

WHG-konforme Wannen aus FD-Beton für Großtransformatoren in Konverterstationen

Jürgen Strätz

Siemens Energy AG, Deutschland

Thomas Markus Laggner

convex ZT GmbH, Österreich

KURZFASSUNG:

Angeichts von Ölmengen von bis zu 100 Tonnen in einem Großtransformator und eines Gesamttransformatorengewichts von bis zu 500 Tonnen liegen bei der Auslegung und Bemessung von Auffangwannen der Großtransformatoren in HGÜ-Konverterstationen höchste Anforderungen an die Statik, den Brandschutz und den Gewässerschutz gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vor. In der Regel werden die Bemessung und konstruktive Umsetzung der erforderlichen Auffangwannen als flüssigkeitsdichter Beton (FD-Beton) ausgeführt. Dies ist jedoch technisch anspruchsvoll und es kann zu problematischen Bemessungs- und Ausführungsfehlern kommen.

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf dem Brückenschlag zwischen der theoretischen Bemessung nach der DAfStb-Richtlinie und der Baupraxis. Thematisiert werden Strategien zur Abminderung der Zwangbeanspruchungen, etwa durch bituminöse Gleitschichten, sowie die gezielte Rissführung mittels Sollrissfugen und Fugenblechen. Zudem werden spezifische Herausforderungen wie die thermische Belastung im Havariefall und der Nachweis der Mindestdruckzonenhöhe erläutert. Abschließend reflektiert der Beitrag Projekterfahrungen zur Ausführungsqualität, insbesondere bei der Bewehrungsführung in den Fugenbereichen aber auch zum Gleitschalungsverfahren der aufgehenden Brandwände. Ziel ist es, in der Praxis erfolgreich erprobte Lösungen aufzuzeigen, die eine dauerhafte Dichtheit dieser sicherheitskritischen Infrastrukturanlagen gewährleisten und typische Fehlerquellen in der Ausführung minimieren.

1 Einleitung

1.1 Relevanz von Auffangwannen bei HGÜ-Konverterstationen

Anhand von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) kann hohe elektrische Leistung effizient über große Entfernungen zwischen zwei Konverterstationen übertragen werden. Aktuelle deutsche HGÜ-Projekte weisen überwiegend Übertragungsleistungen von etwa 2 GW je Bipol auf; d.h. jeder der beiden Pole kann 1 GW elektrische Leistung übertragen. Dabei stellen die Großtransformatoren sicherheits- und umweltrelevante Schlüsselkomponenten dar, da sie große Mengen an Isolieröl enthalten. Für mineralische Isolieröle ist bei einem Transformator dieser Größenordnung eine Ölmenge

von etwa 100 t üblich und diese Menge ist für die Konzeption der Rückhalteinfrastruktur maßgebend. Der Anlagenbetrieb erfordert, dass im Störfall (z. B. Leckage an Flanschen, Kühlerleitungen, Armaturen) oder im Schadensereignis (z. B. mechanische Beschädigung oder Brand) austretende Flüssigkeiten sicher lokal begrenzt zurückgehalten und kontrolliert abgeführt werden können. Meist stehen drei Transformatoren in einer Auffangwanne, die durch Brandwände mit einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten separiert sind. Insgesamt haben aktuelle Anlagen dieser Größe 7 Transformatoren. 3 Transformatoren pro Übertragungspol und ein Ersatztransformator. Es existieren aber auch doppelte Bipole mit 4x3 Transformatoren + ein Ersatztransformator. In Abbildung 1 ist beispielhaft eine Bipol-



Abbildung 1 Anordnung einer Bipol-Anlage mit jeweils einer Transformatorenwanne je Pol (2x3 Transformatoren)

Anlage mit jeweils einer Transformatorenwanne für drei Transformatoren (2 x 3 Anlage) abgebildet. Die Auffangwannen der Großtransformatoren erfüllen in diesem Kontext mehrere Funktionen gleichzeitig:

- (1) Sekundärbarriere und Löschwasserrückhaltung zur Verhinderung von Boden- und Grundwasserkontamination,
- (2) Brandschutzanforderungen, d.h. Schutz der Anlagenteile in der Umgebung des Transformators im Brandfall
- (3) Hochbelastetes Gründungselement. Moderne Großtransformatoren haben ein Gesamtgewicht von ca. 500 t inkl. Ölfüllung und werden über ein Gleis an die finale Anlagenposition gezogen.

1.2 Schutzziele des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG)

Die Schutzziele des WHG [1] lassen sich für Anlagen mit wassergefährdenden Stoffen in technische Kernaussagen überführen:

- Der Austritt von wassergefährdenden Medien ist zu verhindern (bei den Großtransformatoren ist Isolieröl mit Wassergefährdungsklasse WGK 1 - schwach wassergefährdend im Einsatz)
- Die Nachweisbarkeit der Dichtheit ist durch eine kontinuierliche Dokumentation von Planung und Ausführung sowie eine gutachterliche Abnahme sicherzustellen.

Für Auffangwannen bedeutet dies, dass nicht nur das rechnerische Rückhaltevolumen, bestehend aus Ölvolumen, Löschwasser und Regenspende, sondern insbesondere die Dichtfunktion über die Lebensdauer nachzuweisen und sicherzustellen ist.

Bei Trafowannen aus FD-Beton (flüssigkeitsdichter Beton) ist die Dichtheit gemäß DAfStb Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ [2] nachzuweisen.

