

Anwendung der Vorspannung

Th. Friedrich

Domostatik AG Zürich, Schweiz

Vortrag gehalten an der Tagung: "DBV-Arbeitstagung - Beton als Schutz gegen wassergefährdende Stoffe"; Hamburg 15. Oktober 1997

und veröffentlicht in den Tagungsunterlagen "Beton als Schutz gegen wassergefährdende Stoffe" DBV-Arbeitstagung;
Deutscher Beton-Verein E. V. 1997

ANWENDUNG DER VORSPANNUNG

Th. Friedrich

Domostatik AG Zürich, Schweiz

1. Anwendungsgrenzen von Stahlbeton

Beton mit Stahleinlagen hat sich in der Vergangenheit als tragendes Bauelement hervorragend bewährt. Darin liegt die gegenüber anderen Baustoffen unangefochtene Marktstellung von Stahlbeton begründet.

In den Anfängen des Stahlbetons galt das Interesse der Konstrukteure den ungeahnten Möglichkeiten, den Beton zu formen und eine ausreichende Tragfähigkeit bereitzustellen. Im Blick auf diese überragenden Eigenschaften, hat man das Verhalten dieses Baustoffs im Gebrauchszustand teilweise vernachlässigt. Die Folge davon waren Probleme mit dem Aussehen und der Dauerhaftigkeit der Betonstrukturen. Diese dem Image des Betonbaus abträglichen Erscheinungen haben zu verstärkten Anstrengungen geführt, das Verhalten der Betonkonstruktionen im Gebrauchszustand zu verbessern. Heutzutage werden Entwurf und Konstruktion von Betonbauwerken bestimmt durch die Anforderungen an Dauerhaftigkeit, Funktionstüchtigkeit und Aussehen des Tragwerks. Somit sind diese Anforderungen oftmals bestimmend für die Dimensionierung der Bauelemente. Um das zu erreichen, wurden Grenzwerte in Bezug auf Risse, Verformungen, Schwingungen, Dichtheit und weitere Faktoren für die Beständigkeit der Betonkonstruktionen im Gebrauchszustand festgelegt.

Ein entscheidendes Kriterium ist die Rissbildung, da sie massgeblichen Einfluss auf Dauerhaftigkeit (z.B. Korrosion der Bewehrung), Funktionstüchtigkeit (z.B. Dichtheit) und Aussehen des Tragwerks hat. Dementsprechend konzentrieren sich nahezu alle Anstrengungen und Massnahmen zur Erzielung einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit auf die Begrenzung der Risse im Beton. Dieses lässt sich mit folgenden Massnahmen erreichen [1]:

- Betontechnologische Massnahmen;
- zweckmässige konstruktive Durchbildung;
- Anordnung einer der Beanspruchung entsprechenden Betonstahlbewehrung;
- Aufbringen von Vorspannung;

In nahezu allen Veröffentlichungen die das genannte Thema behandeln, wird die Möglichkeit der Anwendung von Vorspannung aufgeführt. In der Baupraxis bleibt die Umsetzung jedoch auf wenige Ausnahmen beschränkt. Dies ist um so unverständlicher, da die Vorspannung als einzige Massnahme Risse im Beton verhindern bzw. dauerhaft begrenzen kann.

Die Entwicklungen auf dem Gebiet einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit von Betonkonstruktionen haben verstärkt dazu beigetragen, das Image von Beton erheblich aufzuwerten. Gleichzeitig haben diese Anstrengungen auch dazu geführt, neue Anwendungsgebiete für das Bauen mit Beton zu ermöglichen. Dazu zählt ohne Zweifel die Entwicklung, Beton als Schutz gegen wassergefährdende Stoffe einzusetzen. Einer Betonkonstruktion eine Trag- und Schutzfunktion ohne weitere Massnahmen wie beispielsweise einer Abdichtung, zuzuweisen, ermöglicht ein robustes, dauerhaftes, und nicht zuletzt ein wirtschaftliches Bauen. Mit dieser sogenannten Einschichtkonstruktion lassen sich alle bekannten Probleme der Zweischichtkonstruktion umgehen.

Voraussetzung für eine sichere Schutzfunktion ist die Gewährleistung der Dichtheit. In solch einer Konstruktion dürfen keine Trennrisse auftreten, Biegerisse sind in ihrer Auswirkung auf ein Minimum zu begrenzen. Die Anwendung von Vorspannung ist in der Lage, gegenüber den vorgenannten Massnahmen, dies zu leisten.

