

# Risiken bei Konstruktion und Ausführung von wasserundurchlässigen Betonkonstruktionen für hochwertige Nutzung

Dipl.-Ing. C. Flohrer, HOCHTIEF Construction AG, Mörfelden-Walldorf

## 1 Einleitung

„Weiße Wannen“ sind Betonbaukörper, die ein- oder beidseitig Wasserdruck ausgesetzt sind und die neben der Lastabtragung auch die Funktion der Abdichtung zu übernehmen haben. Beispiele sind Behälter, Tunnelbauwerke, Tröge, Becken oder Tiefgeschosse in Büro, Industrie- oder Wohngebäuden.

Im Gegensatz zu „schwarzen Wannen“ muss dabei der Beton selbst sowie die Betonkonstruktion wasserundurchlässig sein.

Zur Erzielung der Wasserundurchlässigkeit einer Betonkonstruktion sind folgende Kriterien zu erfüllen:

- Betontechnologische Maßnahmen zur Erzielung eines wasserundurchlässigen Betons und zur Minimierung von Zwangsspannungen
- Bemessung der Stahlbetonkonstruktion mit Steuerung des Rissabstandes und der Rissweiten unter Berücksichtigung der Last- und Zwangsspannungen
- Planung und konstruktive Durchbildung der Stahlbetonkonstruktion, insbesondere Fugenplanung und Planung von Fugendichtungsmaßnahmen
- Sachgerechte Ausführung der Betonbauteile aus wasserundurchlässigem Beton

Werden auf wasserundurchlässigen Bauteilen weitere Wand- oder Bodenaufbauten für eine hochwertige Nutzung der so umschlossenen Räume aufgebracht, sind die Transportmechanismen der Feuchtigkeit und deren Folgen für das Bauwerk zu berücksichtigen und erforderliche zusätzliche weitergehende Maßnahmen zu planen und umzusetzen.

## 2 Entwurfgrundsätze

Für die Planung wasserundurchlässiger Betonkonstruktionen können 3 unterschiedliche Ansätze zugrunde gelegt werden /1/.

- a) Unter wirklichkeitsnaher Berücksichtigung aller auftretenden Spannungen wird die Bewehrung derart bemessen, dass die Rissbreite so klein bleibt (i.A. 0,1-0,15 mm), dass vor Beginn der Nutzung (oder Aufbau weiterer Schichten) die Risse durch Selbstheilung abgedichtet sind.
- b) Ausnutzung aller betontechnologischen und konstruktiver und ausführungstechnischer Maßnahmen um Trennrisse weitestgehend zu vermeiden; die Bewehrung zur Steuerung der Rissbreite muss dann vorwiegend unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit und unter Berücksichtigung der Stahleigenschaften bemessen werden.
- c) Die Bewehrung wird unter Berücksichtigung üblicher Umgebungsbedingungen derart bemessen, dass Risse zugelassen werden, die Rissbreite der auftretenden Risse bezgl. der Dauerhaftigkeit begrenzt wird und die Risse planmäßig verpresst werden.

Spannungen aus äußeren Lasten ergeben lastabhängige Verformungen, die i.A. zu Biege- oder Schubrisen führen. WU-Bauteile sind so zu bemessen, dass bei Entstehung derartiger Biegerisse eine Mindestdicke der rechnerischen Druckzone von  $\min x > 5 \text{ cm}$  oder  $> 2 \times d_k$  (Größtkorn Zuschlag) verbleibt.

Die Wasserdurchlässigkeit wird jedoch wesentlich stärker durch lastunabhängige Verformungen aus Temperatur und Schwinden beeinflusst, aus denen, bei Behinderung der Verformungen zentrische Zwangsspannungen, Biegezwangsspannungen oder Eigenspannungen entstehen. Folge derartiger Spannungen können Trenn-, Biege- oder Schalenrisse sein. Trennrisse sind i.A. immer wasserführend, die Dauer des Wasserdurchtritts hängt von der Rissbreite und den Möglichkeiten für eine Selbstheilung ab.

### **3 Transportmechanismen der Feuchtigkeit**

Die Anforderung an eine weiße Wanne bezüglich der Wasserundurchlässigkeit (Dichtigkeit) können unterschiedlich sein, wie dies z.B. in DS 853 /2/ für Bauwerke der Deutschen Bahn AG oder in /1/ allgemein gültig beschrieben ist.

Zur Festlegung der zu erreichenden Wasserundurchlässigkeit des Betons ist es wichtig, Transportmechanismen der Feuchtigkeit in Beton zu kennen, da der Feuchtetransport bei einer weißen Wanne nicht durch eine Hautabdichtung unterbunden wird.

Für den Feuchtetransport gelten folgende Mechanismen:

- Wasserdurchtritt durch Risse, insbesondere Trennrisse, sowie lokale Schwachstellen
- Transport von Wasser durch die Kapillarporen
- Transport von Wasserdampf durch das Porengefüge infolge Diffusion
- Permeation/laminare Strömung aufgrund des Druckgefälles

Ein Betonbaukörper gilt nach bisherigen Vorstellungen dann als wasserundurchlässig, wenn (als Folge der genannten Transportvorgänge),

- die zur Luftseite kann hin transportierte Feuchtigkeitsmenge so klein bleibt, dass sie dort von der umgebenden Luft aufgenommen werden kann
- eine vorgegebene Leckrate nicht überschritten wird (z.B. bei Becken oder Behältern)
- durch Risse eindringendes Wasser durch planmäßige Injektion oder durch den Selbstheilungseffekt gestoppt oder verhindert wird

Als Vorteil der weißen Wanne gegenüber der Hautabdichtung wird besonders hervorgehoben, dass nicht vermeidbare kleinere Undichtigkeiten aus später durchtretendem Wasser sowie aus der Bauausführung durch nachträgliche Dichtmaßnahmen beseitigt werden können. Dazu ist jedoch erforderlich, dass die Oberflächen der Bauteile kontrollierbar und zugänglich bleiben.

