

**SONDERDRUCK  
AUS BWI 08/06**

Maik Diepenseifen, Ditmar Hornung, Werner Schultz

## **Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff**

auf Basis des Premium-Zements Dyckerhoff VARIODUR®

... mit Mikrodur Technology



# Dyckerhoff

Dyckerhoff AG, 65203 Wiesbaden, Deutschland

# Beton mit hohem Widerstand gegen Säureangriff

Erfahrungsgemäß werden die Dauerhaftigkeitsanforderungen an abwassertechnische Anlagen bei Beanspruchungen durch übliche kommunale Abwässer mit dem Einsatz von Normalbeton erfüllt. Enthält das Abwasser jedoch betonangreifende Medien in höheren Konzentrationen oder bildet sich in der Kanalatmosphäre betriebsbedingt biogene Schwefelsäure, so werden oftmals bereits nach wenigen Betriebsjahren starke Korrosionserscheinungen beobachtet. Daraus können erhebliche Einschränkungen in der Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit der Abwasseranlage folgen. Gegenüber anderen in der Abwassertechnik eingesetzten Baustoffen weist Beton dennoch entscheidende technische und auch wirtschaftliche Vorteile auf, so dass von den Netzbetreibern für Abwasserbereiche mit besonders hohem Angriffspotenzial Betone mit hohem Säurewiderstand gefordert werden.

■ Maik Diepenseifen, E + F GmbH, Rohrwerk Epiton,  
Dr. Dittmar Hornung, Werner Schultz, Dyckerhoff AG,  
Deutschland ■

## Hochleistungsbindemittel mit Hüttensandfeinstmehlen

Betone mit hohem Säurewiderstand verfügen über eine besonders hohe Gefügedichtheit, die einerseits durch einen niedrigen Wasserbindemittelwert und andererseits durch Verwendung von reaktiven Betonzusatzstoffen sichergestellt wird. Mit einer optimal aufeinander abgestimmten Bindemittelgranulometrie kann die Gefügedichtheit noch weiter erhöht werden. Daneben werden das Bindemittelvolumen und damit der Gehalt an potenziell säurelöslichen Bestandteilen im Beton soweit wie möglich reduziert, wodurch der Säurewiderstand zusätzlich gesteigert werden kann. Die Optimierung der Dauerhaftigkeitseigenschaften hat dabei jedoch so zu erfolgen, dass die Erhärtungscharakteristik des Bindemittels/Betons die herstellungstechnologischen Anforderungen erfüllt.

Die genannten Maßnahmen können jedoch zu Schwierigkeiten in der Herstellung und Verarbeitung des Betons führen. Für praxistaugliche Betone ist daher eine Optimierung zwischen der Erhöhung des Säurewiderstandes einerseits und einer ausreichenden Verarbeitbarkeit andererseits notwendig. Hochwirksame und auf das Bindemittel abgestimmte Fließmittel in Kombination mit einer grobkornreichen Sieblinie der Gesteinskörnung sind hierfür zweckmäßige Maßnahmen.

Aus den Erfahrungen einer mehrjährigen Entwicklungsarbeit lassen sich vorgenannte Anforderungen am besten erfüllen, wenn die Bindemittelkomponenten nach getrennter Mahlung und Sichtung in Hochleistungsmischern gezielt zusammengesetzt werden. Die separate Optimierung erfolgte dabei sowohl aus chemischen Reaktivitätsgründen als auch nach granulometrischen Kriterien. Die im Ergebnis bei der Dyckerhoff AG entwickelten Premium-Zemente leisten als

Tabelle 1: Betonrezepturen

	Beton 1	Beton 2
<b>Zement</b>	Variodur 40 CEM III/A 52,5 R 350 kg/m <sup>3</sup>	Sulfadur CEM I 42,5 R-HS/NA 245 kg/m <sup>3</sup>
<b>Flugasche</b>	-	77 kg/m <sup>3</sup>
<b>Microsilica</b>	-	56 kg/m <sup>3</sup>
<b>Wasser</b>	147 kg/m <sup>3</sup>	127 kg/m <sup>3</sup>
<b>w/b-Wert</b>	0,42	0,42

CEM II und CEM III Zemente dabei auch einen Beitrag zur Ressourcenschonung und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung.

Wie bei anderen Hochleistungsbetonen ist auch bei Beton mit hohem Säurewiderstand im Zuge der Betonherstellung eine sehr hohe Gleichmäßigkeit sicherzustellen. Dazu ist eine intensive Überwachung der Ausgangsstoffe und des Frischbetons notwendig, die z. T. über die Normvorgaben deutlich hinausgehen.

Die Entwicklung der Hochleistungsbindemittel  $\geq$  XA 3 begann bei der Dyckerhoff

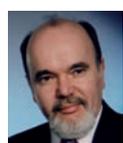
AG bereits Ende der 90er Jahre, um einem sauren chemischen Angriff bis zu einem pH-Wert von 3,5 ausreichend ohne zusätzlichen Schutz der Betonoberfläche dauerhaft zu widerstehen. Schon bei den ersten Versuchen wurden hüttensandhaltige Zemente eingesetzt, bei denen Hüttensand und Portlandzementklinker getrennt gemahlen, granulometrisch optimiert und anschließend in Hochleistungsmischern unter Zugabe eines Sulfatträgers hergestellt wurden.



