Kniele Baumaschinen GmbH, 88422 Bad Buchau, Allemagne

SPECIAL PRINT
PBI 02/16

Mélangeur intensif de laboratoire avec rhéomètre et tribomètre intégrés

En combinant un malaxeur intensif de laboratoire et un rhéomètre, l'appareil Kniele KKM-RT 15/22.5 permet de fournir les propriétés rhéologiques d'un mélange, soit en unités relatives, soit en unités absolues. Une sonde de malaxeur permettant de déterminer le taux d'humidité et une unité de dosage pour l'ajout de composants liquides viennent compléter les caractéristiques de fonctionnement et permettent ainsi des études automatisées de paramètres lors de la conception d'un nouveau mélange.

Christian Baumert et Harald Garrecht,
Institut des matériaux de construction de l'université de Stuttgart, Allemagne
Harald et Alexander Kniele,
Kniele Baumaschinen GmbH, Allemagne

Catalogue d'exigences du nouveau mélangeur de laboratoire

Volumes de mélange et choix des matériaux

Pour pouvoir effectuer des essais classiques sur du béton frais, comme la détermination de la longueur d'étalement, l'étalement, le cône d'écoulement (trémie VdZ), de la boîte LCPC, etc., il est nécessaire de préparer environ 5 à 6 litres de béton frais. Pour pouvoir fabriquer, à partir d'un même lot, des corps d'essai permettant d'établir les valeurs caractéristiques mécaniques, il faut ajouter encore quelques litres de matériau. En fixant le volume de béton frais à 15 litres au maximum, il est possible, dans le même temps, de fabriquer les petites quantités nécessaires aux tests en laboratoire sur un malaxeur plus compact et plus convivial. Pour rendre le nettoyage du malaxeur plus aisé et permettre ainsi des applications en dehors des analyses technologiques du béton, le malaxeur est fabriqué presque entièrement en acier inoxydable résistant à la corrosion.

Vue d'ensemble du nouveau malaxeur intensif de laboratoire

Sortie de matériau et nettoyage du malaxeur

Avec une quantité de remplissage de 15 l au maximum, on obtient, pour des applications avec du béton, une masse de mélange d'environ 35 kg. Même avec une cuve de mélange amovible fabriquée dans une structure légère, celle-ci reste difficile à manipuler par une seule personne lorsqu'elle est pleine. C'est pourquoi le cône éprouvé est équipé d'une ouverture à son extrémité inférieure. Lorsque le clapet d'obturation est ouvert, et sous l'effet de la gravité, le mélange va alors tomber presque totalement dans le récipient placé en dessous de l'ouverture et pourra ainsi être déplacé plus aisément vers le lieu de traitement. À l'ouverture du clapet d'obturation, les bétons très liquides, qui sortent à grande vitesse, ont tendance à gicler par la fine fente qui se forme. En apposant un tablier en caoutchouc tout autour du clapet de sortie, le matériau est guidé vers le récipient posé juste en dessous de l'ouverture. De même, le nettoyage du malaxeur est ainsi bien plus simple et rapide. Une fois le matériau sorti, le clapet est refermé, le cône rempli d'eau et les outils de mélange actionnés à très haute vitesse. Cette procédure va permettre au matériau qui s'était déposé sur les outils de mélange de se détacher et d'être évacué avec l'eau lors de la prochaine ouverture du clapet d'obturation. Pour limiter les dépôts au niveau du clapet d'obturation, le mécanisme de renvoi de ce clapet a été installé plus haut et, par conséquent, en dehors de la zone d'encrassement.

Outil de mélange

Pour augmenter l'intensité de mélange, des améliorations sur des points précis ont été apportées sur l'outil de mélange éprouvé du malaxeur conique. L'installation de pointes courtes sur les bords extérieurs des palettes de mélange permet une bien meilleure et une bien plus rapide désagglomération des matériaux très fins ainsi que la dispersion des fibres fines. Pour pouvoir mieux supporter les charges élevées, les zones fortement sollicitées ont été protégées avec un revêtement approprié.

