

## Concept de fabrication du béton

# Malaxeur conique intensif hybride avec rhéomètre intégré pour du béton haute performance

Cet article présente un tout nouveau concept global pour la fabrication du béton. Sur base des rapports décrits plus bas entre la formulation du mélange, la technique de malaxage et les propriétés rhéologiques à déterminer pour le béton au sein du malaxeur, il est possible de garantir la production ciblée de bétons sur mesure tout en tenant compte des aspects écologiques et économiques. Le logiciel Bétonlab Pro permet de calculer des valeurs indicatives pour la formulation du mélange quant au seuil de cisaillement et à la viscosité du béton frais. Il a été possible d'évaluer les effets des différents régimes de malaxage sur le seuil de cisaillement, la viscosité et la thixotropie en exploitant également le malaxeur comme un rhéomètre rotatif et en l'utilisant pour les mesures en oscillation. Sur base des valeurs caractéristiques rhéologiques mesurées, le régime de malaxage et la formulation du mélange ont pu être optimisés à l'aide du logiciel.

La boîte LCPC modifiée est un rhéomètre « low-cost » qui permet non seulement de mesurer le seuil de cisaillement, mais également d'évaluer la viscosité du béton frais.

■ Harald Garrecht, Christian Baumert et Andreas Karden, Institut für Massivbau de l'Université Technique de Darmstadt, Allemagne ■

## Exposé du problème

Le profil d'exigence d'un béton moderne se rapporte non seulement aux propriétés classiques du béton durci, mais également et de plus en plus aux aspects de durabilité et de conservation des ressources. Une méthode technologique pour le béton est la réduction de la teneur en clinker. On remplace en partie le ciment par des substituts, on augmente la densité de compactage par le biais des fines et on réduit le rapport eau/liant. Il est indispensable d'utiliser des superplastifiants étant donné que c'est la seule manière d'atteindre une consistance d'aptitude à la mise en œuvre jusqu'à l'autocompactage. La formulation du mélange largement modifiée par rapport aux bétons normaux nécessite des durées de malaxage nettement plus grandes ainsi qu'une consommation accrue d'électricité [1, 2]. Selon [3], le défi

réside ici dans la réduction de la viscosité du béton afin qu'une mise en œuvre soit possible dans la pratique. Les propriétés rhéologiques du béton dépendent de cet égard également de la technique de malaxage utilisée et du régime de malaxage [4], elles sont déterminées dès que le malaxage est terminé – en général hors du malaxeur – sur base d'essais de béton frais réalisés sur des portions du mélange. Malgré les interactions bien connues de ces composantes entre elles, on évalue encore et toujours trop souvent la formulation du mélange et la technique de malaxage séparément et la caractérisation rhéologique du béton frais par des essais de celui-ci est souvent insuffisante.

## Les règles de l'art

### Technique de malaxage

Dans la pratique, le processus de malaxage se termine après le fameux temps de stabilisation. Selon [5], l'absorption d'énergie des moteurs d'entraînement se rapproche de ma-

nière asymptotique d'un minimum. Les propriétés de béton frais atteintes ici dépendent du modèle et de la taille du malaxeur ainsi que du régime de malaxage. Les grands malaxeurs [3] et ceux avec vitesses d'outil élevées [1] permettent des valeurs plus faibles pour le seuil de cisaillement et tout particulièrement pour la viscosité des bétons qu'ils produisent. La vitesse élevée des outils permet de réduire la durée de malaxage grâce à l'homogénéisation plus rapide des matériaux de base, entraînant ainsi une meilleure dissolution des agglomérats. Bien que la puissance électrique motrice des outils de mélange doive être considérablement accrue en raison de l'augmentation de la vitesse de rotation, le besoin d'énergie pour la production des gâchées est moindre grâce à la durée de malaxage réduite [1]. Les bétons avec adjonction de superplastifiant qui doivent être réalisés selon un procédé à deux niveaux atteignent des valeurs de résistance à la compression 8 à 17 % plus élevées [6]. Le mortier - composé de sable, ciment, eau

Tableau 1 : régimes de malaxage analysés pour les séries d'essais 1 à 8, résultats sélectionnés pour le béton frais et le béton durci

