

**SPECIAL PRINT
PBI 08/06**

Maik Diepenseifen, Ditmar Hornung, Werner Schultz

Béton à haute résistance aux attaques acides

à base de ciment Premium Dyckerhoff VARIODUR®

... avec technologie Mikrodur



Dyckerhoff

Dyckerhoff AG, 65203 Wiesbaden, Allemagne

Béton à haute résistance aux attaques acides

L'expérience montre que les exigences de durabilité dans les installations d'épuration d'eau lors de sollicitations par les eaux usées communales courantes sont satisfaites en utilisant du béton normal. Si les eaux usées contiennent cependant en plus hautes concentrations des liquides attaquant le béton ou qu'il se forme dans l'atmosphère du canal de l'acide sulfurique biogène, on observe souvent après seulement quelques années de service, l'apparition de fortes corrosions. Il peut en résulter de sérieuses limitations de la capacité d'utilisation et de la sécurité de la station d'épuration. Par rapport aux autres matériaux mis en œuvre dans la technique des eaux résiduaires, le béton dispose d'avantages techniques et économiques décisifs, de sorte que des bétons offrant une haute résistance aux acides sont exigés par les exploitants de réseaux pour les zones d'eaux résiduaires à fort potentiel d'attaque.

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

Liant haute performance avec farines ultra-fines de granulés de laitier

Les bétons résistant aux acides présentent une texture particulièrement dense qui est garantie d'une part par une faible valeur moyenne de rétention d'eau et d'autre part par l'utilisation d'additifs pour béton réactifs. Une granulométrie des liants harmonisées entre elles permet d'augmenter encore la densité de structure. Parallèlement, les volumes de liant et ainsi le contenu de composants potentiellement soluble aux acides est réduit autant que possible, ce qui permet de surcroît d'augmenter la résistance aux acides. L'optimisation des propriétés de durabilité doit en outre résulter de telle sorte que les caractéristiques de durcissement du liant/béton satisfont aux exigences technologiques de fabrication.

Les mesures citées peuvent cependant conduire à des difficultés dans la fabrication et la mise en œuvre du béton. Pour des bétons aptes à la pratique, une optimisation entre l'augmentation de la résistance aux acides d'une part et une ouvrabilité satisfaisante d'autre part est nécessaire. Des fluidifiants puissants et adaptés au liant combinés à une courbe granulométrique riches en gros grains de granulats sont pour cela des mesures efficaces.

Les enseignements tirés d'un travail de développement de plusieurs années montre que les exigences citées plus haut sont satisfaites au mieux lorsque les composants du liant sont, après broyage et tamisage, incorporés efficacement dans un mélangeur de haute puissance. L'optimisation séparée se produit ainsi tant pour des raisons de réactivité chimique que selon des critères granulométriques. Les ciments de haute qualité fabriqués en conséquence par Dyckerhoff AG contribuent également en tant que ciments CEM II et CEM III à la préservation des ressources et à la réduction des émissions de CO₂.

Tab. 1: Recettes de béton

	Béton 1	Béton 2
Ciment	Variodur 40 CEM III/A 52,5 R 350 kg/m ³	Sulfadur CEM I 42,5 R-HS/NA 245 kg/m ³
Cendres volantes	-	77 kg/m ³
Microsilica	-	56 kg/m ³
Eau	147 kg/m ³	127 kg/m ³
rapport e/b	0,42	0,42

Comme pour d'autres bétons hautes performances, il faut assurer, pour le béton à haute résistance aux acides, une très haute uniformité dans le cadre de la fabrication du béton. En outre, une surveillance renforcée des matériaux de base et du béton frais est indispensable, ce qui actuellement va nettement au-delà des recommandations de la norme. Le développement du liant à haute performance \geq XA 3 a débuté chez Dyckerhoff déjà à la fin des années 90, afin de pouvoir résister durablement à une attaque chimique acide jusqu'à un pH de 3,5 sans protection supplémentaire de la surface de béton.

Des ciments à base de laitier granulé ont été utilisés déjà lors des premiers essais dans lesquels le laitier granulé, le klinker de ciment Portland broyés séparément, optimisés granulométriquement et enfin avec addition d'un support de sulfate, ont été fabriqués dans un mélangeur haute performance.

Etude comparative de deux bétons à haute résistance aux acides

Situation initiale

A la demande de Dyckerhoff AG, une étude comparative de deux bétons a été réalisée



■ Dipl.-Ing. Maik Diepenseifen a fait ses études de génie civil à la Universität-Gesamthochschule de Essen de 1995 à 2000, avec une spécialisation en construction hydraulique et technique des fondations. De 2000 à 2002, il a été conducteur de travaux et calculateur dans des PME de constructions métalliques (constructions à ossature métallique, constructions industrielles, construction d'installations, constructions clé sur porte). Depuis 2002, il est directeur d'usine chez E+F GmbH, Rohrwerk Epiton et y est également responsable en tant que titulaire du certificat « E-Schein » de la conception et de la supervision du point de vue technologie du béton dans l'usine. En sus de ces activités à haute responsabilité, il poursuit actuellement un deuxième cycle d'étude en sciences économiques.



