

Recommandation CROW-CUR 128: 2021
**Filler d'UIDND dans du
béton non armé à
consistance de terre
humide**



À propos de CROW

Chez CROW, nous concevons des solutions intelligentes et pratiques pour répondre aux problèmes d'infrastructure, d'espaces publics, de transport et de circulation aux Pays-Bas. Nous travaillons avec des professionnels externes qui partagent leurs connaissances et les utilisent pour inventer des solutions pratiques.

CROW est une organisation de la connaissance indépendante et sans but lucratif, qui investit dans l'expertise pour le présent et l'avenir. Notre objectif est de trouver les meilleures solutions aux défis importants liés aux infrastructures, aux espaces publics, aux transports, au travail et à la sécurité. Nous sommes également experts en matière d'appels d'offres et de contrats.

Recommandation CROW-CUR 128: 2021
**Filler d'UIDND dans du
béton non armé à
consistance de terre
humide**

CROW

BP 37, 6710 BA Ede, Pays-Bas
Téléphone +31 (0)318 69 53 00
E-mail klantenservice@crow.nl
Site web www.crow.nl

Août 2021

CROW et les autres parties qui ont contribué à cette publication ont compilé ces données avec grand soin et conformément aux pratiques scientifiques et technologiques les meilleures et les plus récentes. Toutefois, nous ne pouvons pas garantir que cette publication soit exempte d'erreurs. Le lecteur utilise ce document à ses propres risques.

CROW et les autres parties ayant contribué à cette publication ne peuvent être tenus pour responsables des éventuels dommages résultant de l'utilisation de ces informations.

Le contenu de cette publication est protégé par la loi sur le droit d'auteur.

CROW est le détenteur des droits d'auteur relatifs à cette publication.

Introduction

Ces dernières années, nous avons assisté à une hausse de la demande en fillers appropriés pour le béton – notamment ceux à caractère pouzzolanique. Un des produits capables de répondre à cette lacune est le filler d'UIDND, qui est fabriqué à partir de mâchefers provenant d'unités d'incinération d'ordures ménagères (UIDND). Outre les étapes de traitement standard appliquées à ces mâchefers, la production de filler d'UIDND implique un processus spécifique de broyage humide. Ce filler est également un moyen utile de réutiliser un matériau résiduel minéral. Dans la présente recommandation CROW-CUR, l'utilisation de filler d'UIDND dans le béton est limitée aux produits en béton non armé fabriqués avec du béton à consistance de terre humide, tels que les dalles de béton, les carreaux de béton et les bordures de béton. L'élaboration de cette recommandation CROW-CUR, qui définit les exigences de qualité pour les fillers d'UIDND, permet d'inclure le produit comme nouveau type de matière première dans la directive d'évaluation néerlandaise BRL 1804, « Fillers à utiliser dans le béton et le mortier ».

Lorsqu'il est fourni dans le cadre d'un processus certifié BRL 1804, ce filler peut être utilisé en toute confiance comme filler de type I dans les produits en béton non armé fabriqués avec du béton à consistance de terre humide.

L'Accord néerlandais sur le béton définit une ambition nationale visant à rendre la chaîne du béton plus durable. L'un de ses objectifs est la réutilisation de haute qualité de 100 % des déchets de béton résiduels. L'utilisation de fillers d'UIDND a donc également été vérifiée en termes de circularité et de performance environnementale, conformément au décret néerlandais sur la qualité des sols ; ce travail n'entre pas dans le cadre de la présente recommandation CROW-CUR, mais a été coordonné avec les membres de ce groupe de travail CROW. Les granulats de béton fabriqués à partir de béton avec du filler d'UIDND a été comparé à un matériau de référence de granulats de béton fabriqués uniquement avec des matières premières primaires. La comparaison portait sur les aspects techniques et environnementaux ainsi que sur la circularité. Cette comparaison montre que les granulats de béton et les fillers recyclés à partir de gravats de béton avec des fillers d'UIDND peuvent être réutilisés de manière responsable comme matière première dans le béton.



Le contenu de cette recommandation CROW-CUR se fonde sur les résultats obtenus lors d'un essai approfondi de béton fabriqué avec du filler d'UIDND, qui a été consigné dans un rapport de base.

Cette recommandation CROW-CUR a été rédigée par le groupe de travail CROW « Fillers d'UIDND dans le béton non armé ». Au moment de la publication de la recommandation, le groupe de travail était composé de :

Angelo Sarabèr (*Sarabèr Consultancy, Président*)
Angelo Antoniadis (*Kiwa*)
Erwin Bakker (*Blue Phoenix Group*)
Rob Bleijerveld (*Mineralz*)
Eugene Caron (*Master Builders Solutions Nederland*)
Mark van Kempen (*Blue Phoenix Group*)
Felix Leenders (*Mobilis*)
Erik Onstenk (*Pelt & Hooykaas*)
Math Pluis (*Betonhuis*)
Jos van der Scheer (*Kijlstra Betonwaren*)
Evert Schut (*RWS*)
Henk Soen (*Blue Phoenix Group*)
Ludwig Temme (*Gemeente Amersfoort*)
Edwin Vermeulen (*Betonhuis*)
Martin Verweij (*Cementbouw*)
Gert van der Wegen (*SGS INTRON, rapporteur*)

Le soutien de CROW a été organisé par Ad van Leest.

La publication de cette recommandation a été rendue possible grâce aux contributions financières de : Blue Phoenix Group, Betonhuis Cement et la direction générale néerlandaise des travaux publics et de la gestion de l'eau (Grands projets et entretien)

Le contenu de la Recommandation CROW-CUR 128 a été partagé avant sa publication avec les membres du comité 353 039 de normalisation NEN « Béton », et son groupe de travail « Fillers ». Les réponses et les commentaires obtenus ont été intégrés à la présente recommandation, dans la mesure du possible.

Sommaire

1	Objet et champ d'application	6
2	Termes et définitions	6
1.1	Sujet	6
1.2	Portée	6
3	Exigences matérielles	7
	Annexe	9
	Rapport de base pour Recommandation CROW-CUR 128:2021 : Étude sur l'adéquation des MIDND de sol humide comme fillers dans le béton non armé à consistance de terre humide – Rapport SGS INTRON B.V.	

1

Objet et portée

1.1 Objet

La présente recommandation CROW-CUR établit les définitions, les exigences et les règles relatives au filler d'UIDND, qui est produit à partir de mâchefers provenant d'une unité d'incinération de déchets non dangereux (MIDND) et d'un extracteur de scories par voie humide. Outre les étapes de traitement standard du mâchefer, à savoir le tamisage et l'élimination des métaux ferreux et non ferreux, un processus de broyage par voie humide est également effectué. Le filler d'UIDND doit être produit à partir de la gamme complète des catégories de mâchefers d'UIDND.

1.2 Portée

La présente recommandation CROW-CUR s'applique aux fillers d'UIDND utilisés dans les produits en béton non armé, non destinés à la construction, fabriqués avec un mortier de béton humide de classe de consistance C0 (sec) ou C1 (terre humide) et dont la teneur maximale en filler d'UIDND est de 140 kg/m³.

2

Termes et définitions

Mâchefers d'UIDND

Les mâchefers UIDND sont produits lorsque les déchets domestiques et les déchets commerciaux équivalents (y compris la biomasse) sont brûlés dans une unité d'incinération d'ordures ménagères (UIDND) avec un incinérateur à grille. Les mâchefers des centrales d'énergie à biomasse peuvent représenter jusqu'à 5,0 % m/m des MIDND, à condition qu'ils proviennent d'une centrale d'énergie à biomasse située dans la même installation et qu'ils soient ajoutés au MIDND non traité. Les cendres de chaudière peuvent faire partie des MIDND pour autant que les cendres de chaudière soient produites en même temps que les MIDND et qu'elles soient ajoutées pendant le processus de combustion lui-même.

Filler d'UIDND

Un filler produit à partir de MIDND, provenant d'une UIDND avec un extracteur de scories par voie humide où, en plus des étapes de traitement standard effectuées sur le mâchefer, un processus de broyage par voie humide est également réalisé.

Le filler d'UIDND doit répondre aux exigences énoncées dans le tableau ci-dessous.

Propriété	Méthode	Exigence
Distribution des particules	NEN-EN 933-10	100% < 2 mm 85-100% < 125 µm 70-100% < 63 µm
Teneur en substances alcalines, exprimée en équivalent Na ₂ O	Spectrométrie de fluorescence des rayons X (XRF) NEN-EN 196-2	≤ 5,0 % (m/m) ¹⁾
Adsorption du bleu de méthylène	NEN-EN 933-9	≤ 1,2 % (m/m)
Teneur en chlorure	NEN-EN 196-2	≤ 1,0 % (m/m) ²⁾
Teneur en sulfate – SO ₃	NEN-EN 196-2	≤ 4,0 % (m/m) ³⁾
Effet sur la force ^{4,5)}	NEN-EN 196-1	≥ 65%
Effet sur le temps de prise ⁴⁾	NEN-EN 196-3	< 120 minutes
Détermination de la solidité ⁶⁾	NEN-EN 196-3	< 10 mm
Teneur en COT	NEN-EN 13639	≤ 6 % (m/m)
Teneur en Al + Zn métallique	Recommandation CUR 116	≤ 0,2 % (m/m)

- 1) Si la valeur XRF est > 5 % (m/m), cette valeur doit être déterminée en tant que teneur en substances alcalines solubles, conformément à la norme NEN-EN 196-2, la digestion de l'échantillon de filler d'UIDND s'effectuant conformément au point 4.4.4.2, mais avec une solution de 107 g de LiOH par 1000 ml au lieu de la solution de KOH décrite.
- 2) Cette exigence s'applique à un remplacement de 25% (m/m) du ciment par du filler d'UIDND. Pour des pourcentages de remplacement plus élevés, la valeur limite est réduite proportionnellement.
- 3) Si la teneur en sulfate soluble dans l'acide, exprimée en SO₃, est de 0,2 ≤ x ≤ 4,0 % (m/m), la teneur en sulfate dans le granulat utilisé ne doit pas dépasser 0,2 % (m/m) (AS0.2) et cette limite d'utilisation des granulats doit figurer dans les spécifications du produit. Les fillers dont la teneur en sulfate, exprimée en SO₃, est supérieure à 4,0 % (m/m) ne doivent pas être utilisés.
- 4) L'exigence s'applique aux mélanges composés de 25 % (m/m) de filler et de 75 % (m/m) de CEM I 42.5 par rapport aux échantillons d'essai réalisés avec 100 % de CEM I 42.5.
- 5) Si la teneur en air du mortier avec filler d'UIDND est supérieure à celle du mortier de référence, la résistance à la pression du mortier de référence doit être réduite de 5 % pour chaque % de teneur en air supérieure avant de réaliser l'essai. Cette correction a été introduite parce que le filler d'UIDND peut entraîner une augmentation de la teneur en air dans les mortiers plastiques, ce qui ne se produit pas dans les mortiers secs et à consistance de terre humide.
- 6) Cette exigence s'applique aux mélanges composés de 25 % (m/m) de filler et de 75 % (m/m) de CEM I 42.5.

Titres des normes et documents référencés

NEN-EN 196-1	Méthodes d'essai du ciment – Partie 1 : détermination de la force
NEN-EN 196-2	Méthodes d'essai du ciment – Partie 2 : analyse chimique du ciment
NEN-EN 196-3	Méthodes d'essai du ciment – Partie 3 : détermination des délais de prise et de la solidité
NEN-EN 933-9	Essais des propriétés géométriques des granulats – Partie 9 : évaluation des fines. Essai au bleu de méthylène
NEN-EN 13639	Détermination du carbone organique total dans le calcaire
Recommandation CUR 116	Granulats d'UIDND comme agrégat pour le béton
Rapport de base pour CROW-CUR Recommandation 128	« Étude sur l'adéquation des MIDND de sol comme filler dans le béton non armé à consistance de terre humide », rapport A117460/R20210149 SGS INTRON, juillet 2021

Annexe

Rapport de base pour CROW-CUR Recommandation 128:2021

Étude sur l'adéquation des mâchefers d'UIDND de sol humide comme filler dans le béton non armé à consistance de terre humide

Rapport SGS INTRON B.V.

Sommaire

Résumé	13
1 Introduction	14
2 Conception de l'étude	15
2.1 Caractérisation des fillers d'UIDND	15
2.2 Essais sur la pâte et le mortier	15
2.3 Étude du béton : 1 ^{re} vie	16
2.4 Circularité	17
2.4.1 La technologie du béton : Granulats de béton	17
2.4.2 La technologie du béton : Filler	17
2.4.3 Environnement	17
3 Résultats et analyse	18
3.1 Caractérisation des fillers d'UIDND	18
3.1.1 Analyses chimiques et besoins en eau	18
3.1.2 Distribution des particules	19
3.1.3 Composition élémentaire	19
3.1.4 Composition minéralogique	19
3.1.5 Microstructure et composition	21
3.1.6 Conclusions de la caractérisation	22
3.2 Essais sur la pâte et le mortier	23
3.2.1 Essais sur la pâte	23
3.2.2 Essais sur le mortier : Force	23
3.2.3 Essais sur le mortier : Expansion dans l'eau à 40 °C	24
3.2.4 Essais sur le mortier : Effet du filler d'UIDND sur la RAS	25
3.3 Étude du béton : 1 ^{re} vie	26
3.3.1 Composition des carreaux de béton	26
3.3.2 Propriétés mécaniques	26
3.3.3 Résistance au sel de voirie	27
3.3.4 Absorption d'eau et séchage	28
3.3.5 Conclusions de l'étude du béton : 1 ^{re} vie	28
3.3.6 Circularité	29
3.3.7 La technologie du béton : Granulats de béton	29
3.3.8 La technologie du béton : Filler	30
3.3.9 Environnement	32
4 Conclusions : Adéquation du filler d'UIDND	33
5 Recommandation CROW-CUR	33
6 Postface	35
Annexes	
A Origines et représentativité des échantillons de matériaux d'entrée	
B Détails des méthodes de mesure XRD et XRF	43
C Production de carreaux de béton	44
D Distribution des particules dans les fillers et le ciment	45
E Diagrammes de diffraction des rayons X	46
F SEM/EDAX	47
G Essai de moussage de fillers d'UIDND	48

Résumé

Introduction

Les mâchefers d'UIDND peuvent être traités et broyés par voie humide pour produire un filler utilisable dans le béton non armé, à consistance de terre humide. Pour utiliser ce filler d'UIDND de manière responsable et acceptée dans le béton, il convient de mettre en place un système d'évaluation sous la forme d'une recommandation CROW-CUR. Cette recommandation constitue également la base technique pour l'inclusion de ce type de filler dans le Guide d'évaluation BRL 1804, qui peut être utilisé pour certifier le filler.