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7	Test 8
Mixing energy kWh/m <sup>3</sup>	8,75	5,25	3,45	5,25	5,25	3,45	3,45	2
Superplasticiser kg/m <sup>3</sup>	6	6	6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Addition of 40% superplasticiser at kWh/m	5,55	1,85	1,4	1,65	3,25	1,75	1,15	1
Stage I	Concrete 100 rpm	Mortar 600 rpm	Mortar 600 rpm	Mortar 1000 rpm	Concrete 250 rpm	Concrete 250 rpm	Mortar 1000 rpm	Paste 1000 rpm
up to kWh/m <sup>3</sup>	-	3,7	2,1	3,7	-	-	2,3	
Stage II	-	Concrete 150 rpm	Concrete 150 rpm	Concrete 150 rpm	-	-	Concrete 150 rpm	Concrete external
plastic viscosity ICAR [Pa]	163	86,6	150	181	316	471	210	348
LCPC T <sub>700</sub> [s]	29	25	34	29	43	51	37	43
LCPC slump-flow [cm]	115 (13,8 Pa)	107 (17,2 Pa)	104 (18,4 Pa)	111,5 (15,4 Pa)	111 (15,6 Pa)	110 (16 Pa)	106 (17,6 Pa)	105 (18 Pa)
f <sub>cm,cube 100, 1d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	15,8	5,1	3,5	11,6	14,2	12,3	10,4	13,5

# Maîtrise des matières premières dans l'industrie du béton

et superplastifiant - est tout d'abord réalisé dans un mélangeur à suspension et est ensuite mêlé au granulats grossiers dans un second malaxeur conventionnel. Dans [2], l'étalement et le maintien de la consistance d'un BAP ont pu être fortement accrus par un processus de malaxage à deux niveaux utilisant un mélangeur à suspension.

## Mesures rhéologiques au sein du malaxeur

Dans la pratique et pour les bétons des classes de consistance usuelles, le courant ou la puissance absorbés des moteurs d'entraînement se sont avérés appropriés. En outre, il est possible d'obtenir les différentes phases de malaxage et avec elles la fin du malaxage à partir de l'évolution de la puissance absorbée sur toute la durée de malaxage [7]. Selon [8], cette démarche ne convient pas pour l'évaluation rhéologique du BAP. En alternative, pour ce procédé on diminue le régime dans la dernière phase de malaxage en 5 étapes, à l'aide d'un convertisseur de fréquence.

Les paires de valeurs régime/couple des différentes phases sont utilisées via régression linéaire pour le calcul des paramètres relatifs de Bingham et l'étalement en est déduit. La Viscoprobe™ commercialisée par Skako Concrete mesure la résistance à l'avancement d'une sphère en acier plongée dans le béton et reliée par une barre à un capteur de couple. Pour pouvoir calculer les paramètres relatifs de Bingham, il faut deux paires de valeurs (vitesse et couple correspondant). L'enregistrement des données et l'évaluation se font en temps réel, en parallèle au processus de malaxage ; ils n'augmentent donc pas la durée de malaxage.

## Procédé

Mettant en œuvre des matériaux de base bon marché à faible potentiel d'effet de serre ainsi que le logiciel Bétonlab Pro, la recette d'un béton de classe de résistance C60/75 à durabilité excellente fut développée. La fabrication du béton eut lieu une et en deux étapes, dans un malaxeur conique modifié. Alors qu'avec le procédé à une seule étape, tous les matériaux secs étaient ajoutés à l'eau conformément au modèle, le procédé à deux étapes voyait au sein du même malaxeur tout d'abord la fabrication du mortier ou du liant, suivie dans une seconde étape par l'ajout des granulats. Pour les deux procédés, l'énergie électrique absorbée par les entraînements du malaxeur, la vitesse d'outil et le moment d'ajout du superplastifiant ont été modifiés, voir à cet égard le tableau 1. La saisie des valeurs caractéristiques rhéologiques a eu lieu avec l'outil de mélange, un



■ Le Prof. Dr. Ing. Harald Garrecht a fait ses études d'ingénieur en génie civil à l'Université de Karlsruhe. Il a présenté sa thèse de doctorat en 1992 à l'Université de Karlsruhe. De 1998 à 2006, il est professeur à la Haute école de Karlsruhe - Technique et économie dans les domaines des matériaux de construction, de la physique du bâtiment et de la construction. Depuis 2006, il est professeur à l'Université technique de Darmstadt et représentant de la branche des matériaux de construction à l'Institut für Massivbau, dans les domaines des matériaux, de la physique du bâtiment et de la conservation du patrimoine.