■ Dr.-Ing. Ditmar Hornung, 1968 - 1975 études/doctorat Technische Universität Dresden. 1975 - 1990 Activités dans la cimenterie Deuna/Thüringen à différents postes techniques. 1991 - 2004 Responsable qualité du produit, développement de produit, application de produit chez Deuna Zement GmbH (Dyckerhoff AG) principalement sur la rhéologie des mélanges de matériaux de construction et de ciments composites à base de laitier granulé et de farines de calcaire. Depuis 2005, il directeur du programme de développement produit et de consultation en application du ciment chez Dyckerhoff AG.



■ Dipl.-Ing. Werner Schultz a étudié le génie civil à Essen et a travaillé par la suite au département de contrôle de la Hochtief AG à Essen, dernièrement en tant que directeur adjoint du département de contrôle. Ensuite, activité comme chargé de contrôle dans le cadre de la surveillance de qualité de la Deutschen Beton Verein (Fédération allemande du béton). Il est passé ensuite à BauMineral dans la distribution technique pour cendres volantes de houille. Depuis 1991, il est conseiller de construction de la Dyckerhoff AG. Il est membre de la commission de travail Technique et Normalisation de la Bundesverband Mineralische Rohstoffe MIRO (Fédération des matières premières minérales), membre de la commission des normes DIN béton projeté et du Comité Allemand pour la normalisation du béton projeté en Europe. De plus, il est chargé de cours dans le cadre de la formation approfondie en matière de technologie du béton (E-Schein).

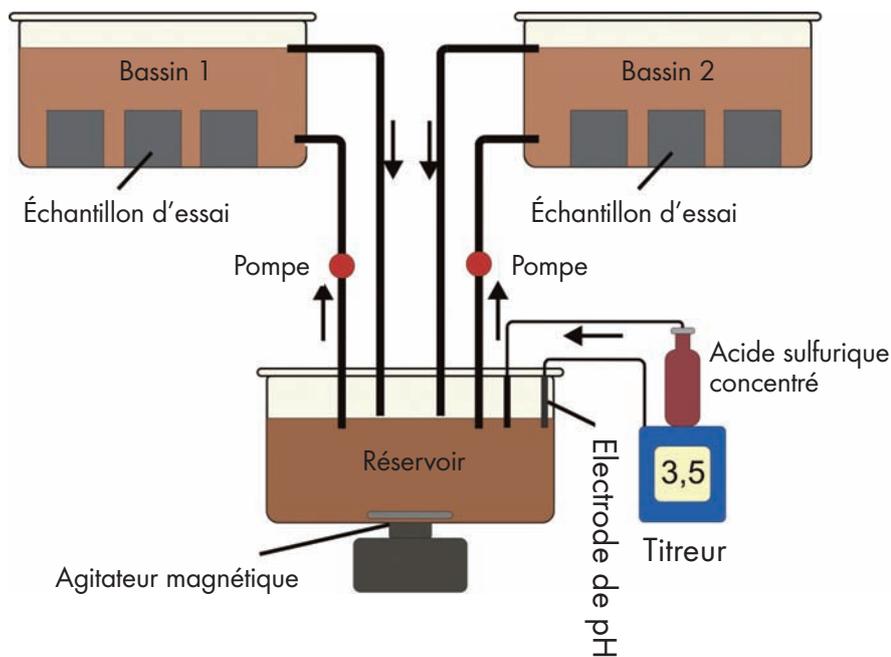


Fig. 1: Schéma de principe du banc d'essai à l'acide

Tab. 2: Résultats des essais de bétons frais et durcis

	α_5/α_{45} [mm]	Teneur en pores d'air [%]	Densité brute [kg/m ³]	Âge [jours]	f_c [N/mm ²]	Module d'élasticité [N/mm ²]	f_{ct} [N/mm ²]
Béton 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
Béton 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

à la chaire de technique des matériaux de construction de la Ruhr-Universität Bochum. On a ainsi établi pour chaque béton un profil de propriétés comportant les propriétés essentielles des bétons frais et durcis. Un point essentiel de l'étude concernait une recherche comparée de la résistance aux acides des bétons concernés.