Im Gegensatz zu Bauwerken, die auf Basis einer Beschichtung abgedichtet werden, erfordert eine FD-Beton-Konstruktion eine zwingende rissmechanische Betrachtung. Gemäß der Richtlinie (DWA-A 786 [3]) ist die Bemessung auf Trennrisse nicht zulässig, da in diesem Fall die geforderte absolute Dichtheit nicht garantiert werden kann. Demzufolge ist es bei der Auslegung erforderlich, dass generell nicht wechselnde risserzeugende Beanspruchungen auftreten und zumindest eine der beiden Querschnittsseiten ungerissen bleibt. Eine Leckageüberwachung ist ein essenzieller Bestandteil eines ganzheitlichen Schutzkonzeptes, da die FD-Betonbauteile in der Regel lediglich für eine Beaufschlagungsdauer von 72 Stunden nachgewiesen werden. Längere Beaufschlagungsdauern sind zwar gemäß der Richtlinie vorgesehen, jedoch ist deren Umsetzung bei diesen hoch beanspruchten Bauteilen kaum realisierbar.

Im Gegensatz zu anderen sicherheitsrelevanten Regulierungen ist im WHG [1] keine Geringfügigkeitsgrenze für Austrittsmengen oder Tropfmengen verankert.

1.3 Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis

Ziel des Beitrags ist es, die Bemessung und konstruktive Ausbildung von WHG-konformen Auffangwannen aus flüssigkeitsdichtem Beton (FD-Beton) entlang der üblichen Richtlinienlogik darzustellen und mit Bau- und Projekterfahrungen zu spiegeln. Der Fokus liegt auf einem praxiserprobten System mit einer FD-Beton-Wanne als tragendem und dichtendem Bauteil, Sollrissfugen in den Wänden zur kontrollierten Rissführung, unbeschichteten Fugenblechen als wesentlichem Abdichtungselement in Arbeitsfugen sowie einem unterseitigen Reib-/Gleitkonzept (PE-Folien bzw. bituminöse Gleitschichten) zur Beherrschung von Zwangbeanspruchungen.

2 Bemessung nach der FD-Betonrichtlinie

2.1 Grundlagen des flüssigkeitsdichten Betons (FD-Beton)

FD-Beton ist kein Spezialbeton, sondern ein Beton mit definierten Anforderungen an die Nachweisführung und die Zusammensetzung, um ein möglichst dichtes Korngefüge und ein möglichst geringes Schwindmaß zu erzielen. Dies wird durch nachfolgende Anforderungen erreicht:

- Zementleimgehalt $< 190 \text{ l/m}^3$: Reduzierung Schwinden
- mind. C30/37 und w/z-Wert $\leq 0,5$: Dichtes Gefüge, wenige Kapillarporen
- Sieblinie im Bereich A/B: Dichte Kornmatrix
- Zementauswahl beschränkt u.a: CEM I, CEM III/A und CEM III/B, häufig angewendet wird CEM III/A
- Flugasche und Silikastaub sind zugelassen, bevorzugt Konsistenz F3

Auf FDE-Beton (FD-Beton mit Eindringprüfung) wird hier nicht näher eingegangen, für die Beaufschlagung mit Öl sind diese Betone nicht relevant. Für die Definition als FD-Beton-Element sind eine richtlinienkonforme Bemessung und konstruktive Durchbildung des Bauteils entscheidend. Des Weiteren liegen strenge Dokumentationspflichten und die Verpflichtung zu einer gutachterlichen Abnahme vor.

2.2 Expositionsklassen und Anforderungen an die Beständigkeit

Trafowannen sind typischerweise einer kombinierten Beanspruchung aus Feucht-Trockenwechsel (XC4), gegebenenfalls salzhaltiger Luft bei Projekten in Meeresnähe (XS1) und/oder chemischem Angriff aus dem Boden oder Grundwasser (XA1 bis XA3) ausgesetzt. Aufgrund der ständig wechselnden Beaufschlagung mit Regenwasser und der häufig vorhandenen Wasservorlage sind die Bodenplatte und die Wände des Auffangraums der Expositionsklasse XF3, Frost-Tau-Wechsel bei hoher Wassersättigung, zuzuordnen. Aus der Expositionsklasse XF3 resultiert gemäß Eurocode 2 + NA mit DIN EN 206 [4] die Mindestbetongüte C35/45, alternativ darf auch die Betongüte C30/37 langsam ($r < 0,3$) oder bei massigen Bauteilen C30/37 eingesetzt werden. Um die durch das Abfließen der Hydrationswärme entstehenden Temperaturspannungen möglichst gering zu halten, wird Beton der Klasse C30/37 langsam bevorzugt. Für eine Betonage in den Wintermonaten ist dieser Beton allerdings ungeeignet, weshalb hier oft auf C30/37 mittel ausgewichen werden muss. Damit wird von den Vorgaben des Eurocode 2/DIN EN 206 [4] abgewichen und stattdessen auf die zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-Ing) [5] ausgewichen. Diese bieten die Möglichkeit, auch Beton der Güte C30/37 mit mittlerer Festigkeitsentwicklung in die Expositionsklasse XF3 einzustufen. Diese Abweichung muss allerdings im Vorfeld mit dem Kunden und dem WHG-Sachverständigen schriftlich abgestimmt werden. Alternativ bietet sich die Verwendung von C35/45 mit einem Prüfalter von 56 Tagen an. Beide Betone zeigen ein ähnliches Verhalten in Bezug auf die zu erwartende Wärmeentwicklung. Nachteilig sind jedoch die wesentlich längeren Nachbehandlungszeiten. Um das Ende der Nachbehandlung sicher abschätzen zu können, hat es sich bewährt, eine ausreichende Anzahl an Prüfwürfeln herzustellen, geschützt neben der Wanne vor Ort zu lagern und diese in regelmäßigen Abständen abzudrücken, um die Druckfestigkeitsentwicklung zielsicher bewerten zu können. Dies ist besonders in der kalten winterlichen Jahreszeit von elementarer Wichtigkeit,

um die Nachbehandlung bis zum Erreichen von 75 % der Normfestigkeit fortzuführen.