garrecht@massivbau.tu-darmstadt.de



■ L'Ing. Dipl. Ing. Dipl.(FH) Christian Baumert a tout d'abord étudié le génie civil à l'école technique supérieure de Münster. Après avoir travaillé deux années dans le domaine de la planification, il a étudié le génie civil à l'Université technique de Braunschweig avec spécialisation en construction. Depuis 2007, il est collaborateur scientifique dans le département des matériaux de construction de l'Université Technique de Darmstadt, dans le domaine du développement technologique pour les applications dans le béton.

baumert@massivbau.tu-darmstadt.de



■ L'Ing. Dipl. (FH) Andreas Karden MBA BEng a tout d'abord étudié le génie civil à l'école supérieure de Karlsruhe, puis à l'Université d'Ulster. Il a ensuite travaillé au sein d'un bureau d'ingénieurs d'essais en statique des constructions. Lors d'études de post-graduat à l'école supérieure de Karlsruhe, il obtint son diplôme de MBA et est depuis 2010 collaborateur scientifique dans le département des matériaux de construction de l'Université Technique de Darmstadt, dans le domaine du développement technologique pour les applications dans le béton.

karden@massivbau.tu-darmstadt.de

rhéomètre à béton et la boîte LCPC modifiée. L'outil de mélange du malaxeur conique tournant ou oscillant à très faible vitesse permet une évaluation de toute la charge quant à son seuil de cisaillement, sa viscosité et sa thixotropie. On reconnaît ainsi les effets d'un régime de malaxage modifié sur la rhéologie et on peut les optimiser de manière ciblée pour chaque application spécifique dans le cadre d'un processus intégral, cela en adaptant la recette à l'aide du logiciel Bétonlab Pro. Comme l'outil de mélange ne dispose pas de conditions définies de cisaillement en ce qui concerne la surface de cisaillement et la fente de cisaillement, les valeurs déterminées présentent un caractère relatif. Pour l'étalonnage de l'outil de mélange suite à son usure et pour déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité, la boîte LCPC a été modifiée pour des bétons à viscosité élevée.

## Formulation du mélange

La formulation du béton repose sur le concept de [9] et est désignée dans l'espace anglo-saxon par les termes de High-Volume Fly Ash (HVFA) Concrete, ce qui correspond au BHTCV (béton à haute teneur en

## HYGROMÈTRE MALAXEUR

> Tout un programme au service de la performance

H500 - minimum 100 programmes

H2000 - de 1 à 10 programmes

> Traçabilité et communication numérique des systèmes

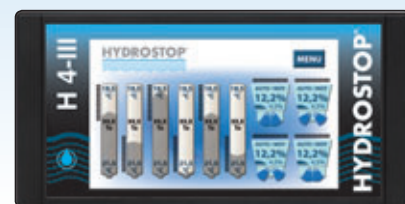


## GESTION DES MATIÈRES PREMIÈRES

> Mesure de quantité-température dans les silos

> Mesure de la plasticité du béton dans le malaxeur

> Mesure de l'humidité dans les sables et les graviers



Pour plus d'informations,

**contactez-nous au**

**+33(0)2 41 56 82 93**

ou **info@hydrostop.fr**

**HYDROSTOP®**

ZI des Grands Bois • BP 35  
49280 St Léger sous Cholet • FRANCE  
+33 (0)2 41 56 82 93 • Fax +33 (0)2 41 56 92 92

Tableau 2 : recette de béton HVFA mise en œuvre

	HVFA kg/m <sup>3</sup>
CEM I 52,5 N HS/NA	180
Fly ash KM/C	309
Superplasticiser Sika 20 HE	4.5 - 6
Water	112
Sand 0/2	640
Gravel 2/8	746
Gravel 8/16	391

cendres volantes). Outre le béton à grain maximum de 16 mm décrit au tableau 2, on développa également à l'Institut des matériaux de construction de l'Université Technique de Darmstadt des bétons haute résistance à grain fin ainsi que des bétons légers haute résistance, caractérisés par une très faible tendance au retrait. Bien que la mise en œuvre de ciment à haute teneur utile en alcalins semble judicieuse du fait de la proportion élevée de pouzzolane, deux ciments à faible teneur utile en alcalins furent utilisés. Leur faible demande en eau et en superplastifiant permettent, en combinaison avec des superplastifiants hautes performances appropriés, une diminution accrue du rapport eau/liant. Ceci permet d'atteindre des classes de résistance jusqu'à C60/75 ainsi que des résistances initiales nettement plus élevées. En raison du durcissement ultérieur très marqué, on peut assurément atteindre après 90 jours des résistances à l'écrasement d'un cube de plus de 120 N/mm<sup>2</sup>. À l'encontre de la conception du superplastifiant pour une fluidification maximum sur une durée utile brève, la consistance de béton peut ici être maintenue pendant plusieurs heures.