Les bétons se différenciaient par la composition de leur liant. Le béton 1 avait été fabriqué avec un ciment de haut fourneau en utilisant de la farine de laitier granulé ultra-fine provenant d'un broyage séparé. Le béton 2 avait en revanche été fabriqué avec du ciment Portland à forte résistance aux sulfates, des cendres volantes et de la poudre de silice [1]. Les deux bétons affichaient un rapport eau/liant de 0,42 et avaient été fabriqués avec des granulats quartzitiques (grosseur maximale de grains 16 mm). En sus des bétons de laboratoire, d'autres échantillons provenant d'un tuyau de grand format fabriqué en béton 1 ont été intégrés aux tests à l'acide.

Essais à l'acide

L'essai de résistance à l'acide s'est effectué pour chaque béton dans des bassins séparés. On a utilisé comme solution pour l'essai de l'acide sulfurique avec un pH de 3,5. Durant toute la durée de l'essai, l'acide sulfurique était déplacé par des pompes en circuit fermé. Toutes les deux semaines, la solution d'essai du réservoir et des bassins était complètement remplacée. La structure générale du banc d'essai à l'acide est représentée à la figure 1.

On détermine sur les éprouvettes de béton la perte de matière durant la période de stockage de 15 semaines pour chacune des trois éprouvettes non brossées et des trois éprouvettes brossées. Les essais à la phénolphthaleïne sur les surfaces de rupture fraîches ont fourni des renseignements sur les profondeurs de détérioration. La zone non colorée de la surface de rupture a été enregistrée au microscope et mesurée. À partir d'une tranche de béton non-brossé et brossé des deux types de béton, des coupes

minces ont été préparés après le stockage dans l'acide et examinés au microscope.

Propriétés des bétons frais et durcis

Dans l'optique d'une fabrication en usine de tuyaux en béton, on a pu obtenir avec les deux recettes de béton des propriétés de béton frais facilement ouvrables et aptes à une utilisation pratique. Après 1 jour, le béton 1 montrait une résistance à la compression plus élevée que le béton 2. Après 28 et 56 jours en revanche, les propriétés mécaniques des deux bétons ne se différenciaient plus beaucoup les uns des autres (tableau 2).

Modification de masse

Les éprouvettes non brossées montraient déjà pour les deux bétons, après quelques jours de stockage dans l'acide sulfurique, des augmentations de masse significatives (fig. 2). L'augmentation de masse initiale a continuellement diminué en cours de stockage dans l'acide sulfurique, alors que l'augmentation de masse du béton 1 était continuellement un peu plus élevée. Ces comportements avaient déjà été établis dans des travaux antérieurs et qui sont causés par la reconstitution de produits de réaction du béton et de parties acides qui restent dans la texture du béton [2,3]. Pour les éprouvettes brossées, la superposition de produits de réaction et d'érosion de la masse suite à l'attaque par l'acide est moins claire, du fait qu'ici les produits de réaction collant légèrement sur la surface immédiate étaient mécaniquement supprimés. Une perte de masse réelle par rapport à la masse initiale avant le stockage dans l'acide a été établie pour le béton 2 après 73 jours et pour le béton 1 la première fois après 107 jours de stockage dans l'acide sulfurique. Aucune différence apparente entre les éprouvettes des deux bétons n'était identifiable. L'augmentation de masse est plus marquée pour les éprouvettes de tuyaux que pour le béton de laboratoire de même composition.

Profondeur de détérioration (essai à la phénolphthaleïne)

Sur les surfaces de rupture fraîches, aspergées avec de la phénolphthaleïne, on a pu observer un front de détérioration par contraste de couleur avec la microscopie optique. Conformément aux attentes, l'évolution de la profondeur de détérioration sur le périmètre de l'éprouvette n'est pas distribuée uniformément. Déjà après 31 jours de stockage dans l'acide sulfurique, une profondeur de détérioration légèrement plus faible s'affichait pour le béton 1 par rapport au béton 2. Le béton de tuyau a montré une profondeur de détérioration constamment

plus importante que pour le béton de laboratoire 1 [4].

Fonçage de tuyaux Gelsenkirchen Zoom

A Gelsenkirchen près du zoo de la Ruhr « Zoom - Erlebniswelt », on a creusé un canal d'égout à partir de deux voies d'avancée par fonçage à tracé incurvé d'un rayon de 470 m dans une tranchée de pousse-tube double dans la marnière de l'Ems. La société W. Epping Spezialtiefbau en charge des travaux a utilisé un système de fonçage de tuyaux à front d'attaque ouvert et un sabot de tube à commande. La station de pressage principale installée dans le puits de départ comportait 4 vérins hydrauliques télescopiques chacun d'une force de compression de 3.000kN. Pour empêcher des forces de compression non autorisées, des vannes de surpression adéquates ont été installées.