#### **3.1 Wassertransport durch Risse und lokale Schwachstellen**

Der Wassertransport durch Risse in Betonbauteilen soll nach Empfehlung einiger Autoren bevorzugt durch Verwendung rissbreitensteuernder Bewehrung unterbunden werden. Dazu wird empfohlen, eine Rissbreite von 0,1 bis 0,25 mm der Bemessung zugrunde zu legen, um den Selbstheilungseffekt zu nutzen. Durch Eindringen von Feinstteilen in den Riss sowie eine oberflächige Versinterung des Risses durch Reaktion des CO<sub>2</sub> aus der Luft mit dem im Riss ausgelagerten Calciumhydroxids des Betons soll sich der Riss nach kurzer Zeit des Wasserdurchtritts verschließen. Voraussetzung für die Selbstheilung der Risse sind geringe Fließgeschwindigkeiten des Wassers, ausreichend Calciumhydroxid sowie abgeschlossene Rissbewegungen.

Erfahrungen aus der praktischen Umsetzung derartiger Konzepte zeigen, dass die geplante Selbstheilung nach kurzer Zeit nicht oder nur selten eintritt. Ursache dafür sind insbesondere Bewegungen der Rissufer, da zu dem frühen Zeitpunkt weder temperatur- noch schwindbedingte Verformungen des Betons abgeschlossen sind.

Sind Risse nicht zu vermeiden, ist ein Konzept, bei dem planmäßig breitere Risse zugelassen und diese später durch Injektion abgedichtet werden wirtschaftlicher und führt zum gleichen Ergebnis. Die Breite der Risse ist dann insbesondere unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit der Bauteile zu planen und wird im Regelfall bei 0,25 bis 0,3 mm liegen.

Risse sind solange unkritisch, sofern sie vor der endgültigen Nutzung bzw. dem Aufbringen weiterer Schichten aufgetreten sind und möglichst ihre Rissbreite nur geringfügig ändern.

Eine weitere unabdingbare Voraussetzung ist, dass die Beanspruchung durch das drückende Wasser (möglichst mit dem Bemessungswasserstand) zum Zeitpunkt des Nutzungsbegins bzw. dem Aufbringen weiterer Schichten vorhanden ist. Nur dann sind die wasserführenden Risse erst vollständig zu erkennen und können planmäßig abgedichtet werden.

Diese Voraussetzung ist in der Praxis nur selten gegeben. Häufig werden weiße Wannen vorsorglich für später möglicherweise auftretendes drückendes Wasser geplant. Ebenso häufig ist während der Bauphase das Grundwasser abgesenkt und somit die Wasserbelastung nicht vorhanden, dennoch werden weitere Schichten (Estriche, Beläge usw.) auf die Bodenplatten bereits aufgebaut.

Besonders kritisch sind planmäßige Belastungsschichten auf wasserundurchlässigen Bodenplatten zur Herstellung der Auftriebsicherheit der Gebäude einzuschätzen, weil diese Schichten zwingend vor der Wasserbelastung aufgebracht werden müssen und somit die Wasserundurchlässigkeit der Bodenplatten zu keinem Zeitpunkt geprüft werden kann.

Neben dem Auftreten von Rissen infolge Frühzwang (durch abfließende Hydratationswärme, chemisches Schwinden) sind insbesondere Risse oder Rissweitenänderungen aus Spätzwang zu berücksichtigen, die häufig zu Wasserdurchtritten bei bereits genutzten wasserundurchlässigen Bauwerken führen. Auch dies erfordert zwangsläufig die Zugänglichkeit der Oberflächen der wasserundurchlässigen Betonbauteile auch während der Nutzung.

Neben dem Wassertransport durch Risse ist auch ein Wassertransport durch Schwachstellen (z.B. Verdichtungsfehler, Kienester) oder entlang von Fugeneinlagen (Fugenbändern) nicht völlig auszuschließen. Vorteil ist, dass diese Fehlstellen frühzeitig, das heißt bei geringster Wasserbelastung erkannt werden können. Voraussetzung für das Erkennen derartiger Fehlstellen ist jedoch, dass eine äußere Wasserbelastung vorhanden ist.

### **3.2 Kapillarer Wassertransport, Wassertransport durch Diffusion und Permeation**

Nach bisherigen theoretischen Erkenntnissen können durch kapillaren Wassertransport, Transport infolge des anstehenden Wasserdrucks (Permeation) und Transport gasförmigen Wassers durch Diffusion geringfügige Wassermengen durch die Weiße Wanne dringen. Eine Abschätzung der durchdringenden Feuchtigkeit kann (z.B. nach /3/) durch  $Q_G = 1/d \times (Q_K + Q_P + Q_D)$  [ $g/m^2 \times d$ ] vorgenommen werden. Deshalb sind für die Beurteilung der Qualität (Erfüllung der Forderungen) einer WU-Konstruktion auch die klimatischen Bedingungen auf der trockenen Seite der weißen Wanne zu bewerten, da diese zumindest die Diffusionsvorgänge beeinflussen können.