Une étude approfondie de la caractérisation et du béton a été menée pour déterminer les propriétés et les performances du filler d'UIDND. Cette étude s'est également intéressée à la circularité du béton qui utilise le filler d'UIDND. Ces connaissances ont servi de base à la recommandation CROW-CUR.

Les résultats de l'étude sont présentés dans ce rapport, qui sert de document de base à la recommandation CROW-CUR correspondante.

L'étude a été conçue et réalisée sous la supervision du groupe de travail CROW N1794, « Filler d'UIDND dans le béton non armé ».

Activités entreprises

Des échantillons représentatifs de filler d'UIDND ont été caractérisés en termes de propriétés pertinentes pour une utilisation dans le béton. L'étude a également examiné l'effet du filler d'UIDND sur les principaux critères de performances des carreaux de béton produits en usine, en utilisant comme références des carreaux de béton sans filler et des carreaux de béton avec un filler de calcaire broyé.

Pour évaluer l'effet du filler d'UIDND sur la circularité du béton, les granulats de béton avec filler d'UIDND ont été caractérisés, et le béton fabriqué avec ces granulats a été examiné de façon à déterminer ses propriétés de base, à la fois technologiques et environnementales. L'étude s'est également penchée sur la question de savoir si le ciment durci contenant du filler d'UIDND pouvait être broyé et réutilisé comme filler dans un nouveau béton.

Conclusions

Sur la base des études réalisées, nous pouvons conclure que le filler d'UIDND envisagé est adapté à une utilisation dans des produits en béton non armé, non destinés à la construction, fabriqués avec un mortier de béton sec ou à consistance de terre humide.

L'étude a également montré que, lorsque le filler d'UIDND est utilisé dans ces produits, les flux de matériaux générés lors du recyclage du béton en question (granulat de béton et fraction de poudre) peuvent être réutilisés comme matière première dans un béton de 2^e vie. Cette application du filler d'UIDND est donc entièrement circulaire en termes d'aspects qui tombent dans le cadre de cette étude.

Recommandations

Outre les propriétés génériques énumérées dans la BRL 1804, nous recommandons d'incorporer les aspects suivants des fillers d'UIDND dans la recommandation CROW-CUR :

- Teneur en alcali (Na_2O -eq)
- Teneur en COT
- Teneur en Al + Zn métallique
- Teneur en chlorure

Blue Phoenix Group (BPG) souhaite commercialiser le filler d'UIDND comme filler certifié, destiné à une utilisation dans les produits en béton non armé fabriqués avec du mortier de béton à consistance de terre humide. Ce filler d'UIDND est fabriqué à partir de mâchefers d'UIDND selon un procédé qui, outre les étapes de traitement standard des mâchefers, à savoir le tamisage et l'élimination des métaux ferreux et non ferreux, comprend également un processus de broyage humide. Le produit est fourni sous forme de poudre.

Pour certifier ce filler d'UIDND conformément à la norme BRL 1804, il convient d'établir d'abord une recommandation CROW-CUR qui constitue la base technique de cette certification. Les études requises à cette fin ont été déterminées par le groupe de travail CROW N1794 « Filler d'UIDND dans le béton non armé ».

Cette étude s'est également intéressée à la circularité du béton qui utilise du filler d'UIDND.

Le présent rapport, qui sert de rapport de base à la Recommandation CROW-CUR, expose les résultats des études réalisées. Les décisions prises par rapport à des aspects spécifiques, tels que ceux inclus dans la recommandation CROW-CUR, sont également expliquées plus en détail.

L'étude a été menée sur trois échantillons de filler d'UIDND. Selon le groupe Blue Phoenix, le matériau utilisé pour produire ces échantillons provient de trois unités d'incinération d'ordures ménagères (UIDND) différentes aux Pays-Bas et il est représentatif des mâchefers d'UIDND produits aux Pays-Bas (voir annexe A). Cette annexe comprend également des informations sur la façon dont les échantillons de mâchefers ont été obtenus et le processus utilisé pour les transformer en filler d'UIDND.

Le programme d'études est divisé en plusieurs sections :

- Caractérisation des trois échantillons de filler d'UIDND
- Effet du filler sur les propriétés de la pâte et du mortier
- Étude technologique du produit en béton dans lequel le filler d'UIDND a été utilisé (« 1^{re} vie »)
- Étude de 2^e vie (circularité), y compris les facteurs technologiques et environnementaux.

Sur la base des résultats obtenus dans les deux premières sections du programme, un filler d'UIDND a été sélectionné pour une étude complète dans les deux sections suivantes.

2.1 Caractérisation des fillers d'UIDND

Les propriétés suivantes ont été déterminées pour chacun des trois échantillons de filler d'UIDND :

- Distribution des particules (granulométrie laser)
- Valeur β_p du besoin en eau : annexe C de BRL 1804
- Teneur en chlorure (soluble dans l'acide et dans l'eau) : NEN-EN 196-2 et NEN-EN 1744-1 respectivement
- Teneur en sulfate (soluble dans l'acide et dans l'eau) : NEN-EN 196- et NEN-EN 1744-1 respectivement
- Teneur en substances alcalines (Na_2O -eq) : NEN-EN 196-2
- Teneur en phosphates hydrosolubles : annexe C de NEN-EN 450-1
- Teneur en composés organiques (TOC) : NEN-EN 13639
- Teneur en Al + Zn métallique : annexe A de CUR recommandation 116
- Composition des éléments par spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF) : NEN-EN 196-2
- Composition minérale : diagrammes quantitatifs de diffraction des rayons X (XRD)
- Microstructure/composition : microscopie électronique à balayage (MEB) + analyse dispersive en énergie (EDXA)

Une spécification sommaire de la méthode de mesure XRF et XRD est fournie à l'annexe B.

2.2 Essais sur la pâte et le mortier

Des essais sur la pâte et le mortier ont été réalisés en utilisant les trois échantillons de filler d'UIDND et un calcaire broyé largement disponible (comme référence), avec 25 % (m/m) du ciment remplacé par ces fillers. À titre de référence supplémentaire, ces essais ont également été réalisés sur des pâtes et des mortiers sans filler (100 % ciment). Les pâtes et mortiers conformes aux normes ont été mélangés selon les critères suivants NEN-EN 196-3 et NEN-EN 196-1, en utilisant du CEM I 52.5 N comme agent de liaison (ENCI Maastricht). Le CEM I 52.5 N a été choisi car ce ciment est utilisé pour produire les carreaux de béton utilisés dans l'étude sur le béton.

Les propriétés suivantes ont été déterminées :

- Teneur en air (mortier frais) selon la norme NEN-EN 12350-7
- Temps de prise (pâte) selon la norme NEN-EN 196-3
- Solidité (Le Chatelier) conforme à NEN-EN 196-3

- Essai en autoclave (sur la pâte) conforme à ASTM C151
- Expansion lors du stockage sous eau à 40 °C. À la fin de l'essai, une micro section a été examinée au microscope
- Résistance à la pression après 7, 28 et 90 jours de durcissement selon la norme NEN-EN 196-1

L'effet du filler d'UIDND sur la réaction alcali-silice (RAS) a été étudié en utilisant l'essai « Ultra-Accelerated Mortar Bar Test » (UAMBT) conformément à l'annexe E de CUR Recommandation 89 avec les combinaisons suivantes :

- CEM I 52.5 sans filler d'UIDND en combinaison avec des agrégats réactifs et non-réactifs (deux références)
- Le filler d'UIDND sélectionné dans les étapes précédentes, qui remplace 25 % m/m du ciment, en combinaison avec les agrégats réactifs et non réactifs.
- Les deux autres fillers d'UIDND (remplaçant 25 % (m/m) du ciment) en combinaison avec un agrégat réactif seulement

Comme aucun agrégat réactif n'était disponible, nous avons choisi d'utiliser du verre borosilicate comme matériau alcali-réactif. Les billes de verre fabriquées avec ce matériau ont été écrasées et tamisées pour obtenir les fractions de particules requises pour l'essai UAMBT. Pour obtenir des dilatations substantielles, des échantillons de 25 x 25 x 285 mm ont été utilisés dans cet essai.

2.3 Étude du béton : 1^{re} vie

Dans la conception initiale, cette étude devait être réalisée sur des dalles de béton pressées en laboratoire, avec une formule et une pression de compression utilisées dans des applications réelles. Cependant, comme l'énergie de compression intense ne pouvait pas être reproduite en laboratoire, les dalles de béton produites en laboratoire avaient une résistance à la fissuration/ résistance à la traction de seulement la moitié de la valeur normale attendue. C'est pourquoi, en consultation avec le groupe de travail CROW, nous avons décidé de faire produire les échantillons d'essai par une entreprise spécialisée en dehors du laboratoire, avec Blue Phoenix Group et SGS INTRON pour la gestion de projet. Bianca Baetens, employée et ingénieur de SGS INTRON, a supervisé et documenté l'ensemble du processus de production. L'annexe C présente les principaux détails du processus de production.

Cinq séries de carreaux de béton ont été produites :

- Béton sans filler (référence 1), produit de manière standard
- Béton avec filler de calcaire broyé (référence 2)
- Béton avec les trois échantillons de filler d'UIDND

Les quatre fillers ont été dosés pour remplacer 25 % (m/m) du ciment.

Après 28 jours de durcissement à 20 °C et avec leur taux d'humidité propre inchangé, les propriétés suivantes ont été déterminées en trois fois pour chacune des dalles de béton :

- Poids volumétrique selon la norme NEN-EN 12390-7
- Module d'élasticité dynamique (calculé à partir de la vitesse de propagation des ultrasons)
- Résistance à la pression de l'échantillon cubique prélevé selon la norme NEN-EN 12390-3
- Résistance à la flexion conformément à l'annexe F de la norme NEN-EN 1339
- Résistance au sel de voirie conformément à l'annexe D de la norme NEN-EN 1339
- Absorption et séchage de l'eau par capillarité

2.4 Circularité

Un autre groupe de travail CROW élabore actuellement un système permettant d'évaluer l'adéquation des matières premières pour le béton circulaire. Comme ce système n'avait pas encore été publié au moment de lancer cette étude, il n'a pas été possible d'en étudier tous les aspects, notamment les substances extrêmement préoccupantes (SVHC) et la radioactivité. Les aspects technologiques et environnementaux énumérés ci-dessous ont été examinés dans le cadre de cette étude.

2.4.1 Technologique : Granulat de béton

Un certain nombre de carreaux de béton fabriqués à partir de trois des mélanges de béton ont été soumis à une période de deux mois de durcissement rapide dans l'eau à une température de 40 °C après leur période initiale de durcissement de 28 jours à 20 °C, dans le but d'atteindre un niveau d'hydratation plus élevé (pour reproduire le béton « ancien »). Ces carreaux de béton ont ensuite été brisés dans un concasseur à mâchoires et tamisés à sec en granulats de béton de 4 à 22 mm. Cette étape a été réalisée sur le mélange de béton sans filler (référence 1), le mélange de béton avec filler de calcaire broyé (référence 2), et le mélange de béton avec filler d'UIDND sélectionné lors de la première étape de l'étude.

Ces trois granulats de béton grossier ont ensuite été soumis aux essais suivants :

- Caractérisation :
 - Densité (particules) et absorption d'eau conformément à NEN-EN 1097-6
 - Distribution des particules conformément à NEN-EN 933-1
- Production de béton plastique (S3) avec du CEM I 42.5 N de 320 kg/m³ et un rapport eau/ciment de 0,50 et détermination de :
 - La résistance à la pression après 7 et 28 jours conformément à NEN-EN 12390-3
 - La pénétration de l'eau après 28 jours de durcissement conformément à NEN-EN 12390-8
 - Le coefficient de migration des chlorures après 28 jours de durcissement selon NT Build 492

2.4.2 Technologique : Filler

Grâce à des techniques de recyclage innovantes, la plus grande partie du ciment peut être séparée du granulat, ce qui signifie que cette fraction de poudre peut être réutilisée comme filler dans le nouveau béton. L'essai suivant a été réalisé pour déterminer l'effet du filler d'UIDND sur la qualité d'un filler de 2^e vie :

Trois pâtes de ciment ont été produites avec un rapport eau/ciment de 0,35 (comparable à celui des carreaux de béton) : une pâte de ciment sans filler (référence 1), une pâte de ciment avec filler de calcaire broyé (référence 2) et une pâte de ciment avec filler d'UIDND sélectionné lors de la première étape de l'étude. Ces pâtes de ciment ont été soumises à une période de deux mois de durcissement rapide dans l'eau à une température de 40 °C après leur période initiale de durcissement de 28 jours à 20 °C, dans le but d'atteindre un niveau d'hydratation plus élevé (pour imiter le béton « ancien »). Après cette phase de durcissement rapide, les échantillons ont été brisés dans un concasseur à mâchoires pour obtenir une taille de particule < 4 mm, puis broyés à sec pendant une heure dans un broyeur à boulets pour obtenir une consistance de poudre.

Les trois fillers de « 2^e vie » produits selon cette méthode ont été testés pour déterminer les propriétés suivantes :

- Effet sur le temps de prise conformément à NEN-EN 196-3
- Solidité conformément à NEN-EN 196-3
- La résistance à la pression après 7 et 28 jours conformément à NEN-EN 196-1

2.4.3 Environnement

Après 28 jours de durcissement à 20 °C et avec leur propre taux d'humidité inchangé (hermétiquement scellé dans un film plastique), seuls les carreaux de béton produits sans filler (référence 1) et ceux avec le filler d'UIDND sélectionné ont été broyés en particules de taille < 4 mm. Les deux échantillons de granulats de béton ont été testés pour déterminer leur lixiviation en utilisant un essai sur colonne conformément à NEN 7383.

3.1 Caractérisation des fillers d'UIDND

Pour l'étude, BPG a livré trois échantillons de filler d'UIDND au laboratoire SGS INTRON à Sittard, aux Pays-Bas. BPG a délibérément produit ces échantillons avec un certain degré de variation, y compris différents niveaux de COT, afin d'illustrer l'effet de ces différences sur les propriétés du mortier et du béton (mortier).