■ Dipl.-Ing. Maik Diepenseifen studierte an der Universität-Gesamthochschule Essen von 1995-2000 Bauingenieurwesen mit den Vertiefungen Wasserbau und Grundbau. Von 2000 bis 2002 war er bei mittelständischen Stahlbauunternehmen als Bauleiter und Kalkulator tätig (Stahlhochbau, Industriebau, Anlagenbau, Schlüsselfertigbau). Seit 2002 ist er Werkleiter bei der E+F GmbH, Rohrwerk Epiton und verantwortet dort als E-Schein Inhaber auch die betontechnologische Konzeption und Überwachung des Werkes. Neben dieser verantwortungsvollen Tätigkeit absolviert er zzt. ein wirtschaftswissenschaftliches Zweitstudium.



■ Dr.-Ing. Dittmar Hornung, 1968 - 1975 Studium/Promotion Technische Universität Dresden. 1975 - 1990 Tätigkeit im Zementwerk Deuna/Thüringen in verschiedenen technischen Funktionen. 1991 - 2004 Verantwortlich für Produktqualität, Produktentwicklung, Produktanwendung bei der Deuna Zement GmbH (Dyckerhoff AG) mit den Schwerpunkten Rheologie von Baustoffmischungen und Kompositzementen mit Hüttensand- und Kalksteinmehlen. Seit 2005 Leiter Produktprogrammentwicklung und Anwendungsberatung Zement bei der Dyckerhoff AG



■ Dipl.-Ing. Werner Schultz studierte in Essen Bauingenieurwesen und war anschließend in der Prüfstelle der Hochtief AG Essen tätig, zuletzt als stellv. Prüfstellenleiter. Danach Tätigkeit als Prüfbeauftragter im Rahmen der Güteüberwachung des Deutschen Beton Vereins. Anschließend wechselte er zur BauMineral in den technischen Vertrieb für Steinkohleflugasche. Seit 1991 ist der Bauberater der Dyckerhoff AG. Er ist Mitglied im Arbeitsausschuss Technik und Normung des Bundesverbandes Mineralische Rohstoffe MIRO, Mitglied im DIN Normenausschuss Spritzbeton und im Deutschen Spiegelausschuss für die Europäische Spritzbetonnormung. Außerdem ist er als Dozent im Rahmen der Erweiterten betontechnologischen Ausbildung (E-Schein) tätig.

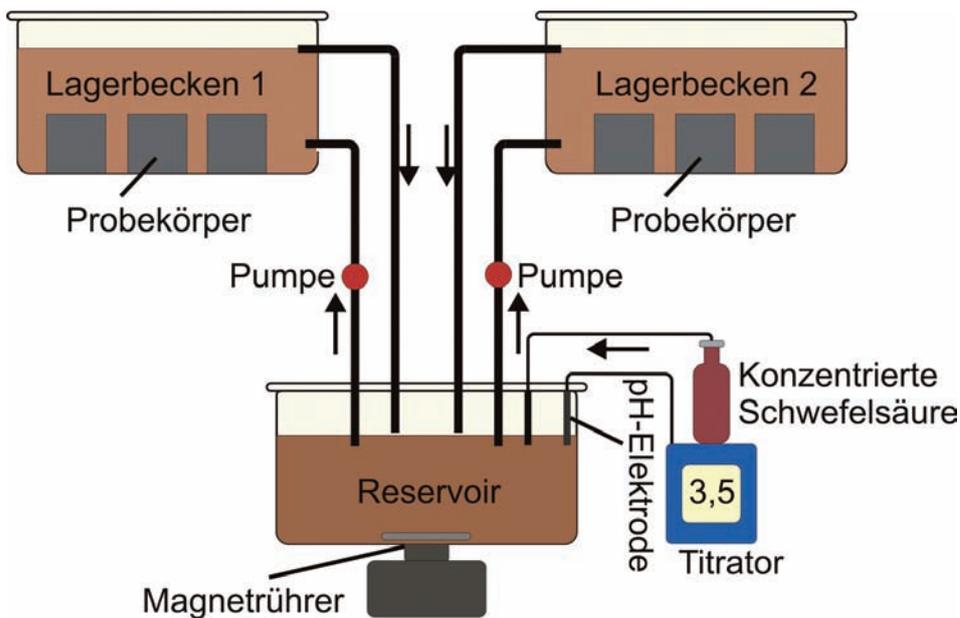


Abb. 1: Prinzipskizze Säureprüfstand

Tabelle 2: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen

	$\alpha_5/\alpha_{45}$ [mm]	LP-Gehalt [%]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Alter [Tage]	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ct}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Beton 1	490 / 460	0,5	2.420	1	35,9	24.600	2,5
				28	89,3	39.000	4,9
				56	93,5	38.600	4,8
Beton 2	560 / 430	1,2	2.400	1	19,8	22.200	1,8
				28	88,0	37.300	4,3
				56	95,9	39.400	4,9

## Vergleichsstudie an zwei Betonen mit hohem Säurewiderstand

### Ausgangssituation

Am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum wurde im Auftrag der Dyckerhoff AG eine Vergleichsstudie an zwei Betonen durchgeführt. Dabei wurde je Beton ein Eigenschaftsprofil erstellt, das die wesentlichen Frisch- und Festbetoneigenschaften beinhaltet. Ein Schwerpunkt der Studie lag in der vergleichenden Untersuchung des Säurewiderstandes der betrachteten Betone.

Die Betone unterschieden sich in ihrer Bindemittelzusammensetzung. Beton 1 wurde mit einem Hochofenzement unter Verwendung von Hüttensandfeinstmehlen aus getrennter Mahlung hergestellt. Beton 2 dagegen wurde unter Verwendung von Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand, Flugasche und Silikastaub hergestellt

[1]. Beide Betone wiesen einen w/b-Wert von 0,42 auf und wurden mit quarzitischen Gesteinskörnungen (Größtkorn 16 mm) hergestellt. Neben den Laborbetonen wurden weitere Proben aus einem großformatigen Rohr, der aus Beton 1 hergestellt wurde, in die Säureprüfungen mitaufgenommen.