### Bétonlab Pro

Le logiciel développé au Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) pour le développement du mélange permet de calculer le temps de stabilisation. La faible concentration relative des matières solides s'accompagne ici d'un bref temps de stabilisation [5]. Afin de déterminer au préalable les séquences de dosage judicieuses des différents matériaux de base, des calculs ont été réalisés avec le logiciel Bétonlab Pro. Le tableau 3 reprend les temps de stabilisation pour la recette complète de béton HVFA et pour les mélanges sans matériaux de base individuels. Avec le procédé à deux étapes (cas de figure 2), le mortier est réalisé dans une première phase par le biais d'une vitesse d'outil nettement plus élevée et le temps de stabilisation est da-

Tableau 3 : temps de stabilisation calculés avec Bétonlab Pro pour différentes formulations de mélanges

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
CEM I 52,5 N HS/NA	x	x	x	x	x	x
Fly ash KM/C	x	x	x	x	x	-
Superplasticiser Sika 20 HE	x	x	x	x	x	x
Water	x	x	x	x	x	x
Sand 0/2	x	x	50%	-	-	x
Gravel 2/8	x	-	-	x	-	x
Gravel 8/16	x	-	-	-	x	-
Stabilisation time [s]	210	166	143	122	178	235

vantage réduit. Par conséquent, on n'attend pas un allongement de la durée de malaxage par rapport au procédé classique (cas de figure 1).

### Malaxeur conique Kniele

Les exigences posées à la technique de malaxage comprennent un entraînement à régime variable avec vitesse de rotation et puissance motrice nettement plus élevées ainsi que des modifications sur l'outil de mélange. Si les exigences posées à la technique de malaxage peuvent aussi être satisfaites avec un simple convertisseur de fréquence, l'évaluation rhéologique nécessite un convertisseur aux performances maximum. La méthode de régulation Direct Torque Control satisfait à cette exigence car elle est en mesure d'accélérer le moteur de manière contrôlée à partir du ralenti et elle permet une exploitation aux faibles

régimes. Un autre avantage réside dans la possibilité d'une exploitation en fonction du couple comme c'est habituellement le cas avec les mesures rhéologiques [10]. De par le recours aux données du convertisseur, on se passe en outre de composants supplémentaires comme p.ex. les capteurs de couple dans ou à proximité directe du malaxeur. Pour pouvoir se passer d'une démultiplication et des inconvénients qui y sont liés et pour atteindre une précision de régime élevée, un moteur synchrone à aimant permanent à couple élevé a été aménagé (voir figure 1), il entraîne directement l'outil de mélange intérieur. La rigidité de la chaîne cinématique ainsi obtenue permet des mesures en oscillation au sein du malaxeur. Les mesures en oscillation permettent non seulement de déterminer le seuil de cisaillement et la viscosité, mais également d'évaluer la structure d'un matériau.

### Courbe d'écoulement et seuil de cisaillement statique dans le malaxeur

Afin de déterminer la courbe d'écoulement, le béton est précisaillement pendant 10 secondes. Ensuite, l'outil de mélange tourne en 9 étapes selon des vitesses de rotation de 21,8 tr/min à 1,7 tr/min, à chaque fois pendant 4 secondes. Pour l'évaluation, les données obtenues de la phase de précisaillement et celles de la première seconde de chaque étape ne sont pas prises en compte. Lors des différentes phases de mesure à vitesse de rotation constante et prédéfinie, le régime réel et le couple correspondant sont mesurés à intervalles de 100 ms, voir figure 2. Toujours sur base des valeurs de mesure, on établit des moyennes pour les paires de valeurs des différentes plages de vitesse et on les édite. Le calcul du seuil de cisaillement relatif et de la viscosité plastique relative est effectué au sein de la commande programmable du malaxeur selon la méthode des moindres carrés. Pour déterminer le seuil de cisaillement statique relatif, on augmente continuellement le couple jusqu'à ce que l'outil de mélange com-



Figure 1 : malaxeur conique (Kniele) avec dispositifs de dosage pour utilisation en laboratoire