Avec une machine à attaque ponctuelle fixée dans le tube de machine, le sol a été dégagé sur le front d'attaque et transporté dans un wagonnet à l'aide d'un wagonnet. Des treuils tractaient le wagonnet au travers du sas à air comprimé vers le puits de départ où une pelle à câble le vidait. Pour le colmatage de l'espace annulaire et la réduction du frottement du terrain, une suspension de bentonite a été utilisée lors du fonçage. Le front d'attaque librement accessible à tout moment était lui-même soutenu par une surpression d'air, qui refoulait les eaux souterraines présentes et empêchait le glissement du terrain instable.

Exigences liées aux tuyaux de fonçage

Les tuyaux de fonçage devaient être fabriqués sur base de DIN EN 1916 et DIN V 1201 ainsi que des cahiers des charges agréés par contrat et des clauses techniques contractuelles supplémentaires (ZTV)

du donneur d'ordre, la coopérative d'Ems comme suit:

- Tuyaux de fonçage DN1600/DA2240
- Longueur de construction standard 4,00 m
- Poids 19,5 t
- avec manchettes en acier inoxydable ainsi que tous les autres éléments incorporés
- béton avec résistance aux acides améliorée (SWB)

Fabrication du tuyau

Les tuyaux ont été fabriqués à l'usine de Hünxe de E+F GmbH Rohrwerk Epiton. Avant de démarrer la fabrication des tuyaux, un plan d'assurance-qualité impliquant la participation de toutes les parties concernées et en concertation avec la chaire de technique des matériaux de construction de la Ruhr - Universität Bochum était indispensable. Le premier essai approfondi a été réalisé en avril 2007 sous le contrôle de la coopérative d'Ems et de la Ruhr - Universität Bochum. On avait pour cela fabriqué de nombreuses éprouvettes, notamment pour les analyses de résistance chimique. Pour la fabrication des cages d'armature, on a utilisé une des plus grandes machines de soudage de cage d'armature au monde : celle fabriquée par MBK - Maschinenbau GmbH. Cette machine fabriquait séparément et automatiquement les cages d'armature extérieures et intérieures conformément aux calculs statiques ou aux projets d'armature. La cage fabriquée devait être contrôlée et les données entrées sur la fiche d'identification du tuyau. La coopérative d'Ems exigeait pour le recouvrement en béton des armatures d'acier une dérive maximale de seulement ± 5 mm. Les tuyaux étaient coulés debout dans des moules en acier centrés. De

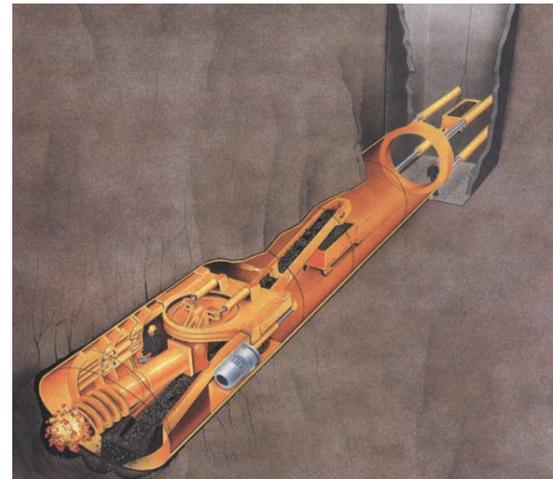


Fig. 4: Tunnelier



Fig. 5: Tuyau de fonçage

Développement de la modification de masse

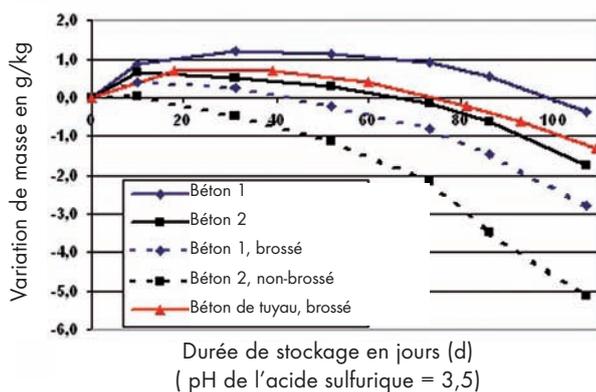


Fig. 2: Développement de la modification de masse

Profondeur de détérioration maximale (essai à la phénolphtaléine)

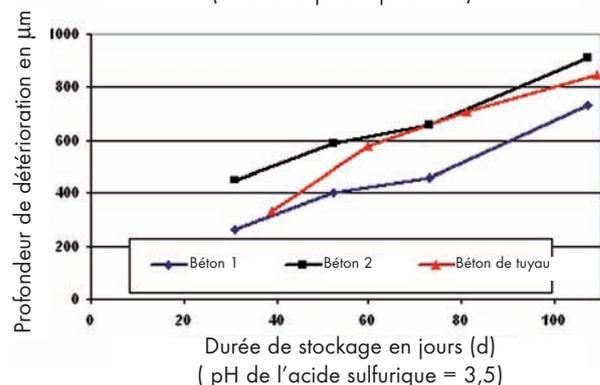


Fig. 3: Développement des profondeurs de détérioration maximales

Tab. 3: Composition du béton SWB

Désignation	kg / m ³
CEM III / A 52,5 R	320
Sable concassé 0 / 2 mm	701
Gravier 2 / 8 mm	301
Gravier 8 / 16 mm	1.002
Eau	133
Fluidifiant pour béton (PCE)	2

juin à décembre 2007, on a fabriqué deux tuyaux de fonçage par jour avec un jeu de moules.