Entraînement et fonctionnement en tant que rhéomètre (valeurs de mesure relatives)

Le malaxeur conique KKM de la société Kniele se caractérise par un racleur extérieur et par un outil de mélange centré à l'intérieur. Le racleur extérieur a pour fonction essentielle d'effectuer un mélange grossier avant de conduire celui-ci vers l'intérieur de l'outil de mélange. Le racleur extérieur peut fonctionner avec des vitesses d'outils variables, mais relativement basses et avec un système d'inversion du sens de rotation. L'outil de mélange à l'intérieur, quant à lui, pénètre seulement dans une partie du volume du mélange et ne peut pas être utilisé sur les bords (grand écart avec les parois de la cuve de mélange). Grâce à une puissance de moteur contrôlable, il est alors possible d'atteindre des vitesses d'outil élevées sans avoir à craindre les fortes usures pouvant être causées par les granulats grossiers qui se coincent sur la paroi de la cuve. Les vitesses d'outils que l'on peut obtenir et qui sont judicieuses pour la fabrication de mortier et de béton atteignent 6 m/s au maximum, et sont, par conséquent, bien au-dessus de celles présentes sur les malaxeurs de béton classiques (max. environ 1,5 m/s). Alors que les bétons standard à forte teneur en eau et à faible proportion d'additions et d'adjuvants peuvent être fabriqués sans aucun problème avec une faible vitesse d'outil, la situation n'est plus la même lorsqu'il s'agit de mélanger des bétons plus élaborés. En présence d'une faible quantité d'eau et d'une plus grande quantité d'additions et d'adjuvants, des régimes de mélange (partiellement) à des vitesses d'outil plus élevées permettent d'obtenir de bien meilleurs résul-

■ M. Dr.-Ing. Christian Baumert, ingénieur diplômé et docteur ; 2007-2012, collaborateur scientifique dans les matériaux de construction à l'université technique de Darmstadt avec spécialisation dans la technologie de construction massive ; depuis 2012, collaborateur scientifique en chef à l'Institut des matériaux de construction de l'université de Stuttgart avec une spécialisation de recherche dans la technique de malaxage et les nouvelles technologies du béton.
christian.baumert@iwb.uni-stuttgart.de

■ M. Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, ingénieur diplômé, docteur et professeur ; à partir de 1998, professeur dans les spécialisations matériaux de construction, physique des bâtiments et constructions à l'université de Karlsruhe - Sciences appliquées ; 2006-2012, professeur dans la spécialisation matériaux de construction à l'Institut des matériaux de construction de l'université technique de Darmstadt et directeur scientifique auprès du Laboratoire d'essais des matériaux MPA de l'université de Stuttgart.
harald.garrecht@mpa.uni-stuttgart.de

■ M. Dipl.-Ing. Harald Kniele, ingénieur diplômé, études en génie civil à l'université de Stuttgart de 1982 à 1988 ; depuis 1992 directeur de la société Kniele Baumaschinen GmbH. hk@kniele.de

■ M. Dipl.-Ing. Alexander Kniele, ingénieur diplômé, études en génie civil à l'université de Stuttgart de 1991 à 1995 ; depuis 1995, directeur de la société Kniele Baumaschinen GmbH. ak@kniele.de

tats. Ceci a peu de répercussions sur le seuil de cisaillement (c'est-à-dire sur l'étalement), mais beaucoup sur la viscosité nécessaire à l'ouvrabilité. Lors de vitesses d'outils élevées, les particules agglomérées vont en grande partie se disloquer et entraîner ainsi une viscosité plus faible du matériau. Étant donné que la vitesse de l'outil intérieur est variable sur une plus grande plage et que son sens de rotation peut être également inversé, les systèmes de mélange en service dans la pratique peuvent être ainsi reproduits. En ce qui concerne la fonction de mélange, il existe uniquement des exigences au niveau du couple de rotation et de la plage de vitesses de rotation ; des exigences pouvant être idéalement respectées, sans aucun problème et à faibles coûts, par l'utilisation d'unités de transmission conventionnelles à moteur asynchrone.

