

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

wir danken Ihnen für das Interesse, welches Sie „schadenprisma“ entgegenbringen. Daß wir uns mit den Veröffentlichungen auf der „richtigen Linie“ befinden, ist an den positiven Reaktionen, die uns erreichen, zu erkennen. Selbstverständlich bedeutet diese erfreuliche Tatsache aber nicht, daß ein Konzept nie verbessert werden darf. Dem Trend der Zeit folgend, haben wir uns entschlossen, „schadenprisma“ ab Heft 1/1990 grafisch einer zeitgemäßen Linie anzupassen. Wir hoffen, daß verändertes Layout die Lesefreundlichkeit der Beiträge erhöht und auch das neue Cover Sie ansprechen wird. Eines versichern wir gern:

Die seriöse und absolut unabhängige Richtung von „schadenprisma“ wird beibehalten und soll weiterhin dazu beitragen, daß Sie uns die Treue halten.

Die Redaktion

Elektrosanierung von Freiluft-Stahlbeton-Konstruktionen nach Großbrand

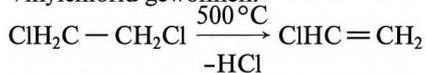
Dipl.-Chem. H. Bernhardt, Beton-Techn. A. Oehme, Dipl.-Ing. S. Stief

Schaden

Am 18. September 1988 ereignete sich Norwegens größter Industriebrandschaden mit einer geschätzten Gesamtschadenssumme von 500 Mio. Nkr in einer Anlage zur Herstellung von Vinylchlorid-Monomerem (VCM). Die Ausgangsstoffe Ethylen und Chlor werden in je einer benachbarten Anlage hergestellt und zunächst durch eine Addition des Chlors an das Ethylen zu 1,2 Dichlorethan umgesetzt.



Aus dem Dichlorethan wird durch Cracken bei 500 °C Chlorwasserstoff (HCl) abgespalten und das Endprodukt Vinylchlorid gewonnen.



Durch Bersten einer Hochdruck-Rohrleitung zur Förderung von 1,2-Dichlorethan wurden innerhalb von 2 Stunden ca. 80–90 t Dichlorethan freigesetzt. Unmittelbar nach dem Bersten entzündete sich die Dichlorethan-Wolke an einem 20 m entfernten Cracker. Erst als die Gesamtmenge Dichlorethan verbrannt war, erlosch das Feuer. Mit 75,2 % Chlor im Dichlorethan errechnen sich aus der verbrannten Menge 64 t freigesetzten Chlorwasserstoffs, der durch freibewitterte Stahlbeton-Tragwerke in süd-östliche Richtung abtrieb.

Bei ersten Untersuchungen wurden im Beton z. T. über 2,5 Gewichtsprozent Chlorid (bezogen auf das Gewicht der Betonproben) festgestellt. Zusätzlich war selbst in 30 mm Tiefe des Betons noch ein Gehalt von ca. 0,1 % Chlorid zu finden. Da außerdem durch die enorme Brandhitze bis über 10 cm starke Schichten des Betons abgeplatzt oder zermürbt

waren, wobei die mit 4 cm Überdeckung eingebauten Armierungsstähle in weiten Bereichen völlig freigelegt wurden, wäre aus der Sicht der Wiederherstellungskosten ein Abriß und Neubau die sinnvollste Vorgehensweise gewesen. Die geschätzte Zeit für den Abriß und Wiederaufbau des am stärksten betroffenen Gebäudes (Struktur IV) lag bei 10–12 Wochen, eine bei einem BU-Verlust von ca. 4 Mio Nkr pro Tag sehr lange Zeit, zu der dann noch die Demontage und spätere Montage großer Behälter und Rohrleitungen zuzuschlagen wäre.

Da eine von den reinen Wiederherstellungskosten zwar teurere Sanierung eine Zeitersparnis von einigen Wochen erwarten ließ, wurde diese Möglichkeit gewählt. Die rein thermischen Schäden (Abplatzungen, Zermürbungen) am Beton sollten durch Abspitzen und Abtragen im Jet-Verfahren (Wasserstrahl mit Drücken von 600–1000 bar) beseitigt, die Chloride extrahiert und neuer Stahlfiber-verstärkter Beton im Spritzverfahren aufgebracht werden.