Neuere Untersuchungen zeigen jedoch /4/, dass offensichtlich folgende Zusammenhänge gelten:

- Der kapillare Wassertransport sowie eine äußere Druckwasserbelastung führen dazu, dass die dem Wasser zugewandte Randzone des Betons bis zu einer Dicke von ca. 70 mm kapillar wassergesättigt ist, vorausgesetzt der Beton erfüllt die Eigenschaften eines WU-Betons ( $w/z < 0,6$ , besser  $\leq 0,55$ )
- Die obere Randzone des Betons bei zunächst freier Verdunstungsmöglichkeit des Überschusswassers bis zu ihrer Ausgleichsfeuchte austrocknet und anschließend auch dann

nahezu kein Wasserdampf nach innen dringt, wenn der Diffusionsstrom nach innen gerichtet ist. Dabei muss die Bauteildicke größer als die Dicke der kapillar gesättigten Schicht plus die Dicke der Verdunstungszone sein, i.A. >20 cm.

- Eine mittlere Zone mit verbleibendem Wasserüberschuss, jedoch ohne vollständige Wassersättigung und ohne wirksamen Wassertransport entsteht, wenn die Bauteildicke größer als die Summe der Dicke der kapillar gesättigten Schicht und der Dicke der Verdunstungszone ist. Dies gilt auch, wenn der Diffusionsstrom wegen des innenseitig geringeren Partialdrucks, nach innen gerichtet ist.
- Eine diffusionsdichte Beschichtung verhindert auch das Verdunsten des freien Wassers an der Betonoberfläche und reduziert die hygriisch bedingten Zugspannungen in der oberen Betonrandzone. Ein Ablösen der Beschichtung aufgrund der behinderten Diffusion kann nicht erfolgen, da der auf die Beschichtung rückwärtig einwirkende Partialdruck weit unter der üblichen Haftzugfestigkeit einer Beschichtung liegt.

Die genannten Grenzwerte hängen selbstverständlich in geringem Maße von der Betonqualität, der Nachbehandlung und den Umgebungsbedingungen ab. Die Ursache für die gegenüber theoretischen Ansätzen deutlich reduzierte Wasserdampfdiffusion ist mit dem dauerhaft feuchten Kernbeton zu erklären, der den Wasserdampftransport nennenswert bremst.

Der Austrocknungsbereich entsteht durch das Ausdiffundieren des Überschusswassers aus den Kapillarporen des Betons im oberen Randbereich, zunächst durch Kapillartransport und Diffusion, später nur durch Diffusion. Diese Austrocknung findet jedoch nicht nur bei Weißen Wannen sondern bei jedem Betonbauteil statt. Deshalb ist auch bei Schwarzen Wannen diese Austrocknung der oberflächennahen Randbereiche des Betons wirksam, und somit bei einer hochwertigen Nutzung zu berücksichtigen.

## **4 Planung von WU-Konstruktionen**

### **4.1 Betontechnologische Maßnahmen**

Als betontechnologische Maßnahmen für die Herstellung von wasserundurchlässigen Betonbauwerken sind zu berücksichtigen:

- Begrenzung des Wasser-Zement-Werts zur Reduzierung der Kapillaraktivität des Betons
- Minimierung der Eigenspannungen infolge Temperatur (Hydratationswärme, Frischbetontemperatur, Temperaturgradient) und Schwinden durch Steuerung von Zementart und -menge sowie Verwendung von Zusatzstoffen
- Steuerung der Betonfestigkeit (Druck und Zugfestigkeit) durch Optimierung von Zement und Zuschlag
- Verwendung von Zusatzmitteln (Verflüssiger, Verzögerer)
- Verbesserung der Dichtigkeit des Zementsteins durch Zugabe von Flugasche und Microsilica

Insbesondere bei Konzept b (Vermeidung von Rissen, siehe 2.) ist darüber hinaus zu regeln:

- Steuerung der Frisch- und Festbetontemperatur

Die Begrenzung des Wasser-Zement-Wertes und damit der Kapillarporosität des Betons ist durch die Verwendung von leistungsfähigen Zusatzmitteln sowie dem Einsatz von Zement und Flugasche mit geringem Wasseranspruch sicher beherrschbar.

Für wasserundurchlässigen Beton sind bei Bauteilen für Weiße Wannen im Ingenieurbau nach DIN 1045-2 die in Tabelle 1 zusammengestellten Vorgaben zu erfüllen.

