem Zementleim einen Verbund mit der Matrix eingegangen ist (Bild11).

6. ERFAHRUNGEN MIT DER HERSTELLTECHNIK UND WEITERE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

Das vorgestellte Produktionsverfahren hat die Erwartungen erfüllt, dünnwandige Bauteile mit beliebiger dreidimensionaler Geometrie innerhalb eines kurzen Zeitintervalls herzustellen. Die aufwendige Schalungsform kann mit großer Wiederholung genutzt werden und lässt sich somit bei großer Stückzahl amortisieren. Die einzelnen Vorgänge sind automatisier- und steuerbar. Somit reduzieren sich die Lohnkosten erheblich.
Dank der für diesen Fertigungsvorgang speziell entwickelten Betonmatrix und dem Fertigungsverfahren, das optimal verdichtet und das Überschusswasser reduziert, entsteht zugleich ein Beton mit höchsten Eigenschaften. Der Festbeton ist äußerst dicht, hat hohe Festigkeiten, ist robust und schlagzäh. Das sind alles Eigenschaften, die einen dauerhaften Beton ausmachen.

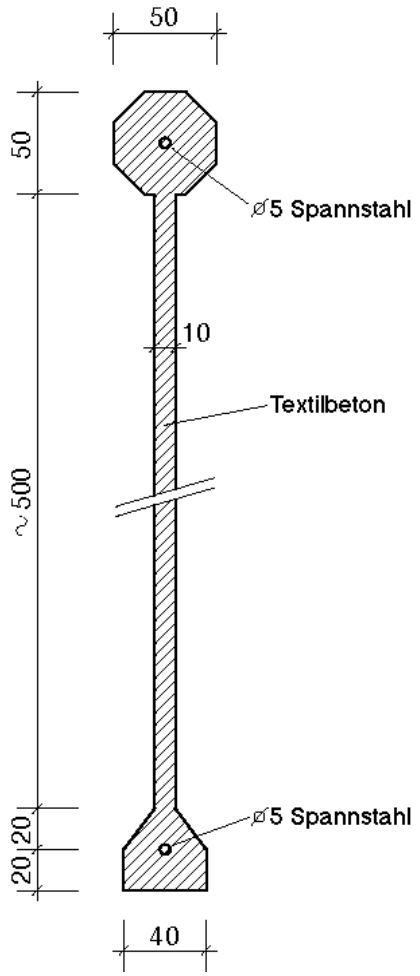

Bild 12: Dünnwandiges Bauteil aus Textilbeton mit Vorspannung

So lässt sich dieses dünnwandige Bauelement auch erfolgreich nutzen in Kombination mit dem an Ort eingebrachten Beton. Beispielsweise kann eine als integrierte Schalung wirkende Platte die Aussenhaut einer Betonfläche bilden, und somit den aggressiven Angriffen der Umwelt entgegenwirken.
Realisierbar ist auch die direkte Integration einer Stahlbewehrung innerhalb des dünnwandigen Bauteils aus Textilbeton. Die dichte Matrix erhöht den Widerstand gegenüber eindringenden flüssigen bzw. gasförmigen Stoffen und schützt somit den Stahl erfolgreich vor Korrosion. Geringere Betonüberdeckungen werden damit möglich. Dünnwandige Bauteile ließen sich an diskreten Stellen verdicken, um dort eine Stahleinlage mit der gewünschten Überdeckung einzubauen (Bild 12). Am wirkungsvollsten ist eine vorgespannte Stahleinlage, welche die dünnwandigen Bauteile zugleich unter eine hohe Druckspannung setzt, um somit sowohl den Biege- als auch den Schubwiderstand zu vergrößern. Dünnwandige Bauteile werden auf diese Weise zu äussert leistungsfähigen Tragelementen. Leicht, schlank und tragfähig sind derartige Bauteile und somit für eine große Palette von Anwendungen prädestiniert. Als ein mögliches Beispiel sei der tragfähige, leichte und dünnwandige Rolladenkasten genannt.