2.3 Praxisbeispiel: Statische Bemessung und konstruktive Durchbildung einer Trafowanne

Eine Trafowanne für die übliche Anzahl von drei Transformatoren hat ungefähr die Abmessungen $L \times B \times H = \text{ca. } 50 \text{ m} \times 21 \text{ m} \times 23 \text{ m}$. Die Bodenplattendicke beträgt ca. 40 – 50 cm, die Dicke der Brandwände beträgt ca. 35 – 40 cm.

Zu den relevanten Einwirkungen zählen ständige und veränderliche Lasten (Eigengewicht, Nutzlasten, Montagezustände aus dem Verschieben der Transformatoren bei Erstmontage oder Austausch), konzentrierte Transformatorauflagerlasten, Flüssigkeitslasten im Rückhaltefall (hydrostatischer Druck), Baugrund- / Wassereinwirkungen (Erddruck, Auftrieb) sowie Zwangseinwirkungen infolge Temperatur, Schwinden, Kriechen und Setzungen. Darüber hinaus ist auch der Temperaturlastfall „*Austreten von heißem Transformatorenöl*“ zu betrachten.

Die Ölmenge von ca. 100 t entspricht überschlägig einem Volumen von etwa 110 – 115 m³ (Dichtebereich mineralischer Isolieröle). Das erforderliche Rückhaltevolumen ist unter Berücksichtigung von Verdrängungen durch Einbauten sowie möglicher Regen- und Löschwasserszenarien zu bestimmen. Daraus ergeben sich Wandhöhen, Freibord und die maßgebenden hydrostatischen Beanspruchungen. Die Tiefe der Wannen beträgt insgesamt i.d.R. 1,5 - 2,5 m. Von Vorteil ist es, wenn die Wannen untereinander verbunden werden dürfen, da so das Löschwasser auf drei Wannen verteilt werden kann. Um eine Verschmutzung aller Wannen im Schadensfall zu vermeiden, wird in den Wannen eine permanente Wasserfüllung von ca. 20 cm Höhe vorgehalten. Die verbindenden Öffnungen in den Brandwänden werden unterhalb des Wasserspiegels angeordnet. Dadurch kann das leichte Transformatorenöl nicht durch die Öffnungen strömen. Die Wasserfüllung erfüllt noch eine weitere wichtige Funktion: Hierdurch werden große Temperaturspannungen auf die Bodenplatte im Havariefall (mittlere Öltemperatur ca. 60 °C) deutlich reduziert.

Aus konstruktiver Sicht hat sich die Strategie der gezielten Rissführung bewährt. Dabei werden Sollrissfugen im Abstand von 1,5 bis 2 m in die Wände eingebracht, während glatte Fugenbleche mit einer Bauhöhe von 300 mm die Dichtfunktion übernehmen. Die Bodenplatte ist trennrissfrei auszubilden. Dies wird erreicht, indem die Bodenplatte gleitend auf die geglättete Sauberkeitsschicht aufgelegt wird. Hier haben sich flügelgeglättete Sauberkeitsschichten mit erhöhten Ebenheitsanforderungen bewährt. Um eine erfolgreiche Flügelglättung zu gewährleisten, wird bei sandigen Böden als Vermischungsschutz eine PE-Folie am Boden vor der Betonage der Sauberkeitsschicht ausgelegt.

Die besten Ergebnisse zur gleitenden Lagerung der Bodenplatte wurden bisher mit bituminösen Gleitschichten erzielt, aber auch zweilagige PE-Folien auf der Sauberkeitsschicht reichen häufig aus. Bei bituminösen Gleitschichten ist aber besonders darauf zu achten, dass die Bahnen ein Kaltbiegeverhalten von $\leq -25^\circ\text{C}$ aufweisen, um auch im Winter ein ausreichend viskoses Tragverhalten gewährleisten zu können. Bei pfahlgegründeten Bauwerken summieren sich die Zwangsspannungen aus der Reibung und den horizontalen Pfahlwiderständen. Dies führt, abhängig von der horizontalen Pfahlsteifigkeit, zu großen Zwangskräften aus Temperatur und Schwinden. Werden die aufnehmbaren Betonzugspannungen überschritten, sind Trennrisse die Folge. Deshalb ist es wichtig, die Pfahlköpfe durch eine Weichfasermatte von der Sauberkeitsschicht zu entkoppeln (vergleiche Planungsdetail in Abbildung 2 und bauseitiges Ausbildungsdetail in Abbildung 3). Geschieht dies nicht, stellt sich keine Pfahlkopfschiebung ein, da die Sauberkeitsschicht wie ein Druckglied wirkt und die Relativverschiebung der Pfahlköpfe verhindert. Die dadurch entstehende sehr starre Festhaltung an den Pfahlköpfen würde zwangsläufig zu Trennrissen führen.