Bauteil	Expositi- onsklas- se	Mindest- druckfestig- keitsklasse	Betonde- ckung $c_{min}$	Was- ser/Zem- ent- Wert w/z	Min- destze- ment- gehalt $Z_{min}$	$Z_{min}$ bei Anrech- nung v. Zusatz- stoffen	Überwa- chungs- klasse
<b>Bodenplatte /Außenwände</b>							
Unter GOK, ohne Frost	XC2	C25/30 Mindestdruck- festigkeits- klasse für $d \leq 40$ cm, sonst C16/20	20	0,60 für $d \leq 40$ cm, sonst 0,75	280 für $d \leq 40$ cm, sonst 240	270 für $d \leq 40$ cm, sonst 240	2*
Unter GOK, ohne Frost, schwacher chemischer Angriff	XC2, XA1	C25/30	20	0,60	280	270	2*
Unter GOK, ohne Frost, mäßiger chemischer Angriff	XC2, XA2	C35/40	20	0,50	320	270	2*
Unter GOK, ohne Frost, starker chemischer Angriff	XC2, XA3	C35/40	20	0,45	320	270	2*
<b>Außenwände</b>							
Frost	XC4	C25/30	25	0,60	280	270	2*
Frost, schwacher chemischer Angriff	XC4, XF1 XA1,	C25/30	25	0,60	280	270	2*
Frost, mäßiger chemischer Angriff	XC4, XF1,XA2	C35/40	25	0,50	320	270	2*
Frost, starker chemischer Angriff	XC4, XF1,XA3	C35/40	25	0,45	320	270	2*

Für Bauteile in Küstennähe, für Bauteile nach Alkali-Richtlinie oder für Bauteile mit zusätzlichem Chloridangriff können ergänzende Anforderungen erforderlich werden;

\* Beton mit hohem Wassereindringwiderstand darf in die Überwachungsklasse 1 eingeordnet werden, wenn der Baukörper nur zeitweilig aufstauendem Sickerwasser ausgesetzt ist und wenn in der Projektbeschreibung nichts anderes festgelegt ist

Tabelle 1: Vorgaben für WU-Betonbauteile aus DIN 1045-1 und 1045-2

Bei einem Wasser-Zementwert  $\leq 0,6$  ist der Kapillarporenanteil des Betons soweit reduziert, dass auch bei hohen Wasserdrücken nur eine, auf den Randbereich (1-5 cm) begrenzte, kapillare Wassersättigung eintritt.

Eine Verbesserung der Dichtigkeit des Zementsteins durch weitere Reduzierung des Porenanteil kann so weit gelingen, daß der Beton eine Dauerbeständigkeit gegen einen Säureangriff bis  $pH=2,5$  aufweist. Dazu ist neben der Reduzierung des Wasser/Zementwertes insbesondere eine Optimierung des Kornaufbaus der Bindemittel im Mikrobereich erforderlich, um eine möglichst dichte Packung der Feinstpartikel zu erzielen /5/.

Zur Minimierung der Eigenspannungen aus dem chemischen und physikalischen Schwinden kann ebenfalls der Einsatz von Fließmitteln, Maßnahmen zur Reduzierung des Wasseranspruchs sowie einer Reduzierung der Bindemittelmengen beitragen. Durch Schwinden herbei-

geführte Eigenspannungen führen bei dünnen Bauteilen häufig zu Biegerissen, bei dicken Bauteilen sind meist oberflächennahen netzartigen Rissen.

Besonders bei dicken Bauteilen werden jedoch Temperatur bedingte Zwangsspannungen (aus behinderter Verformung) maßgebend, die zu Trennrissen führen. Um Rissbildung zu minimieren, werden üblicherweise Zemente mit niedriger Hydratationswärme sowie zusätzlich Flugasche als Betonzusatzstoff eingesetzt. Unabhängig davon sollte auch die Reißneigung des Zements beurteilt werden, die durch seine chemische Zusammensetzung und die Mahlfineinheit bestimmt werden. Anzustreben ist der Einsatz von Zementen mit geringer Reißneigung /6/.

Auch bei Berücksichtigung der oben genannten Einflüsse ist die sichere Steuerung der Betonfestigkeit schwierig, da die zuvor beschriebenen Maßnahmen zum Teil unerwünscht hohe Betonfestigkeiten zur Folge haben. Zudem ist die Festigkeitsentwicklung durch eine lange andauernde Nacherhärtung geprägt ist, die zu einer sehr hohen Endfestigkeit führt. Die Endfestigkeiten von Betonen unter Verwendung von CEM III-Zementen und Flugasche kann zwischen 50 und 100 % über der festgelegten Nachweisfestigkeit (Druckfestigkeit im Alter von 56 oder 90 Tagen) liegen. Als Folge daraus ergibt sich, bei Berücksichtigung der tatsächlich zu erwartenden hohen Betondruckfestigkeit, ein unwirtschaftlich hoher Bewehrungsgrad, weil die im Beton entstehenden hohen Zugspannungen im Falle einer späten Rissentstehung auf den Bewehrungsstahl umgelagert werden müssen. In der Praxis wird dies häufig nicht ausreichend berücksichtigt. Bei Spättrissbildung ist dann jedoch von deutlich größeren Rissweiten als die der Bemessung zugrunde gelegte Rissweite  $w_{cal}$  auszugehen.

Mit noch mehr Risiko behaftet ist die Abschätzung der Temperaturentwicklung und die damit verbundenen Zwangsspannungen in Beton, wenn das Bauteil nicht zwangsfrei gelagert ist. Lassen sich Eigenspannungen infolge abfließenden Hydratationswärme durch die Verwendung von NW-Zementen sowie die Minimierung der Bindemittelmengen noch einigermaßen steuern, kann der Einfluß der Frischbetontemperatur und der Entwicklung der Umgebungsbedingungen nur grob abgeschätzt werden. Günstige Bedingungen sind bekanntermaßen bei kühler Jahreszeit, da die Frischbetontemperatur niedrig ist. Liegen besondere Anforderungen bezüglich der Dichtigkeit oder der Rissefreiheit vor, muß die Temperaturentwicklung des frisch betonierten Bauteils gesteuert und den Umgebungsbedingungen angepaßt werden (z. B. durch Kühlen des frisch eingebauten Betons oder durch zusätzliches Aufheizen des vorangegangenen Betonierabschnitts). Detaillierte Hinweise zur Planung betontechnologischer Maßnahmen sind in /7/ enthalten.