2. Rissbildungsmechanismen von Betonelementen

Beton besitzt im Gegensatz zu einer hohen Druckfestigkeit nur eine geringe Zugfestigkeit. Überschreiten die durch äussere Einwirkungen am homogenen Betonquerschnitt hervorgerufenen Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons, so bildet sich ein Riss. Eine in der Zugzone vorhandene Bewehrung kann entsprechend ihrer Anordnung und Grössenordnung die Rissbreite begrenzen und auf mehrere fein verteilte Einzelrisse verteilen. Die gesamte Zugkraft wird beim Überschreiten der Zugspannung frei und wird vom Stahl übernommen. Ist die vorhandene Bewehrung unterdimensioniert, oder ist keinerlei Bewehrung vorhanden, entsteht ein breiter Riss.

Bei äusseren Einwirkungen unterscheidet man zwischen Einwirkungen aus Verformungen und aus Lasten. Werden die Verformungen behindert, entstehen proportional zu den Steifigkeiten Kräfte. Während sich die Schnittkraftverteilung infolge der Einwirkungen aus Lasten relativ einfach ermitteln lässt, ist die Ermittlung der Einwirkung aus behinderter Verformung bedeutend aufwendiger. Dazu ist die Grösse und die Verteilung der Verformungen zu bestimmen, die Steifigkeit oder die mögliche Verformungsfähigkeit zu kennen sowie die jeweilige Behinderung zu lokalisieren. Verformungen bzw. Dehnungen entwickeln sich bereits im jungen, erhärtenden Beton und können in dieser Phase ohne jegliche Einwirkungen von Lasten zu Rissen führen und damit das Betongefüge stören. Am ausgehärteten Beton wirken i.d.R. gleichzeitig Einwirkungen aus äusseren Lasten und aus behinderten Verformungen. Entsprechend dem Zeitpunkt ihres Auftretens unterscheidet man zwischen Risse im jungen Beton, die ausschliesslich durch behinderte Verformungen entstehen und Risse im alten Beton, die durch die kombinierte Wirkung von Lasten und behinderten Verformungen entstehen [Bild 1].

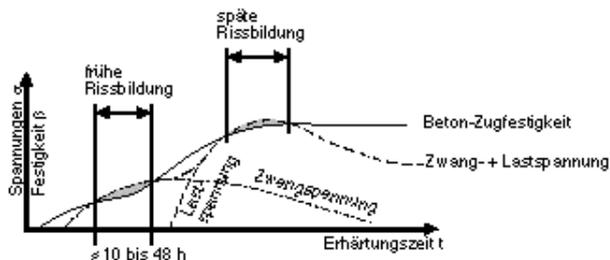


Bild 1: Entwicklung der Betonzugfestigkeit

3. Begrenzung der Rissbildung durch Vorspannung

Risse im Beton können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Einzig mit einer kräftigen Vorspannung (volle Vorspannung) liessen sich sämtliche Risse überdrücken. Aus wirtschaftlichen Gründen scheidet eine derart hoch dimensionierte Vorspannung aus. In vielen Fällen genügt jedoch bereits eine teilweise Vorspannung, die die Vorzüge einer Betonstahlbewehrung mit einer mässigen Vorspannung kombiniert. Erfahrungsgemäss liefert eine leichte Vorspannung in der Grössenordnung von $\approx 0.5 - 2.0 \text{ N/mm}^2$ bereits eine ausreichende Druckspannungsreserve, um Risse zu vermeiden oder in ihren Auswirkungen zu begrenzen.

Die Wirkung der Vorspannung ist zweifach. Die im Querschnitt exzentrisch angeordnete Spannkraft wirkt mit dem Moment bzw. Umlenkraft den äusseren Einwirkungen entgegen und reduziert diese teilweise oder vollständig. Die vorhandene Normalkraft liefert zusätzlich eine gleichmässige Druckspannung, die von einer zentrischen Zugbeanspruchung vorgängig aufgebraucht werden muss. Die absolute Grösse des Zugwiderstandes wird auf diese Weise durch die Druckspannungsreserve [Bild 2] vergrössert.