Sanierungsmethode

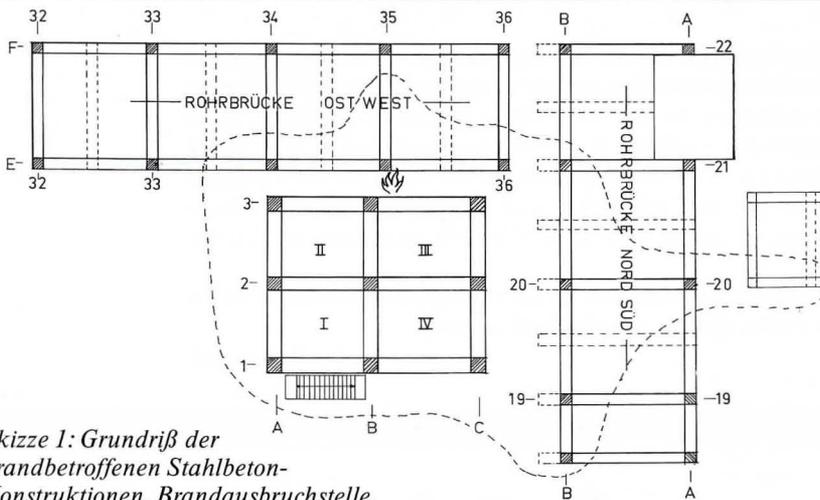
Das IfS war zunächst von einer Sanierungsfirma zur Untersuchung des Betons hinzugezogen und in Anbetracht der ersten Ergebnisse auch nach Sanierungsmöglichkeiten befragt worden. In Absprache mit den verantwortlichen Ingenieuren und der brandbetroffenen Firma entschied man sich für die vorgestellte Elektrosanierung als allein taugliches Verfahren.

Diese von S. Stief und A. Oehme im IfS entwickelte Methode nutzt die Wanderung negativ geladener Chloridionen im elektrischen Feld. Um diesen Effekt

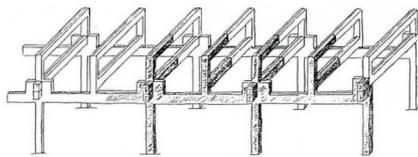
bei der Extraktion von Chlorid aus dem Beton zu nutzen, wird eine ca. 0,5 cm starke Schicht einer wäßrigen Bentonit-Schlämme auf die Betonoberfläche gespritzt und mit Aluminium-Folie bedeckt. Die Folie haftet selbständig an der Schicht. An die Folie (+ Pol) und die Betonarmierung (– Pol) wird eine Gleichspannung von bis zu 40 V angelegt. Die Leistung des Gleichrichters ist auf 2–3 A/m² auszuliegen, bzw. die bearbeitete Fläche ist der Leistung des Gleichrichters anzupassen. Diese Methode war in den vergangenen 2 Jahren in mehreren Fällen erfolgreich eingesetzt worden, bei denen herkömmliche Methoden aufgrund zu hoher Konzentrationen an Chlorid und zu großer Eindringtiefe versagt hätten. In allen Fällen hatte es sich aber um Innenräume und thermisch nicht bzw. wenig geschädigte Betonflächen gehandelt.

Hier bestand zusätzlich die Schwierigkeit, daß nicht abzusehen war, wie weit das Verfahren noch funktioniert, wenn in großen Bereichen nur noch Bentonit-Schlämme zwischen Armierung und Folie besteht. Reicht der Reststrom, der nicht als Verluststrom fließt, aus, um bei einer so ungünstigen Geometrie des elektrischen Feldes noch Chlorid zu extrahieren? Bricht das elektrische Feld aufgrund von zu großen Kurzschluß-Querschnitten eventuell zusammen? Wegen der Jahreszeit war außerdem noch mit Frost zu rechnen, der eventuell die Bentonit/Wasser-Schlämme gefrieren läßt, so daß keine Chloridionen mehr wandern können.

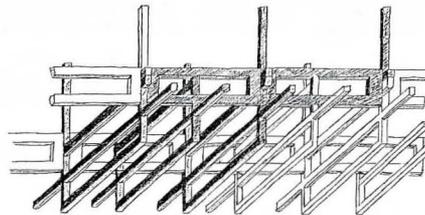
In Absprache mit dem verantwortlichen Ingenieur-Büro und der brandgeschädigten Firma wurden Durchschnittskonzentrationen von 0,1 % Chlorid (bezogen auf die Probeneinwaage) als Sanierungsziel gesetzt.