#### **4.2 Bemessung der Stahlbetonkonstruktion unter Berücksichtigung der Steuerung des Rissabstandes und der Rissweiten**

Risse im Beton können die Gebrauchstauglichkeit der wasserundurchlässigen Betonkonstruktion erheblich beeinflussen. Neben Rissen aus Lastspannungen – in den meisten Fällen Biegerisse – sind insbesondere Trennrisse aus Zwangsspannungen infolge behinderter Verformung für die Dichtigkeit von wasserundurchlässigen Baukonstruktionen relevant.

Bei Biegerissen verbleibt, gemäß Bemessungsvorgaben, eine ausreichende Biegedruckzone, die ein Durchdringen des Wassers verhindert. Trennrisse stellen für die Wasserundurchlässigkeit ein erhebliches Risiko dar, weil, entgegen den Ergebnissen von theoretischen Untersuchungen der sogenannte Selbstheilungseffekt (eine Selbstdichtung des Risses durch das durchfließende Wasser und die darin enthaltenen Feinstpartikel) nicht oder zumindest nicht im Zeitraum bis zur Nutzung des Bauwerks eintritt.

Der Nachweis für die Dichtheit ist ein zusätzlicher Gebrauchstauglichkeitsnachweis zu DIN 1045-1. Für die Begrenzung der Rissbreiten von wasserundurchlässigen Betonbauteilen gilt nach /1/:

- Die Begrenzung der Biegerissbreite richtet sich bei allen Entwurfgrundsätzen (siehe Kapitel 2), unabhängig von der Beanspruchungsart und der Nutzung, nach DIN 1045-1.
- Die Mindestanforderung an die einzuhaltenden rechnerischen Trennrissbreiten richten sich nach DIN 1045-1.
- Die Begrenzung der Trennrissbreiten ist abhängig vom Entwurfgrundsatz unter Berücksichtigung der Druckwasserbeanspruchung und der Nutzung zu wählen. Insbesondere bei Entwurfgrundsatz a (Selbstheilungseffekt) ist der Rechenwert der zulässigen Rissbreite in Abhängigkeit des Druckgefälles  $i$  festzulegen. Das Druckgefälle  $i$  berechnet sich zu  $i = h_w/h_b$  mit  $h_w$  = Druckhöhe des Wassers in m,  $h_b$  = Bauteildicke in m.

Grundsätzlich ist das Ziel bei der Bemessung einer wasserundurchlässigen Betonkonstruktion, die Rißbildung so zu steuern daß die Gebrauchstauglichkeit sichergestellt wird. Dabei wird davon ausgegangen, daß bei einer rechnerischen Rissweite  $w_{cal} = 0,1$  bis  $0,15$  mm die durchdringende Wassermenge derart begrenzt bleibt oder bis zur Nutzung vollständig endet, so daß das Bauwerk die Forderung nach Wasserundurchlässigkeit ohne weitere Nacharbeit erfüllt.

Es darf jedoch nicht unberücksichtigt bleiben, daß eine rechnerische Begrenzung der Rissweiten auf ein Maß, daß ein Durchtritt von Wasser wahrscheinlich verhindert wird, häufig zu unwirtschaftlichen Bewehrungsgraden führt. Dies gilt insbesondere unter der Berücksichtigung, dass die Selbstheilung nur dann eintritt, wenn die Rissweiten konstant bleiben und die Trennrisse aus Spätzwang unter Berücksichtigung der dann maßgebenden Betonfestigkeit in ihrer Breite zu begrenzen sind. Eine absolute Sicherheit der Dichtigkeit der Konstruktion ist selbst dann nicht vorhanden, da die rechnerisch zu berücksichtigende Rissweite  $w_{cal}$  einen Fraktilewert darstellt (95%-Fraktile) und somit durchaus vereinzelt breitere Risse (die dann nicht selbstheilend sind) auftreten können.

Das Ziel des Nachweises der Gebrauchstauglichkeit kann z.B. auch erreicht werden, wenn rechnerisch eine etwas größere Rißbreite zugrunde gelegt wird ( so lange die Dauerhaftigkeit nicht eingeschränkt wird) und die sich einstellenden Trennrisse durch eine nachträgliche abdichtende Injektion mit Polyurethanharz geschlossen werden (Entwurfgrundsatz c).

Grundsätzliche bleibt anzumerken, daß bei jeder wasserundurchlässige Konstruktion wasserführende Trennrisse auftreten können (bei allen 3 Entwurfgrundsätzen), die planmäßig verschlossen werden müssen. Dies bedeutet, daß der Planer oder Ausschreibende die Injektion der Risse als Leistungsposition beschreiben muss.

Für Bauwerke, die Anforderungen aus dem Wasserhaushaltsschutzgesetz (WHG §19) erfüllen müssen, gilt DIN 1045-1 und 2.