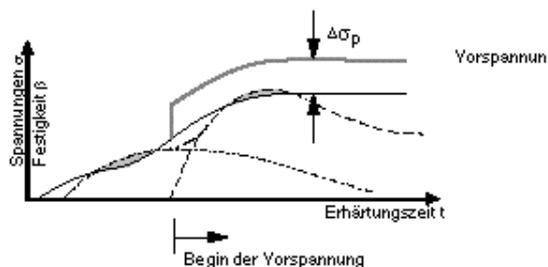


Bild 2: Vergrösserung der Betonzugfestigkeit durch Vorspannung

Die Wirkung der Vorspannung ist jedoch auf die Rissbildungsphase des alten Betons begrenzt, da zur Einleitung der Spannkraft eine minimale Betonfestigkeit vorhanden sein muss. Damit scheidet deren positive Wirkung auf die Frürrissbildung aus. Allenfalls lassen sich bereits vorhandene Risse überdrücken, um deren Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit zu begrenzen.

4. Anwendungen mit Hilfe der Vorspannung

Um die Wirkung der Vorspannung optimal zu nutzen, sollten die Konstruktionen in ihren Querschnittsabmessungen entsprechend schlank entworfen werden. Je schlanker der Querschnitt, desto weniger Vorspannkraft muss aufgebracht werden, um die geforderte Druckspannungsreserve zu erreichen. Damit lässt sich ein wirtschaftlicher Einsatz der Vorspannung erzielen. Im Extremfall dient die Platte als elastisches, dichtes Tuch aus Beton mit der entsprechenden Steifigkeit.

Weitergehende, als von dem vorgespannten Betonquerschnitt aufgenommene Beanspruchungen, sind einer darunterliegenden Tragschicht zuzuweisen. Bei anderen Baukonstruktionen wie Scheiben und Schalen ist die dreidimensionale Lastabtragung konsequent heranzuziehen, um mit möglichst schlanken Querschnitten auszukommen. Entsprechend ist die Vorspannung möglichst in allen Richtungen einer Lastabtragung anzuordnen.

Ein Vorzug bei der Anwendung von Vorspannung liegt in der Möglichkeit, Bauwerke ohne Bewegungsfugen zu erstellen. Es entfallen dadurch die bekannten Probleme mit den Fugen, die schlussendlich stets eine Schwachstelle darstellen. Fugen an Abschnittsgrenzen werden mit Hilfe von angekoppelten Spanngliedern überdrückt und stellen keinerlei

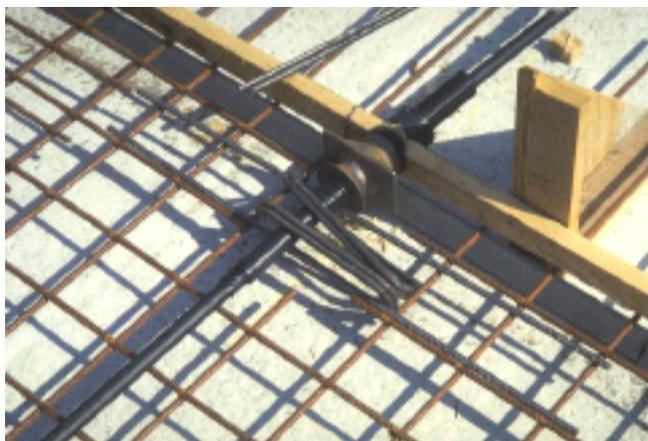


Bild 3: Verankerung der Spannglieder am Plattenrand

Gefahr für die Dichtheit dar. Auch in statischer Hinsicht bieten fugenlose Bauteile Vorzüge. Die gegenüber Innenbereichen einer Platte erhöhten Eck- und Randbeanspruchungen durch rollende Einzellasten bleiben somit nur auf den einzigen Rand der grossen, fugenlosen Plattenfläche begrenzt. Das wiederum führt zu Plattenkonstruktionen, die weitgehend ohne schlaaffe Bewehrung auskommen können.