### Säureprüfungen

Die Prüfung des Säurewiderstandes erfolgte für jeden Beton in einem separaten Lagerbecken. Als Prüflösung kam Schwefelsäure mit einem pH-Wert von 3,5 zum Einsatz. Während der gesamten Versuchsdauer wurde die Schwefelsäure durch Pumpen im Kreislauf bewegt. Alle 2 Wochen wurde die Prüflösung des Reservoirs und der Lagerbecken vollständig ausgetauscht. Der Gesamtaufbau des Säureprüfstandes ist in Abb.1 dargestellt.

An den eingelagerten Betonproben wurde während der Einlagerungsdauer von 15

Wochen der Masseverlust an je drei ungebürsteten und drei gebürsteten Probekörpern bestimmt. Phenolphthalein-Tests an den frischen Bruchflächen gaben Aufschluss über die Schädigungstiefe. Der unverfärbte Bereich der Bruchfläche wurde mikroskopisch aufgenommen und vermessen. Aus je einer ungebürsteten und gebürsteten Betonscheibe der beiden Betonsorten wurden nach Abschluss der Säurelagerung Dünnschliffe angefertigt und mikroskopisch untersucht.

### Frisch- und Festbetoneigenschaften

Im Hinblick auf eine werksmäßige Herstellung von Betonrohren konnten mit beiden Betonrezepturen verarbeitungsfreundliche und praxisgerechte Frischbetoneigenschaften erzielt werden. Nach einem Tag wies der Beton 1 eine höhere Druckfestigkeit als Beton 2 auf. Nach 28 und 56 Tagen unterschieden sich hingegen die mechanischen Eigenschaften beider Betone nicht mehr wesentlich voneinander (Tabelle 2).

### Masseänderung

Die ungebürsteten Probekörper beider Betone wiesen bereits nach wenigen Tagen Lagerung in Schwefelsäure signifikante Massezunahmen auf (Abb. 2). Die anfängliche Massezunahme ging im weiteren Verlauf der Säurelagerung kontinuierlich zurück, wobei die Massezunahme von Beton 1 durchgehend etwas höher ausfiel. Dieses Verhalten wurde bereits in früheren Arbeiten festgestellt und auf die Neubildung von Reaktionsprodukten aus Beton- und Säurebestandteilen zurückgeführt, die im Betongefüge verbleiben [2, 3]. Bei den gebürsteten Proben ist die Überlagerung von Reaktionsprodukten und Masseabtrag infolge Säureangriff weniger deutlich, da hier die leicht anhaftenden Reaktionsprodukte an der unmittelbaren Oberfläche mechanisch entfernt werden. Ein tatsächlicher Masseverlust gegenüber der Ausgangsmasse vor der Säurelagerung wurde bei dem Beton 2 nach 73 Tagen und bei Beton 1 sogar erst nach 107 Tagen Schwefelsäurelagerung festgestellt. Ein augenscheinlicher Unterschied war an den Probekörpern der beiden Betone nicht erkennbar. Die Massezunahme ist bei den Rohrproben ausgeprägter als beim Laborbeton gleicher Zusammensetzung.

### Schädigungstiefe (Phenolphthalein-Test)

An den mit Phenolphthalein besprühten frischen Bruchflächen konnte über den Farbkontrast eine Schädigungsfront mittels Lichtmikroskopie beobachtet werden. Erwartungsgemäß war der Verlauf der Schädigungstiefe über den Umfang der Probekörper ungleichmäßig verteilt. Bereits

nach 31 Tagen Schwefelsäurelagerung zeichnete sich für Beton 1 gegenüber Beton 2 eine etwas geringere Schädigungstiefe ab. Der Rohrbeton wies durchgehend etwas höhere Schädigungstiefen auf als der Laborbeton 1 [4].

### Rohrvortrieb Gelsenkirchen Zoom

In Gelsenkirchen Nähe Ruhr-Zoo „Zoom - Erlebniswelt“, wurde ein Abwasserkanal aus zwei Vortriebsstrecken in Kurvenfahrt mit einem Radius von 470 m aus einer Doppelpressgrube im Emschermergel vorgetrieben. Die bauausführende Firma W. Epping Spezialtiefbau setzte dazu eine Rohrvortriebsanlage mit offener Ortsbrust und einem steuerbaren Schneidschuh ein. Die im Startschacht installierte Hauptpressstation bestand aus 4 Hydraulik-Teleskop-Zylindern mit einer Presskraft von je 3.000 KN je Zylinder. Zur Vermeidung von unzulässigen Pressenkräften wurden entsprechende Überdruckventile installiert.

Mit einer im Maschinenrohr befestigten Teilschnittmaschine wurde der Boden an der Ortsbrust gelöst und mit Hilfe eines Förderbandes in eine Lore transportiert. Seilwinden zogen die Lore durch die Druckluftschleusenkammer zum Startschacht, wo sie ein Seilbagger entleerte. Zur Abdichtung des Ringspalts und Reduzierung der Gebirgsreibung wurde beim Vortrieb Bentonitsuspension eingesetzt. Die jederzeit frei begehbare Ortsbrust selbst wurde durch Luftüberdruck gestützt, der das anstehende Grundwasser verdrängte und ein Einfließen nicht standfester Böden verhinderte.