Die Steuerung der Entstehung von Rissen kann auch durch konstruktive Maßnahmen maßgeblich beeinflusst werden oder auch durch eine Vorspannung der Bauteile erreicht werden.

#### **4.3 Konstruktive Durchbildung der Stahlbetonkonstruktion sowie Anordnung und Abdichten von Fugen**

Je nach festgelegtem Entwurfgrundsatz können unterschiedlich aufwendige konstruktive Maßnahmen erforderlich werden, um Zwangsspannungen infolge behinderter Verformungen weitgehend zu beherrschen. Mögliche Maßnahmen sind:

- Zwangarme ebene Lagerung
- Berücksichtigung der Steifigkeit des Baugrunds und der Bauteile
- Verwendung von Gleitfolien oder bituminösen Gleitschichten
- Vermeidung von Querschnittssprüngen

- Ausbildung von Fugen

Durch die Auswahl einer ebenen, zwangarmen Lagerung können zentrische Zugspannungen im Bauteil minimiert werden, da die Verkürzung der Bauteile durch abfließende Hydratationstemperatur und Schwinden nur wenig behindert wird. Dies gilt gleichermaßen für Bodenplatten wie für Wände. Besondere Sorgfalt ist bei einhäutig gegen den Baugrubenverbau geschalteten Wänden erforderlich, da Unebenheiten des Verbaus eine Verzahnung der Wände mit dem Verbau bewirken können. Dies kann wirkungsvoll verhindert werden, wenn der Verbau durch ausreichend steife Bleche, Dämmlagen oder andere Schutzmaßnahmen von dem Wandbeton getrennt wird.

Bodenplatten sind insgesamt als unempfindlicher gegen Verformungsbehinderung einzustufen, weil vielfach der Unterbau eine vergleichsweise geringe Steifigkeit aufweist. Trotz allem wird empfohlen, bei starken Querschnittsänderungen (z. B. Aufzugsunterfahrten, Fundamentbalken) durch Anvoutung der Bauteile und durch Einbau von Weichfasermatten und zwischen Untergrund und Beton eine Verformung des sich verkürzenden Betonbauteils zum Massenschwerpunkt hin zu ermöglichen. Gleitfolien oder bituminöse Gleitschichten mit zusätzlicher PE-Folie reduzieren die Reibung zwischen Unterbau und der Sohlplatte nennenswert, ein oder zweilagige PE-Folien alleine stellen nur eine Trennung, jedoch keine Gleitschicht dar.

Die wirksamste Möglichkeit zur Minimierung von Zwangsspannungen stellt neben aufwendigen betontechnologischen Maßnahmen die Anordnung von Fugen da. Zur Trennung der Verformungen, insbesondere unterschiedlicher Setzungen einzelner Bauwerksteile werden Bewegungsfugen angeordnet. Einzelne Betonierabschnitte werden durch Arbeitsfugen unterteilt und ein Betonierabschnitt kann durch Sollrissfugen in Abschnitte kleiner Länge unterteilt werden, um die für die Verformungen maßgebende Grundlänge zu klein zu halten.

Entscheidend für die Wasserundurchlässigkeit der durch Fugen unterteilten Bauwerksteile ist die Wirksamkeit der Abdichtung einzelner Fugen selbst sowie das Vorhandensein eines, über das gesamte Bauwerk gesehen, zusammenhängenden Abdichtungssystems. Die Planung der Fugen ist Aufgabe des Tragwerksplaners, bei größeren Bauvorhaben sind separate, detaillierte Fugenpläne zu erstellen. Dabei ist jede Verbindungsstelle kritisch zu hinterfragen und deren wirkliche Funktionstüchtigkeit zu überprüfen. Insbesondere bei gemischten Abdichtungssystemen (Bleche und Bänder, Bänder und Injektionsschläuchen usw.) zeigen sich bei kritischer Überprüfung häufig planmäßige Fehlstellen /8/.

Langjährige Erfahrung hat gezeigt, dass, sorgfältige Planung und Ausführung vorausgesetzt, Abdichtungssysteme aus Fugenblechen (Arbeitsfugen, Sollrissfugen mit Blechkreuzen) in Kombination mit Elastomer-Dehnungsfugen-Bändern mit anvulkanisierten Blechen (Dehnfugen) die wirkungsvollsten Wassersperren in den Fugen darstellen. Auch PVC - oder Elastomer-Bänder für Arbeits-, Sollriss- und Dehnfugen sind funktionierende Wassersperren, die auch bei hohen äußeren Wasserdrücken wirksam sind. Dabei sollten jedoch nicht ausschließlich außenliegende Fugenbänder eingesetzt werden. Bei horizontalen außenliegenden Fugenbändern gelingt es nicht ausreichend sicher, die Rippen so dicht in den umgebenden Beton einzubinden, da Luft und Blutwasser unterhalb der horizontalen Rippen eingeschlossen und Schmutz und Betonreste auf den Rippen abgelagert werden. Detaillierte Lösungsansätze für die Abdichtung von Arbeits- und Sollrissfugen sind in /8/ enthalten.

Die Verbindung der Bleche ( $d \geq 2$  mm,  $b \geq 25$  cm) durch Herstellung von geschweißten Stumpfstoßen ist i.A. ebenso erforderlich wie die Einschränkung auf Stumpfstoß-Verbindungen auf der Baustelle bei den Fugenbändern. Alle übrigen Verbindungen der Bänder sind werkmäßig vorzufertigen. Überlappungen bei Blechen werden häufig als mögliche Lösung für erforderliche Stöße genannt, die Funktionstüchtigkeit derartiger Lösungen hängt jedoch besonders von einer extrem sorgfältigen Bauausführung ab.