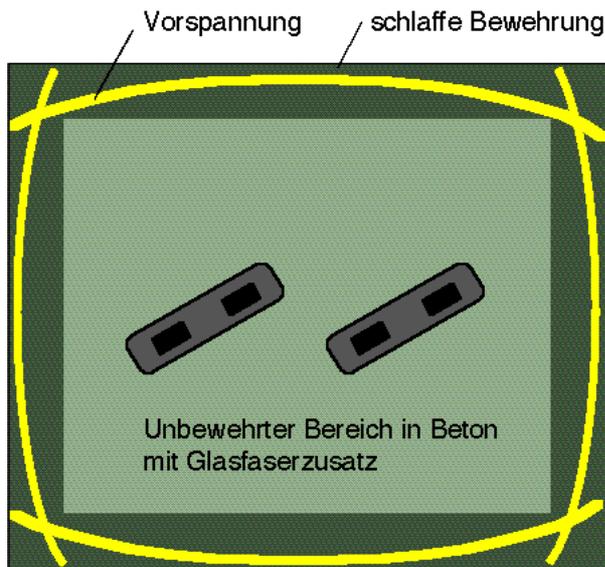
Für schlanke Querschnitt wird eine in ihren Abmessungen kompakte Vorspannung mit entsprechender Verankerung erforderlich. Für derartige Anwendungen steht die Monolitze als verbundlose Vorspannung zur Verfügung. Die Spannglieder zeichnen sich durch ihre flexible Handhabung und die kompakten Ankerkörper aus [Bild 3]. Sind grössere Spannkraften bei entsprechenden Querschnittsabmessungen gefordert, kommt die Vorspannung mit Verbund zur Anwendung.

4.1 Vorgespannte Platten



Bild 4: Flächenvorspannung mit Monolithenspannglieder

Für grosse, fugenlose Flächen hat sich die Anordnung der Vorspannung in gleichmässigen Abständen sehr bewährt. Entsprechend der geforderten Spannkraft werden einzelne Monolitzen in regelmässigem Abstand in der Platte in beide Richtungen angeordnet [Bild 4]. An den Abschnittsgrenzen der Betonieretappe werden die Spannglieder i.d.R. verankert und für den nächsten Abschnitt angekoppelt. Die einzelnen Betonierabschnitte lassen sich dann individuell vorspannen, um die geforderte Druckspannung möglichst rasch auf den erhärtenden Betonquerschnitt aufzubringen.



Für kleinere bis mittelgrosse Flächen ist eine konzentrierte Anordnung der Vorspannung effektiver. Dabei wird von der durch die bogenförmige Anordnung der Spannkabel erzeugten Umlenkkräfte Gebrauch gemacht. Diese wirken auf die Ränder der Platte. Eine ringförmige Anordnung entlang den Begrenzungsändern setzt die einzelnen Kraftkomponenten ins Gleichgewicht [Bild 5]. Mit dieser Anordnung der Vorspannung kann die Platte weitgehend ohne schlaaffe Bewehrung ausgeführt werden. Nur im Randbereich ist aus statischen Gründen und zur Aufnahme der Krafteinleitungskräfte eine obere und untere Bewehrung in Form von Standardmatten erforderlich. Der restliche Plattenbereich ist frei von jeglicher Bewehrung. Mit Vorzug wird ein Faserbeton in Form von anteilmässigen Glasfasern eingebracht, um eine mögliche Frührisbildung [2] zu unterbinden.

Bild 5: Vorspannung für Standardflächen

4.2 Vorgespannte Schalen (Kombination von Scheibe und Platte)

Bei den im Bauwesen häufig vorkommenden Schalenkonstruktionen handelt es sich i.d.R. um die Wirkung von zusammengesetzten Einzeltragelementen wie Platte und Scheibe. Eine eindeutige Zuordnung der Tragwirkungen sowohl für die Scheibe als auch für die Platte wird damit möglich. Die häufigste Art der Bauwerke besteht aus einer Bodenplatte und darauf aufgehenden Wandscheiben. Die Platte ist nur als solche zu bemessen, ebenso wie die Wandscheibe nur in ihrer Tragwirkung als Scheibe zum Gesamttragverhalten beiträgt.

Dazu gehören z.B. lange Trogquerschnitte, welche als Unterführung oder in Form einer Spezialkonstruktion als Was-