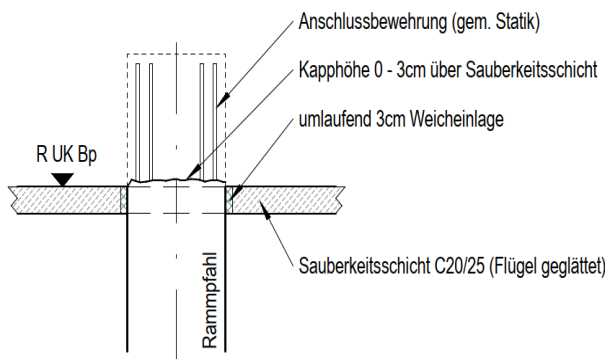


Abbildung 2 Pfahlkopf abgefugt von Sauberkeitsschicht mit Weicheinlage



Abbildung 3 Pfahlkopf und bituminöse Gleitschicht

Mit ansteigender horizontaler Pfahlkopfsteifigkeit wird es immer unwahrscheinlicher, dass die Betonzugspannungen unterhalb der Risschnittgröße verbleiben. Hier muss dann die Dichtebene (Bodenplatte) von den Pfählen entkoppelt werden. Dies wird i.d.R. durch einen Pfahlkopfbalkenrost erzielt. Auf den Balkenrost wird die Wanne dann wiederum gleitend aufgelegt. Die Nachweise reduzieren sich dann wieder auf die Nachweisführung für eine Flachgründung.

2.4 Nachweis der Dichtheit unter Berücksichtigung chemischer Beaufschlagung

Mineralische Isolieröle, wie sie von Shell unter der Bezeichnung „Diala“ angeboten werden, sind nicht betonangreifend. Gemäß DAfStb-Richtlinie [2] gibt

es mehrere Möglichkeiten den Nachweis der Dichtheit zu erbringen. Der „*Vereinfachte Nachweis*“ nach 5.1.2 [2] ist nur für Flachgründungen erlaubt, aber bei hoher Belastung nicht anwendbar, da hierfür die Auflast unter $q \leq 5 \text{ kN/m}^2$ betragen muss. Der „*Nachweis im umgerissenen Bereich*“ nach 5.1.3 [2] ist ebenfalls nicht zielführend, da der Beton aufgrund der hohen thermischen und mechanischen Belastungen nicht im Zustand I verbleibt. Bei gleichzeitiger Wirkung von Normalkraft (Temperatur + Schwinden) und Biegung (Temperatur + mechanische Belastung) ist folgende Gleichung einzuhalten:

$$\frac{\text{vorh } \sigma_{CN}}{f_{ctd}} + \frac{\text{vorh } \sigma_{CM}}{f_{ctd,fl}} \leq 1,0 \quad (1)$$

mit:

vorh σ_{CN} maßgebende Betonzugspannung aus Normalkraft im Zustand I aus Last und Zwang

vorh σ_{CM} maßgebende Betonrandzugspannung aus Biegemoment im Zustand I aus Last, Zwang und Eigenspannungen

f_{ctd} Bemessung der zentrischen Zugfestigkeit

$f_{ctd,fl}$ Bemessungswert der Biegezugfestigkeit
Nähere Erläuterungen siehe [2]

Dieser Nachweis gelingt bei Transformatorenwanne in vielen Bereichen nicht.

Zudem ist zu beachten, dass die Nachweisführung gemäß 5.1.5 „*Nachweis von Trennrissen*“ gemäß DWA-A-786 [3] „*Ausführung von Dichtflächen*“ Tabelle 3, lfd. Nr. 7, nicht zulässig ist.

Somit bleibt nur der Nachweis nach 5.1.4 „*Nachweis der Mindestdruckzonenhöhe*“ und davon nur der nachfolgende Nachweis aus Gleichung (2). Wechselnde risserzeugende Beanspruchungen sind hier nicht zulässig, da diese einen Trennrisse in der Platte ausbilden könnten. Treten auf beiden Seiten des Querschnitts risserzeugende Beanspruchungen auf, so ist ein Nachweis der Dichtheit nicht mehr zielsicher zu erbringen und die Konstruktion muss entsprechend angepasst werden. Beispielsweise müssen die Bauteildicken angepasst oder aussteifende Bauteile ergänzt werden.

$$\begin{aligned} x &\geq \gamma_c \times e_{tk} \\ &\geq 2 D_{\max} \\ &\geq 30 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2)$$

mit:

x	Druckzonenhöhe
γ_c	Sicherheitsbeiwert nach Tabelle 1-1 [2]
e_{tk}	Eindringtiefe gemäß Abschnitt 4.1 [2]
$D_{\max}$	Nennwert des Größtkorns

Zur Ermittlung der Eindringtiefe e_{tk} müssen im Labor die Oberflächenspannung und die dynamische Viskosität bestimmt werden. Für die anzusetzende Beaufschlagungsdauer von 72h folgt daraus:

$$e_{tm} = e_{72m} \times \sqrt{\frac{t}{72}} \Rightarrow e_{tm} = e_{72m} \quad (3)$$

$$e_{72m} = 10 + 3.33 \times (\sigma/\eta)^{0.5} \quad (4)$$

mit:

σ	Oberflächenspannung in [mN/m]
η	dynamische Viskosität in [mN S/m ²]