Skizze 1: Grundriß der brandbetroffenen Stahlbeton-Konstruktionen, Brandausbruchsstelle, zu sanierender Bereich



Skizze 2: Rohrbrücke Ost/West



Skizze 3: Rohrbrücke Nord/Süd

Durchführung der Arbeiten

Trotz all dieser nicht abwägbaren Schwierigkeiten wurde am 11.10.1988 mit den Arbeiten begonnen. Bis dahin waren Demontearbeiten von Halterungen, Apparaturen und Rohrleitungen zu verrichten, um an die Betonfläche heranzukommen.

Die Elektrosanierungsarbeiten wurden von der gleichen norwegischen Firma durchgeführt, die auch die Abspitz- und Höchstdruck-Schälarbeiten und das Betonspritzverfahren durchführte. IfS-Mitarbeiter übernahmen die Einführung der Elektrosanierungs-Methode bei der Firma und die elektrische sowie chemisch-analytische Überwachung. Über die gesamte Zeit der Sanierungsarbeiten war ständig mindestens ein IfS-Mitarbeiter auf der Baustelle, zeitweise in 24-Stunden-Schichten und auch an den Wochenenden. In dieser Zeit wurden direkt vor Ort weit über 1000 Proben genommen und untersucht.

Skizze 1 gibt einen Grundriß der brandbetroffenen Stahlbeton-Konstruktionen wieder. Es sind hier auch Brandausbruchsstelle und Windrichtung eingetragen. Die gestrichelte Linie umfaßt die Bereiche, in denen aufgrund festgestellter hoher Chloridkonzentrationen im Beton eine Elektrosanierung durchzuführen war.

Das zentrale Gebäude „Struktur IV“, an dem die größten Schäden festzustellen waren, besteht aus einer Sohle und zwei Stahlbeton-Platten, die von 9 Stützen (90 x 90 cm² Querschnitt) getragen

werden. Mit einer Grundfläche von 15 x 13 m² und einer Höhe von 15 m sowie Deckenstärken von 50 cm ist dieses Gebäude für die Aufnahme großer Lasten ausgelegt. Entlang der Ostseite und entlang der Nordseite verlaufen die aus Stahlbeton-Fertigteilen aufgestellten Rohrbrücken. Größere Schäden wies die Rohrbrücke Ost/West im Bereich des Brandherdes auf. Die Rohrbrücke Nord/Süd zeigte nur in einem kleineren Bereich Abplatzungen bis zur Bewehrungstiefe. Die Bauformen der brandbetroffenen Gebäude werden aus den Skizzen 2 und 3 und Abb. 7 ersichtlich.

Die Arbeiten begannen an der Decke und den Stützen in der oberen Etage der am schwersten beschädigten Struktur IV. Zunächst wurden mit Preßluft-Hämmern und im Jet-Verfahren lockere Stücke und Schichten von zermürbtem Beton abgetragen. Hier konnte dann schon mit der Elektrosanierung begonnen werden, während der Beton in der unteren Hälfte des Gebäudes geschält wurde. Um die 500 m² Betonoberfläche der oberen Gebäudehälfte möglichst insgesamt sanieren zu können, wurden 5 Gleichrichter mit je 160 Ampere Stromabgabe eingesetzt.

Beim Anbringen der Aluminium-Folie stellten sich zahlreiche Probleme ein. Dort, wo der Beton bis hinter die Armierung abgeplatzt war, wurde die Aluminium-Folie hinter den freiliegenden Stählen verlegt. Wo nur die äußere Lage Stähle freilag, wurde versucht, die Folie in Streifen zwischen diesen Stählen zu verlegen und in Bereichen mit einseitig freiliegenden Stählen wurde versucht, beim Aufbringen der Folie mög-

lichst wenig Bentonit zwischen Folie und Stahl zur Seite zu drücken, um Kurzschlüsse weitgehend zu vermeiden. Außerdem waren zahlreiche Rohrdurchführungen, Montageplatten und herausragende Stahlstangen, die alle direkte Verbindung mit der Armierung hatten, auszusparen. Die Vorbereitung für eine Elektrosanierung dauerte zwei Tage. Dabei wurden allerdings fertiggestellte Teilflächen schon an die Spannungsquelle angeschlossen, während in anderen Bereichen noch Bentonit und Folie aufgebracht wurden. Wegen der nur geringen Gleichspannung war dies auch gefahrlos möglich.