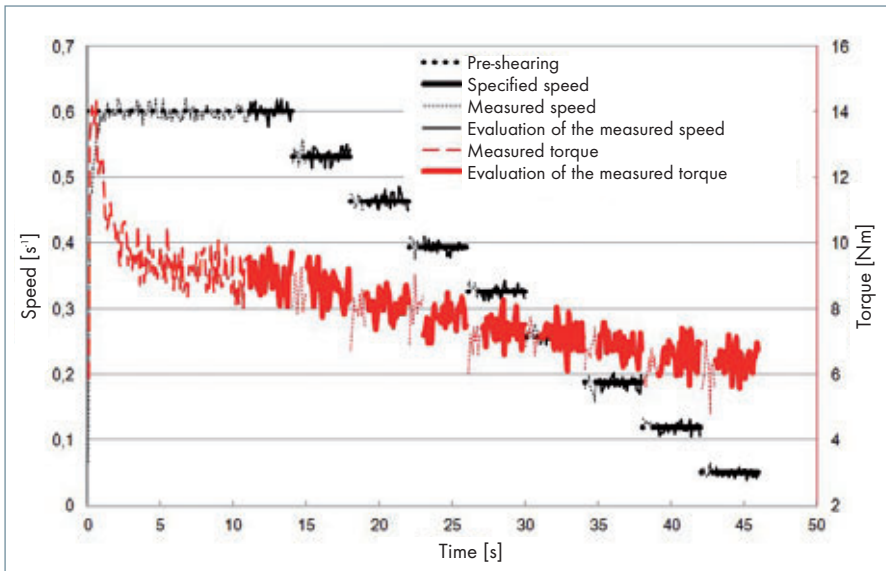


Figure 2 : profil de mesure et valeurs calculées pour déterminer la courbe d'écoulement dans le malaxeur conique

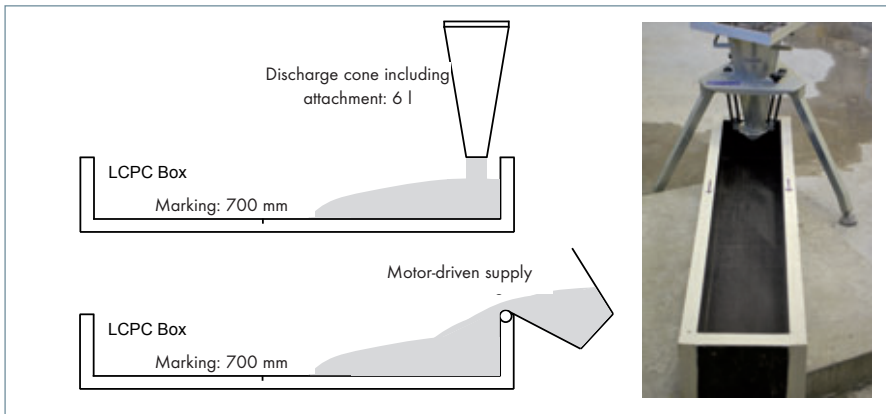


Figure 3 : boîte LCPC avec cône d'écoulement, y compris rehausse (en haut) et alimentation commandé par moteur (en bas)

mence à tourner.

### Boîte LCPC combinée au cône d'écoulement

Afin de pouvoir poser l'hypothèse d'un processus d'écoulement libre d'un matériau homogène, il faut une hauteur d'échantillon au moins 5 fois supérieure au diamètre du grain maximum de l'échantillon, mesurée sur le bord extérieur [11]. La boîte LCPC fut développée en alternative à l'étalement avec le maintien d'une quantité maniable d'échantillons. Elle se compose d'un coffrage d'une longueur de 120 cm, d'une largeur de 20 cm et d'une hauteur de 15 cm, on y remplit 6 l de béton sur un des côtés. Le remplissage manuel lent de l'échantillon de béton dans la boîte LCPC est un processus difficilement reproductible qui ne permet donc pas de fournir des données précises sur la viscosité. Pour obtenir des valeurs de mesures tant sur le seuil effectif de cisaillement que sur la viscosité, le procédé avec la boîte LCPC a été modifié conformément

à la figure 3 dans le cadre de ces analyses. Le remplissage d'un côté de la boîte LCPC est reproductible grâce au cône d'écoulement. Le temps entre l'ouverture du clapet du cône d'écoulement et le dépassement par le béton du repère 700 mm à l'intérieur de la boîte est utilisé pour évaluer la viscosité (temps  $T_{700}$  en [s]).