### Anforderung an die Vortriebsrohre

Die Vortriebsrohre waren auf Grundlage der DIN EN 1916 und DIN V 1201, sowie den vertraglich vereinbarten Leistungsverzeichnissen und zusätzlichen technischen

Vertragsbedingungen (ZTV) des Auftraggebers Emschergenossenschaft wie folgt zu produzieren:

- Vortriebsrohre DN1600/DA2240
- Standardbaulänge 4,00m
- Gewicht 19,5 t
- mit Edelstahlmanschetten, wie auch alle weiteren Einbauteile
- Beton mit erhöhtem Säurewiderstand (SWB)

### Rohrfertigung

Die Rohre wurden im Werk Hünxe der E+F GmbH Rohrwerk Epiton hergestellt. Vor Aufnahme der Rohrfertigung war ein QS-Plan unter Mitwirkung aller Beteiligten und in Abstimmung mit dem Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum erforderlich. Die umfangreiche Erstprüfung wurde im April 2007 unter Aufsicht der Emschergenossenschaft und der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Dabei wurden zahlreiche Probekörper hergestellt, u. a. für Analysen des chemischen Widerstandes.

Zur Fertigung der Bewehrungskörbe wurde eine der weltweit größten Korbschweißmaschinen verwendet, die von der MBK - Maschinenbau GmbH hergestellt wurde. Diese Maschine stellte die inneren und äußeren Bewehrungskörbe separat entsprechend der statischen Berechnung bzw. den Bewehrungsplänen vollautomatisch her. Der fertige Korb war zu kontrollieren und die Daten in den Rohrbegleitschein einzutragen. Die Emschergenossenschaft forderte für die Betonüberdeckung eine maximale Abweichung von nur  $\pm 5$ mm. Die Rohre wurden stehend in zentrierten Stahlformen gegossen. Von Juni bis Dezember 2007 wurden mit einem Formensatz zwei Vortriebsrohre pro Tag gefertigt.

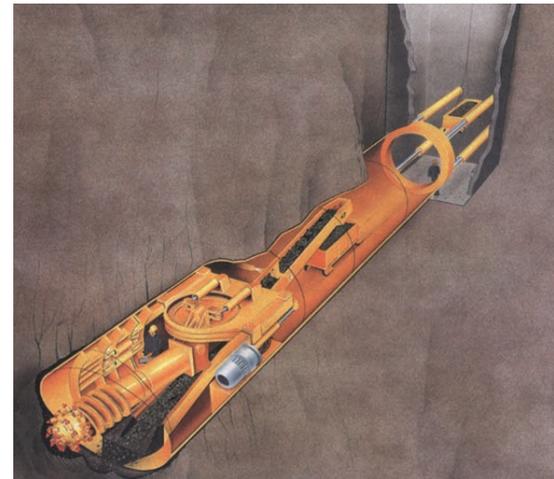


Abb. 4: Tunnelbohrmaschine



Abb. 5: Vortriebsrohr

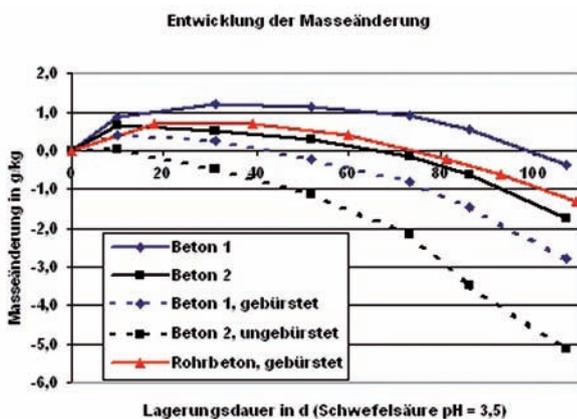


Abb. 2: Entwicklung der Masseänderung

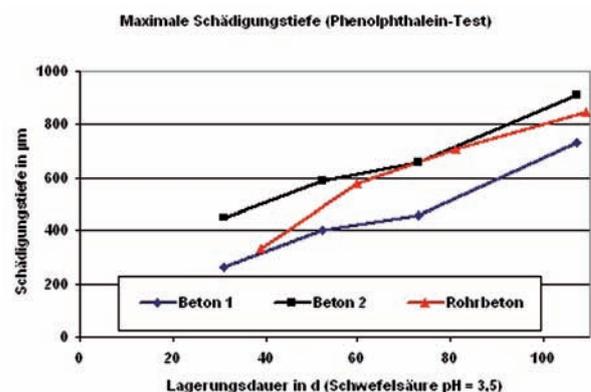


Abb. 3: Entwicklung der beobachteten maximalen Schädigungstiefen

Tabelle 3: Betonzusammensetzung SWB

Bezeichnung	kg / m <sup>3</sup>
CEM III / A 52,5 R	320
Brechsand 0 / 2 mm	701
Kies 2 / 8 mm	301
Kies 8 / 16 mm	1.002
Wasser	133
Betonverflüssiger (PCE)	2

**Betonherstellung und QS-Maßnahmen**

Die EmscherGenossenschaft hatte für die Herstellung der Vortriebsrohre folgende, sehr anspruchsvolle Anforderungen an den Beton mit erhöhtem Säurewiderstand (SWB) festgelegt:

- Betondruckfestigkeitsklasse: C50/60 (Obergrenze der Druckfestigkeit nach 28 Tagen ≤ 90 N/mm<sup>2</sup>)
- Expositionsklassen: XC4, XD3, XM2, XA3\*  
\* auf zusätzliche Schutzmaßnahmen entsprechend der Anforderung aus der Expositionsklasse XA3 wurde aufgrund der besonderen betontechnologischen Maßnahmen explizit verzichtet
- Größtkorn der Gesteinskörnung: 16 mm (keine calcitische Gesteinskörnung)
- w/z-Wert bzw. w/b-Wert: ≤ 0,42
- Bindemittelgehalt (Zement + Betonzusatzstoffe): ≤ 350 kg/m<sup>3</sup>