Toutefois, pour pouvoir effectuer des mesures supplémentaires permettant l'analyse rhéologique du mélange aux plus faibles vitesses de rotation et bas couples de rotation, un entraînement direct a été réalisé par le biais d'un entraînement avec un moteur synchrone Hi-Torque. Ainsi, les influences dues au glissement de moteur et aux pertes variables causées par la démultiplication sont essentiellement exclues. Le palier volant de l'outil de mélange intérieur, ne comprenant pas d'autres paliers, permet de réduire un peu plus encore les pertes causées par le frottement statique et la friction de glissement. L'interaction avec un convertisseur de fréquence travaillant suivant le principe du contrôle direct de couple permet d'obtenir un entraînement affichant de très faibles pertes, dont la performance est largement au-dessus d'un entraînement conventionnel. Outre l'entraînement régulé par la vitesse de rotation, il est ainsi également possible d'avoir un entraînement régulé par le couple de rotation (privilégié pour la rhéologie) ainsi que des mesures oscillantes avec un changement rapide de sens de rotation. Grâce à une très grande précision du convertisseur de fréquence lors du calcul du couple de rotation, il est possible de se passer d'un capteur de couple de rotation.

Les mesures rhéologiques sont effectuées suivant le principe de Searle, selon lequel la charge de cisaillement est produite par l'outil de mélange intérieur et le couple de rotation nécessaire à cela calculé par le convertisseur de fréquence. Étant donné qu'il n'est pas possible de déterminer très précisément ni les volumes cisaillés, ni les surfaces de cisaillement, les mesures faites avec l'outil de mélange fournissent des résultats en unités relatives, que ce soit pour le couple de rotation (Nm) ou la vitesse de rotation (tr/min). Ces résultats ne sont donc significatifs que pour un mélange et un remplissage donnés et ne peuvent pas être transposés à d'autres rhéomètres travaillant avec des valeurs de mesure relatives.

Fonctionnement en tant que rhéomètre, pour la détermination de valeurs de mesure en unités absolues

Pour pouvoir calculer les propriétés rhéologiques en unités absolues Pa et Pa·s, la charge de cisaillement doit être exercée sur une surface définie. Pour les applications avec du béton, la méthode de deux cylindres coaxiaux entre lesquels le matériau est cisaillé s'est révélée efficace. Dans la plupart des cas, le cylindre extérieur est fixe et le cylindre intérieur en rotation, conformément à la vitesse de rotation définie. Le couple de rotation nécessaire peut alors s'appuyer sur la surface de cisaillement connue ce qui permet ainsi le calcul en unités absolues. Pour la transposition, de ce qui précède, sur le malaxeur de laboratoire, deux systèmes de changement rapides, destinés au changement nécessaire des outils de mélange sur les cylindres coaxiaux, ont été développés. Le système de changement rapide intérieur permet d'accrocher et de décrocher les outils par un simple mouvement de rotation. La liaison solidaire avec l'entraînement se fait au moyen d'une douille de serrage hydraulique rapide actionnée par le biais d'une vis. L'outil de mélange extérieur peut être également accroché et décroché par un simple mouvement de rotation et est fixé solidairement avec l'entraînement extérieur par le biais d'une vis.