3.1.1 Analyses chimiques et besoins en eau

Le tableau 1 présente les résultats des analyses chimiques et des essais de besoins en eau.

Tableau 1. Caractérisation des fillers d'UIDND

Propriété	Unité	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3	Exigence générique dans BRL 1804
Insoluble (HCl/Na ₂ CO ₃)	% (m/m)	41,7	43,5	44,1	-
Sulfate, soluble dans l'eau (SO ₃)	% (m/m)	1,18	0,70	0,88	-
Sulfate, soluble dans l'acide (SO ₃)	% (m/m)	2,10	1,31	1,65	≤ 4,0
Chlorure, soluble dans l'eau	% (m/m)	0,19	0,11	0,29	-
Chlorure, soluble dans l'acide	% (m/m)	0,32	0,23	0,42	-
Équivalent alcalin, XRF	% (m/m)	4,8	4,8	4,6	≤ 5,0
Phosphate soluble (P ₂ O ₅)	% (m/m)	< 0,0010	< 0,0010	< 0,0010	-
Aluminium métallique + zinc	% (m/m)	< 0,03	< 0,03	< 0,03	-
TOC	% (m/m)	5,8	2,0	0,69	-
Besoin en eau, valeur β _p	V/V	1,54	1,18	1,32	-

La teneur en sulfate est inférieure à l'exigence générique fixée dans BRL 1804 (≤ 4,0 % (m/m)) et à l'exigence fixée dans EN 450-1 pour les cendres volantes (≤ 3,0 % (m/m)).

La norme BRL 1804 ne spécifie pas d'exigence générique pour la teneur en chlorure car une limite maximale de la teneur en chlorure est en place pour le mortier de béton utilisé dans le béton armé et le béton précontraint en raison du risque de corrosion de l'armature. La teneur totale en chlorure de l'ensemble des matières premières utilisées doit satisfaire à ce critère. Comme les applications de fillers d'UIDND sont limitées au béton non armé, cette limite de teneur maximale en chlorure n'est pas pertinente. Une autre raison de limiter la teneur en chlorure est son impact sur les caractéristiques de retrait du béton. Cet impact n'est perceptible qu'à des niveaux élevés de chlorure (> 1 % (m/m) du poids du ciment). Même à des doses très élevées de filler d'UIDND – par exemple 50 % du poids du ciment – l'effet sur la teneur en chlorure est limité à 0,2 % (m/m) du ciment, ce qui n'aura pas d'impact négatif.

L'équivalent alcalin a été déterminé par XRF, qui mesure la teneur totale, y compris les alcalis présents dans la fraction amorphe (verre) des fillers d'UIDND. Bien que ces alcalis ne soient libérés que lorsque ce verre a été (partiellement) dissous par les réactions pouzzolaniques, les valeurs mesurées satisfont à l'exigence générique fixée dans BRL 1804 (≤ 5,0 % (m/m)).

Les teneurs en phosphates hydrosolubles et en aluminium + zinc métalliques sont inférieures à la valeur limite inférieure fixée dans les méthodes de mesure prescrites et sont donc effectivement absentes. Il n'y a aucune exigence générique pour ces deux aspects dans BRL 1804. En termes de phosphate hydrosoluble, une exigence de < 0,01 % (m/m) est fixée dans NEN-EN 450-1 pour les cendres volantes et dans BRL 1804 pour les fillers libérés lors du nettoyage thermique de l'asphalte sans goudron et contenant du goudron. Le phosphate hydrosoluble est donc au moins dix fois inférieur à cette exigence.

La valeur du COT varie (délibérément) de manière significative entre les différents fillers d'UIDND. Pour les trois fillers d'UIDND testés, la valeur est supérieure à l'exigence supplémentaire fixée pour le calcaire broyé dans BRL 1804 ($\leq 0,5 \%$ (m/m)).

Le béton produit avec du calcaire broyé dont la teneur en COT est supérieure à $0,5 \%$ (m/m) semble être sensible au sel de voirie. Cet aspect a été étudié plus en détail pour les fillers d'UIDND (voir section 3.3).

La valeur β_p des trois fillers d'UIDND testés est plus élevée que celle du ciment (CEM I 52.5 = environ 1,2) et d'autres fillers tels que les cendres volantes (environ 0,7) et le calcaire broyé (environ 0,8).

Cela signifie que le mortier plastique et le mortier de béton avec des fillers d'UIDND nécessitent plus d'eau.

La détermination de l'adsorption du bleu de méthylène ne faisait pas partie des essais de caractérisation décrits ci-dessus. Les essais réalisés sur trois échantillons de filler d'UIDND de même origine que l'UIDND-3 mais prélevés sur une période de plusieurs mois en 2018 ont donné une valeur d'adsorption du bleu de méthylène de $0,16 \%$ (m/m) [rapport SGS INTRON A101790/R20180428c du 12-7-2018]. Cette valeur est nettement inférieure à l'exigence de $< 1,2 \%$ (m/m) fixée par la norme BRL 1804.

3.1.2 Distribution des particules

La distribution des particules des trois fillers d'UIDND testés et la distribution des particules du mélange de CEM I 52.5 N et de calcaire broyé utilisé dans la production des carreaux de béton, mesurée à l'aide de la granulométrie laser, est présentée dans les graphiques de l'annexe D. Les dimensions caractéristiques des particules sont indiquées dans le tableau 2.

Tableau 2. Distribution caractéristique des particules

Propriété des particules	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3	Calcaire broyé	CEM I 52.5 N
d10 (μm)	0,51	0,46	0,24	0,84	0,79
d50 (μm)	8,4	8,2	5,8	9,8	7,6
d90 (μm)	47	55	25	48	34

Le tableau 2 montre que l'échantillon UIDND-3 est un peu plus fin que les deux autres échantillons testés de filler d'UIDND, qui sont pratiquement identiques. La distribution des particules des quatre fillers et du ciment est comparable. La distribution des particules des trois fillers d'UIDND satisfait aux exigences fixées par BRL 1804.

3.1.3 Composition élémentaire

Les résultats de la composition élémentaire obtenus par fluorescence X (XRF) sont présentés dans le tableau 3. La variation entre les trois échantillons de filler d'UIDND est très faible.

Les principaux composants (exprimés en oxydes) sont le silicium, le calcium, le fer et l'aluminium (environ 85 % du total). La teneur en sulfate est conforme à l'analyse chimique du site.

3.1.4 Composition minéralogique

La composition minéralogique des trois échantillons testés de filler d'UIDND est présentée dans le tableau 4. Les diagrammes de diffraction des rayons X sont présentés dans l'annexe E.

Les échantillons ont tous la même composition minéralogique, avec seulement de légères variations dans les niveaux de contenu.

Ils contiennent tous une quantité relativement importante de matériau amorphe (environ 66 %).

Les principaux minéraux rencontrés sont le quartz (environ 14 %), les minéraux de type méllilite (environ 6 %) et la calcite (environ 4 %).

Tableau 3. Composition élémentaire (% (m/m) sous forme d'oxydes)

Élément (sous forme d'oxyde)	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
Silicium sous forme de SiO ₂	50,07	47,61	50,46
Calcium sous forme de CaO	18,18	17,03	16,41
Fer sous forme de Fe ₂ O ₃	7,90	11,04	10,59
Aluminium sous forme de Al ₂ O ₃	7,43	8,23	7,98
Sodium sous forme de Na ₂ O	4,13	4,13	3,94
Soufre sous forme de SO ₃	2,69	1,60	1,64
Magnésium sous forme de MgO	2,39	2,42	2,02
Phosphore en tant que P ₂ O ₅	1,10	1,23	0,94
Le titane sous forme de TiO ₂	1,15	1,32	0,98
Potassium sous forme de K ₂ O	1,01	0,97	1,02
Zinc sous forme de ZnO	0,54	0,60	0,50
Cuivre sous forme de CuO	0,31	0,38	0,27
Manganèse sous forme de Mn ₃ O ₄	0,16	0,21	0,18
Plomb sous forme de PbO	0,11	0,11	0,11
Chrome sous forme de Cr ₂ O ₃	0,10	0,11	0,09
Zirconium sous forme de ZrO ₂	0,14	0,06	0,07
Baryum sous forme de BaO	0,21	0,27	0,20
Strontium sous forme de SrO	0,07	0,05	0,05
Nickel sous forme de NiO	0,02	0,03	0,03
Vanadium sous forme de V ₂ O ₅	0,01	0,01	0,01

Tableau 4. Composition minéralogique (202621-1 = UIDND-1 ; 202621-2 = UIDND-2 ; 202621-3 = UIDND-3)

Minéral	Formule théorique ²	202621-1	202621-2	202621-3
Silicates				
Quartz	SiO ₂	14,8	11,3	15,6
Cristobalite	SiO ₂	0,2	0,2	0,1
Feldspath alcalin	(Na,K)AlSi ₃ O ₈	0,6	0,5	0,9
Plagioclase/albite	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	1,0	1,1	1,1
Minéraux de type méliélite	(Ca,Na)(Al,Mg,Fe)(Si,Al) ₂ O ₇	5,0	6,5	5,9
Petedunnite	Ca(Zn,Mn,Fe,Mg)Si ₂ O ₆	1,2	1,7	2,0
C ₂ S*, larnite	Ca ₂ SiO ₄	1,2	0,1	0,5
Muscovite/mica	(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ .(H ₂ O)]	1,2	0,9	1,1
Carbonates				
Calcite	CaCO ₃	4,5	4,8	3,1
Sulfates				
Bassanite	CaSO ₄ • 1/2H ₂ O	0,6	0,7	1,1
Anhydrite	CaSO ₄	0,3	0,1	0,1
Oxydes/hydroxydes				
Magnétite	Fe ₃ O ₄	1,6	2,4	2,2
Hématite	Fe ₂ O ₃	0,8	1,0	0,7
Périclase	MgO	0,2	0,1	0,1
Wustite	FeO	0,5	0,9	1,0
Rutile	TiO ₂	0,3	2,1	0,1
Phosphates				
Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,OH,Cl)	0,8	0,9	0,5
Autres/amorphe		66,3	66,6	65,8

3.1.5. Microstructure et composition

Un microscope électronique à balayage (MEB) a été utilisé pour examiner la morphologie et la composition typique des particules UIDND. Les résultats obtenus sont décrits en détail à l'annexe F. Les résultats indiquent que les trois échantillons testés de fillers d'UIDND présentent de nombreuses similitudes tant au niveau de leur morphologie que dans leur composition typique. La figure 1 donne un aperçu des formes et des tailles typiques des particules.

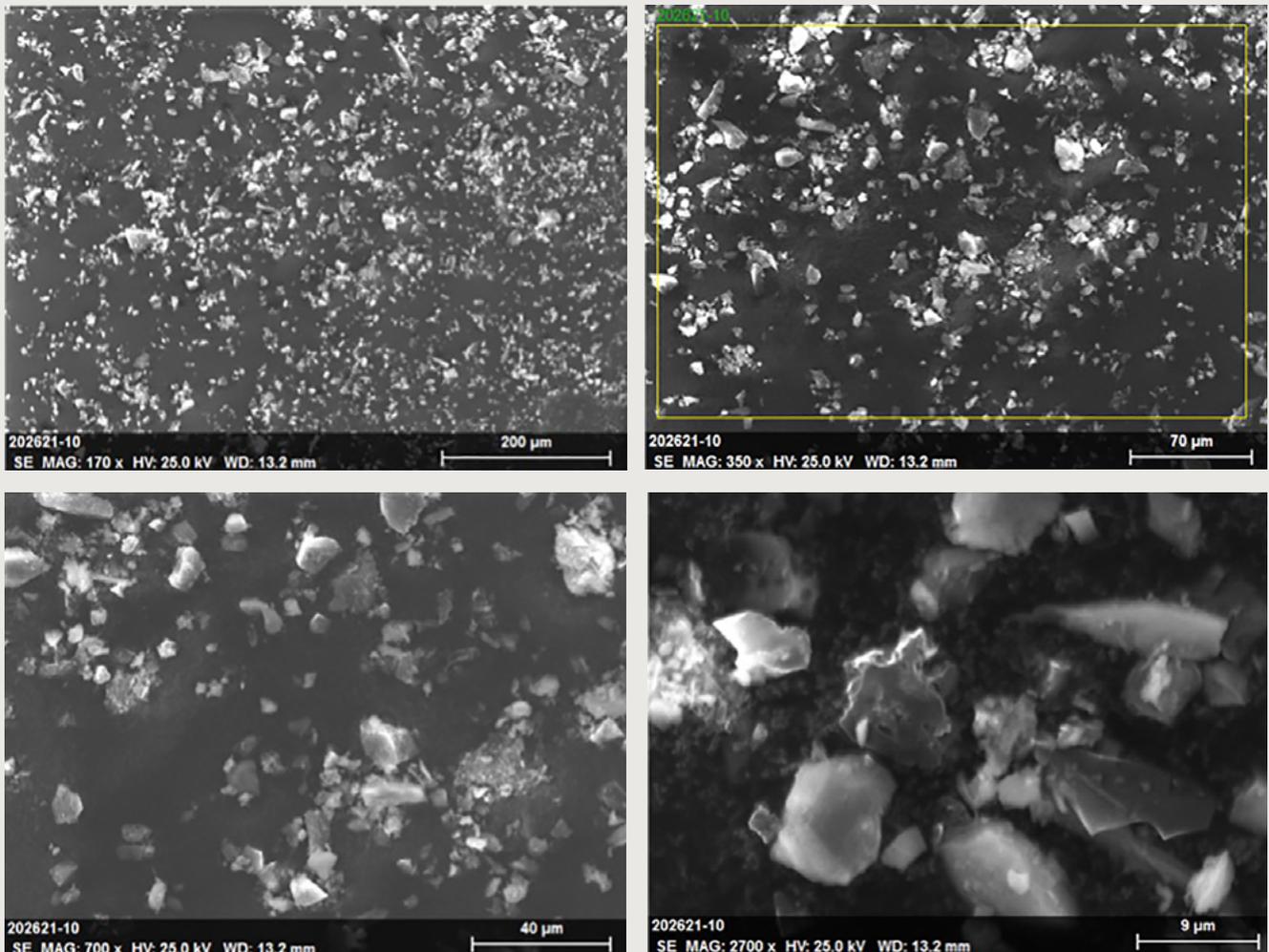


Figure 1. Formes et tailles typiques des particules pour les trois fillers d'UIDND

3.1.6 Conclusions de la caractérisation

Malgré les différentes origines des mâchefers d'UIDND utilisés comme matière première pour le processus de broyage, les fillers d'UIDND produits à partir de ces matériaux ne présentent que de légères variations pour les propriétés testées, à l'exception de la teneur en COT, qui a été délibérément modifiée.