Aus den 2 Varianten des Ausschreibungstextes wurde die folgende gewählt:

Tabelle 4: Eigenschaften Variodur 40, CEM III / A 52,5 R

Lageparameter d'	8,20 µm
Steigungsmaß n	0,99
H <sub>2</sub> O-Normsteife	31,5 M.-%
Erstarrensbeginn	200 min
Erstarrensende	230 min
Falsches Erstarren	12,8 cm
Le Chat.	0,0 mm
<b>Druckfestigkeit N/mm<sup>2</sup></b>	
N 1	21,0
N 2	37,6
N 7	63,2
N 28	78,0
N 56	80,1
<b>SO<sub>3</sub>-Gehalt</b>	1,72 M.-%
<b>Hydratationswärme</b>	
0 bis 0,5h	12,2 J/g
0 bis 1 d	173 J/g
0 bis 2 d	259 J/g
0 bis 3 d	305 J/g
0 bis 7d	358 J/g

**Rohrbeton SWB C 50 / 60  
Prüfalter 28 Tage**

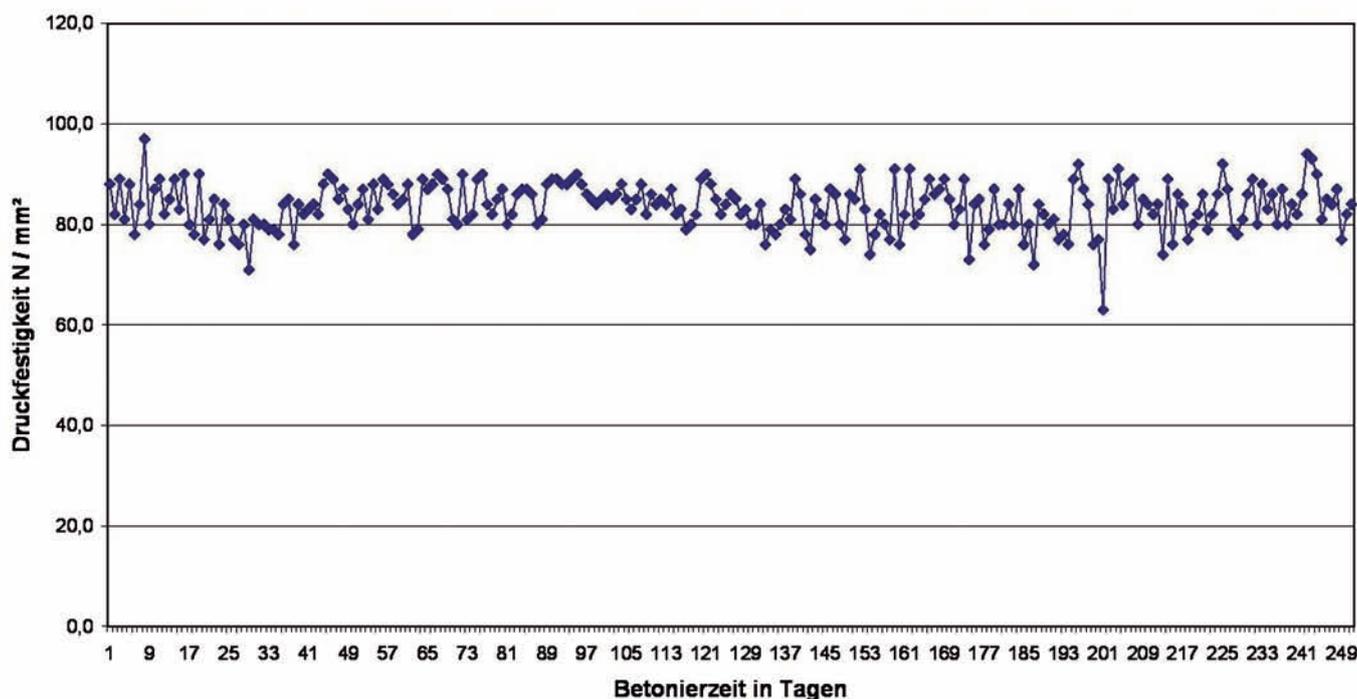


Abb. 6: Betondruckfestigkeiten Rohrbeton



Abb. 7/8: Kläranlage MG-Neuwerk

- a. Zementart: CEM III / A 52,5 R nach DIN EN 197-1
- b. Gehalt an Hüttensand: 40 M.-%  
± 3 M.-%
- c. Getrennte Mahlung von Zementklinker und Hüttensand
- d. Anforderungen an gemahlene Portlandzementklinker:  
Mahlfeinheit nach Blaine: 5.000 cm<sup>2</sup>/g ± 500 cm<sup>2</sup>/g  
Lageparameter d´: 11 µm ± 1,5 µm
- e. Anforderungen an gemahlene Hüttensand:  
Mahlfeinheit nach Blaine: 8.000 cm<sup>2</sup>/g ± 500 cm<sup>2</sup>/g  
Lageparameter d´: 6 µm ± 1,5 µm

Die umfangreichen Erstprüfungen am Beton beinhalteten u. a.:

- Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Schwefelsäure entsprechend dem Säureprüfverfahren nach Hüttl
- pH-Wert der Schwefelsäure 3,5
- Bestimmung des Chloridmigrations-Koeffizienten
- Bestimmung der Gesamtporosität

Diese Prüfungen wurden auf Veranlassung des Auftraggebers im MPA Berlin-Brandenburg durchgeführt. Die anfallenden Kosten für die Durchführung der Prüfungen wurden von der Emschergerossenschaft übernommen.