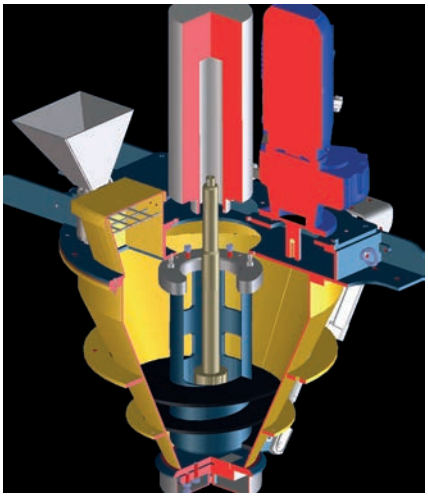
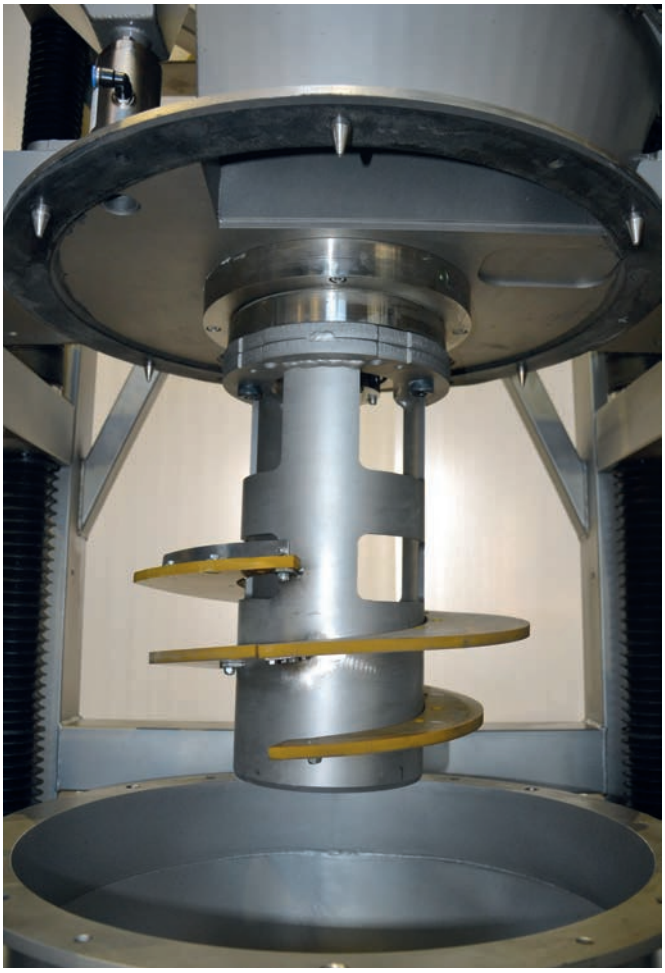


Schéma technique du modèle KKM-RT 15/22.5

Une fois la procédure de mélange terminée, l'ensemble de l'unité d'entraînement supérieure peut être relevé et permet ainsi d'échanger les outils à une hauteur judicieuse et plus ergonomique. Une fois l'échange effectué, l'unité d'entraînement est de nouveau abaissée jusqu'à ce que la base inférieure des cylindres de mesure se trouve plongée dans le béton. Le cylindre intérieur de mesure tourne ensuite à la vitesse de rotation prédéfinie et le couple de rotation nécessaire peut être alors enregistré. Toutefois, étant donné que la valeur correspond au couple de rotation occasionné par le fond du cylindre de mesure, celle-ci sera déduite lors des mesures suivantes. Ainsi, seul le couple de rotation nécessaire à la rotation des surfaces latérales du cylindre sera pris en compte dans les calculs. L'unité d'entraînement est ensuite abaissée encore un peu plus et la course de déplacement, à savoir la hauteur des surfaces latérales entourées de béton, va être déterminée par le biais des données transmises par le capteur rotatif de l'unité de déplacement. Les vitesses de rotation ainsi que les couples de rotation déterminés lors des mesures rhéologiques qui vont suivre, peuvent se référer à la surface de cisaillement connue (diamètre du cylindre et profondeur d'immersion h) et être établies ainsi en unités absolues. Pour les mesures rhéologiques en elles-mêmes, trois modes différents librement programmables sont à disposition.

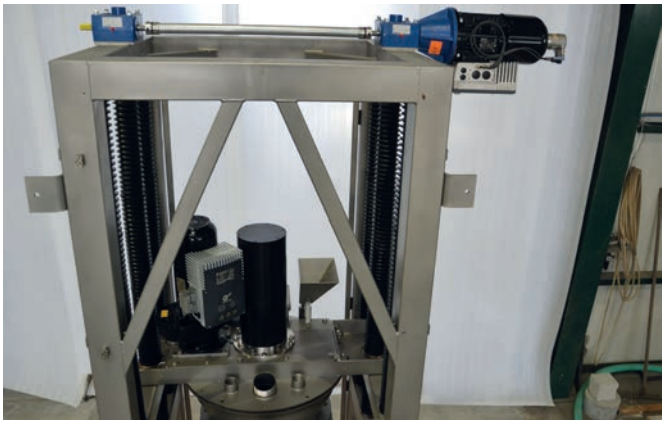
Outils de mesure rhéologiques et détails :