Le filler d'UIDND est composé d'environ deux tiers de matériau amorphe. Les composants minéraux sont principalement le quartz, un silicate de type méliélite et la calcite.

Les analyses chimiques et minéralogiques n'ont pas mis en évidence de composants (en quantités significatives) qui pourraient empêcher l'utilisation de ces fillers d'UIDND dans le béton.

3.2 Essais sur la pâte et le mortier

3.2.1 Essais sur la pâte

Les résultats des essais sur la pâte, dans lesquels 25 % m/m du ciment a été remplacé par le filler, sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 5. Résultats des essais sur la pâte

Propriété	REF	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
Besoin en eau (% (m/m))	27,2	26,0	31,6	29,0	30,4
Début de la prise (min.)	110	120	230	175	125
<i>Variation par rapport à REF</i>		+10	+120	+65	+15
Fin de la prise (min.)	150	190	310	265	200
<i>Variation par rapport à REF</i>		+40	+160	+115	+50
Solidité (mm)	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5
Autoclave :					
Teneur en eau (% (m/m))	24,9	23,5	28,8	26,9	27,5
Expansion mesurée (%)	0,031	0,015	0,055	0,044	0,051

Ce tableau montre que les fillers d'UIDND nécessitent plus d'eau et ralentissent la vitesse de prise des pâtes. Une teneur en eau plus élevée et le remplacement partiel du ciment entraînent généralement une prise plus lente (en raison de la distance accrue entre les particules de ciment). Cependant, l'effet de ralentissement du filler d'UIDND semble également être lié à sa teneur en COT. L'effet de ralentissement est réduit dans la séquence suivante : UIDND-1 (5,8 %) → UIDND-2 (2,0 %) → UIDND-3 (0,69 %). Le filler d'UIDND a un temps de prise comparable à celui de la pâte avec du calcaire broyé (CB). Les trois fillers d'UIDND satisfont à l'exigence fixée dans BRL 1804 (délai maximal de 120 minutes avant le début de la prise) ; le délai pour UIDND-1 est exactement de 120 minutes.

La solidité (Le Chatelier) des cinq pâtes est excellente, et l'expansion est très faible, voire nulle. L'expansion en autoclave est plus élevée pour les pâtes avec filler d'UIDND que pour les deux pâtes de référence, mais elle reste confortablement dans les valeurs exigées par les normes ASTM C1157-20 (< 0,80 %) et BRL 1804 (< 0,40 %).

3.2.2 Essais sur le mortier : Force

Le ciment et le calcaire broyé (CB) utilisés pour les essais sur le mortier étaient les mêmes que ceux utilisés pour la production des carreaux de béton. La composition du mortier est conforme à NEN-EN 196-1, avec 25 % m/m du ciment remplacé par les fillers correspondants. Les résultats de l'essai sur le mortier sont résumés dans le tableau 6.

Ce tableau montre que les mortiers plastiques avec des fillers d'UIDND ont une teneur en air très élevée, ce qui entraîne une faible densité. Les différences de teneur en air sont de loin la cause la plus significative des grandes différences de densités des mortiers durcis. La différence de densité entre les fillers de calcaire broyé et ceux d'UIDND (respectivement 2,7 et 2,5 kg/dm³) entraîne une différence de 10 kg/m³ maximum dans la densité des mortiers durcis. Cette différence dans la teneur en air signifie que les résistances à la pression des mortiers avec des fillers d'UIDND sont relativement faibles (60-80 % du mortier de référence). Cependant, si l'on corrige les valeurs pour la différence de teneur en air (dernière ligne du tableau 6), la résistance à la pression à 28 jours des trois mortiers avec filler d'UIDND est d'environ 90 % du mortier de référence, tandis que la valeur pour le mortier avec calcaire broyé est seulement de 70 % de la valeur de référence. Cela indique que les fillers d'UIDND apportent une contribution supplémentaire à la résistance finale du mortier.

Lorsque les fillers d'UIDND sont utilisés dans les mortiers de béton à consistance de terre humide, il ne semble pas y avoir d'augmentation de la teneur en air (voir section 3.3). La cause de l'augmentation de la teneur en air dans les mortiers plastiques avec des fillers d'UIDND a été étudiée plus en détail dans un « essai de moussage » (voir annexe G). En mélangeant (en remuant vigoureusement avec une tige de verre) le filler d'UIDND avec de l'eau, l'on crée une couche de bulles d'air sur l'eau. Cela indique qu'il y a des composants tensioactifs dans le filler d'UIDND. Ces bulles d'air n'ont pas pu être créées par la formation d'hydrogène à partir d'aluminium métallique, car aucun aluminium métallique n'a été détecté lors de la caractérisation des fillers d'UIDND et cet essai de moussage n'a pas été réalisé dans un environnement alcalin (eau déminéralisée : pH neutre).

Tableau 6. Résultats des essais de mortier

Propriété	Référence	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
Mortier :					
Densité (kg/m ³)	2.219	2.229	2.058	2.041	2.149
Teneur en air (%V/V)	4,0	2,9	10,0	11,5	6,8
Résistance à la pression (MPa) :					
7 jours	49,8 (100%)	35,9 (72%)	30,5 (61%)	28,7 (58%)	38,4 (77%)
28 jours	66,2 (100%)	47,7 (72%)	40,7 (61%)	38,8 (59%)	49,2 (74%)
90 jours	71,4 (100%)	54,3 (76%)	48,4 (68%)	45,4 (64%)	57,7 (81%)
Résistance à la flexion (MPa) :					
7 jours	7,7 (100%)	6,2 (81%)	5,2 (68%)	4,9 (64%)	5,8 (75%)
28 jours	8,6 (100%)	7,8 (91%)	6,1 (71%)	6,0 (70%)	6,6 (77%)
Densité (kg/m ³) :					
7 jours	2.264	2.261	2.073	2.075	2.171
28 jours	2.294	2.280	2.089	2.103	2.189
Résistance à la pression 28d (MPa) Avec correction à 4 % d'air (1 % d'air = 5 % de résistance)	66,2 (100%)	45,1 (68%)	58,1 (88%)	62,1 (94%)	57,2 (86%)

3.2.3 Essais sur le mortier : Expansion dans l'eau à 40 °C

Pour cet essai d'expansion, trois prismes (40 x 40 x 160 mm) ont été fabriqués pour chaque mélange conformément à NEN-EN 196-1, à une température de 20 °C. Dans les mélanges avec filler, 25 % (m/m) du ciment a été remplacé par le filler correspondant. Après la production, les prismes ont été recouverts d'une feuille de verre pendant 23,5 heures. Ils ont ensuite été retirés du moule pour la préparation des points de mesure. Tout au long du processus, on a empêché les prismes de se dessécher. La première mesure de longueur (mesure 0) a été prise 24 heures après la production à 20 °C et a été mathématiquement corrigée à 40 °C avec un coefficient d'expansion de 13,10·10⁻⁶ °C⁻¹. Les prismes ont ensuite été stockés sous l'eau à une température de 40 °C pour les mesures de longueur restantes. En plus de la longueur, le poids de chaque prisme a également été vérifié. Les dilatations moyennes et les augmentations de poids pour les mélanges testés sont présentées dans la figure 2. Après six semaines, l'expansion continue à augmenter très légèrement ou n'augmente plus du tout. L'expansion dans les mélanges avec filler d'UIDND est au même niveau que dans le mélange de référence sans filler, nous pouvons donc conclure qu'il n'y a plus de mécanismes d'expansion actifs à ce stade.

La quantité d'expansion et l'augmentation de poids causée par l'absorption d'eau dans les mortiers avec des fillers d'UIDND sont comparables aux valeurs du mortier de référence sans filler (REF). Le niveau d'expansion mesuré de 0,2 à 0,3‰ est nettement inférieur à l'exigence fixée pour les prismes de mortier dans l'essai UAMBT (< 1,0 ‰).

Comme l'essai Le Chatelier et l'essai en autoclave n'ont pas non plus indiqué de niveaux d'expansion pertinents, nous pouvons conclure que les fillers d'UIDND testés ne provoquent pas de mécanismes d'expansion destructeurs.

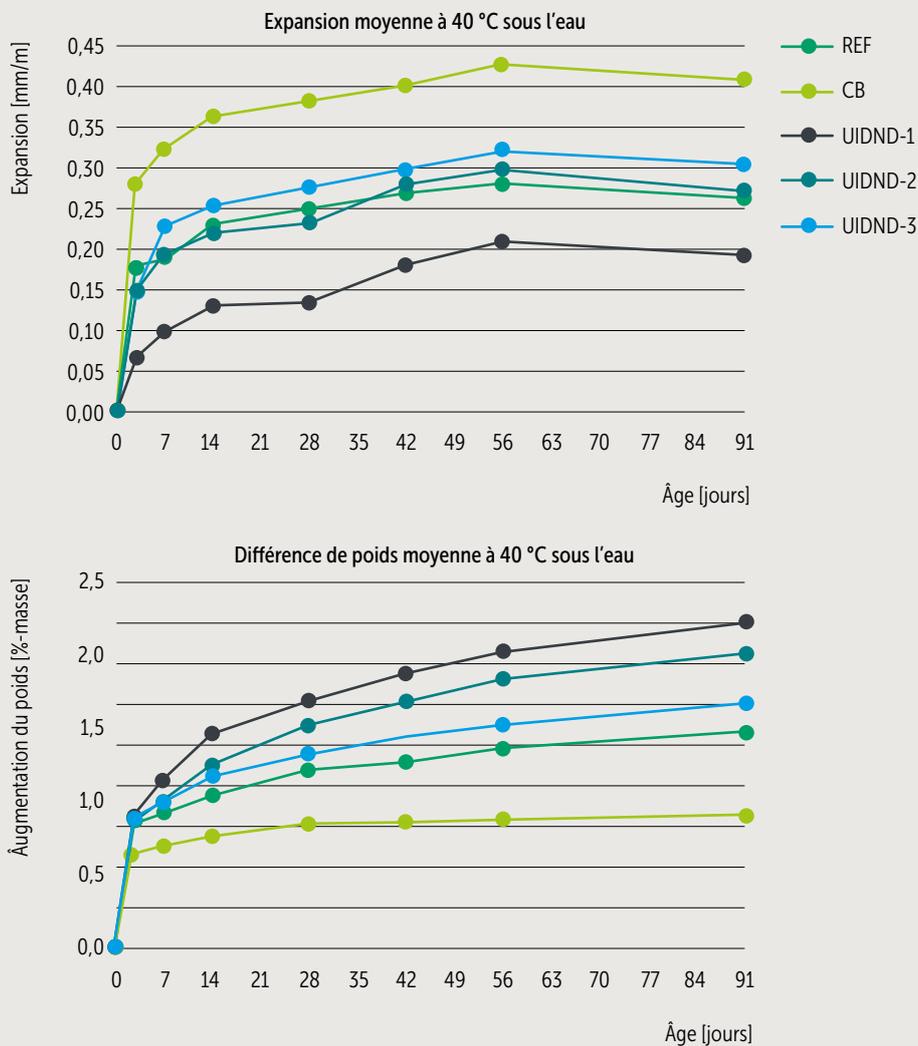


Figure 2. Expansion (haut) et augmentation du poids (bas)

Il est intéressant de noter que le mortier avec du calcaire broyé (CB) a un niveau d'expansion significativement plus élevé et une moindre augmentation de poids. Cela indique que le calcaire broyé utilisé a une composante expansive. L'expansion mesurée est conforme aux exigences susmentionnées et n'a pas entraîné de fissures.

3.2.4 Essais sur le mortier : Effet du filler d'UIDND sur la RAS

L'effet du filler d'UIDND sur la réaction alcali-silice (RAS) a été étudié grâce à l'essai « Ultra-Accelerated Mortar Bar » (UAMBT) en combinaison avec des agrégats non-réactifs et réactifs. Les mesures ont été effectuées sur des échantillons minces (25 x 25 x 285 mm) afin d'obtenir un niveau d'expansion plus élevé, dans le but de mettre l'effet en évidence plus clairement. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7. Effet du filler d'UIDND sur la RAS

Agent de liaison	Agrégat	Expansion (%)
100 % CEM I 52.5 R	non réactif	2,2
100 % CEM I 52.5 R	réactif	4,2
75 % CEM I 52.5 R + 25 % UIDND-3	non réactif	0,4
75 % CEM I 52.5 R + 25 % UIDND-3	réactif	4,5
75 % CEM I 52.5 R + 25 % UIDND-1	réactif	3,7
75 % CEM I 52.5 R + 25 % UIDND-2	réactif	3,7

On a constaté que le granulats réactif utilisé, le verre borosilicate, augmentait l'expansion d'un facteur d'environ 2. Cependant, en combinaison avec le granulats non réactif, le filler d'UIDND a entraîné des niveaux d'expansion significativement plus faibles. Il n'y a aucune explication évidente à ce résultat.

En combinaison avec le granulats réactif, les fillers d'UIDND n'ont pas eu d'impact significatif sur l'expansion de la RAS (environ les mêmes niveaux d'expansion que le mélange de référence). Par conséquent, sur la base de ces essais, il n'apparaît pas que le filler d'UIDND ait un effet inhibiteur sur la RAS.]

3.3 Étude du béton : 1^{re} vie

3.3.1. Composition des carreaux de béton

Les compositions des carreaux de béton produits dans une usine de béton à Drachten sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8. Compositions (kg/m³)¹⁾ des carreaux de béton produits

Composant	REF	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
CEM I 52,5 N	289	219	218	219	219
Filler	0	79	73	73	73
Eau (efficace)	80	89	106	106	105
Eau d'absorption (dans l'agrégat)	11	11	11	11	11
Sable 0-2	791	791	801	794	790
Granit 0-2	1154	1154	1152	1177	1157
Rapport eau/ciment (efficace)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

1) À l'exclusion d'environ 5 % V/V air

3.3.2 Propriétés mécaniques

Le poids volumétrique, la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et la résistance à la flexion ont été déterminés pour chacune des cinq séries de carreaux de béton à un âge de 28 jours. La résistance à la pression a également été mesurée à un âge de 90 jours sur des échantillons coupés dans les dalles de béton.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 9. Ce tableau indique également le rapport eau/ciment efficace ; bien que les fillers soient des fillers de type I, ils ont été considérés comme faisant partie de l'« agent liant » à cette fin.