Das Regelwerk bietet hier zwar auch einen Lösungsansatz für Querschnitte mit wechselnden riss-erzeugenden Beanspruchungen, aber dieser Nachweis nach (1-9) [2] ist in der Praxis nur schwer umsetzbar. Hierfür wären nämlich zeitaufwendige Labortests mit den vorhandenen Betonrezepturen und dem Medium erforderlich. Die Proben müssten dabei mindestens sieben Tage feucht und weitere 56 Tage bei Normalklima gelagert werden. Die Prüfung selbst dauert weitere 72 Stunden, also drei Tage. Dies ist bei den engen Terminplänen und der noch ungewissen Auswahl der eingesetzten Produkte bzw. wassergefährdender Stoffe verschiedener Hersteller nicht realisierbar. Einzelheiten zur Prüfung können Anhang A5 in [2] entnommen werden.

$$\begin{aligned} xw &\geq \gamma_c \times e_{wtk} \\ &\geq 2 D_{\max} \\ &\geq 50 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5)$$

mit:

xw	Druckzonenhöhe
γ_c	Sicherheitsbeiwert nach Tab. 1-1 [2]
e_{wtk}	Eindringtiefe in der vorgerissenen Druckzone

$D_{\max}$ Nennwert des Größtkorns

Der Nachweis der Mindestdruckzonenhöhe ist für die beiden nachfolgenden Kombinationen der Einwirkungen zu Erbringen.

Vor der Beaufschlagung:

$$E_d = E_d(\sum G_{k,j} + P_k + Q_{k,1} + \sum(\psi_{0,i} * Q_{k,i})) \quad (6)$$

Während der Beaufschlagung:

$$E_{d,A} = E_{d,A}(\sum G_{k,j} + P_k + A_d + (\psi_{2,1} * Q_{k,1})) \quad (7)$$

Des Weiteren ist der Nachweis für eine Rissbreite von 0,2 mm für die seltene Lastfallkombination zu erbringen. Hierdurch wird sichergestellt, dass selbst bei nicht erwartbaren Belastungen möglichst nur kleine Leckagen entstehen könnten.

3 Projekterfahrungen, Herausforderungen und Problemstellungen aus der Baupraxis

3.1 Übersicht aktueller HGÜ-Anlagen und Standortanforderungen

Siemens Energy zählt zu den führenden Lieferanten von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssystemen (HGÜ) in der westlichen Welt. In Deutschland ist das Unternehmen federführend am Ausbau der HGÜ-Infrastruktur beteiligt und realisiert den überwiegenden Teil der Konverterstationen entlang der zentralen Nord-Süd-Übertragungskorridore sowie zahlreiche landseitige Stationen der 2-GW-Offshore-Netzanbindungen. Sowohl Flachgründungen als auch Tiefgründungen der Trafowannen sind in Abhängigkeit des vorhandenen Bodens und der Randbedingungen am Bauort vorhanden, wobei der Gesamtanteil beider Gründungsarten ungefähr gleich ist. Besonders die flach gegründeten Transformatorenwannen sind empfindlich gegenüber Schiefstellungen durch Differenzsetzungen (vergleiche Berechnungsergebnisse der Trafowan-nengesamtverformung in Abbildung 4). In den Bereichen der rückwärtigen Brandwand überlagern sich die Spannungen im Baugrund aus dem Gewicht der Brandwand und dem Gewicht der Transformatoren. Hier sind häufig Bodenverbesserungen, z. B.