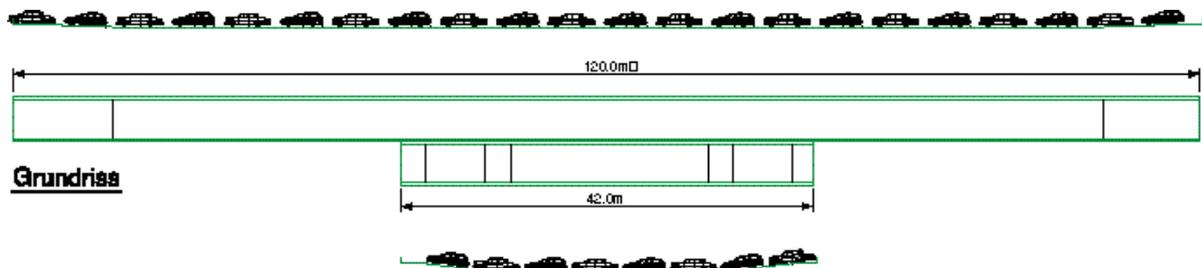


Bild 6: Bosch, Testgelände Boxberg - Fugeelose Wasserbecken

serbecken genutzt werden. Auf dem Testgelände der Firma Bosch werden zwei Wasserbecken mit Längen von $L_1=42.0$ m bzw. $L_2= 120$ m errichtet [Bild 6]. Zu Testzwecken werden die mit Wasser gefüllten Becken für die Durchfahrt von PKW genutzt. Die Becken sind fugeelos und die Anforderungen sehen dichte Konstruktionen vor. Abschnittsweise werden zuerst Bodenplatte und anschliessend die beiden Trogwände erstellt. Um die Auswirkungen der Behinderung der Wände durch die vorgängig erstellte Bodenplatte zu begrenzen, wurde ein Faserbeton mit Glasfaserzusatz von ca. 4.3 kg/m^3 verwendet, und einzelne Spannglieder der Bodenplatte gleichzeitig mit denjenigen der Wand vorgespannt. Die sonst übliche Bewehrung für den Lastfall "Abfliessen der Hydratationswärme" konnte dank dieser Massnahme erheblich reduziert werden. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die hier angewendete Kombination von Glasfasern im Beton und Vorspannung äusserst attraktiv. Ein Eindruck von den fugeelosen Abmessungen der Becken vermittelt die vollständig bewehrte Bodenplatte in Bild 7.

Für die Vorspannung der Wände hat sich die Monolitenvorspannung ebenfalls hervorragend bewährt. Dank deren einfacher Handhabung lassen sich die dünnen Einzelspannglieder an der vorhandenen Bewehrung der Wände befestigen [Bild 8]. Dank der konzentrierten Anordnung der Spannglieder können auch vorhandene Hindernisse wie Aussparungen in der Wand leicht umgangen werden.



Bild 7: Bosch, Testgelände Boxberg - Vorspannung der Bodenplatte



Bild 8: Anordnung der Wandvorspannung

Für Beckenkonstruktionen mit höchsten Anforderungen an die Dichtheit, werden Platten- und Scheibenelemente in zwei Richtungen vorgespannt. Für das mit chemischen Flüssigkeiten zu befüllende Rückhaltebecken [Bild 10] der Firma Hoechst AG in Frankfurt, wurde eine reine Betonkonstruktion vorgezogen. Entsprechend musste die Vorspannung derart angeordnet werden, dass unter Kombination aller Lastfälle die erlaubten Zugspannungen nirgends überschritten werden. Zu diesem Zweck wurde die Bodenplatte in Längs- und in Querrichtung vorgespannt. Die Wandscheiben wurden ebenfalls in horizontaler und in vertikaler Richtung vorgespannt. Für die relativ kurzen Abschnitte der Bodenplatte und der Wände wurde die Vorspannung mit einer Schlaufenverankerung angeordnet. Aus den sonst kurzen Spannmitgliedern werden auf diese Weise wirtschaftliche Kabeleinheiten erzeugt, die dank des geringeren Anteils von Spannankern zur Wirtschaftlichkeit beitragen. Die Schlaufenverankerung hat bei der vertikalen Wandvorspannung zudem den Vorteil, dass der gewünschte Bogen in Form eines Leerrohres bereits in die vorgängig zu betonierende Bodenplatte eingelegt werden kann [Bild 9].