Zur Ausführung kam Beton der unter Verwendung der Bindemittelvariante A hergestellt wurde. Die Betonrezeptur ist in Tabelle 3 dargestellt.

Der Zement wurde von der Dyckerhoff AG, Werk Neuwed geliefert, der Beton von der Fa. Elskes Transportbeton GmbH & Co.KG, Werk Hünxe. Die Betonherstellung wurde durch die Fa. Melius Baustofftechnik überwacht. Die Festigkeitsprüfungen für den angelieferten Beton wurden im Auftrag der E+F GmbH, Rohwerk Epiton durch die Prüfstelle Kondor Wessels durchgeführt.

Vorlaufende und baubegleitende QS-Maßnahme

- Aufstellung eines QS - Planes in Abstimmung mit dem Auftraggeber und der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik
- Schulung der Mitarbeiter und Nachunternehmer durch die Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik
- SWB war in Überwachungskategorie 3 einzustufen
- Lasergranulometrie der Ausgangsstoffe
- Lasergranulometrie des Zementes

- Chemische Zusammensetzung des Zementes
- Erstarrungsbeginn und -ende
- Frischbetontemperatur zwischen 10° C - 30° C

Die Zementdaten des gewählten CEM III / A 52,5 R (Variodur 40) der Dyckerhoff AG, Werk Neuwed zeigt Tabelle 4.

Der Zement wurde aus den getrennt gemahlene Einzelkomponenten Zement und Hüttensand nach Bestellung in einem Hochleistungsmischer gemischt und anschließend immer direkt „frisch“ in das Silofahrzeug produziert. Während des Produktionsvorgangs wurde der Zement beprobt, im Werklabor Neuwed der Dyckerhoff AG analysiert und anschließend die Beladung des Silofahrzeugs freigegeben. Noch während der Fahrt des Silofahrzeugs vom Zement- zum Transportbetonwerk wurden die ermittelten Zementdaten (Lasergranulometrie und SO<sub>3</sub> - Gehalt) dem Empfänger per E-Mail übermittelt, so dass vor Ankunft des Silofahrzeugs im Transportbetonwerk die vom Auftraggeber verlangten Nachweise vorlagen. Tabelle 5 zeigt die ermittelten Daten über einen Lieferzeitraum von ca. elf Monaten.

Tabelle 5: Lasergranulometrische Kennwerte und SO<sub>3</sub> - Gehalt

	Variodur 40 CEM III / A 52,5 R		
	Lageparameter d´ µm	n	SO <sub>3</sub> M.-%
<b>Mittelwert</b>	9,3	1,00	1,81
<b>Min.</b>	8,2	0,93	1,72
<b>Max.</b>	9,7	1,03	1,89

Die Zahlen zeigen die hohe Gleichmäßigkeit des hergestellten Zementes, der nicht nur bei den Einzelkomponenten Hüttensand und Portlandzementklinker die festgelegte Schwankungsbreite im Lageparameter d´ einhielt, sondern auch im fertigen Zement.

Der Beton wurde in der Konsistenzklasse F3 produziert und im Transportbetonwerk sowie im Betonfertigteilwerk gemäß QS Plan geprüft. Nach Konsistenzbeurteilung per Augenschein wurde der Beton dann über einen Verteilerteller gleichmäßig der Schalung zugeführt. Zur Verdichtung kamen kranzförmig angeordnete Innenvibratoren (Flaschenrüttler) zum Einsatz, die entsprechend der Betonbefüllung hochgezogen wurden. Das Spitzende wurde überbetoniert und mit den Flaschenrüttlern nachverdichtet. Der Rohrspiegel wurde auf Höhe abgezogen, um die für Vortriebsrohre

Tabelle 5: Technische Daten der Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk

Einwohnerwerte	635.000 E
Trockenwetterzufluss $Q_t$	150.000 m <sup>3</sup> /d 6.250 m <sup>3</sup> /h
Mischwasserzufluss $Q_m$	288.000 m <sup>3</sup> /d
Biologische Reinigungsstufe	12.000 m <sup>3</sup> /h
Mechanische Reinigungsstufe	38.000 m <sup>3</sup> /h

wichtige Rechtwinkligkeit und Ebenheit der Stirnflächen zu gewährleisten. Der Spitzend Spiegel wurde abgedeckt und die Rohre mussten nach Betonierende mindestens acht Stunden in der Form erhärten. Die Betondruckfestigkeiten im Prüfalter von 28 Tagen aus der Eigenüberwachung der E+F GmbH, Rohwerk Epiton zeigt Abb. 6. Der geforderte C 50/60 wurde zu jedem Produktionszeitpunkt sicher erreicht. Zur 3-tägigen Nachbehandlung wurde dem Rohr unmittelbar nach dem Ausschalen eine Haube übergestülpt. Durch Zufuhr von Wasser unter die Haube stellte sich eine relative Luftfeuchtigkeit von mindestens 85% ein. Das Abziehen des Rohres von der Untermuffe durfte frühestens nach drei Tagen erfolgen und die Rohre mussten dann mindestens sechs Tage stehend gelagert werden. Zur Dokumentation der Fertigungsschritte, Abmaße, Einbauteile, Baustoffangaben etc. wurde zu jedem Rohr ein Rohrbegleitschein erstellt. Der Versand der Rohre erfolgte frühestens nach fünfzehn Tagen. Vor der Fahrzeugbeladung wurde jedes Rohr einer Endkontrolle unterzogen und das Ergebnis auf dem jeweiligen Rohrbegleitschein vermerkt.