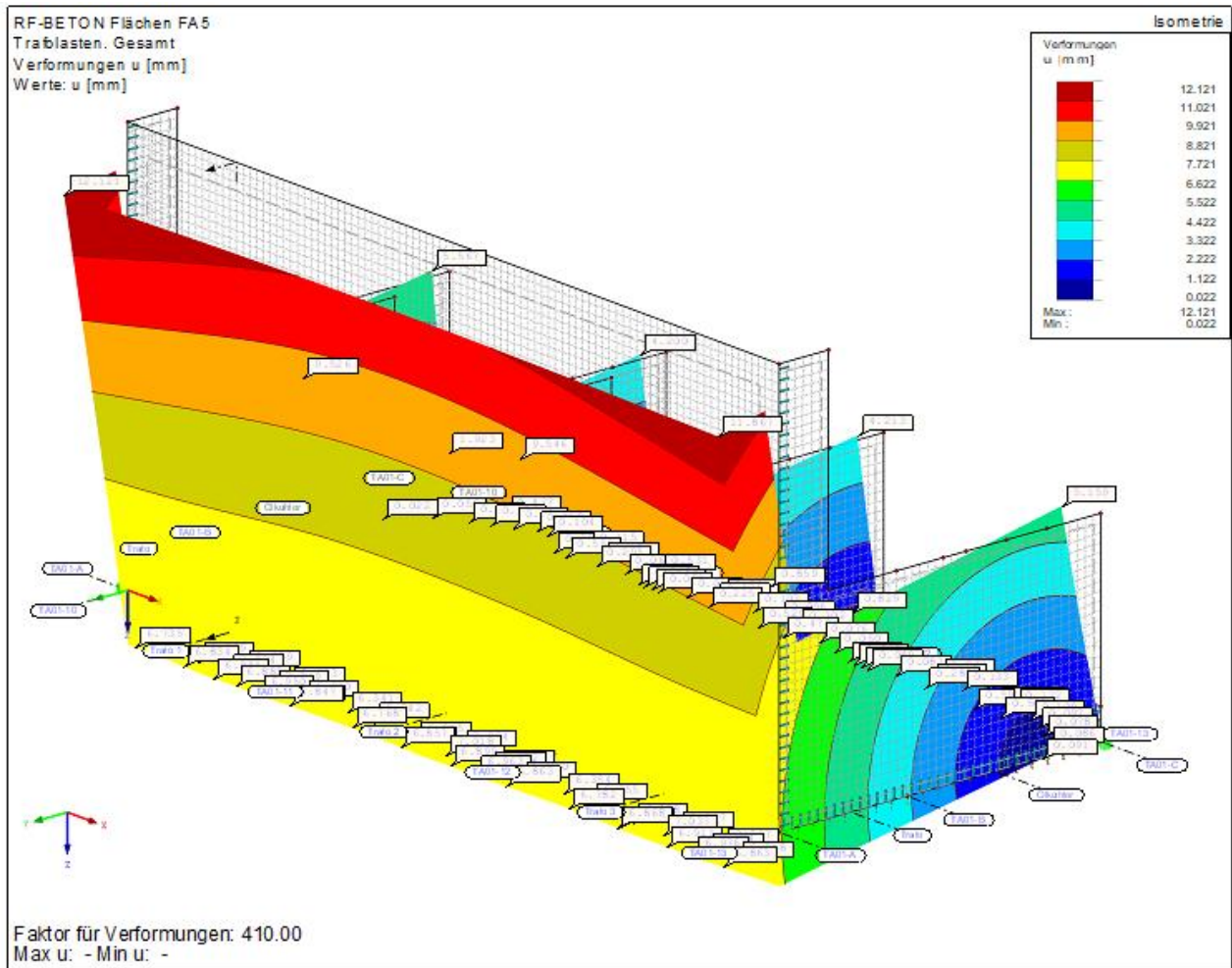


Abbildung 4 Beispielhafte Verformungen / Schiefstellung einer Trafowanne aufgrund ungleichmäßiger Belastung ohne Windeinfluss

Rüttelstopfverdichtungen oder Vorbelastungen mit Erdüberschüttungen, erforderlich.

3.2 Konstruktive Umsetzung von WHG-konformen Wannen für Großtransformatoren

Die Wahl des Herstellungsverfahrens überlässt Siemens Energy den Nachunternehmern. Diese entscheiden sich ungefähr in gleichen Teilen für konventionelle Kletterschalverfahren und Gleitbauschalung. Wird Gleitschalung eingesetzt, so ist ein besonderes Augenmerk auf die kontinuierliche Lieferung von Transportbeton über ca. 7 Tage und Nächte zu legen (vergleiche Abbildung 5 und Abbildung 6). Für den Ausfall von Mischanlagen sind entsprechende Reservekapazitäten vorzuhalten, damit die Betonage (bis zu 1000m³) nicht unterbrochen werden muss. Nacharbeiten und Wochenendarbeiten sind behördlich zu beantragen. Im Vorfeld müssen die Bewehrungspläne entsprechend umgearbeitet werden, da sich die vertikale Bewehrung

systembedingt in einem Bereich mit schlechtem Verbund befindet. Im Nachgang müssen die Hohlräume der Kletterrohre mittels Vergussbeton verschlossen werden.



Abbildung 5 Gleitschalung aller Brandwände (7 Tage)