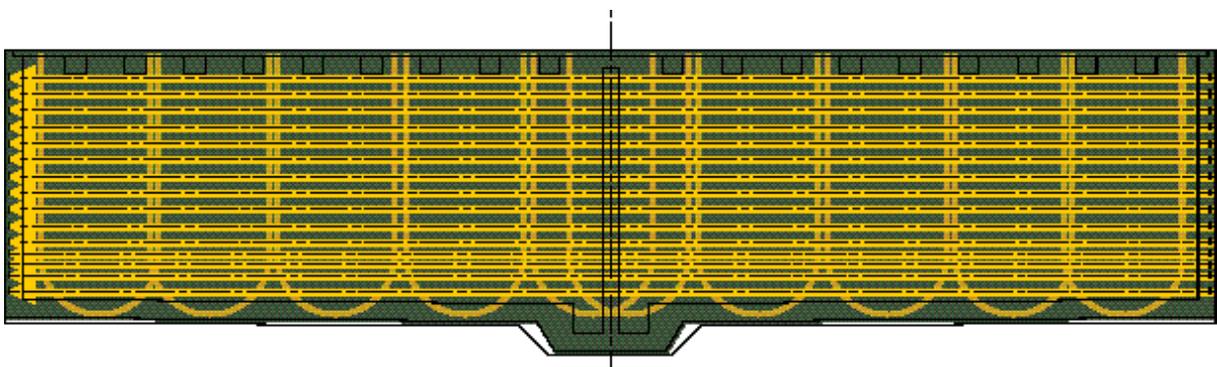


Bild 9: Rückhaltebecken Hoechst AG - Anordnung der Wandvorspannung

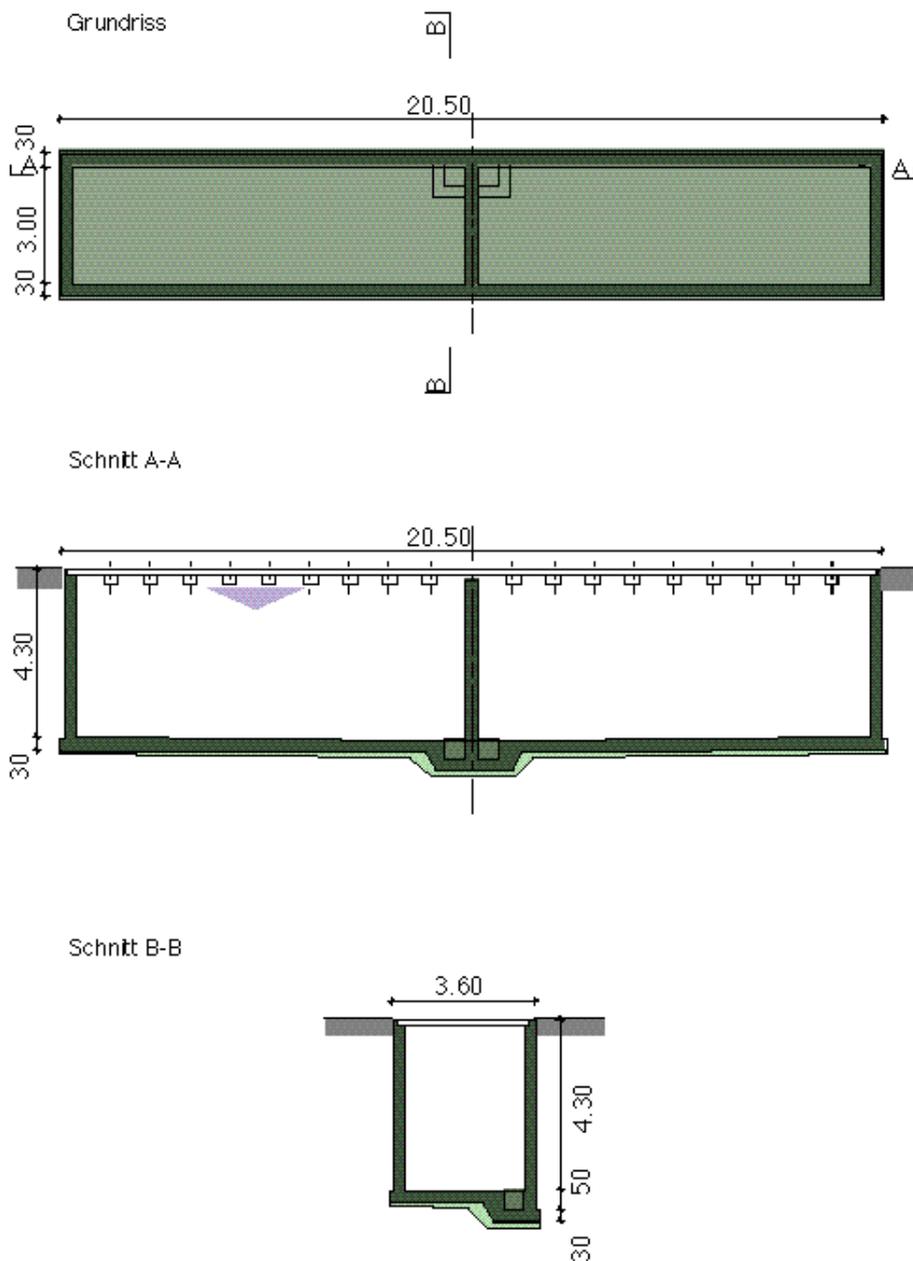


Bild 10: Rückhaltebecken Hoechst AG

Becken- bzw. Behälterkonstruktionen können sowohl in runder als auch in rechteckiger Form erstellt werden. Die Wirkung der Vorspannung bei Rundbehältern ist offensichtlicher, vergleichbar den Stahlreifen bei der Fassvorspannung. Für die Ausführung von Interesse ist jedoch die abschnittsweise Erstellung der Wand mit direkter Vorspannung der Einzelabschnitte bevor der Ring geschlossen ist. Angepasst an die ringförmige Anordnung der Vorspannung in den Wänden, bietet sich diese Form aus ausführungstechnischen Gründen auch für die Bodenplatte an. Unterhalb der aufgehenden Wand wird die Vorspannung in mehreren Lagen übereinander ringförmig angeordnet. Die Länge der Spannglieder orientiert sich an den Abschnittslängen der Wände. Um eine geschlossene Ringkraft in der Bodenplatte zu gewährleisten, überlappen sich die Spannglieder. Die Verankerung der Spannglieder der Bodenplatte erfolgt in regelmäßigen Abständen entlang des Umfangs der Platte [Bild 11].

Rechteckige Behälter erhalten in den Wänden entsprechend deren kombinierte Tragwirkung als Scheibe und als Platte eine horizontale und eine vertikale Vorspannung. Auf letztere kann aufgrund der Ringwirkung in den Rundbehältern verzichtet werden. Für die vertikale Vorspannung wird auf die vorgängig beschriebene Schlaufenverankerung in der Bodenplatte zurückgegriffen. Die Abstimmung des Spannvorgang von einzelnen Spanngliedern der Bodenplatte unterhalb des Wandfusses mit den horizontalen Spanngliedern in den Wänden ist konsequent einzuhalten [Bild 12].



Bild 11: Rundbehälter: Vorspannung für Bodenplatte und Wände



Bild 12: Rechteckbehälter: Vorspannung für Bodenplatte und Wände