Tableau 9. Propriétés mécaniques des carreaux de béton

Propriété	REF	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
Rapport eau/ciment (efficace)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36
Poids volumétrique (kg/m ³)	2 180	2 210	2 280	2 260	2 270
Vitesse ultrasonique (km/s)	3,98	4,07	4,17	4,10	4,06
Module de relaxation calculé (GPa) ¹⁾	31,0	32,9	35,7	34,2	33,7
Résistance à la flexion (MPa)	5,6	5,6	8,5	7,3	7,6
Poids volumétrique (kg/m ³)	2 260	Non calculé	2 280	2 290	2 290
Résistance à la pression (MPa)	31,7	Non calculé	53,9	51,8	53,6
Rapport résistance à la flexion/pression (%)	18	Non calculé	16	14	14

1) Calculé avec $E_{dyn} = 0,9 \rho v^2$ (en supposant un coefficient de Poisson = 0,2)

Malgré un rapport eau/ciment plus élevé (0,36 contre 0,28 pour REF et 0,30 pour CB), la résistance des carreaux de béton avec des fillers d'UIDND est significativement plus élevée que celle des deux références. Cela peut être en partie attribué à un meilleur compactage, comme le montre le poids volumétrique mesuré des dalles de béton ; les mélanges de béton avec des fillers d'UIDND sont plus facilement compactés. Les valeurs de la résistance à la pression et de la résistance à la flexion des mortiers (plastiques) avec des fillers d'UIDND sont significativement plus faibles que celles du mortier de référence (voir tableau 6), ce qui peut être largement attribué à la teneur en air plus élevée des mortiers avec des fillers d'UIDND. Cependant, dans le béton à consistance de terre humide, l'application à laquelle est destinée la recommandation CROW-CUR, les fillers d'UIDND n'entraînent pas d'augmentation de la teneur en air, bien au contraire (voir les poids volumétriques du tableau 9).

Il est également intéressant de noter que la résistance à la pression du béton de référence (REF) est d'environ 60 % de celle des carreaux de béton avec du filler d'UIDND ; pour la résistance à la flexion, la valeur est d'environ 70 %. Cela ne peut s'expliquer par la dispersion des résultats des mesures individuelles.

Le poids volumétrique des éprouvettes de résistance à la pression dans le béton de référence (REF) est supérieur de 80 kg/m³ à celui des éprouvettes de résistance à la flexion (2 260 contre 2 180 kg/m³). Ceci est le résultat de l'absorption d'eau d'environ 4 % (m/m) (voir section 3.3.4), qui se produit pendant le conditionnement sous eau de 48 heures prescrit pour les échantillons de résistance à la pression dans NEN-EN 12504-1. Pendant ce processus de conditionnement, les échantillons avec filler d'UIDND absorbent seulement 0,7 % (m/m) (voir section 3.3.4), ce qui correspond à une augmentation de poids volumétrique d'environ 16 kg/m³. Cela correspond aux poids volumétriques indiqués dans le tableau 9 pour les carreaux de béton avec filler d'UIDND.

3.3.3 Vorstdooizoutbestandheid

La résistance au sel de voirie a été déterminée à un âge de l'échantillon de 28 jours.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 10. Ce tableau indique également le facteur de liaison à l'eau du mélange de béton et la teneur en COT des fillers d'UIDND.

Tableau 10. Résistance au sel de voirie

Propriété	REF	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3	Exigence de la norme NEN-EN 1339
Écaillage après 14 cycles (kg/m ²) :						
Échantillon 1	0,002	0,013	0,009	1,30	1,21	≤1,5
Échantillon 2	0,017	0,010	0,042	0,79	1,40	≤1,5
Échantillon 3	0,007	0,009	0,053	0,10	1,31	≤1,5
Moyenne	0,01	0,01	0,03	0,73	1,3	≤1,0
rapport eau/ciment (efficace)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36	-
COT du filler (%m/m)	-	-	5,8	2,0	0,69	-

Le rapport eau/ciment sensiblement plus élevé des mélanges de béton avec les trois fillers d'UIDND a entraîné un niveau d'écaillage plus élevé dans l'essai de résistance au sel de voirie. La très faible quantité d'écaillage observée avec les échantillons REF et CB peut être attribuée à leur faible rapport eau/ciment efficace.

Malgré le fait qu'ils aient tous le même rapport eau/ciment, les trois mélanges de béton avec filler d'UIDND se comportent très différemment lorsqu'ils sont exposés au sel de voirie. Le mélange de béton avec filler d'UIDND-1 s'écaille au même niveau que les mélanges REF et CB ; les deux autres mélanges avec filler d'UIDND s'écaillent significativement plus. Nous savons que la teneur en COT du calcaire broyé affecte la résistance au sel de voirie du béton dans lequel il est utilisé ; c'est pourquoi une limite maximale a été imposée pour la quantité de calcaire broyé autorisée dans le béton. Pour le filler d'UIDND, la teneur en COT ne semble pas avoir le même impact. En fait, plus la teneur en COT est élevée, plus le degré d'écaillage est faible.

3.3.4 Absorption de l'eau et séchage

Afin de mieux comprendre les résultats obtenus lors des essais de résistance aux sels de voirie, des essais d'absorption d'eau par capillarité et de séchage ont également été réalisés en complément du programme d'étude initial. Les carreaux de béton qui avaient été stockés sur des palettes ont été placés sur des bancs de travail de laboratoire et séchés pendant un mois à une température de 20 °C et à environ 50 % HR. À la fin de cette période, les échantillons d'essai avaient environ quatre mois. L'absorption d'eau par capillarité a ensuite été mesurée sur le dessus des dalles de béton (= surface de coffrage) pendant une période de 72 heures. Après l'essai d'absorption, la perte de poids résultant du séchage à 20 °C et environ 50 % HR a été mesurée pendant 144 heures. Les résultats sont présentés dans la figure 3.

Le degré d'absorption d'eau et de séchage des carreaux de béton avec fillers d'UIDND était significativement plus faible que celui des deux carreaux de béton de référence (REF et CB). La structure des pores des carreaux de béton avec fillers d'UIDND est plus fine (soit en dépit, soit précisément en raison du rapport eau/ciment plus élevé), ce qui donne un béton moins poreux.

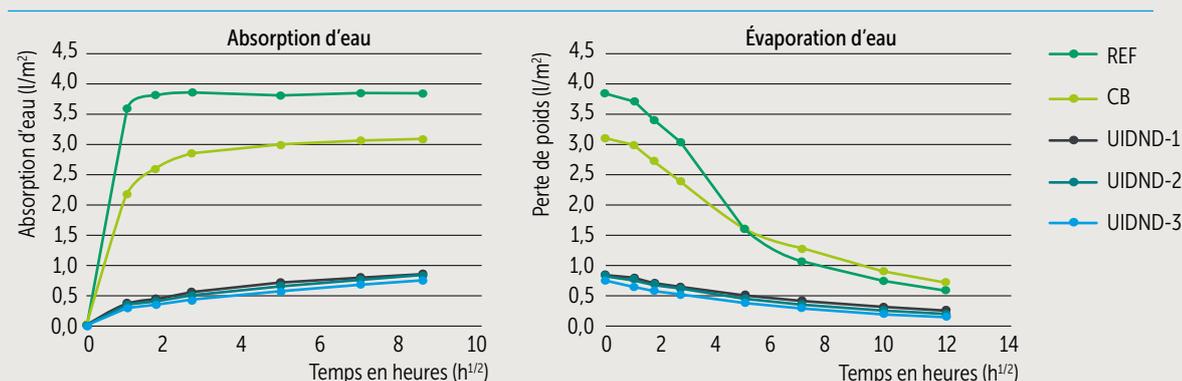


Figure 3. Absorption d'eau (gauche) et séchage (droite)

3.3.5 Conclusions de l'étude du béton : 1^{er} vie

Les fillers d'UIDND peuvent être utilisés comme un substitut partiel du ciment pour fabriquer des produits en béton à consistance de terre humide avec un niveau de résistance à la flexion et à la pression supérieur à celui obtenu par le béton de référence. La résistance au sel de voirie des bétons fabriqués avec des fillers d'UIDND est très variable, allant d'un niveau très élevé au niveau minimum requis par la norme de produit correspondante (NEN-EN 1339). Cette variation ne peut pas être expliquée par l'absorption d'eau et/ou le facteur de liaison à l'eau effectif du béton en question. La teneur plus élevée en COT des fillers d'UIDND n'a pas d'effet négatif sur la résistance au sel de voirie du béton fabriqué avec ces fillers d'UIDND.

3.4 Circularité

Sur la base des résultats obtenus dans l'étude décrite ci-dessus, le groupe de travail CROW a choisi de tester le filler d'UIDND-3, et les carreaux de béton fabriqués avec ce filler, dans cet essai de circularité.

3.4.1 Technologique : Granulat de béton

Les carreaux de béton sans filler (REF), avec de la pierre calcaire broyée (CB) et avec le filler d'UIDND sélectionné (UIDND-3) ont été brisés dans un concasseur à mâchoires après deux mois d'hydratation rapide à 40 °C. Le béton a ensuite été tamisé à sec en particules de 4 à 22 mm.

Caractérisation des granulats de béton 4-22 mm

Les résultats de la caractérisation des trois granulats de béton obtenus par cette méthode sont fournis dans le tableau 11.

Tableau 11. Propriétés des granulats de béton

Propriété	REF	CB	UIDND-3
Distribution des particules (% m/m) (tamisage humide)			
22,4 mm	100	100	100
20 mm	98	97	97
16 mm	81	74	77
14 mm	73	69	65
12,5 mm	67	63	57
11,2 mm	61	55	50
10 mm	53	47	44
8 mm	41	34	34
6,3 mm	29	23	23
5,6 mm	25	17	17
5 mm	21	14	13
4 mm	18	11	4
2 mm	8	3	3
1 mm	7	3	2
0,5 mm	6	2	2
0,25 mm	3	1	1
0,125 mm	1	0	1
0,063 mm	0,7	0,3	0,3
Densité des particules (ρ_{rd} ; kg/dm ³)	2,23	2,23	2,23
Absorption d'eau 24h (%m/m)	6,4	6,4	6,0

Le processus de tamisage humide a montré que les échantillons REF et CB contenaient encore une quantité importante de particules de 2 à 4 mm. Les échantillons utilisés pour déterminer la densité des particules et l'absorption d'eau ont été tamisés par voie humide pour éliminer les particules mesurant < 4 mm.

La densité des particules des trois granulats de béton était la même. L'absorption d'eau de l'échantillon de granulats de béton UIDND-3 était légèrement inférieure à celle des échantillons REF et CB.

Étude : Béton de 2^e vie

En utilisant les trois échantillons de granulats de béton susmentionnés comme agrégat, nous avons produit des mélanges de béton avec les compositions indiquées dans le tableau 12. Nous avons déterminé diverses propriétés de ces mélanges comme indiqué dans le tableau.

Tableau 12. Composition et propriétés du béton de 2^e vie

Propriété	Betongranulaat REF	Betongranulaat GL	Betongranulaat UIDND-3
Composition du béton (kg/m³) :			
CEM I 42,5 N	320	320	320
Eau, effectif	160	160	160
Eau d'absorption	70	70	66
Granulats de ciment 4–22 mm	1 049	1 049	1 049
Sable de rivière 0-4 mm	666	666	666
Propriétés du mortier			
Affaissement (mm)	110	120	130
Débit (mm)	400	390	420
Température (°C)	19,3	19,0	18,8
Teneur en air (%V/V)	1,8	1,8	1,9
Poids volumétrique (kg/m ³)	2 235	2 255	2 245
Propriétés du béton durci			
Résistance à la pression cubique (MPa) après :			
7 jours	36,5	34,1	36,0
28 jours	42,4	42,8	44,0
*Poids volumétrique (kg/m ³) après :			
7 jours	2 290	2 290	2 280
28 jours	2 290	2 280	2 290
Pénétration d'eau maximale (mm)	24	25	13
Coefficient de migration des chlorures ($\cdot 10^{-12}$ m ² /s)	22,0	21,6	15,7

Les résultats obtenus indiquent que les bétons fabriqués avec les trois granulats de béton sont comparables en termes de résistance à la pression. Cette valeur est également comparable à celle du béton de référence (avec le même rapport eau/ciment efficace et le même ciment) testé après 28 jours de durcissement dans le cadre du projet CROW « Nouvelles méthodes de recyclage pour les agrégats » (46,5 MPa).

La densité (résistance à la pénétration de l'eau et des ions chlorure) du béton avec les granulats de béton UIDND-3 est meilleure que celle obtenue avec les granulats REF et CB. Ces résultats correspondent également à ceux obtenus dans le cadre du projet CROW susmentionné.

Malgré la portée limitée de cette étude, nous pouvons conclure de manière justifiée que la qualité technologique des granulats de béton fabriqués avec des fillers d'UIDND est comparable à celle des granulats de béton standard et donc que l'utilisation de ce filler ne limite pas l'application de 2^e vie de ce béton.

3.4.2 Technologique : Filler

Nous avons produit des pâtes de ciment avec 100 % de CEM I 52.5N (REF), 75 % de CEM I 52.5N + 25 % de calcaire broyé (CB), et 75 % de CEM I 52.5N + 25 % de filler UIDND-3. Le rapport eau/

ciment des trois pâtes produites était de 0,35. Ces trois pâtes de ciment ont été hydratées rapidement pendant deux mois sous l'effet de l'eau à une température de 40 °C. Les échantillons durcis ont été brisés dans un concasseur à mâchoires de laboratoire, séchés à 110 °C, puis broyés pendant 20 minutes dans un broyeur à boulets. La distribution des particules de ces trois fillers de 2^e vie est présentée dans le tableau 13. Le tableau montre également l'effet de ces fillers sur le temps de prise, la solidité et la résistance du ciment à 25 % (m/m) de remplacement du ciment (CEM I 52.5N).