Mélangeur



Rhéomètre

Installation capteur



Dispositif de levage

1.) En mode vitesse de rotation, les rotations du cylindre intérieur sont prédéfinies et les couples de rotation mesurés. Il est possible de calculer, par le biais de modèles rhéologiques appropriés et à partir des données brutes des vitesses rotation, du seuil de cisaillement et de la surface de cisaillement, le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité sous la forme d'unités absolues.

2.) En mode couple de rotation, le déroulement du couple de rotation est prédéfini et la vitesse de rotation de l'entraînement mesurée. Étant donné que l'entraînement installé dispose d'un capteur de rotation haute définition, le seuil de cisaillement peut être déterminé par une élévation brutale de la vitesse de rotation.

3.) En mode mesures oscillantes, un changement de sens de rotation sinusoïdal avec amplitude croissante a lieu. Dans ce mode de fonctionnement également, il est possible de choisir entre un fonctionnement avec couple de rotation ou avec un déplacement prédéfini. Grâce à l'installation d'un entraînement direct synchrone, la chaîne cinématique dispose ainsi de la masse et

de la rigidité minime nécessaires. En tenant compte du moment d'inertie de la chaîne cinématique, ces mesures vont permettre de déterminer les valeurs caractéristiques rhéologiques.

Les systèmes de mesure utilisés pour la rhéologie et conformes, par exemple, à la norme DIN 53019-1 [1], ne peuvent cependant pas être utilisés pour les mortiers et les bétons sans procéder à quelques adaptations et sans faire quelques compromis. En effet, sur les surfaces non profilées et en raison de la formation d'une couche pâteuse, il est clair que cette couche de pâte serait cisaillée, mais pas le matériau de remplissage. De plus, le granulat nécessite une largeur de fente plus grande. C'est la raison pour laquelle de fins profilages ont été fraisés à la surface de l'outil de mesure, même pour les rhéomètres dédiés à la mesure de pâtes (par exemple Rheotest RN 4.1). Sur les rhéomètres pour le béton, on utilise parfois également des corps rotatifs à ailettes supposés cisailler le matériau de manière cylindrique. Les analyses selon [2] attestent toutefois que cette supposition n'est pas pertinente. C'est la raison pour laquelle les deux outils de mesure cylindriques sur la machine Kniele KKM- RT 15/22.5 sont équipés de gorges verticales permettant d'éviter tout glissement, sans toutefois avoir une forte influence sur le flux.

Dispositif de levageSi le rhéomètre fonctionne suivant le principe de Searle (entraînement de l'outil intérieur), les particules vont se déplacer, en fonction de leur taille et de leur densité, vers la zone de bordure. Lors d'une mesure rhéologique, une phase de pré-cisaillement est absolument nécessaire pour défaire la structure du mélange qui s'est formée au repos. Toutefois, ce précisaillement peut également entraîner une ségrégation et conduire à des valeurs fausses durant tout le processus de mesure. Ces deux phénomènes de ségrégation seront renforcés à la suite de tentatives répétées sur une même charge.

Pour pouvoir aller activement à l'encontre de ces deux phénomènes et permettre ainsi des mesures répétées sur une même charge, l'outil de mesure extérieur est doté d'une fonction supplémentaire. En effet, une hélice a été installée le long de la surface extérieure. Cette construction est mise en rotation par le biais de l'unité motrice du racleur extérieur et transporte ainsi le matériau qui se trouve tout au fond du cône vers le haut, où il sera conduit au travers de la fente entre les outils de mesure. Ceci permet d'obtenir un brassage et une harmonisation du mélange corrects au sein du cône. Étant donné que ce principe permet de bien mélanger le matériau, il est alors également possible d'ajouter à ce mélange - avec les outils de mesure installés - des adjuvants avec l'intensité de mélange nécessaire. L'incorporation ultérieure d'adjuvants ainsi que la mesure des paramètres rhéologiques modifiés en unités absolues peuvent être effectués dans une seule machine, sans avoir à changer les outils.