Mit den aufgezeigten, ausgeführten Objekten wurden die Möglichkeiten für eine optimale Anordnung der Vorspannung aufgezeigt. Entsprechend ihrer Wirkung als Platte, Scheibe oder als Kombination ist die Vorspannung einzusetzen.

5. Anwendung der Vorspannung als optimales Verfahren

Mit der Anwendung der Vorspannung lassen sich die gestellten Anforderungen an die Dichtheit von Bauwerke zum Schutz gegen wassergefährdende Stoffe vortrefflich erfüllen. Nachweislich ist nur die Massnahme "Vorspannung" in der Lage, Risse zu verhindern oder derart zu begrenzen, dass die Dichtheit gewährleistet ist. Um die Methode erfolgreich in die Praxis umzusetzen, bedarf es der Lösung einiger konstruktiver Besonderheiten, damit das Verfahren rationell und wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Diesbezüglich wurden mit den ausgeführten Objekten einige Hinweise gegeben.

Durch die Erfahrung mit der Anwendung von Faserbeton mit Vorspannung kristallisiert sich heraus, dass diese Kombination zukunftsweisend sein wird. Vorteile in der Ausführung kompensieren die leicht erhöhten Materialpreise voll auf. Langzeitvorteile in der Nutzung durch Wegfall von Unterhaltsarbeiten z.B. bei den Fugen und bei der Abdichtung machen die unter Umständen erhöhten Erstellungskosten mehr als wett. In der Beurteilung dieser wirtschaftlichen Aspekte ist jedoch mehr der unternehmerisch denkende Entscheidungsträger denn derjenige mit Händlermentalität gefragt. Es bleibt zu hoffen, dass wieder mehr Entscheidungsträger mit Unternehmerqualitäten am Bauprozess beteiligt werden.

Literaturhinweise:

- [1] DBV-Merkblatt: Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau
- [2] Th. Friedrich: A new Method of Constructing a Crack-free Concrete Member. 22nd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore 1997