### Auslagerungsversuche Niersverband

Da nicht alle chemischen Angriffe in Abwasseranlagen im Labor abgebildet werden können, wurde parallel zu den Laboruntersuchungen von der Dyckerhoff AG ein Auslagerungsversuch angestrebt.

Hier konnte der Niersverband zur Durchführung eines umfangreichen Auslagerungsprogramms gewonnen werden. In der Kläranlage Mönchengladbach -Neuwerk (Abb. 7 bis 10) wurden dazu Mörtelprismen mit verschiedenen Zementen in speziell gefertigten Auslagerungskörben an exponierten Stellen platziert.

### Technische Daten der Kläranlage Mönchengladbach-Neuwerk

Der im Mai 2006 begonnene Auslagerungsversuch ist der umfangreichste seiner Art im deutschen Abwassernetz:

- 420 Probekörper
- 6 Auslagerungsstellen (4 im Gasraum /2 in der Wasserwechselzone)
- 1 Kontrolllagerung
- Versuchsdauer 5 Jahre

### Laboruntersuchungen Niersverband / Wilhelm Dyckerhoff Institut

Die Auslagerung wird in engen Intervallen durch ein sorgfältig abgestimmtes Untersuchungsprogramm mit folgenden Prüfungen begleitet:

- Abwasseranalysen
- Gasanalysen
- E-Modul
- Abwitterung
- Gewicht
- Druckfestigkeit
- Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen des Zementsteingefüges

- Rietveld-Analysen
- Quecksilberdruckporosimetrie

Die chemischen Gas- und Wasseranalysen führt das Labor des Niersverbandes standardmäßig durch. Die weiteren Untersuchungen erfolgen im Vergleich zu den im Wilhelm Dyckerhoff Institut gelagerten Nullproben, um u. a. auch Erkenntnisse über Veränderungen im Zementsteingefüge der ausgelagerten Proben zu gewinnen. Bei saurem chemischen Angriff (pH-Werte  $\geq 3,5$ ) zeigen die in getrennter Mahlung hergestellten Hochofenzemente mit granulometrisch optimierten Feinsthüttensandmehlen gegenüber optimierten Rezepturen mit Portlandzementen und Zusätzen deutliche Vorteile. Das Potenzial löslicher Bestandteile ist sehr viel niedriger und die Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop zeigen extrem dichte, fast schon keramische Strukturen des Zementsteingefüges (Abb. 11 und 12).

### Naturzugkühler ohne Beschichtung

Ein weiteres Anwendungsgebiet für die neuen Zemente entstand fast zeitgleich im Zuge des Neubaus von Braun- und Steinkohlkraftwerken. Heute leiten die Kraftwerke die Rauchgase nicht mehr über Kamine, sondern über hohe Naturzugkühler ab. Das erste Kraftwerk mit dieser Anlagentechnik war das 2002 fertig gestellte RWE Braunkohlkraftwerk Niederaußem (BOA 2). Das Betonkonzept beruht auf dem Prinzip der dichtesten Packung und ermöglicht bei einem chemischen Angriff mit sehr niedrigen pH-Werten hoch resistente Betone. Die inzwischen patentierte Rezeptur besteht aus rund 228 kg/m<sup>3</sup> hochsulfatbeständigem Portlandzement, 65 kg/m<sup>3</sup> Steinkohlenflugasche und 33 kg/m<sup>3</sup> Silikastaub [5]. Bei dieser Lösung wurden also neben Portlandzement auch Steinkohleflugasche und Silikastaub als Binde-

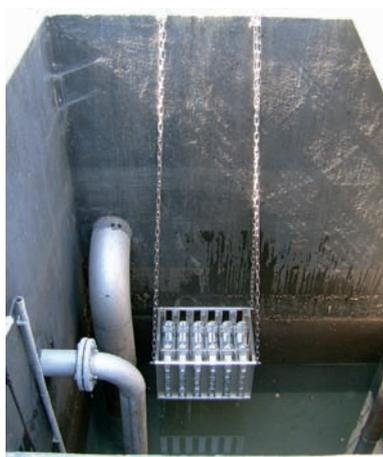


Abb. 9: Auslagerung im Gasraum



Abb. 10: Positionen der Auslagerungsstellen

- A** Gesamtzulauf
- B** Teilzulauf Nord (Mündung Druckleitung)
- C** Biofilter Rechen
- D** Sandfang 1/2
- E** Voreindicker II
- F** Entwässerungsschacht Biofilter 2