Fonctionnement du tribomètre

Pour pouvoir déterminer l'aptitude au pompage d'un béton, à partir du mélange, la machine KKM-RT 15/22.5 peut être également utilisée en tant que tribomètre. Les pompes à béton haute performance génèrent des vitesses d'écoulement de plusieurs m/s dans la conduite de refoulement. Ceci entraîne, au niveau de la paroi intérieure de la conduite de refoulement, la formation d'une fine couche de pâte sur laquelle le béton vibré va glisser comme « dans du beurre ». Pour pouvoir reproduire ces conditions limites lors des mesures tribologiques, un cylindre tourne dans le mélange à une vitesse appropriée. La principale différence avec les mesures rhéologiques est que le cylindre affiche une rugosité identique à celle de la paroi intérieure de la conduite de refoulement. La formation de ce film lubrifiant est obtenue de manière ciblée. Avec une vitesse de rotation nominale de 500 tr/min, l'entraînement avec un moteur Hi-Torque permet de reproduire également les conditions des pompes à béton les plus performantes.

Sonde de malaxeur

Pour pouvoir commander et contrôler la valeur moyenne eau-liant des matériaux de départ affichant un taux d'humidité propre changeant, une sonde de malaxeur miniature a été intégrée dans le clapet d'obturation. Par ailleurs, cette sonde de malaxeur donne des informations supplémentaires sur la qualité du mélange - en effet, en raison de l'homogénéisation qui se produit au niveau des liquides et des matières sèches, les variations sur les valeurs d'humidité enregistrées par la sonde vont diminuer.

Commande

La commande basée sur logiciel API s'effectue par le biais d'un écran tactile de la société Beckhoff. Ce système industriel éprouvé et robuste va pouvoir être relié aux divers composants, via tous les systèmes de bus pertinents. Étant donné que la société Beckhoff utilise le système d'exploitation Microsoft Windows, le transfert de données s'effectue sans aucun problème.

Options : caméra et dispositif de dosage de liquides

Pour pouvoir observer et documenter la procédure de mélange, une caméra de malaxeur a été installée. Pour éviter que l'optique de la caméra ne se salisse lors de l'ajout de matières sèches générant de la poussière, celle-ci est protégée par une soupape à pression pneumatique. L'affichage se fait par le biais de l'écran tactile présent et servant à commander le malaxeur. Le dispositif de dosage de liquides est une autre option qui permet de paramétrer très précisément et individuellement l'ajout de liquides. Si, par exemple, de l'eau est ajoutée en permanence à un mélange de matières sèches durant la procédure de mélange, la quantité d'eau idéale pourra être alors déterminée par la caractéristique du couple de rotation qui est définie comme transition entre un tas granuleux et une suspension granuleuse. De même, il est possible de doser la quantité d'eau à partir d'un couple de rotation défini et d'utiliser ainsi cette fonctionnalité en tant que malaxeur de consistance. Si un dosage supplémentaire d'adjuvants doit avoir lieu, on peut obtenir ici également des résultats importants, en particulier lorsque des mesures rhéologiques doivent être effectuées.

Bibliographie

[1] DIN 53019-1:2008-09: Viskosimetrie - Messung von Viskositäten und Fließkurven mit Rotationsviskosimetern - Teil 1: Grundlagen und Messgeometrie, Beuth-Verlag

[2] Ovarlez G. et al.: Flows and heterogeneities with a vane tool: MRI measurements. J Rheol, 55 (2011), Seiten 197-223

AUTRES INFORMATIONS

KNIELE Baumaschinen GmbH

Kniele Baumaschinen GmbH
Gemeindebeunden 6
88422 Bad Buchau, Allemagne
T +49 7582 9303 11 · F +49 7582 9303 30
info@kniele.de · www.kniele.de

bauma 2016 Stand C1.404