Bei den in jüngster Zeit auf dem Markt verstärkt angebotenen Einlagen aus Injektionsschläuchen und Quellschläuchen oder Kombinationsprodukten sind insbesondere die Verbindung zwischen einzelnen Fugen Schwachstellen, denen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Diese Dichtelemente funktionieren nur, wenn Sie vollflächig auf dem Altbeton aufliegen und durch die Injektion mit PU-Harz oder das Aufquellen des Bandes einzelne größere Fehlstellen im Beton abgedichtet werden können. Praktische Erfahrungen zeigen, dass dies nicht immer wirkungsvoll gelingt.

## **5 Konsequenzen bei hochwertiger Nutzung**

Aus den o.g. Zusammenhängen ist erkennbar, dass ein Wassertransport durch Risse oder Fehlstellen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Ein Wassertransport durch Risse (zumindest zeitweise) liegt planmäßig der Bemessung bei den Konzepten a und c (siehe 2.) zugrunde.

Der Wassertransport (Diffusion) durch Austrocknen der oberflächennahen Randzone tritt grundsätzlich bei jedem Betonbauteil ein und muss dann berücksichtigt werden, wenn dies bauphysikalisch erforderlich wird, z.B. wenn weitere Aufbauten erfolgen.

Bei Weißen Wannen mit untergeordneter Nutzung, z.B. als Tiefgaragen oder als Kellerräume, kann ein während der Nutzung auftretender Wasserdurchtritt hingenommen werden, wenn die Oberfläche direkt zugänglich ist und das durchtretende Wasser erkannt und durch Injektion gestoppt werden kann.

Werden die Innenoberflächen direkt (ohne schwimmenden oder auf Trennlage liegenden Belagaufbau) hochwertig genutzt (z.B. Rechenzentrum, Bibliothek ...) müssen Maßnahmen zur Steuerung der durch die Betonkonstruktion dringenden Feuchtigkeit geplant und ausgeführt werden. Mögliche Maßnahmen können Klimatisierung, Entfeuchtung, ausreichende Luftwechsel, Beschichtung zum Absperrern der Feuchtigkeit, Möglichkeit der Injektion von Rissen, usw. sein.

Bei hochwertiger Nutzung der Innenoberflächen weißer Wannen nach dem Aufbringen weiteren Boden- oder Wandaufbauten sind die Oberflächen der weißen Wannen nicht mehr zugänglich, weshalb besondere Überlegungen bezgl. des durch die WU-Bauteile transportierten Wassers anzustellen sind.

Die Risiken bei der hochwertigen Nutzung von weißen Wannen ergeben sich überwiegend aus dem zeitlichen Ablauf des Ausbaus. Damit die Räume in der WU-Konstruktion möglichst früh genutzt werden können, wird mit dem Ausbau begonnen, wenn

- die Wasserbelastung der WU-Konstruktion noch nicht vorhanden ist (Wasserhaltung, temporäre Wasserbelastung...)
- die Wasserbelastung noch nicht oder zum Zeitpunkt des Aufbaus nicht zu Wasserdurchtritten führt (Wasserbelastung tritt erst später auf, nachträgliche Risse infolge Setzungen etc.)
- der Beton noch einen hohen Anteil Eigenfeuchte hat.

In den genannten Fällen ist deshalb damit zu rechnen, dass nach Aufbringen der weiteren Bodenaufbauten Feuchtigkeit durch die WU-Konstruktion tritt.

Als besonders risikohaft ist ein Aufbau einer WU-Konstruktion einzuschätzen, bei dem die Auftriebssicherheit der Konstruktion durch Aufbringen einer Schüttung auf eine vergleichsweise dünne Bodenplatte erfolgt und damit die Oberfläche der wasserundurchlässigen Bodenplatte bei späterer Wasserbelastung nicht mehr kontrollierbar ist. Der eigentliche Aufbau weiterer Nutzsichten erfolgt bei derartigen Konstruktionen auf einer zusätzlichen inneren Bodenplatte.

Werden auf die Betoninnenflächen von WU-Bodenplatten weitere Schichten aufgebaut, sind die Transportmechanismen für durchdringendes Wasser zu berücksichtigen. Insbesondere ist zu berücksichtigen, daß noch stattfindende Verformungen durch Eigen- und Zwangspannungen zu einer Öffnung von bereits verpressten Rissen führen können und somit erneut Wasserdurchtritte stattfinden können.

Grundsätzlich sollte bei einer derartigen Planung berücksichtigt werden, daß

- eine wirklichkeitsnahe Belastung durch Druckwasser bereits stattgefunden hat, bevor weitere Schichten aufgebaut werden,
- Risse, Fehlstellen und wasserdurchlässige Fugen mit PU-Harz nach der Wasserbelastung verpreßt wurden.

Idealerweise wird ein weiterer Aufbau von Schichten derart geplant, daß zu einem späteren Zeitpunkt die Innenoberfläche der WU-Bodenplatte durch Inspektionsöffnungen kontrolliert und erforderlichenfalls nachträglich noch abgedichtet werden kann.