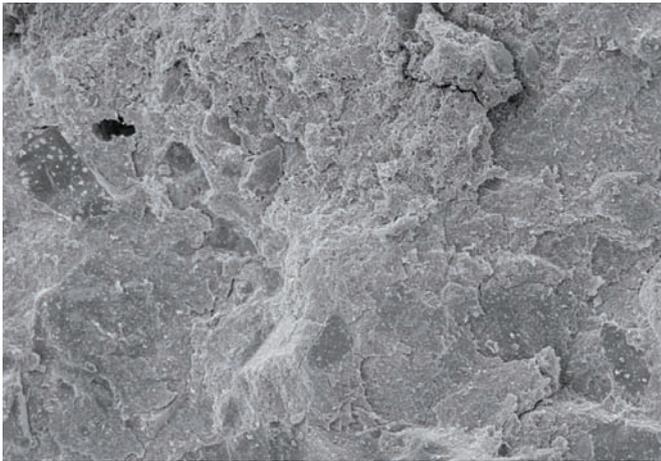


Abb. 11: REM Aufnahme 100 – fache Vergrößerung

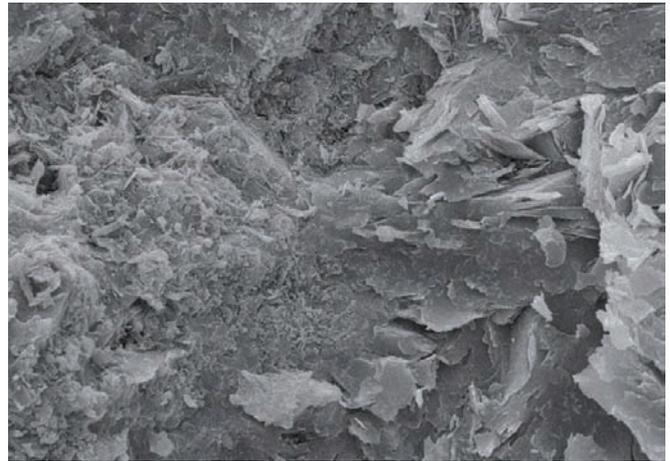


Abb. 12: REM Aufnahme 2.500-fache Vergrößerung

mittel gewertet. Da der Mindestzementgehalt von  $270 \text{ kg/m}^3$  für Stahlbetonbauwerke nicht eingehalten wird, benötigt diese Rezeptur eine bauaufsichtliche Zulassung.

Auf Basis der positiven Ergebnisse der zahlreichen Labor- und Feldversuche war es naheliegend, Zement mit granulometrisch optimierten Feinsthüttensandmehlen auch für resistente Betone bei niedrigen pH-Werten  $\geq \text{XA } 3$  zu erproben. Dies geschah mit Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R, einem Normzement nach DIN EN 197-1, der ohne bauaufsichtliche Zulassung für Stahl- und Spannbetonbauwerke eingesetzt werden darf. Die Säurebeständigkeit wurde an der Materialprüfanstalt MPA Berlin-Brandenburg nachgewiesen, so dass EON beim Neubau des Kraftwerks Datteln dem Betonkonzept mit Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R für den Naturzugkühler zustimmte.

### Ausblick

Nicht nur bei den hier beschriebenen besonders stark durch aggressive Medien

beanspruchten Bauteilen, sondern auch bei normalen Bauteilen wird zunehmend eine erhöhte Dauerhaftigkeit gefordert. Baustoffe der Zukunft, wie z.B. UHPC Ultra High Performance Concrete, leiten dabei ihr Eigenschaftsbild aus einem besonders dichten Zementsteingefüge ab. Dies lässt sich aktuell nur durch zunehmend knapper werdenden Silikastaub in Verbindung mit  $\text{C}_3\text{A}$ -armen Standardzementen erreichen, z. T. nur mit bauaufsichtlicher Zulassung. Diese Bindemittelsysteme erfordern zudem einen hohen Aufwand bei Dosierung und Qualitätssicherung, da die Rohstoffe Zement und Silikastaub einzeln und in ihrer Kombination zu prüfen sind.

Einfacher ist es, ein besonders dichtes Zementsteingefüge durch granulometrische Optimierung der Zementbestandteile selbst zu erreichen. Dies kann, wie im Beitrag geschildert, durch feinste Hüttensandmehle aus getrennter Sichtung und späterer Mischung mit einem Portlandbasiszement erfolgen. Das Ergebnis ist ein Normzement, der wie jedes andere Bindemittel ohne zusätzlichen Aufwand im Transport-

betonwerk dosiert und verarbeitet werden kann. Bei der Qualitätssicherung ist nur eine Bindemittelkomponente ohne Wechselwirkung mit anderen zu prüfen. Das neue Bindemittelkonzept ist variabel, d. h. es sind auch andere Kombinationen mit kornabgestuften Hüttensand- aber auch Klinkerfeinmehlen möglich [5]. Auf diese Weise entstehen verarbeitungsfreundliche Normzemente mit gezielt einstellbaren Eigenschaften zur sicheren Herstellung von Hochleistungsbetonen. ■

### Literatur

- [1] Hillemeier, B.; Hüttl, R.: Säureresistenter Beton mit einstellbarer Festigkeit für den höchsten Kühlturm der Welt. Tagungsband 44. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage 2000.
- [2] Grabau, J.: Untersuchungen zur Korrosion zementgebundener Materialien durch saure Wässer unter besonderer Berücksichtigung des Schwefelsäureangriffs. ISBN 3-8265-0443-7, Shaker Verlag, Aachen, 1995.
- [3] Lohaus, L.; Petersen, L.: Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturmbau. Betoninformationen, Heft 5/6 2007, 47. Jahrgang, Verlag Bau+Technik GmbH, 2007
- [4] Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik Projekt B 2-49-7-2006, „Beton mit erhöhtem Säurewiderstand für großformatige Betonrohre“ Bericht B 2-7 (unveröffentlicht)
- [5] Patentschrift DE 199 12 652 C 2
- [6] Deuse, T.; Schultz, W.; Strunge, J.: Spezialzemente für Hochleistungsbeton. BWI, Betonwerk International Nr. 1, Februar 2007



Abb. 13: Naturzugkühler Datteln

### WEITERE INFORMATIONEN



Dyckerhoff AG  
 Biebricher Straße 69, 65203 Wiesbaden, Deutschland  
 T +49 611 6760, F+ 49 611 6761040  
[info@dyckerhoff.com](mailto:info@dyckerhoff.com), [www.dyckerhoff.de](http://www.dyckerhoff.de)