### Résultats

#### Courbe d'écoulement et seuil de cisaillement statique dans le malaxeur

La figure 4 démontre l'excellente conformité des courbes d'écoulement mesurées avec le rhéomètre ICAR et le malaxeur conique. Pour ce faire, le corps de mesure du rhéomètre a été fixé à l'arbre de mélange par un adaptateur. La mesure du rhéomètre a eu lieu dans un cône aux dimensions du malaxeur conique (figure 5). La figure 6 montre la bonne corrélation entre la viscosité plastique déterminée avec le rhéomètre et le couple moteur du malaxeur à une



# L'humidité est notre élément

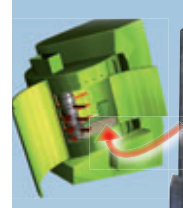
Augmentez votre production et améliorez l'assurance de la qualité grâce à des idées innovantes



Haute précision des mesures grâce à la technique de mesure par micro-ondes la plus moderne



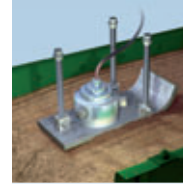
La technique microélectronique la plus actuelle dans des unités de contrôle modulaires et indépendantes



Compatibilité avec toutes les commandes de processus d'usage L'encombrement réduit des capteurs donne des possibilités de montage universelles



Des solutions de systèmes orientées clients



Garantit une longue disponibilité de tous les composants du matériel et du logiciel



Appareils de laboratoire

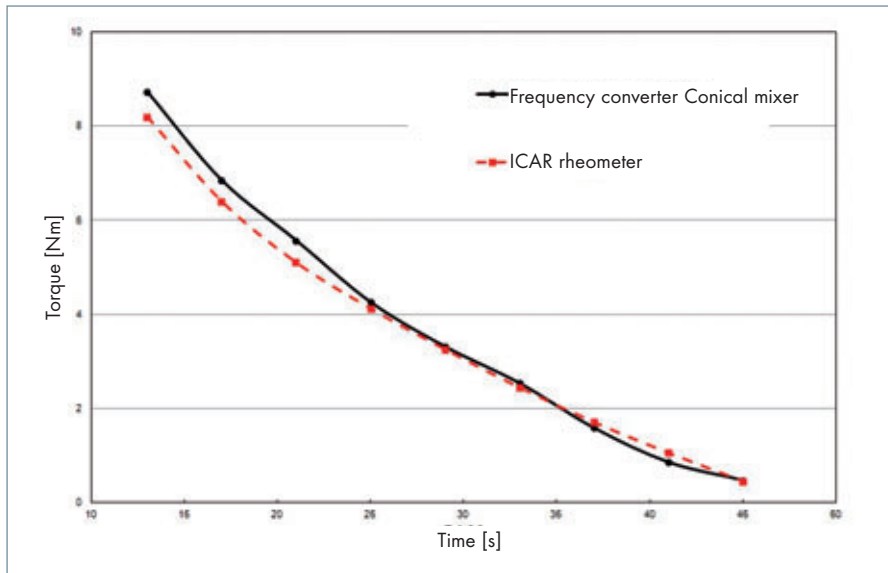


Figure 4 : courbes d'écoulement mesurées avec le malaxeur conique et le rhéomètre ICAR



Figure 5 : adaptateur pour corps de révolution à pales dans le malaxeur (gauche) et rhéomètre ICAR dans un cône aux dimensions identiques à celles du malaxeur conique (droite)

vitesse de 11 rotations de l'outil de mélange par minute, pour les différents régimes de malaxage. Les courbes d'écoulement relativement statiques mesurées à différents moments au sein du malaxeur (tableau 4) permettent d'évaluer la structure du béton frais en fonction du régime de malaxage.

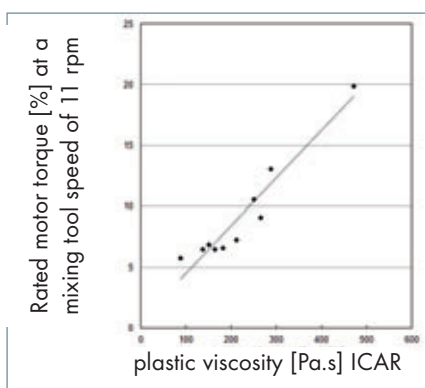


Figure 6 : comparaison du couple moteur et de la viscosité plastique déterminée avec le rhéomètre ICAR

### Balayage de l'amplitude dans le malaxeur

Avec un préajustage du couple et le maintien de la fréquence, l'amplitude a continuellement augmenté. Les résultats de mesure déterminés avec l'essai d'amplitude permettent de caractériser le comportement viscoélastique du matériau en fonction de la charge. Si les consignes de couple  $REL'$  et  $REL''$  sont données comme sur le schéma suivant, il est possible de fournir des affirmations quant au caractère de la structure. Tant que  $REL'$  et  $REL''$  restent constants, l'essai est non destructif étant donné que la structure n'est pas perturbée de manière irréversible (zone viscoélastique linéaire).