Fabrication du béton et mesures de contrôle-qualité

La coopérative d'Ems avait fixé pour la fabrication des tuyaux de fonçage les exigences très élaborées suivantes pour le béton à résistance aux acides augmentée (SWB) :

- Classe de résistance à la compression du béton : IC50/60 (limite supérieure de résistance à la compression après 28 jours = 90 N/mm²)
- Classes d'exposition : XC4, XD3, XM2, XA3*

* Sur base des mesures particulières de technologie du béton, on a renoncé à des mesures de protection supplémentaires conformément aux exigences de la classe d'exposition XA3

- Taille de grain maximale du granulat : 16 mm (pas de granulat calcitique)
- Valeur eau-ciment ou valeur eau-liant : ≤ 0,42
- teneur en liant (ciment + additif pour béton) : ≤ 350 kg/m³

Des deux variantes du texte d'adjudication, on a choisi le suivant :

- type de ciment : CEM III / A 52,5 R selon DIN EN 197-1
- teneur en laitier granulé^o : 40 M.-% ± 3 M.-%
- broyage séparé du clinker de ciment et du laitier granulé
- exigences envers le ciment Portland broyé
degré de broyage selon Blaine : 5.000 cm²/g ± 500 cm²/g
paramètre de couche d' :
11 μm ± 1,5 μm

Tab. 4: Propriétés Variodur 40 CEM III/A 52,5 R

paramètre de couche d'	8,20 μm
Pente n	0,99
Consistance normale H ₂ O	31,5 M.-%
Début de la prise	200 min
Fin de la prise	230 min
Fausse prise	12,8 cm
Le Chat.	0,0 mm
Résistance à la compression N/mm²	
N 1	21,0
N 2	37,6
N 7	63,2
N 28	78,0
N 56	80,1
Teneur en SO₃	1,72 M.-%
chaleur d'hydratation	
0 à 0,5h	12,2 J/g
0 à 1 d	173 J/g
0 à 2 d	259 J/g
0 à 3 d	305 J/g
0 à 7d	358 J/g

- exigences envers le laitier granulé broyé :
degré de broyage selon Blaine : 8.000 cm²/g ± 500 cm²/g
paramètre de couche d' :
6 μm ± 1,5 μm

Les premiers contrôles initiaux du béton comprenaient notamment :

- détermination de la capacité de résistance à l'acide sulfurique conformément au test d'épreuve à l'acide selon Hüttl
- valeur de pH de l'acide sulfurique 3,5
- détermination du coefficient de migration des chlorures
- Détermination de la porosité totale