Tableau 13. Propriétés des fillers de 2^e vie

Propriété	Ciment	REF	CB	UIDND-3	Exigence BRL 1804
Distribution des particules, résidus tamisés (% m/m) :					
0,5 mm	-	0	1	0	-
0,25 mm	-	1	2	1	-
0,125 mm	-	4	6	3	0-15
0,063 mm	-	23	27	22	0-30
Fraction <63 µm	-	77	73	78	-
	100% ciment à 25 % (m/m) de remplacement du ciment				
Besoin en eau (% m/m)	24,2	28,6	29,0	29,0	-
Début de la prise (min)	140	190	195	220	-
Différence de valeur par rapport au ciment	-	+50	+55	+80	<120
Fin de la prise (min)	170	240	235	260	-
Différence de valeur par rapport au ciment	-	+70	+65	+90	<120
Solidité (mm)	0,0	0,5	0,5	0,0	<10
Résistance à la pression (MPa) après :					
7 jours	39,8	35,0	32,3	31,9	-
28 jours	47,7 (100%)	41,7 (87%)	38,5 (81%)	40,6 (85%)	>65%
Résistance à la flexion (MPa) après :					
7 jours	6,8	6,3	5,8	5,5	-
28 jours	7,5 (100%)	6,8 (91%)	6,7 (89%)	6,5 (87%)	-
*Poids volumétrique (kg/m ³) après :					
7 jours	2 260	2 200	2 200	2 210	-
28 jours	2 238	2 201	2 181	2 200	-

Le tableau 13 montre que les trois produits de remplissage « 2^e vie » testés ont ralenti le processus de prise. Ceci est inhérent au remplacement de 25 % m/m du ciment et au rapport eau/ciment plus élevé qui en découle. Le filler UIDND-3 « 2^e vie » a un temps de prise un peu plus long que les deux fillers de référence, mais la valeur reste dans la fourchette requise.

La solidité (essai Le Chatelier) a été excellente pour les trois fillers « 2^e vie » testés. Il en va de même pour leur impact sur la résistance à la pression, qui se situe également dans la fourchette requise.

Sur la base de ces résultats, nous pouvons en conclure qu'il n'y a pas de limitations à la réutilisation de la fraction de poudre générée lors du recyclage du béton de « 1^e vie » fabriqué avec des fillers d'UIDND.

3.4.3 Environnement

Après 28 jours de durcissement à 20 °C (emballés dans un film plastique = teneur en humidité propre ; aucun contact avec l'eau), un certain nombre de carreaux de béton sans filler (REF) et avec filler d'UIDND-3 ont été brisés en granulats de taille < 4 mm. Ces deux échantillons fragmentés ont été testés pour la lixiviation à l'aide d'un essai sur colonne.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 14, qui indique également les exigences du décret néerlandais sur la qualité des sols (BBK) pour les matériaux de construction non moulés.

Tableau 14. Lixiviation (essai en colonne) de carreaux de béton cassés, REF et UIDND-3

Composant	Lixiviation cumulée L/S 10 (mg/kg)		
	Granulats de béton REF	Granulats de béton UIDND-3	Valeur maximale dans BBK
pH	12,5-12,8	12,5-12,8	-
Antimoine	<0,0040	0,0060	0,32
Arsenic	<0,050	<0,050	0,9
Baryum	6,4	11	22
Cadmium	<0,00100	<0,00100	0,04
Chrome	0,16	0,27	0,63
Cobalt	<0,030	<0,030	0,54
Cuivre	0,071	0,13	0,9
Mercure	<0,00040	<0,00040	0,02
Plomb	<0,100	<0,100	2,3
Molybdène	0,037	0,071	1
Nickel	<0,050	<0,050	0,44
Sélénium	<0,0070	<0,0070	0,15
Étain	<0,020	<0,020	0,4
Vanadium	<0,20	<0,20	1,8
Zinc	<0,20	<0,20	4,5
Fluorure	2,6	2,3	55
Chlorure	61	110	616
Sulfate	60	52	2 430
Bromure	<0,80	<0,80	20

Ce tableau montre que les granulats de béton avec UIDND-3 lixivie les composants baryum, chrome, cuivre, molybdène et chlorure à un degré plus élevé que le granulats de béton sans filler (REF). Dans tous les cas, la quantité de lixiviation reste bien en deçà des exigences de BBK.

Nous pouvons en conclure que la qualité environnementale des granulats de béton avec fillers d'UIDND est comparable à celle des granulats de béton standard. Les niveaux légèrement élevés de lixiviation de certains composants sont encore bien conformes aux exigences du BBK.

4

Conclusions : Adéquation des fillers d'UIDND

Sur la base des études réalisées, nous pouvons conclure que le filler d'UIDND produit par Blue Phoenix Group est adapté à une utilisation dans des produits en béton non armé, non destinés à la construction, fabriqués avec un mortier de béton sec ou à consistance de terre humide. L'étude a également montré que, lorsque le filler d'UIDND est utilisé dans ces produits, les flux de matériaux générés lors du recyclage du béton en question (granulat de béton et fraction de poudre) peuvent être réutilisés comme matière première dans un béton de 2^e vie. Cette application du filler d'UIDND est donc entièrement circulaire en termes d'aspects qui tombent dans le cadre de cette étude.

5

Recommandation CROW-CUR

BRL 1804 comprend des exigences génériques qui s'appliquent à tous les fillers, y compris les fillers d'UIDND. Ces exigences recouvrent les aspects suivants :

- Distribution des particules
- Adsorption du bleu de méthylène
- Teneur en alcalis, exprimée en équivalent Na_2O
- Teneur en chlorure
- Teneur en sulfate – SO_3
- Effet sur le temps de prise
- Détermination de la solidité
- Effet sur la résistance

Sur la base des essais effectués, les aspects suivants des fillers d'UIDND nécessitent un examen spécifique supplémentaire :

- Teneur en alcalis :
cette valeur est généralement déterminée par XRF, qui fournit une teneur totale, y compris des alcalis dans les particules de verre. Les alcalis contenus dans les particules de verre ne sont libérés que si le verre amorphe se dissout dans l'environnement alcalin du béton. Cependant, le verre ne se dissoudra jamais complètement.

Si le résultat de la mesure XRF de la teneur en alcali dépasse la valeur limite fixée à 5,0 % (m/m), cela n'entraîne pas immédiatement de rejet ; la teneur en alcalis des fillers d'UIDND peut être recalculée par digestion alcaline, conformément à la norme NEN-EN 196-2, puis contrôlée par rapport à l'exigence.

■ Teneur en COT :

La teneur en COT du filler d'UIDND ne semble pas avoir d'impact négatif sur la résistance du béton au sel de voirie. Cependant, une teneur en COT plus élevée peut entraîner un temps de prise du ciment plus long. Sur la base des résultats obtenus dans les essais réalisés, la teneur en COT du filler d'UIDND devrait donc être limitée à un maximum de 6 % (m/m).

L'effet sur le temps de prise étant une exigence générique, une garantie supplémentaire est en place pour cet aspect.

■ Métallique Al+Zn :

Dans un environnement alcalin, l'aluminium et le zinc métalliques peuvent provoquer la formation d'hydrogène gazeux. Ces métaux peuvent être présents en petites quantités dans les mâchefers d'UIDND, la matière première pour la production de filler d'UIDND. En raison du processus de production (broyage humide et environnement alcalin) et de la finesse du filler d'UIDND, la teneur en Al + Zn métallique sera très faible.

Pour cette raison, une exigence stricte d'un maximum de 0,2 % (m/m) a été prescrite pour le filler d'UIDND.

Cette exigence est cinq fois inférieure à celle des granulats d'UIDND, qui sont dosés à un niveau quatre fois supérieur à celui des fillers d'UIDND dans le béton. Cette exigence est donc 20 fois plus stricte que celle applicable aux granulats d'UIDND, qui sont largement utilisés dans les dalles et les carreaux de béton depuis de nombreuses années sans aucun problème.

Bien qu'il n'y ait pas d'exigences relatives à la teneur en chlorure des fillers dans la norme BRL 1804, étant donné que les exigences s'appliquent au mortier de béton conformément à la norme NEN 8005, il a été décidé d'inclure une exigence dans la recommandation CROW-CUR comme garantie supplémentaire pour les fillers d'UIDND. Une teneur en chlorure $\leq 1,0$ % (m/m) à une dose de filler d'UIDND d'un maximum de 80 kg/m³ de béton (équivalent à environ 25 % (m/m) de ciment), la teneur en chlorure des granulats de béton résultant sera $\leq 0,05$ % (m/m). Cette valeur correspond aux « Directives pour des spécifications pour recycler les granulats de béton » publiées par Betonhuis/BRBS.

Remarque : à des doses plus élevées de filler d'UIDND dans le béton, l'exigence de teneur en chlorure est réduite en conséquence. À la dose maximale autorisée de 140 kg/m³, l'exigence de la teneur en chlorure est : $< 0,6$ % (m/m).

Il serait peut-être bon d'envisager de placer une note dans la recommandation CROW-CUR indiquant que l'utilisation du filler d'UIDND dans les produits en béton non armé fabriqués à partir de béton à consistance de terre humide peut entraîner une sensibilité accrue à l'écaillage en cas d'exposition au sel de voirie. Cependant, comme ces types de produits en béton sont presque toujours utilisés avec une couche supérieure qui ne contient pas de filler d'UIDND, ceci n'est pas pertinent.

Cette postface explore un certain nombre d'aspects qui ne sont pas directement liés aux essais réalisés et à l'objectif de ce rapport, mais qui sont importants pour développer une bonne compréhension de l'utilisation du filler d'UIDND dans le béton.

La différence entre les granulats d'UIDND et les fillers d'UIDND n'est pas toujours claire. Ces matériaux ont des fonctions différentes dans le béton (ils sont utilisés respectivement comme granulats et comme filler) et ils ont des effets très différents sur les propriétés du béton dans lequel ils sont utilisés.

En raison de la consommation de Ca(OH)_2 , la Recommandation CROW-CUR 128: 2021 limite l'utilisation du filler MSWI à 140 kg/m^3 de béton. À long terme, une consommation excessive de Ca(OH)_2 entraîne une carbonatation, qui affecte le gel CSH et crée un gel de silice poreux. Cela réduit considérablement la capacité du béton à résister aux cycles de gel et de dégel.

Si le filler d'UIDND satisfait à l'exigence relative à la teneur en chlorure décrite au chapitre 5, il n'y a aucun risque de corrosion de l'armature induite par les chlorures lors de l'utilisation de granulats de béton contenant du filler d'UIDND dans un béton de 2^e vie.

Il en va de même pour la résistance au sel de voirie des granulats de béton qui contiennent du filler d'UIDND.

Le degré d'écaillage mesuré dans les dalles de béton avec du filler d'UIDND est comparable, voire inférieur, au niveau observé dans le béton standard, qui est utilisé pour produire les granulats de béton traditionnels.

Les essais réalisés, en conjonction avec les considérations ci-dessus, démontrent que les granulats de béton qui contiennent du filler d'UIDND sont de qualité comparable à celle des granulats de béton traditionnels et peuvent être utilisés comme agrégat dans le béton (2^e vie). Les mêmes réglementations peuvent être appliquées à ces granulats de béton.

Comme le filler d'UIDND contribue de manière significative à la résistance du béton en raison de ses propriétés pouzzolaniques, ce filler consommera une quantité substantielle de Ca(OH)_2 dans le béton. C'est pourquoi il faut tenir compte du filler d'UIDND dans le calcul de la teneur minimale en clinker de ciment Portland dans le liant. Nous recommandons de calculer la capacité de fixation du calcaire du filler d'UIDND.

Annexe A Origine et représentativité des échantillons de matières de départ



**Blue Phoenix
Group**

Groupe de travail CROW :

« Le filler d'UIDND comme filler de type 1 à utiliser dans le béton non armé »

Origine et représentativité des échantillons de matières de départ

Date : 03/03/2021

Introduction

Dans le cadre du programme d'étude de la recommandation CROW-CUR « *Filler d'UIDND dans le béton non armé de terre humide* », Blue Phoenix Group BPG a fourni trois échantillons de filler d'UIDND à SGS Intron. Cette note fournit des informations supplémentaires sur les matières premières utilisées (= mâchefers d'UIDND), le processus de broyage et la représentativité des matières premières et du filler produit.

Origine des matières de départ pour la production d'échantillons de filler d'UIDND

À la demande du groupe de travail, nous avons choisi de fournir des échantillons représentatifs des mâchefers d'UIDND aux Pays-Bas. Le groupe de travail a également demandé des mâchefers d'UIDND avec des niveaux variables de sulfate et de COT, afin d'évaluer les effets du sulfate/COT lorsqu'ils sont utilisés dans le béton. BPG a utilisé des mâchefers provenant de trois des douze UIDND des Pays-Bas : AVR Duiven, AVR Rozenburg et EEW Delfzijl. Le matériau provenant d'AVR Duiven présentait des valeurs élevées pour le sulfate et le COT.

Les 12 UIDND néerlandaises produisent un total d'environ 1 900 000 tonnes de mâchefers d'UIDND. Les trois sites utilisés pour l'échantillonnage produisent environ 600 000 t de mâchefers d'UIDND. Ils sont responsables d'environ 30 % du volume total et les usines sont réparties géographiquement sur l'ensemble des Pays-Bas.

UIDND et mâchefers d'UIDND :

- Description du processus (Conseil d'experts, Matières premières et environnement, 21-02-2018)
 - Les mâchefers d'UIDND sont produits lorsque les déchets domestiques et les déchets commerciaux (y compris la biomasse) sont brûlés dans une unité d'incinération d'ordures ménagères (UIDND) ou dans une centrale d'énergie à biomasse.
La combustion a lieu dans un incinérateur à grille ou un incinérateur à lit fluidisé à une température minimale de 850 °C dans la chambre de combustion. Une fois le processus de combustion terminé, les mâchefers restants sont éteints dans un bassin d'eau, puis acheminés vers un point de stockage intermédiaire avant de subir un traitement ultérieur. Au cours du traitement, les mâchefers bruts sont soumis à un certain nombre d'étapes, notamment le tamisage et l'élimination des métaux ferreux et non ferreux. Les cendres de chaudière d'UIDND peuvent faire partie des mâchefers d'UIDND ; dans la plupart des usines, les deux sont combinés dans l'usine. Les mâchefers d'une centrale d'énergie à biomasse peuvent également faire partie des mâchefers d'UIDND ; ces mâchefers sont ajoutés en doses pendant le traitement.
- Le MIDND est ensuite fragmenté en particules d'un Dmax de 40 mm ; cette fraction est le matériau de départ pour le processus de production du filler d'UIDND.
- Les UIDND sont conformes aux directives de l'IPPC (voir annexe 1)
- Les UIDND respectent une politique stricte par rapport aux matériaux qui entrent dans l'usine, et elles contrôlent régulièrement les déchets livrés à l'usine. Les types de déchets qui peuvent être

livrés à l'usine sont définis par contrat (entre le client et l'UIDND responsable de la combustion); des contrôles aléatoires sont effectués régulièrement, et les chargements de déchets sont déposés sur le sol pour une inspection visuelle.