Bei der Beschaffenheit der zu sanierenden Flächen waren Kurzschlüsse natürlich nicht zu vermeiden. An solchen direkten Kontaktstellen brannte die Folie dann bei Einschalten der Spannung unter Funkenerscheinungen spontan weg und der Kurzschluß war damit ausgeheilt. Dieser Effekt trat auch dann ein, wenn bei eingeschalteter Spannung Folie „tapeziert“ und gegen die Armierung gedrückt wurde. An das ständige Blitzen und Knallen hatten sich die beteiligten Mannschaften aber schnell gewöhnt, und mit Gummihandschuhen ließ sich auch dem elektrischen Sprühfeuer beugen.

Von sehr viel nachhaltigerer Wirkung auf den Fortgang der Extraktion waren die Stellen, an denen kein direkter Kontakt zwischen Folie und Armierung bestand, sondern eine dünne Schicht Bentonit dazwischen lag. An solchen Stellen floß besonders viel Strom von der Folie zur Armierung, ohne irgendwelchen Nutzen für die Extraktion des Chlors aus dem Beton zu haben. Erst wenn durch Stromwärme an diesen Stellen das Bentonit ausgetrocknet oder durch elektrochemische Umsetzung die Folie aufgezehrt war, ging der Anteil dieser Verlustströme zurück. Bei neu vorbereiteten Flächen war nach dem Einschalten der Gleichrichter aufgrund dieser geringen Übergangswiderstände meistens die Spannung auf unter 5 V abgefallen. Erst nach Stunden stieg die Spannung dann auf über 10 V.

Gegenüber früheren Schadenstellen, in denen diese störenden Effekte nicht auftraten und die Extraktion nach spätestens 24 Stunden beendet war, mußte die Schicht hier 2 bis 5 Tage (je nach Verluststromanteil) auf der Betonoberfläche bleiben. Durch die elektrochemische Aufzehrung der Folie mußte täglich „nachtapeziert“ werden, wobei dann auch die Verluststrombrücken wiederhergestellt wurden und die Extraktion weiter verzögert wurde. Die Effektivität der Extraktion wurde anhand von Chloridbestimmungen in der Bentonit-Schicht verfolgt. Dabei wurden im feuchten Bentonit Chloridkonzentrationen bis 8 % (bezogen auf das Gewicht der feuchten Bentonit-Probe) gemessen.

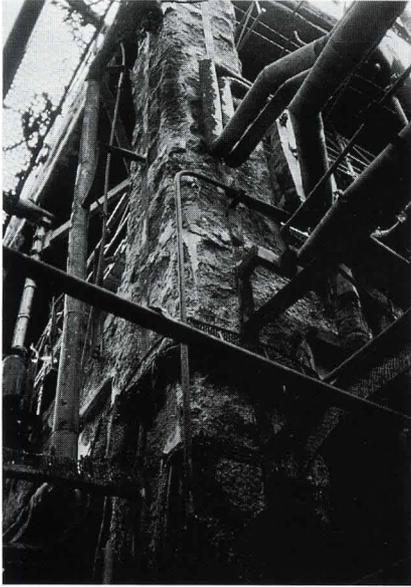


Abb. 1 Zustand nach dem Schaden



Abb. 2 Decke nach dem Schälén im Jet-Verfahren

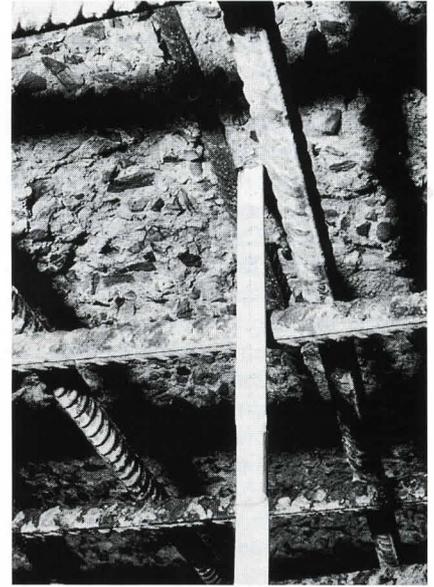


Abb. 3 Über 10 cm Beton waren während des Brandes abgeplatzt bzw. mußten abgetragen werden