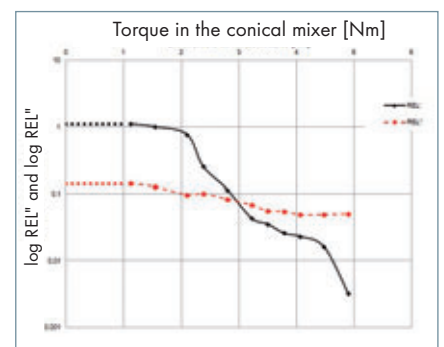


Figure 7 : courbes  $REL'$  et  $REL''$  déterminées lors de l'essai d'amplitude dans le malaxeur conique

Tableau 4 : couples moteur mesurés à différents moments

	Test 4	Test 5	Test 6	Test 7
	[Rated motor torque in %]			
End of mixing	1,45	1,98	6,41	1,48
30 min after end of mixing	4,63	11,78	28,61	6,35
30 min after end of mixing and after a pre-shearing time of 30 seconds	1,78	1,69	4,1	1,38

La valeur limite du couple  $M_{y,relatif}$  (yield point) qui entraîne un dépassement de la plage de viscosité linéaire est désignée par les termes de limite d'élasticité.  $REL'$  et avec lui la part élastique continuent à dominer la part visqueuse  $REL''$ . Ce n'est qu'à l'intersection de  $REL'$  avec  $REL''$  qu'un changement a lieu en faveur de l'aspect plus liquide, voir figure 7. Ce point définit le seuil de cisaillement  $M_{f,relatif}$  (flow point) usuel dans le domaine de la rhéologie du béton. Les valeurs  $M_y$  et  $M_f$  dévient largement l'une de l'autre selon [10] et peuvent influencer sur le taux correspondant de cisaillement selon un coefficient de plus de 10.

### Conclusion / perspectives

Avec un faible apport d'énergie de malaxage, les régimes de malaxage à deux étapes entraînent une nette diminution de la viscosité du béton frais, voir tableau 1. Avec le procédé à deux étapes également, l'ajout retardé de 40 % de superplastifiant donne de meilleurs résultats que dans le cas de l'ajout en une seule fois au début du malaxage. Par rapport à un procédé à une seule étape, le seuil de cisaillement est certes quelque peu plus élevé, mais ceci s'accompagne d'une tendance moindre à la ségrégation. Dans le cadre de l'essai 8, le liant a été fabriqué en une seule charge de malaxeur pour trois charges différentes de béton, cela à vitesse d'outil élevée. Ensuite, le liant - pour simuler un camion malaxeur - a été mêlé au granulat dans un malaxeur à arbre simple tournant à 2 tr/min pendant

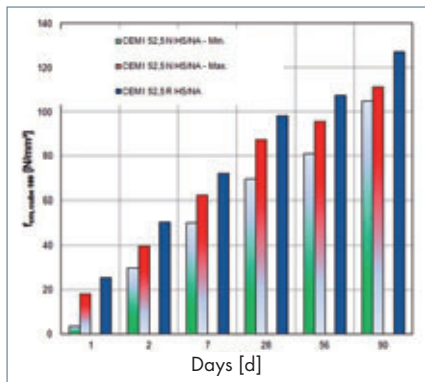


Figure 8 : évolution de la résistance de différents ciments ; pour le CEM I 52,5 N HS/NA, les moyennes inférieure et supérieure sont indiquées pour les différents régimes de malaxage