Dies ist z.B. mit einem Aufbau eines Doppel- oder Hohlraumbodens möglich, der zum Abtransport von Wasser in dampfförmiger Form zusätzlich belüftet und entfeuchtet werden sollte. Flüssiges Wasser ist dauerhaft durch gezielte Entwässerung abzuleiten. Zusätzlich können Überwachungssysteme installiert werden, die das Eintreten von Feuchtigkeit frühzeitig lokalisieren und melden.

Alternativ ist der Einbau einer Drainageschicht mit diffusionsdichtem Material (z.B. Noppenbahn) möglich, wenn der Raum, in dem sich Feuchtigkeit sammelt zusätzlich wirksam und dauerhaft entwässert wird.

Als Mindestforderung muss deshalb gelten, daß die Bodenplatte zeitweilig mit Druckwasser beaufschlagt war, damit grobe Fehlstellen oder wasserführende Risse und Fugen erkannt und abgedichtet werden können, bevor der weitere Aufbau erfolgt.

Neben der Bodenplatte sind gleichermaßen Wände betroffen. Häufig zeigen sich öffnende oder neu entstehende Risse in Wandbauteilen, wenn in Räumen bereits technische Anlagen installiert sind (Technik-Zentralen, Schalträume ..). Sind Injektionen von derartigen Rissen erforderlich, ist dies nur noch möglich, wenn die technischen Anlagen planmäßig ausreichend weit von der Wand angeordnet wurden.

Der Einbau von Negativabdichtungen (z.B. Schweißbahn auf EP-Grundierung) ist nicht zu empfehlen, da bei nachträglicher Öffnung von Rissen Druckwasser direkt auf die Rückseite der Abdichtung einwirkt. Dazu wären alle Anschlüsse (Durchdringungen, Verwahrung) druckwasserdicht auszuführen, was technisch nicht möglich ist.

## **6 Ausführung von wasserundurchlässigen Betonbauteilen**

Bei der Bauausführung von wasserundurchlässigen Betonkonstruktionen sind folgende Arbeitsschritte durch qualitätssichernde Maßnahmen abzusichern:

### *Schalung*

- Vorhalten einer ausreichend steifen Schalung, die auf den zu verwendenden Beton, die Bauteilgeometrie und die Anforderungen an die Betonoberfläche abgestimmt ist
- bei hohen Anforderungen an die Bauteiloberfläche Verwendung von saugender Schalung oder Schalungsbahnen
- Einsatz von aussteifenden Schalungsträgern, die gegen das Durchdringen von Wasser ausreichend Widerstand liefert (z.B. aufgeschweißte Wassersperren)

- dichte Schalungsstöße, die ein Ausbluten des Betons verhindern

### *Bewehrung*

- Sicherstellung der Betondeckung durch Verwendung steifer, für WU-Beton geeigneten Abstandhalter in ausreichender Anzahl /9, 10/
- Anordnung von Rüttelgassen und Einfüllöffnungen (sollten bereits planmäßig vorgegeben sein)

### *Betoneinbau*

- Arbeitsfugen vorbereiten (Reinigen, Vornässen, Vorlaufmischung)
- Einbringen des Betons
  - lagenweises Einbauen
  - geringe Fallhöhe
  - Einbauteile nicht beschädigen
- Verdichten des Betons
  - Beton nicht mit Rüttlern treiben
  - kein Entmischen durch zu langes Rütteln
  - bes. Verdichten an Einbauteilen
  - Nachverdichten bei dicken Bauteilen
- Schutz und Nachbehandlung
  - sofort und ausreichend lange
  - besonders wichtig bei CEM III
  - Bei technischen Bauwerken Einsatz von chemischen Nachbehandlungsmitteln auf Paraffinbasis
  - Bei massigen Bauteilen sollte die wärmedämmende Abdeckung erst nach Erreichen des Temperaturmaximums im Kernbeton erfolgen, um eine möglichst geringe Maximaltemperatur sicherzustellen

### *Fugeneinlagen*

- Sorgfältiger Einbau der Fugeneinlagen (sichere Befestigung, keine Beschädigung)
- Stöße von Bändern und Blechen verschweißen
- Keine Beschädigung der Fugeneinlagen beim Betonieren, trotzdem gute Ummantelung mit Beton

## **7 Literatur**

- /1/ Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton; DAfStb-Richtlinie (Entwurf 2002)
- /2/ Deutsche Bundesbahn DS 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten
- /3/ Cziesielski/Friedmann – Gründungsbauwerke aus wasserundurchlässigem Beton, Bautechnik 4/1985
- /4/ Beddoe/Springenschmidt: Feuchttransport durch Bauteile aus Beton; Beton- und Stahlbetonbau 4/1999
- /5/ Breitenbücher R. Zwangspannungen und Rissbildung infolge Hydratationswärmeentwicklung, Dissertation, TU München 1989

- /6/ Hillemeier/Hüttl – Säurefester Beton mit einstellbarer Festigkeit für den höchsten Kühlturm der Welt, Beton- Fertigteiltechnik 2/2000
- /7/ DBV-Merkblatt „Wasserundurchlässige Baukörper aus Beton“
- /8/ Hillemeier, Wisslicen – Zu den Arbeits- und Scheinfugen in wasserundurchlässigen Betonkonstruktionen, Beton- und Stahlbeton 6+7/1999
- /9/ Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Berlin
- /10/ Merkblatt „Abstandhalter“, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. Berlin