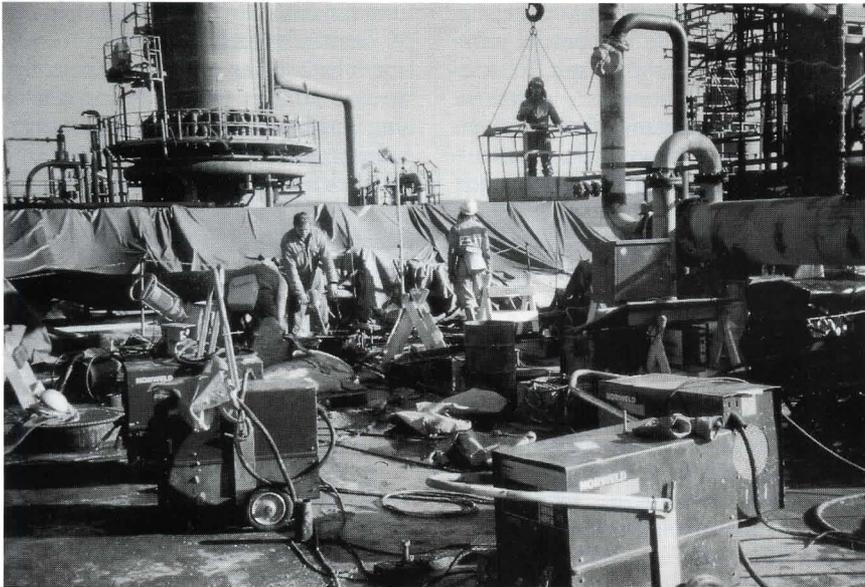


Abb. 4 Gleichstromversorgung und Bentonit-Aufbereitung auf der oberen Decke

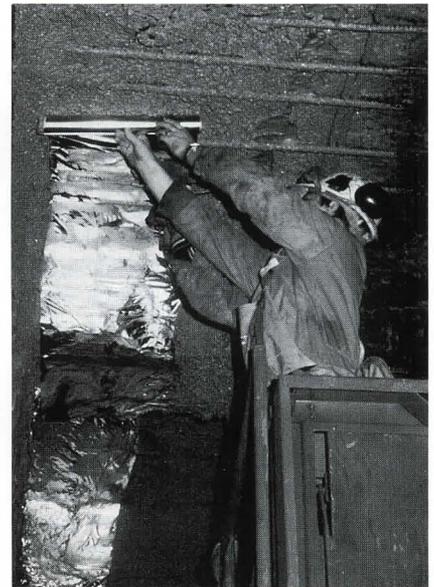


Abb. 5 Aufbringen der Aluminium-Folie

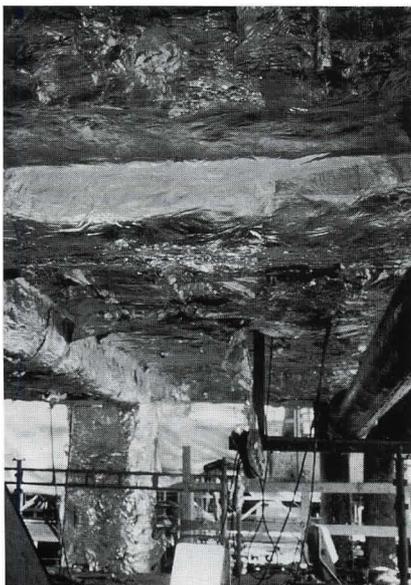


Abb. 6 Decke im 1. OG während der Elektrosanierung

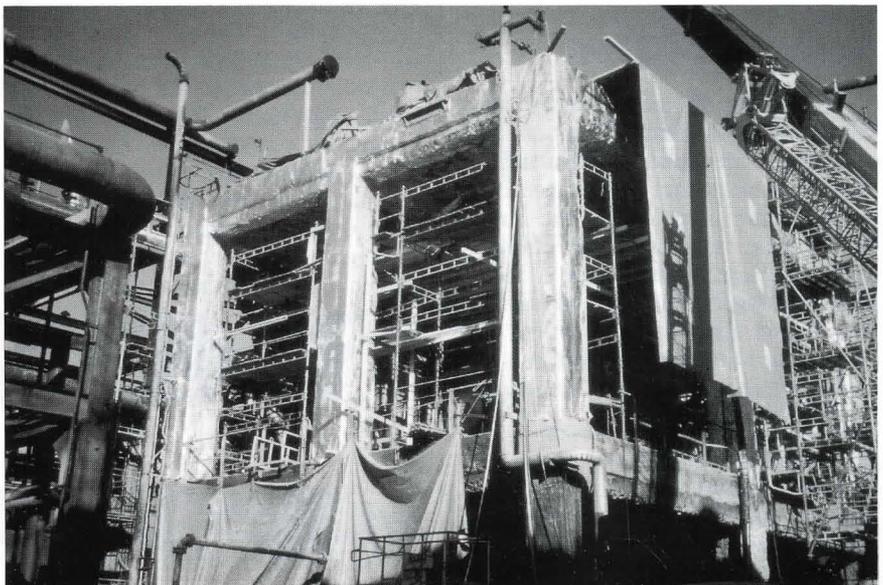


Abb. 7 Obere Hälfte von „Struktur IV unter Spannung“

Wenn sich dann schließlich entsprechende Chloridkonzentrationen im Bentonit aufgebaut hatten, konnte die Schicht entfernt werden. Wegen der rauen Betonoberfläche war dies nicht durch Abstoßen möglich. Nur durch Einsatz der Hochdruck-Wäsche (100–200 bar) ließ sich die Bentonit-Schicht restlos entfernen. Unmittelbar nach dem Abwaschen des Bentonits wurden Bohrproben entnommen und der Restgehalt Chlorid im Beton bestimmt. Um möglichst schnell umfassende Informationen über die Chloridkonzentrationen im Beton zu erhalten und über das weitere Vorgehen zu entscheiden, wurden nur jeweils 2 Fraktionen (0–25 und 25–50 mm) pro Probenahmestelle erbohrt. Die Gesamttiefe von 50 mm war nötig, weil die Chloride entsprechend tief in den Beton eingedrungen waren. Die Sanierung war selten nach einem Arbeitsgang beendet. In hartnäckigen Fällen waren bis zu sechs Beschichtungen nötig, wobei Teilbereiche schon früher fertig waren und bei den letzten Arbeitsgängen ausgespart werden konnten.