20 min. Bien que seulement 38 % de l'énergie de malaxage de l'essai 5 furent utilisés pour fabriquer le liant, les caractéristiques du béton frais se situaient au même niveau. Si on utilise des camions malaxeurs intégrant un dispositif de surveillance et de commande de la consistance, il est possible d'accroître considérablement le rendement tout en diminuant la consommation d'énergie. Comme la fin de prise d'un béton réalisé en deux étapes est obtenue plus tard en raison du maintien optimisé de la consistance, la résistance initiale diminue. Une réduction de la quantité de superplastifiant permet de compenser ce phénomène. Conformément à la figure 8, l'élément décisif pour l'évolution de la résistance reste cependant la spécification d'un ciment. Les propriétés rhéologiques sont reproductibles tant avec le malaxeur conique qu'avec la boîte LCPC modifiée - voir figure 9 - et permettent d'optimiser davantage le mélange avec Bétonlab Pro. Grâce aux mesures d'oscillation, le béton se laisse en outre caractériser plus en détail. ■

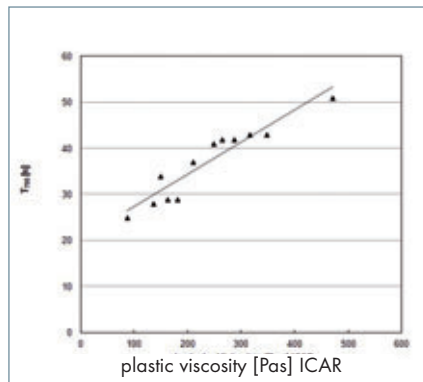


Figure 9 : comparaison du temps  $T_{700}$  et de la viscosité plastique

## Bibliographie

- [1] Baumert, Ch.: Rheologische Mischprozessführung (Arbeitsmittel). Dissertation in Vorbereitung, TU Darmstadt, 2012
- [2] Baumert, Ch.; Garrecht, H.: Mischen von Hochleistungsbetonen, in: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), S. 371-378
- [3] Wallewik, O.H.; Wallewik, J.E.: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, in: Cement and Concrete Research 41 (2011), S. 1279-1288
- [4] Chang, P.-K.; Peng, Y.-N.: Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete, in: Cement and Concrete Research 31 (2001), S. 87-95
- [5] Chopin, D.; Larrad, F. de; Cazaciub, B.: Why do HPC and SCC require a longer mixing time?, in: Cement and Concrete Research 34 (2004), S. 2237-2243

- [6] Rejeb, S. K.: Improving compressive strength of concrete by a two-step mixing method, in: Cement and Concrete Research 26 (1996), S. 585-592
- [7] Cazaciub, B.; Roquet, N.: Concrete mixing kinetics by means of power measurement, in: Cement and Concrete Research 39 (2009), S. 182-194
- [8] Nordenswan, E.; Käppi, A.: A new online method of measuring the workability of self-compacting concrete, in: Proc. 5th RILEM Symposium on SCC, Ghent 2007
- [9] Malhotra, V.M.; Mehta, P.K.: High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Building Sustainable and Durable Structures, 3. Auflage, Ottawa (Canada): Supplementary cementing Materials for Sustainable Development Inc., 2008
- [10] Mezger, Th. G.: Das Rheologie Handbuch, 3. Auflage, Hannover: Vincentz Network, 2010
- [11] Russel, N.: The LCPC Box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC, in: Materials and Structures 40 (2007), S. 889-896

## AUTRES INFORMATIONS

Université Technique de Darmstadt  
Matériaux du bâtiment  
Petersenstraße 12  
T +49 6151 16 6247  
F + 49 6151 16 5344  
[www.wib-tud.de](http://www.wib-tud.de)



Kniele Baumaschinen GmbH  
Gemeindebeunden 6  
88422 Bad Buchau, Allemagne  
T +49 7582 93030 · F +49 7582 930330  
[info@kniele.de](mailto:info@kniele.de) · [www.kniele.de](http://www.kniele.de)



## Votre partenaire pour:

- Malaxeurs coniques KKM
- Malaxeurs laboratoires
- Malaxeur intensif à 1 ou 2 cyclones mécaniques
- Malaxeurs à deux arbres
- Malaxeurs à contre-courant
- Malaxeurs pour chape fluide
- Installations de malaxage stationnaires et mobiles
- Bascules à ciment, eau, agrégats et additifs
- Monte-charge (bennes basculantes ou à fond ouvrant)
- Silos pour ciment et agrégats
- Installations de transport et de chargement
- Accessoires



Gemeindebeunden 6 · D-88422 Bad Buchau  
Tel: +49(0)7582-93030 · Fax: +49(0)7582-930330  
[info@kniele.de](mailto:info@kniele.de) · [www.kniele.de](http://www.kniele.de)