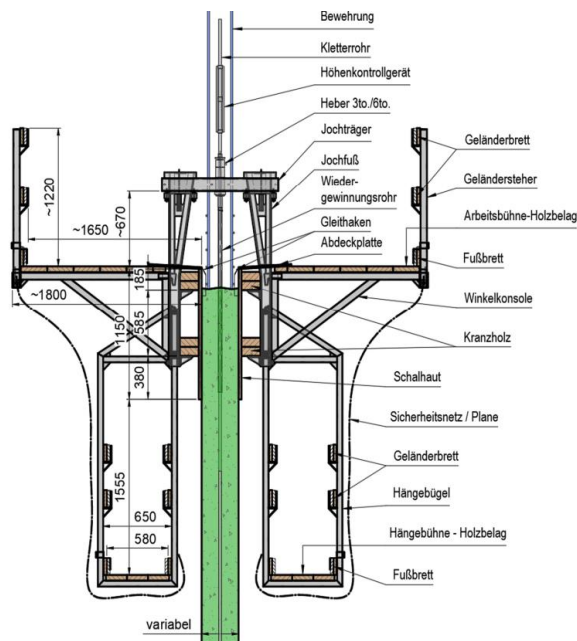


Abbildung 6 Typische Aufbau Gleitschalung

3.3 Fehlerquellen in der Ausführung von FD-Betonwannen und deren Auswirkungen

Schäden an den Bodenplatten von Auffangwannen treten nur in Ausnahmefällen auf. Das konstruktive Prinzip der Zwangskraftreduzierung durch Gleitschichten hat sich als wirksam erwiesen. Demgegenüber entstehen Schäden überwiegend an den Wänden. Diese sind in der Regel auf eine unzureichende Schwächung der Bewehrung im Bereich der Sollrissfugen zurückzuführen. Die Bewehrung muss im Bereich der Sollrissfugen auf das statisch erforderliche Mindestmaß begrenzt werden, um die Aufnahme der Verformungseinwirkung / der Rissbreite in der Sollrissfuge zu ermöglichen. Hierzu wird beispielsweise nach der Verlegung die horizontale Wandbewehrung bei der Sollrissfuge zu 50 % durchschnitten (vergleiche Abbildung 7). Bei der Bewehrungsplanung ist die Lage der Sollrissfugen zwingend zu berücksichtigen. Bewehrungsstöße dürfen keinesfalls im Bereich der Sollrissfugen angeordnet werden. Andernfalls ist mit einem unkontrollierten Rissverlauf, auch außerhalb der Sollrissfugen, zu rechnen. In Abbildung 7 ist die Bewehrung im Bereich der Sollrissfuge (Kreuzfugenblech) dargestellt. Inkorrekterweise verläuft jedoch ein Überlappungsstoß der horizontalen Bewehrung über die Sollrissfuge. Dadurch können sich, wie in Abbildung 8 ersichtlich, auch Risse außerhalb der vorgesehenen Schattenfuge entwickeln.



Abbildung 7 Bewehrungsstoß bei Sollrissfuge und Durchtrennung der horizontalen Bewehrung auf statisch erforderliche Bewehrung



Abbildung 8 Rissbildung neben vertikalen Sollrissfuge

Trennrisse können auch entstehen, wenn Sollrissfugen nicht an den schwächsten Stellen der Wand angeordnet werden. Abbildung 9 zeigt einen Trennriss, der an einer Querschnittsschwächung der Wand für die Trafoschieneneinführung entstand, obwohl in unmittelbarer Nähe eine Sollrissfuge angeordnet war. In diesem Fall hätte die Sollrissfuge im Bereich der vorhandenen Querschnittsschwächung angeordnet werden sollen.

Aufgrund der engen Bewehrung sind die Fugenblechstöße nur schwer zugänglich, weshalb es ebenfalls häufig zu fehlerhaften Verschweißungen kommt. In der Vergangenheit hat sich das Verkleben der Stöße hier als die bessere Lösung herausgestellt. In Zusammenarbeit mit WHG-Sachverständigen und Sika wurde hierfür eine zugelassene Verklebung ausgearbeitet. Diese wird bereits seit Jahren erfolgreich eingesetzt. In Abbildung 10 ist eine reale Ausführung mit verklebtem Fugenblechstoß dargestellt.



Abbildung 9 Ausbildung eines Trennrisses durch falsche Lage Sollrissfuge in Wand

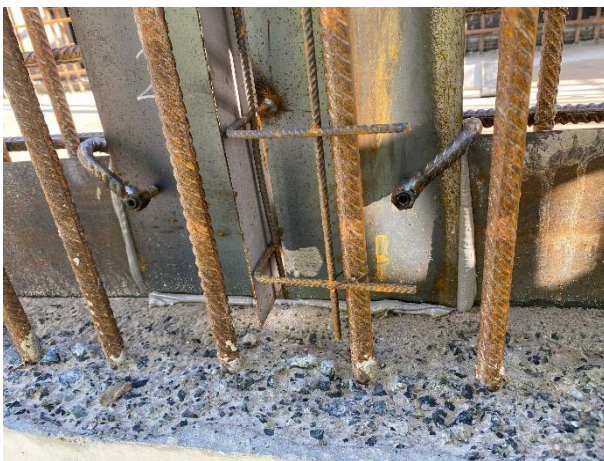


Abbildung 10 WHG konform verklebter Fugenblechstoß

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zukünftige Entwicklungen im Bereich der HGÜ-Infrastruktur

Die aktuelle Entwicklung der HGÜ wird maßgeblich durch spannungsgeführte HGÜ-Systeme (VSC-HGÜ) geprägt. Moderne VSC-Systeme erreichen heute Nennspannungen bis ± 525 kV und Übertragungsleistungen von etwa 3 GW. Sie ermöglichen eine hochdynamische Leistungs- und Spannungsregelung sowie Schwarzstartfähigkeit. Dadurch sind sie besonders geeignet für die Netzintegration erneuerbarer Energien, urbane Hochleistungseinspeisungen und den Aufbau von Multi-Terminal- und vermaschten Gleichstromnetzen. Der

technologische Fokus liegt zunehmend auf der Systemflexibilität und der Netzstützungsfunktion und weniger auf einer weiteren Erhöhung der Nennspannung. Daher ist insgesamt mit weiteren Projekten zu rechnen. Wie im Beitrag erläutert, sind Großtransformatoren ein Herzstück der HGÜ-Anlage und die notwendigen Trafowannen unverzichtbar.

4.2 Impulse für die universitäre Forschung

Die DAfStb-Richtlinie [2] bildet den Stand der Technik grundsätzlich ab, weist jedoch in der praktischen Anwendung sowie im Abgleich mit bauaufsichtlichen Regelwerken wie der MVV TB [6] erkennbaren Weiterentwicklungsbedarf auf.

Forschungspotenziale ergeben sich insbesondere bei der normativen Berücksichtigung leistungsfähiger Polymerbitumenbahnen für niedrige Verarbeitungstemperaturen, der Substitution gesundheitskritischer Prüfflüssigkeiten sowie bei der klaren Definition eines Dichtheitsnachweises für überdrückte Risse unter Biegebeanspruchung. Zudem fehlen bislang zerstörungsfreie Verfahren zur Bestimmung der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe in Bestandsbeton. Vor dem Hintergrund der abweichenden Anforderungen an zulässige Rissbreiten (0,1 mm nach MVV TB [6] versus 0,2 mm in der ingenieurmäßigen Praxis [2]) sowie der fehlenden Erweiterung etablierter Bemessungsansätze wie der Grasser-Formel auf kombinierte Beanspruchungen bietet sich ein kohärentes Themenfeld für universitäre Forschung an. Ziel sollte eine technisch präzierte, widerspruchsfreie und zugleich praxisgerechte Weiterentwicklung der DAfStb-Richtlinie sein.