Nachdem die Abstemm- und Schälarbeiten an der unteren Plattform beendet waren, war der obere Bereich noch nicht chloridfrei. Um gleichzeitig in beiden Bereichen sanieren zu können, wurden fünf zusätzliche Gleichrichter beschafft. So war über das Wochenende 21. bis 23. 10.88 die gesamte Brandruine in Aluminium gehüllt und von 1600 A Strom durchflossen. Danach war die obere Plattform weitgehend abgeschlossen. Nur der Ringbalken an der Ostseite und angrenzende Teile des nördlichen und südlichen Ringbalkens wiesen noch sehr hohe Chloridkonzentrationen auf und mußten weiter behandelt werden. Unterdes wurde aber schon mit dem Betonspritzen des Deckenfeldes auf der Westseite begonnen.

Sanierung bei Frost

Zu diesem Zeitpunkt setzte auch schon der norwegische Winter ein und bescherte für den Rest der Arbeiten Dauerfrost. Zunächst, bei nur wenigen Grad Celsius unter Null, reichte die Stromwärme aus, um die Bentonitschicht nicht gefrieren zu lassen. Einige Beschichtungen mit Bentonit mußten aber wieder abgewaschen werden, weil sie nicht unmittelbar nach dem Anspritzen mit Folie eingedeckt und unter Span-

Dipl.-Chem. Helmut Bernhardt

Beton-Techniker A. Oehme

Dipl.-Ing. S. Stief

*Institut für Schadenverhütung und
Schadenforschung der öffentlich-rechtlichen
Versicherer e.V., Kiel*

Abbildungen 2 und 3:

Firma Novsk Hydro A/S

nung gesetzt worden waren. An der gefrorenen Bentonitschicht ließen sich weder die Folie richtig fixieren noch ein Stromfluß herbeiführen. Später, bei weitergefallenen Temperaturen, mußten die bearbeiteten Bereiche mit Planen verkleidet und beheizt werden. Diese Maßnahme war auch für das anschließende Betonspritzen erforderlich. Das war besonders bei den Rohrbrücken schwierig, weil dies sehr luftige Konstruktionen waren und das Anbringen von Planen überall durch Rohre und Kabelpritschen behindert war.