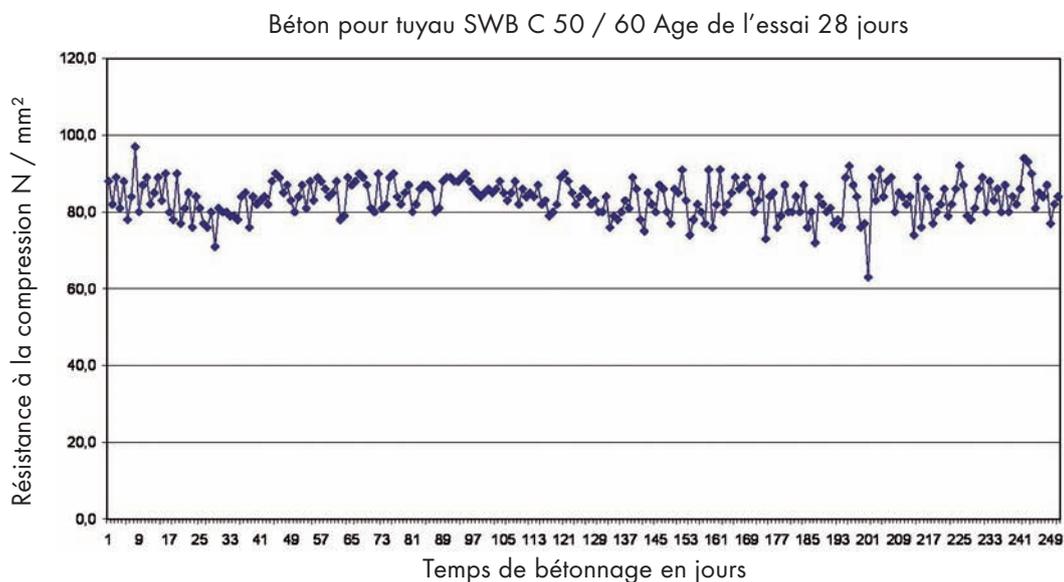


Fig. 6: Résistances à la compression du béton pour tuyau



Fig. 7/8: Station d'épuration MG-Neuwerk

Ces contrôles ont été effectués à la demande du donneur d'ordre au MPA de Berlin-Brandebourg. Les frais résultant de la réalisation des contrôles ont été supportés par la coopérative de l'Ems. On a utilisé pour l'exécution le béton fabriqué avec la variante de liant A. La recette utilisée pour le béton est illustrée au tableau 3. Le ciment a été livré par l'usine de Neuwied de Dyckerhoff AG, le béton par l'usine de Hünxe de la société Elskes Transportbeton GmbH & Co. KG. La fabrication du béton a été supervisée par la société Melius Baustofftechnik. Les contrôles de résistance à la compression du béton livré ont été réalisés par l'organisme de contrôle Kondor Wessels et commandés par E+F GmbH, Rohwerk Epiton.

Mesures de contrôle qualité de préparation et d'encadrement

- Réalisation d'un plan de contrôle-qualité en concertation avec le donneur d'ordre et la chaire de technique des matériaux de construction de la Ruhr-Universität Bochum
- Formation des collaborateurs et des sous-traitants par la chaire de technique des matériaux de construction de la Ruhr-Universität Bochum
- Le SWB a été inséré dans la classe de supervision 3
- Granulométrie par laser des matériaux de base
- Granulométrie par laser du ciment
- Composition chimique du ciment
- Début et fin de la prise
- Température du béton frais entre 10°C et 30 °C

Le tableau 4 montre les données du ciment choisi CEM III / A 52,5 R (Variodur 40) de Dyckerhoff AG, usine de Neuwied. Le ciment a été mélangé aux composants individuels broyés séparément ciment et laitier granulé selon la commande dans un mélangeur haute performance et ensuite fabriqué toujours directement « frais » dans le véhicule silo. Durant le processus de fabrication, le ciment a été contrôlé, analysé dans le laboratoire de Dyckerhoff AG à Neuwied et ensuite le chargement du véhicule silo était validé. Durant le trajet du véhicule silo de la cimenterie à l'usine de béton prêt à l'emploi, les données du ciment obtenues (granulométrie laser et teneur en SO₃) étaient transmises par e-mail au destinataire, de sorte qu'avant l'arrivée du camion silo à l'usine de béton prêt à l'emploi, les certificats exigés par le donneur d'ordre étaient disponibles. Le tableau 5 montre les données générées sur une période de livraison d'environ 11 mois.

Tab. 5: indices de granulométrie laser et teneur en SO₃

	Variodur 40 CEM III / A 52,5 R		
	paramètre de couche d' μm	n	SO ₃ M.-%
Valeur moyenne	9,3	1,00	1,81
Min.	8,2	0,93	1,72
Max.	9,7	1,03	1,89

Les chiffres montrent la haute homogénéité du ciment fabriqué qui respectait la largeur de fluctuation fixée du paramètre de couche d' non seulement dans les composants individuels de laitier granulé et de clinker de ciment portland mais également dans le ciment fabriqué. Le béton a été fabriqué dans la classe de consistance F3 et contrôlé tant à l'usine de béton prêt à l'emploi qu'à l'usine d'éléments préfabriqués selon le plan de contrôle-qualité. Après une appréciation visuelle de la consistance, le béton est introduit de façon homogène dans le coffrage par un disque distributeur. On a utilisé pour le compactage des vibreurs internes disposés en couronne (vibrateur à aiguille) qui étaient déplacés vers le haut en fonction du remplissage du béton. L'extrémité en pointe était couverte de béton et compactée avec les vibrateurs à aiguille vibrantes. L'extrémité du tuyau était tirée vers le haut afin de garantir la perpendicularité et la planéité des faces frontales importantes pour les tuyaux de fonçage. Le niveau de l'extrémité en pointe était recouvert et les tuyaux devaient durcir au moins huit heures dans le moule.

La fig. 6 montre les résistances à la compression à l'âge de 28 jours d'après la propre supervision de E+F GmbH, Rohwerk Epiton. Le C 50 / 60 exigé a été certainement atteint à chaque moment de la fabrication.