- Le RIVM prélève chaque année des échantillons pour déterminer la composition moyenne des déchets produits aux Pays-Bas.
- Les mâchefers d'UIDND répondent aux exigences de la norme BRL 2307-1. Les exigences peuvent être satisfaites par des enquêtes par lots ou par un certificat de processus.
- Les cendres volantes d'UIDND sont conservées séparément et ne sont donc pas présentes dans les mâchefers d'UIDND.

Mâchefers de CEB

Mâchefers de centrales d'énergie à biomasse (CEB) : Sur les 12 UIDND des Pays-Bas, seules AVR Rozenburg, HVC Alkmaar et Twence produisent des mâchefers de CEB. Les mâchefers de CEB d'AVR Rozenburg et de HVC Alkmaar sont ajoutés aux mâchefers d'UIDND. HVC n'ajoute que la fraction grossière aux mâchefers d'UIDND. Au total, AVR Rozenburg et HVC Alkmaar ajoutent environ 7 000 t de mâchefers de CEB à environ 600 000 t de MIDND. Aucun mâchefer de CEB n'est ajouté aux autres 1 300 000 t de granulats d'UIDND. Plus d'informations sur les mâchefers de CEB sont fournies à l'annexe 2.

Échantillonnage des échantillons fournis

Les échantillons ont été prélevés par le technicien de laboratoire de Blue Phoenix ; chez AVR, cette opération a été réalisée en collaboration avec le personnel compétent d'AVR.

La même approche a été adoptée dans chaque site :

- Les mâchefers bruts ont été prélevés de :
 - AVR Duiven : à partir du tas de mâchefers bruts, directement derrière l'extracteur de scories par voie humide.
 - AVR Rozenburg : dépôt de mâchefers bruts.
 - EEW : dépôt de mâchefers bruts de Wijster.
- Un volume d'environ 30-50 t a été mis de côté avec une grue et un camion.
- Ces 30 à 50 tonnes de mâchefer brut d'UIDND ont ensuite été répartis uniformément à l'aide de la grue.
- Des échantillons ont ensuite été prélevés dans cette couche étalée à l'aide d'une grue.
- Les échantillons ont été prélevés en des points uniformément répartis sur le mâchefer brut.
- La grue a été utilisée pour placer les échantillons dans environ 5 à 10 big bags d'une capacité d'environ 1 m³.

Tous les big bags ont été transportés vers l'usine de traitement Blue Phoenix à Rotterdam/Pernis, où ils ont été traités dans l'installation de filler d'UIDND.

Représentativité des échantillons prélevés

Le filler d'UIDND produit à partir de ces échantillons a été soumis à une analyse chimique. La concentration des principaux éléments peut être utilisée pour évaluer la représentativité des échantillons prélevés dans les UIDND en les comparant avec des analyses antérieures et des données de la littérature.

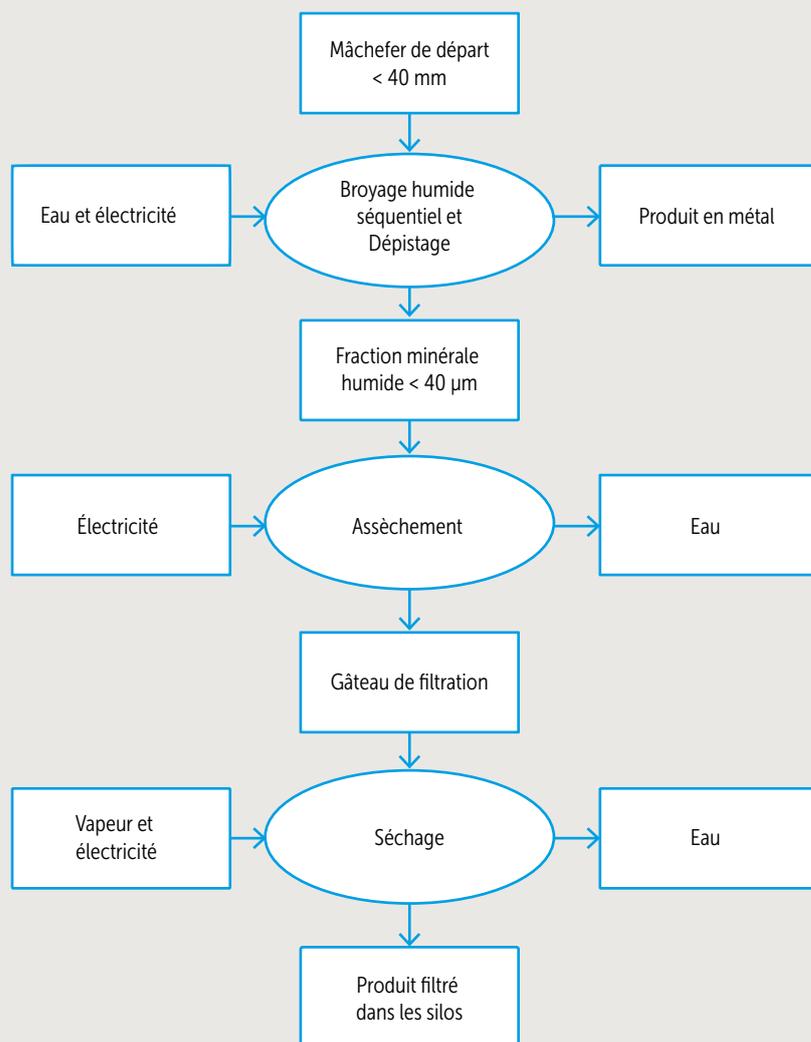
Les analyses/rapports représentatifs ci-dessous avaient déjà été envoyés au groupe de travail CROW :

- 1 Analyse élémentaire de deux échantillons de mâchefer néerlandais et d'un échantillon de mâchefer britannique (SGS 05-15-2020)
- 2 Caractérisation d'une source d'UIDND aux Pays-Bas sur trois périodes différentes (SGS 13/11/2018)
- 3 Caractérisation de trois sources d'UIDND réparties géographiquement aux Pays-Bas (SGS 03/12/2020)

Toutes les mesures sont synthétisées dans le tableau ci-dessous. Les résultats donnent une image représentative de la qualité des mâchefers. Les chiffres sont répartis géographiquement sur l'ensemble des Pays-Bas et constituent une partie représentative du volume total ; ils reflètent également l'évolution sur une période donnée dans un seul endroit. Toutes les mesures XRF ont été effectuées de la même manière.

Tableau 1. Analyse chimique des mâchefers des installations de combustion des déchets dans les échantillons fournis à CROW (% en poids)

Rapport SGS	Filler d'UIDND EEW 13/11/2018			Filler d'UIDND DVN 12/03/2020	Filler d'UIDND RZB 12/03/2020	Filler d'UIDND EEW 12/03/2020	Filler d'UIDND ROYAUME-UNI 15/05/2020
	sept. 2018	oct. 2018	nov. 2018				
Silicium sous forme de SiO ₂	49,61	50,25	46,22	50,07	47,61	50,46	43,92
Calcium sous forme de CaO	18,08	16,38	18,44	18,18	17,03	16,41	20,74
Fer sous forme de Fe ₂ O ₃	11,67	11,18	12,33	7,90	11,04	10,59	11,30
Aluminium sous forme de Al ₂ O ₃	7,54	8,26	8,53	7,43	8,23	7,98	8,93
Sodium sous forme de Na ₂ O	3,73	4,33	3,84	4,13	4,13	3,94	3,91
Soufre sous forme de SO ₃	2,27	1,84	2,62	2,69	1,60	1,64	2,02
Magnésium sous forme de MgO	2,00	1,96	2,05	2,39	2,42	2,02	2,02
Phosphore en tant que P ₂ O ₅	1,08	1,01	1,18	1,10	1,23	0,94	1,06
Le titane sous forme de TiO ₂	1,24	1,07	1,29	1,15	1,32	0,98	1,26
Potassium sous forme de K ₂ O	0,92	0,86	0,99	1,01	0,97	1,02	0,81
Zinc sous forme de ZnO	0,55	0,58	0,69	0,54	0,60	0,50	0,69
Chlorure sous forme de Cl	0,77	0,59	0,72	-	-	-	-
Cuivre sous forme de CuO	0,28	0,31	0,35	0,31	0,38	0,27	0,31
Manganèse sous forme de MnO	0,16	0,23	0,19	-	-	-	0,29
Manganèse sous forme de Mn ₃ O ₄				0,16	0,21	0,18	-
Plomb sous forme de PbO	0,12	0,13	0,14	0,11	0,11	0,11	0,12
Chrome sous forme de Cr ₂ O ₃	0,08	0,11	0,09	0,10	0,11	0,09	0,10
Zirconium sous forme de ZrO ₂	0,04	0,05	0,03	0,14	0,06	0,07	0,05
Baryum sous forme de BaO	0,11	0,10	0,14	0,21	0,27	0,20	0,18
Strontium sous forme de SrO	0,07	0,07	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04
Iode sous forme d'I				-	-	-	-
Nickel sous forme de NiO				0,02	0,03	0,03	0,03
Vanadium sous forme de V ₂ O ₅				0,01	0,01	0,01	-



Processus de production du filler d'UIDND

Les matières premières reçues ont été broyées dans l'usine pilote de BPG à Rotterdam. Un processus de broyage humide a été utilisé. L'objectif du processus était d'obtenir un résultat suffisamment fin et d'éliminer les matériaux perturbateurs tels que l'aluminium métallique. Le chlorure, le sulfate et les matières organiques (COT) n'ont pas été éliminés pendant le traitement. Ce processus de production expérimental à des fins de recherche visait à maintenir les niveaux élevés présents.

Conclusion

Les mâchefers d'UIDND sont composés principalement de silicates et d'oxydes de calcium, complétés respectivement par des oxydes de fer et d'aluminium.

Les mâchefers de CEB sont ajoutés en très petites quantités. L'échantillon de l'AVR Rozenburg contenait la plus grande quantité de mâchefer de CEB ; AVR fait partie du programme global de recherche et développement. Les analyses des mâchefers de CEB sont présentées à l'annexe 2.

Annexe 1 : Installation IPPC

<https://www.infomil.nl/onderwerpen/duurzaamheid-energie/ippc-installaties/>

Contact English Abonneren

 Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Kenniscentrum InfoMil

Home Actueel Rijkswaterstaat **Onderwerpen** Helpdesk Zoeken

Home > Onderwerpen > Duurzaamheid, energie > IPPC-installaties >

IPPC-installaties

IPPC-installaties zijn de grotere industriële bedrijven die vallen onder de Richtlijn industriële emissies (2010/75/EU). Deze richtlijn geldt voor alle lidstaten van de Europese Unie.

De Richtlijn industriële emissies eist dat bedrijven de installatie pas in bedrijf nemen als ze een omgevingsvergunning hebben. Deze integrale vergunning moet voldoen aan de beste beschikbare technieken (BBT). Voor IPPC-installaties staan de beste beschikbare technieken in BBT-conclusies. Deze BBT-conclusies worden op Europees niveau vastgesteld.

Een vergunningverlener moet bij IPPC-installaties ook rekening houden met aangewezen BBT-documenten. Dit zijn documenten die staan in de bijlage van de Regeling omgevingsrecht (Mor). Ook kunnen algemene regels uit Nederlandse wetgeving van toepassing zijn.



Regelgeving

- [BREFs en BBT-conclusies overzicht](#)
- [IPPC-categorie per branche](#)
- [Aangewezen BBT-documenten](#)
- [IPPC en Activiteitenbesluit](#)
- [Rapportage en database](#)
- [Totstandkoming BBT-conclusies](#)

Vergunningverlening

- [Waarom en wanneer BBT bepalen?](#)
- [Stappenplan](#)
- [Is het een IPPC-installatie?](#)
- [Bepaal de relevante BBT-conclusies](#)
- [Verzamel informatie over de installatie](#)
- [Voldoet installatie aan BBT?](#)
- [Bepaal eisen uit Activiteitenbesluit](#)

Informatie

- [Nieuws](#)
- [Vraag en antwoord](#)
- [Checklist IPPC van VITO](#)
- [IPPC-database \(inloggen en helpdesk e-mij\)](#)

Hoe werkt het vanaf 2022?

 **Informatiepunt Leefomgeving**

→ [IPPC-installaties in Omgevingswet](#)

Annexe 2 : Mâchefers de CEB

Le groupe de travail « Matières résiduelles » de l'Association néerlandaise de gestion des déchets (« Dutch Waste Management Association », DWMA) a discuté de la demande d'informations du groupe de travail CROW sur les « mâchefers de CEB ». La question a ensuite été discutée avec les trois producteurs de mâchefers de CEB aux Pays-Bas. Les informations ci-dessous ont été compilées suite à une consultation entre les trois membres de la DWMA qui produisent à la fois des mâchefers d'UIDND et des mâchefers de CEB.

Le DWMA a fait état des tonnages pour 2019 (chiffres arrondis) :

- Les mâchefers des UIDND aux Pays-Bas : 1 900 000 T
- Les mâchefers d'UIDND dans chaque site où des mâchefers de CEB sont également produits
 - AVR Rozenburg 350 000 t
 - HVC 240 000 t
 - Twence 150 000 t
- Mâchefer de centrale d'énergie à biomasse : 15 700 t
 - AVR Rozenburg 5 500 T
 - HVC 1 250 T
 - Twence 9 000 T
- Les mâchefers de CEB de Twence ne sont pas mélangés aux mâchefers d'UIDND ;
- Résumé : 7 000 t/a (1,2 %) mélangés à des mâchefers d'UIDND.