Hier wurde auch nach der ersten Probenahme deutlich, daß die Chlorid-Belastungen der Rohrbrücken in unterschiedlichen Höhen der Stahlbetonkonstruktion und Entfernung bzw. Windrichtung zum Brandherd stark differierten. Um die Sanierungsarbeiten zu optimieren und damit zu beschleunigen, wurde ein Gebiet möglichst genau abgesteckt, in dem die Chloridkonzentration im Beton bis zu einer Tiefe von 25 mm im Durchschnitt über 0,100 % betrug. Dazu war eine große Probenzahl erforderlich. Die Probenahme – mit Bohrmaschine und Kabeltrommel – gestaltete sich an schwer zugänglichen Punkten der Betonkonstruktion vielfach zeitaufwendiger als die Analytik. Sofort nach

der Probenahme wurde analysiert, um möglichst schnelle Entscheidungsgrundlagen zum weiteren Vorgehen zu haben.

Die Rohrbrücken bestanden im Gegensatz zur Struktur IV (Ortbeton) aus Fertigbetonteilen. Die Bewehrungen der einzelnen Bauteile waren nicht miteinander metallisch leitend verbunden. So mußten für die Sanierung durch Kabelverbindungen zwischen den Bewehrungen benachbarter Bauteile Überbrückungen geschaffen werden. Die Rohrbrücken bildeten den Abschluß der Elektrosanierungs-Arbeiten.

Bis zu diesem Zeitpunkt hatte sich das Sanierungspersonal bereits soweit eingearbeitet, daß keine weiteren Verzögerungen mehr durch Fehler in der Ausführung eintraten. Dies war nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß Spannung und Stromfluß von der ausführenden Firma während eines Sanierungsganges in regelmäßigen Zeitabständen überwacht wurden.

Die Gesamtkosten der Elektrosanierung von ca. 2 Mio NKr entsprechen den Betriebsunterbrechungskosten von einem halben Tag. Dabei wurden einige Wochen an Zeit für die Wiederherstellung eingespart. Die Elektrosanierungs-Arbeiten konnten am 21. November 1988 erfolgreich abgeschlossen werden.

Zusammenfassung

Durch die Verbrennung austretenden Dichlorethangases wurden in einer Industrieanlage 64 t Chlorwasserstoff als Bestandteil der Rauchgase freigesetzt. Dies führte zusätzlich zu den erheblichen thermischen Schäden zu hohen Chloridkonzentrationen und großen Eindringtiefen an den tragenden Betonkonstruktionen, die zudem der freien Witterung ausgesetzt sind. Abriß und Wiederaufbau schienen zunächst unvermeidlich. Die Elektrosanierung wurde als Alternative vorgeschlagen, von den Verantwortlichen akzeptiert und unter ständiger Kontrolle durchgeführt. Sie brachte im Vergleich einen mehrwöchigen Zeitgewinn und damit erhebliche Einsparungen der BU-Kosten. Als Sanierungsziel wurden Chloridkonzentrationen $\leq 0,1\%$ angestrebt und erreicht. Diese bisher umfangreichste

durchgeführte Elektrosanierung brachte die folgenden Erkenntnisse:

1. Die Elektrosanierung läßt sich auch bei leichtem Frost (bis ca. -5°C) ohne zusätzliche Heizung durchführen.
2. Mit entsprechenden Verzögerungen ist auch die Sanierung von abgeplatzten Betonflächen mit freiliegenden Stählen möglich.
3. Durch Parallelschalten von entsprechend vielen Gleichrichtern lassen sich beliebig große Flächen in einem Arbeitsgang sanieren.
4. Die Elektrosanierung ist geeignet, größte Chloridkonzentrationen auch bei Eindringtiefen bis hinter die Armierung zu extrahieren.

Die Chloridkonzentrationen aus dem nördöstlichen, besonders stark chloridhaltigen Feld der unteren Decke von Struktur IV verdeutlichen den Sanierungserfolg:

Bohrtiefe mm	Gewichtsprozent Chlorid (von 25 mm-Schichten)			
	18. 10. 88	21. 10. 88	24. 10. 88	nach letztem Arbeitsgang
0–25	0,536	0,875	0,402	0,069 (10. 11. 88)
20–50	0,413	0,259	0,159	-----
0–25	0,696	0,168	0,111	0,032 (07. 11. 88)
25–50	0,451	0,161	0,063	-----
0–25	0,514	0,336	0,385	0,064 (04. 11. 88)
25–50	0,134	0,218	0,133	-----