Pour la cure de 3 jours, le tuyau était immédiatement recouvert d'un capot après le décoffrage. Par l'amenée d'eau en dessous du capot, on réglait une humidité relative d'au moins 85%. Le retrait du tuyau de la rondelle de base ne pouvait s'effectuer qu'au plus tôt après 3 jours et les tuyaux devaient rester entreposés au moins 6 jours. Pour la documentation des étapes de fabrication, dimensions, éléments incorporés et données de matériaux, une fiche d'identification a été générée pour chaque tuyau. L'expédition des tuyaux n'avait lieu qu'au plus tôt après quinze jours. Avant le chargement du véhicule, chaque tuyau subissait un contrôle final et le résultat était porté sur la fiche d'identification de tuyau correspondant.

Tab. 6: Caractéristiques techniques de la station d'épuration Mönchengladbach - Neuwerk

Nombre d'habitants	635.000 Hbts.
Arrivée d'eau par temps sec Qt	150.000 m ³ /d 6.250 m ³ /h
Arrivée d'eaux mixtes Qm	288.000 m ³ /d
Gradin de purification	12.000 m ³ /h
Gradin de purification mécanique	38.000 m ³ /h

Essais de vieillissement Niersverband

Toutes les attaques chimiques dans les installations d'eux résiduaires ne pouvant être reproduites en laboratoire, un essai de vieillissement a été entrepris parallèlement aux examens de laboratoire par Dyckerhoff AG. On a pu ici décider la Niersverband à réaliser un programme approfondi de vieillissement. Dans la station d'épuration de Mönchengladbach Neuwerk (fig. 7 à 10) des prismes de mortier avec différents ciments ont été placés dans des paniers de vieillissement spécialement fabriqués à des endroits exposés.

Caractéristiques techniques de la station d'épuration Mönchengladbach - Neuwerk

L'essai de vieillissement débuté en mai 2006 est le plus approfondi de son genre dans le réseau d'égouts allemand :

- 420 éprouvettes
- 6 sites de vieillissement (4 en compartiment à gaz / 2 dans la zone d'échange des eaux)
- 1 stockage de contrôle
- durée de l'essai 5 années

Recherches de laboratoire Niersverband / Wilhelm Dyckerhoff Institut

Le vieillissement est accompagné à intervalles étroits par un programme de d'étude soigneusement coordonné :

- analyses des eaux usées
- analyses des gaz

- Module E
- Dégradation
- Poids
- La résistance à la compression
- Examen au microscope électronique de la texture du ciment
- Analyses Rietveld
- Porosimètre par intrusion de mercure

Le laboratoire de la Niersverband exécute de façon standard les analyses de gaz et d'eau. Les recherches complémentaires s'effectuent en comparaison avec les échantillons témoins stockés au Wilhelm Dyckerhoff Institut afin d'obtenir des connaissances sur les modifications du ciment des éprouvettes vieilles.

En cas d'attaque chimique acide ($\text{pH} \geq 3,5$), les ciments de haut fourneau fabriqués dans le broyage séparé avec farines de laitier granulé à granulométrie optimisée présente de nets avantages par rapport aux recettes optimisées de ciment Portland et additifs. La partie constituante potentiellement soluble est beaucoup plus réduite et les examens au microscopes électronique montre une densité extrême, presque des structures céramiques pour les textures du ciment (fig. 11 et 12).

Refroidissement naturel sans revêtement

Un autre domaine d'application pour les nouveaux ciments est apparu presque en

même temps avec la construction des centrales électriques à la lignite et au charbon. Aujourd'hui, les centrales ne canalisent plus les fumées dans des cheminées mais via de hauts refroidisseurs à tirage naturel. La première centrale électrique avec cette technique d'installation a été la RWE Braunkohlekraftwerk Niederaußem (BOA 2) terminée en 2002. Le concept de béton repose sur le principe du remplissage le plus dense et rend possible des bétons hautement résistant lors d'une attaque chimique à pH très bas. La recette brevetée entre-temps consiste en environ 228 kg/m³ de ciment Portland à haute résistance aux sulfates, 65 kg/m³ de cendres volantes de charbon et 33 kg/m³ de poussière de silice [5]. Pour cette solution, les cendres volantes de charbon et la poussière de silice ont été considérées comme liant en sus du ciment Portland. La teneur minimale en ciment de 270 kg/m³ pour du béton à armature d'acier n'étant pas atteinte, cette recette nécessite une homologation générale.

Sur base des résultats positifs des nombreux essais de laboratoire et sur le terrain, il était logique de tester le ciment à farine de granulés de laitier à granulométrie optimisée également pour des bétons résistants avec des pH plus faibles $\geq \text{XA } 3$. Cela s'est produit avec le Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R, un ciment normalisé selon DIN EN 197-1, qui peut être utilisé sans homologation pour les bâtiments en béton à armature d'acier et précontraints. La résistance aux acides a été certifiée par le Materialprüfanstalt MPA Berlin-Brandenburg de sorte que EON a marqué son accord pour que la tour de refroidissement à tirage naturel soit réalisée selon le concept de béton avec Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R lors de la construction de la centrale thermique de Datteln.