In diesem Zusammenhang sind auch die Auswirkungen des neu überarbeiteten Eurocode 2 (Version 2023) [7] auf die Rissbreitenbeschränkungen kritisch zu analysieren. Das neue Bemessungsmodell kann dazu führen, dass höhere Bewehrungsmengen erforderlich werden, da es am abgeschlossenen Rissbild kalibriert ist und hier bei den Trafowannen in der Regel der Zustand des Einzelrisses vorliegt. Eine Bewehrungserhöhung ist in der Baupraxis problematisch, da extreme Bewehrungskonzentrationen, insbesondere in Fugenbereichen und Wandknoten, die qualitätsgerechte Verarbeitung sowie

das Verdichten des Betons deutlich erschweren und somit das Risiko von Ausführungsfehlern erhöhen. Zur Reduktion der Einwirkungen sollte auch im Zusammenhang mit der DAfStb-Richtlinie [2] der verformungskompatible Bemessungsansatz, wie er im MRZ: BAW Merkblatt [8] angewendet wird, aufgenommen werden. Durch eine realitätsnahe Modellierung der Zwang- und Verformungseinwirkungen könnte versucht werden, die rechnerischen Beanspruchungen gezielt zu reduzieren. Dies könnte bei gleichzeitiger Beherrschung einer kontrollierten Rissbildung eine wissenschaftlich begründete Reduzierung des Bewehrungsgrads ermöglichen.

Ein weiterer Gegensatz zwischen den Richtlinien und der Praxis zeigt sich im Umgang mit Feinrissen. In der Baupraxis wird zwar häufig eine Verpressung von Rissen ab einer Rissbreite von mehr als 0,1 mm gefordert. Eine ingenieurmäßig zuverlässige und dauerhafte Injektion ist jedoch bei Rissweiten von genau 0,1 mm technisch schwer realisierbar. Gleichzeitig ist auch die Frage der Notwendigkeit zu stellen. In der aktuellen Baupraxis werden daher Probefüllungen ausgeführt und es werden nur die Risse saniert, die zu Undichtigkeit führen.

Wie bereits erwähnt sind im WHG [1] im Gegensatz zu anderen sicherheitsrelevanten Regulierungen keine Geringfügigkeitsgrenzen für Austritts- oder Tropfmengen verankert. In der Praxis ist diese Nulltoleranz jedoch diskussionswürdig, da es bei anderen Anlagen wie Motoren oder Geräten eine unvermeidbare, geringe Menge an Leckage oder vernachlässigbare Tropfverluste gibt, die in der Realität kaum zu einer Beeinträchtigung führen. Die Geringfügigkeitsgrenzen sollten daher in Abhängigkeit der Stoffarten erarbeitet werden.

Darüber hinaus sollte auch bei der Zulässigkeit von Trennrissen eine differenzierte Analyse durchgeführt werden können (Vergleich [9]). Hierbei ist es von Relevanz, den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Mediums, wie beispielsweise die Viskosität, die Penetration in ungestörtem Beton, die Verdunstungseffekte und weitere Faktoren, mit der tatsächlich bemessenen Rissbreite und Bauteildicke zu berücksichtigen. Die Penetration von Rissstrukturen durch hochviskose Medien erfolgt signifikant langsamer oder gar nicht, was bei einer praxisnahen Betrachtung der Dichtheitsanforderungen zu berücksichtigen wäre. Dazu wären fundierte wis-

senchaftliche Untersuchungen zum Bauteilverhalten unter wechselnden Beanspruchungen notwendig. Insbesondere ist hierbei der Mechanismus der Dichtheit und Schließverhalten von Rissen mit Rissbreiten unter 0,2 mm, die wieder effektiv gedrückt werden, experimentell zu untersuchen.

Um all diese Fragestellungen beantworten zu können, wären weitere Forschungsprojekte sowie darauf aufbauende Anpassungen der Richtlinien [2] & [3] sinnvoll.

5 Literatur

- [1] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts 1) 2) *Wasserhaushaltsgesetz - WHG* – (31. Juli 2009 BGBl. I S. 2585), Zuletzt geändert durch Art. 7 G v. 29.3.2026 https://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/index.html
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (BUmwS)*, Ausgabe März 2011
- [3] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: *DWA-A 786 (TRwS 786) Technische Regel wassergefährdender Stoffe-Ausführung von Dichtflächen*, DWA, Oktober 2020
- [4] DIN EN 1992-1-1:2011-01: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, 2011
- [5] Bundesministerium für Verkehr: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten*, Januar 2026
- [6] Muster-Verwaltungsvorschrift: *Technische Baubestimmungen (MVV TB)*, Ausgabe 2025/1
- [7] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 2023
- [8] MRZ: *BAW Merkblatt, Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken (MRZ)*, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2025
- [9] Fritzenwallner, F.: *Beitrag zur praktischen Anwendung der Bemessung von flüssigkeitsdichtem Beton*, FH Joanneum, Bachelorarbeit, 2025