Fig. 9: Vieillissement en compartiment à gaz



Fig. 10: Position des sites des vieillissements

- A** Amenée globale
- B** Amenée partielle nord (Orifice de la conduite sous pression)
- C** Grille du bio filtre
- D** dessableur 1/2
- E** Pré-épaisseur II
- F** Puits de drainage Bio filtre 2

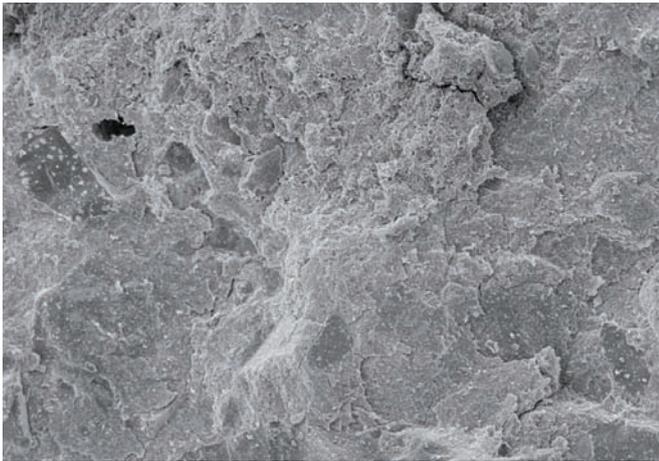


Fig. 11: Prise de vue au MEB agrandissement 100 fois

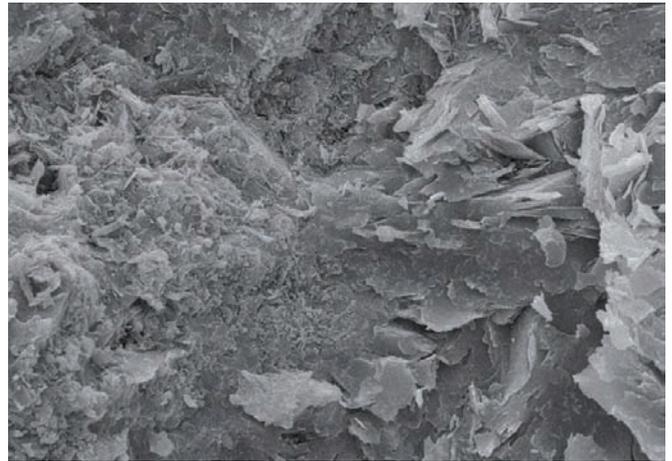


Fig. 12: Prise de vue au MEB agrandissement 2.500 fois

Perspectives

Une durabilité améliorée est de plus en plus exigée non seulement pour les éléments particulièrement sollicités par des liquides agressifs mais également pour les éléments normaux. Les matériaux de construction du futur, comme p.ex. l'UHPC Ultra High Performance Concrete dérivent ainsi leur image caractéristique d'une texture particulièrement dense du ciment. Actuellement ceci ne peut être obtenu qu'avec de la poussière de silice en dosage de plus en plus faible en liaison avec des ciments standards pauvres en C3A, (aluminates de chaux) en partie seulement avec agrément général. Ces systèmes de liant nécessitent de grands frais de dosage et d'assurance qualité, car les matières premières ciment et poussière de silice devant être contrôlées séparément et en combinaison.

Il est plus simple d'obtenir une texture de ciment particulièrement dense par l'optimi-

sation granulométrique des composants du ciment eux-mêmes. Ceci peut se faire, comme dépeint dans la contribution, par une farine ultrafine de granulés de laitier provenant d'un tamisage séparé et par un mélange ultérieur avec un ciment de base Portland. Le résultat est un ciment normalisé qui peut être dosé et façonné sans autres frais dans l'usine de béton prêt à l'emploi à l'instar de n'importe quel autre liant. Lors du contrôle qualité, on peut ne contrôler qu'un seul composant du liant sans interaction avec les autres. Le nouveau concept de liant est variable, c.-à-d. qu'il existe également d'autres combinaisons possibles avec du laitier granulé à grains échelonnés et également avec des farines de clinker [5]. Il en résulte de cette manière des ciments normalisés faciles à façonner avec des propriétés ciblées réglables pour la fabrication sûre de bétons à hautes performances.

Bibliographie

- [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



Fig. 13: Tour de refroidissement à tirage naturel de Datteln

AUTRES INFORMATIONS



Dyckerhoff AG
 Biebricher Straße 69, 65203 Wiesbaden, Allemagne
 T +49 611 6760, F+ 49 611 6761040
info@dyckerhoff.com, www.dyckerhoff.de