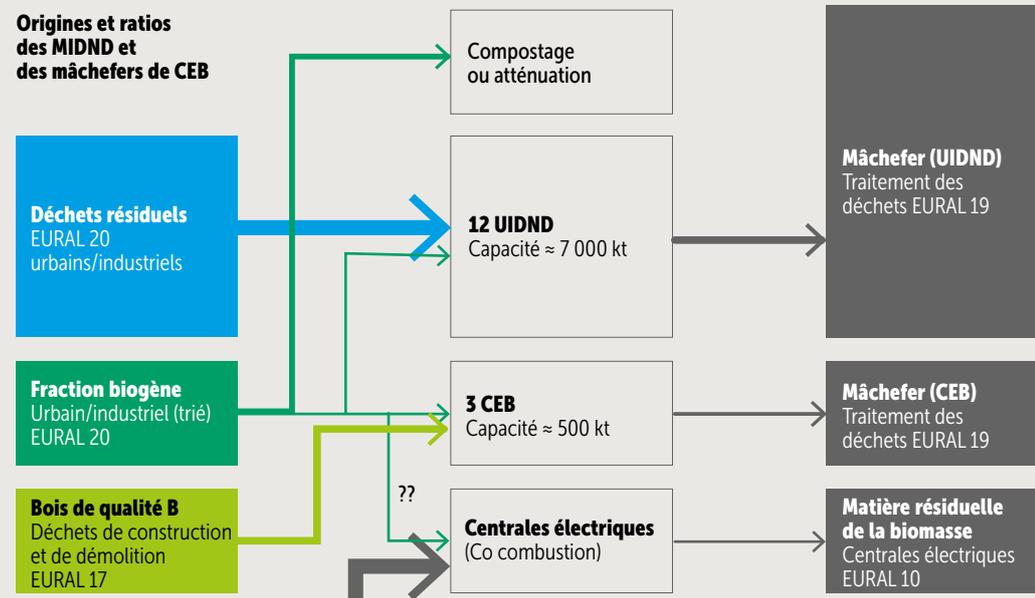


Schéma des mâchefers CEB

Analyses chimiques des mâchefers CEB (AVR RZB)

Résultats		
Analyse	Unité	
Composition élémentaire par XRF		WROXI
SiO ₂	% (m/m) d.w.	48,26
CaO	% (m/m) d.w.	20,53
Fe ₂ O ₃	% (m/m) d.w.	5,07
Al ₂ O ₃	% (m/m) d.w.	7,26
Na ₂ O	% (m/m) d.w.	1,85
SO ₃	% (m/m) d.w.	2,40
MgO	% (m/m) d.w.	2,39
P ₂ O ₅	% (m/m) d.w.	0,69
TiO ₂	% (m/m) d.w.	6,58
K ₂ O	% (m/m) d.w.	1,48
ZnO	% (m/m) d.w.	0,54
Cl	% (m/m) d.w.	-
CuO	% (m/m) d.w.	0,20
Mn ₃ O ₄	% (m/m) d.w.	0,24
Pbo	% (m/m) d.w.	0,19
Cr ₂ O ₃	% (m/m) d.w.	0,11
ZrO ₂	% (m/m) d.w.	0,04
BaO	% (m/m) d.w.	0,86
SrO	% (m/m) d.w.	0,08
NiO	% (m/m) d.w.	0,02

Annexe B Détails des méthodes de mesure XRD et XRF

XRD

Des schémas quantitatifs de diffraction des rayons X (XRD) ont été utilisés pour déterminer la composition minéralogique des trois fillers d'UIDND.

Le calcul a été effectué à l'aide d'un diffractomètre Bruker D8 Advance avec une géométrie Bragg-Brentano et un détecteur sensible à la position Lynxeye. On a utilisé un rayonnement de 45 kV 40 mA Cu K α et une fente de divergence V12 avec une hauteur de 5 mm. Réglage de la détection : LL 0.19 et W 0.06.

Le balayage 2θ a été effectué entre 10–110° avec un pas de 0,030° et un temps de mesure de deux secondes par pas.

Les données obtenues ont été traitées à l'aide du logiciel Diffrac.EVA de Bruker, version 4.3.

XRF

La spectroscopie de fluorescence aux rayons X a été utilisée pour déterminer la composition élémentaire des trois fillers d'UIDND.

Le calcul a été effectué à l'aide d'un Axios WD-XRF Panalytical avec un tube à rayons X de 2,4 kW.

La méthode d'analyse utilisée est AP WROXI, avec un paquet Panalytical de 21 oxydes fabriqués à partir de standards synthétiques. Les standards ont été utilisés pour fabriquer des billes de verre en mélangeant une quantité du standard avec du LiT:LiM (ratio 66 %:34 %) et en le faisant ensuite fondre.

Une liste des longueurs d'onde utilisées pour chaque élément est disponible.

Annexe C Production de carreaux de béton

Le vendredi 11/09/2020, une usine de béton à Drachten a produit des carreaux de béton de 300 x 300 x 60 mm en utilisant les cinq mélanges de béton étudiés. Un lot de 1,25 m³ de béton a été produit pour chaque mélange ; chaque lot a ensuite servi à fabriquer un peu plus de 200 carreaux sur une petite presse à carreaux. Les carreaux produits n'avaient pas de couche supérieure.



La composition des cinq mélanges de béton est décrite dans le tableau ci-dessous.

Compositions (kg/m³) des dalles de béton

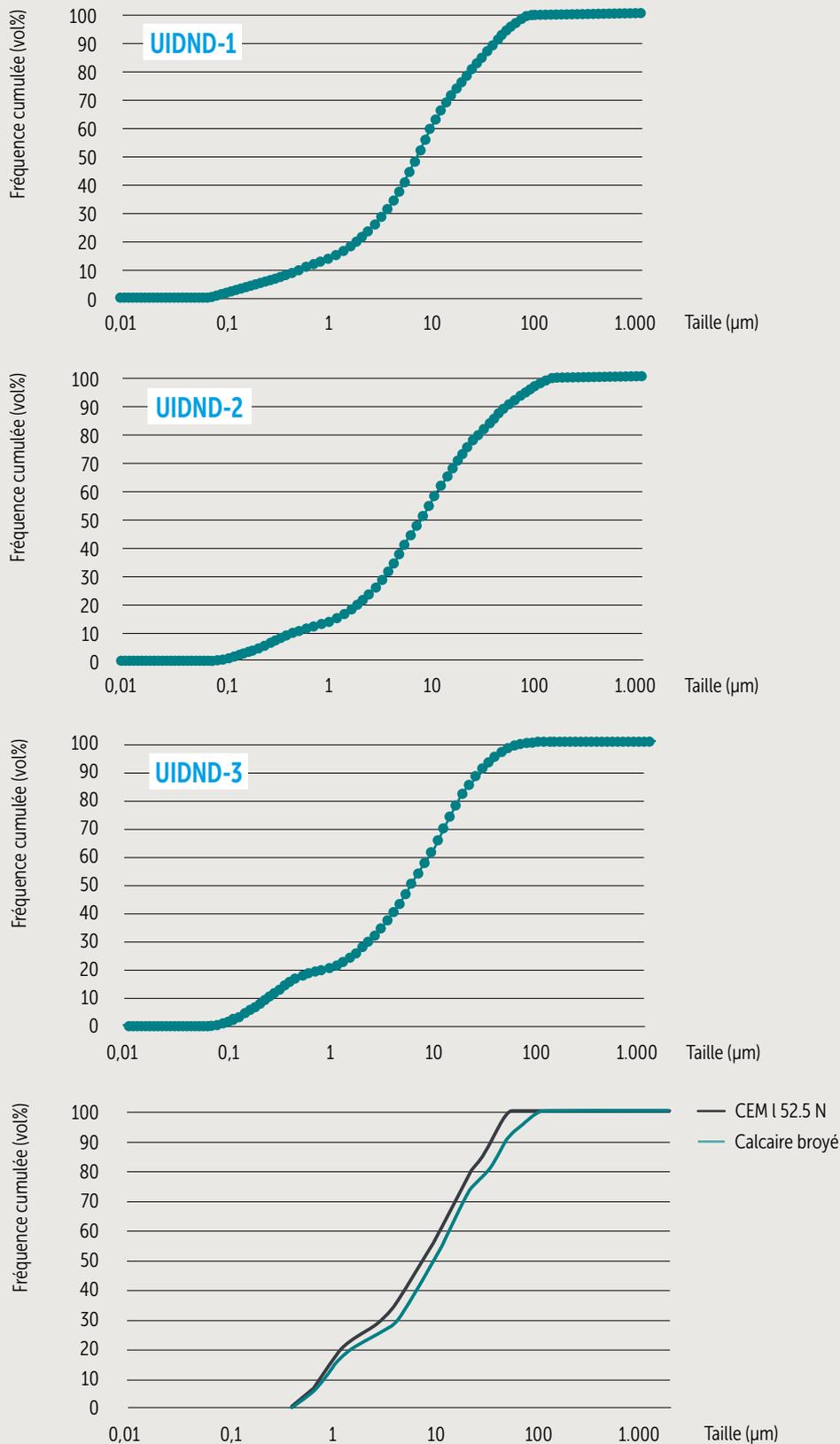
Composant	REF	CB	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
CEM I 52.5 N	289	219	218	219	219
Filler	0	79	73	73	73
Eau (efficace)	80	89	106	106	105
Eau d'absorption	11	11	11	11	11
Sable 0-2	791	791	801	794	790
Granit 0-2	1154	1154	1152	1177	1157
Rapport eau/ciment (efficace)	0,28	0,30	0,36	0,36	0,36

Le mélange de référence (REF) était la formule de base pour ces carreaux de béton. Pour obtenir une consistance uniforme (la consistance a été évaluée par le contremaître du moulin, en pétrissant le mélange pour en faire une boule et en jugeant de la consistance), la teneur en eau du mélange de béton avec du calcaire broyé a été augmentée de 9 l/m³.

Bien que cette consistance ait donné de bons résultats avec les deux mélanges de béton, les employés de la presse à carreaux ont indiqué que les deux mélanges étaient « trop secs » et la consistance des trois mélanges de béton avec des fillers d'UIDND a été légèrement ajustée. Cet ajustement, combiné au besoin en eau légèrement plus élevé des trois fillers d'UIDND, a fait que ces mélanges ont nécessité environ 17 l/m³ d'eau supplémentaire dans le mélange par rapport au mélange avec du calcaire broyé.

Certains des carreaux de béton produits ont été livrés au laboratoire SGS INTRON à Sittard le 22/09/2020. Chaque mélange de béton a été emballé sur une palette séparée.

Annexe D Distributions de particules dans les fillers et le ciment



Bijlage E Diffractogramme de rayons X

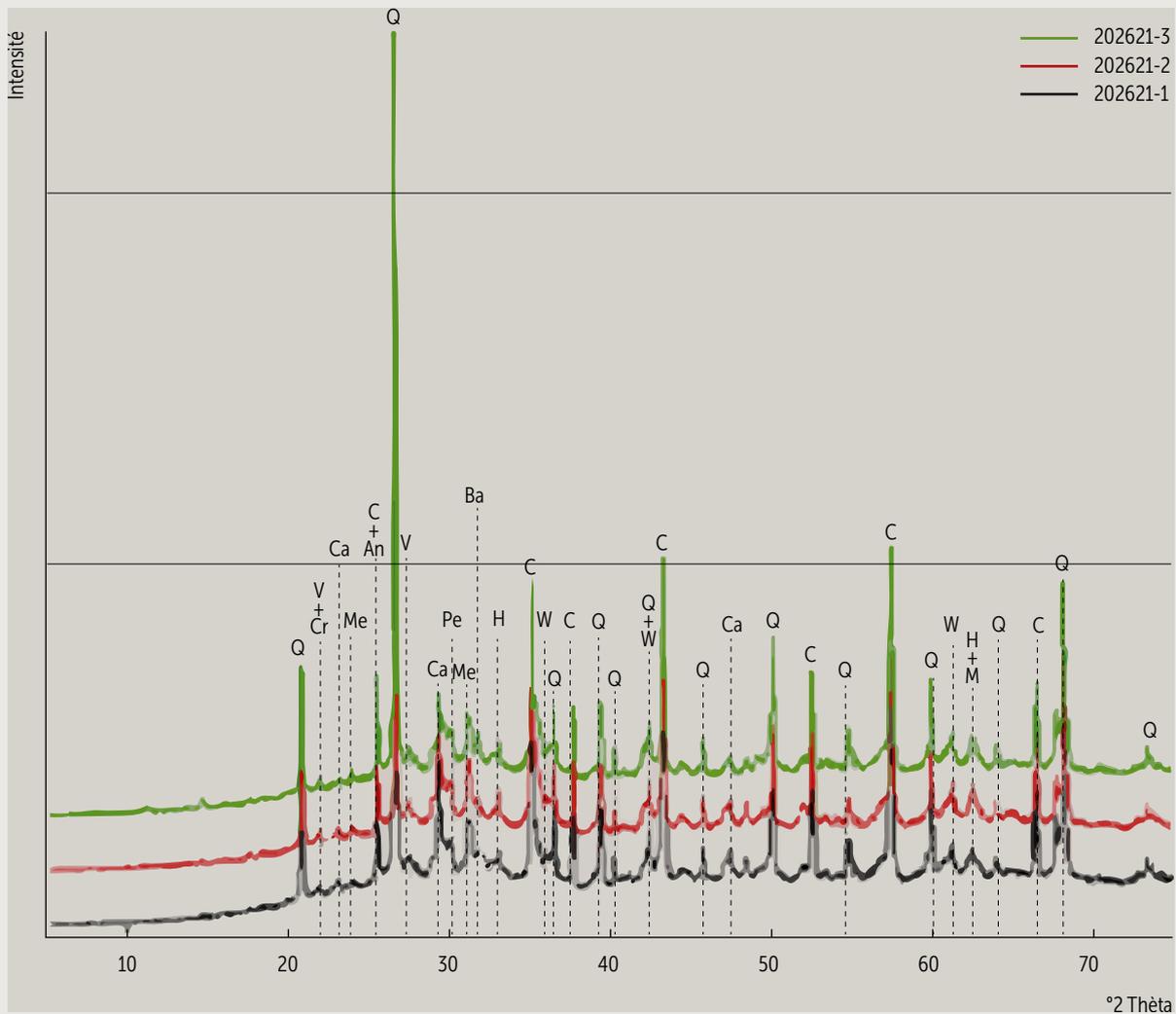
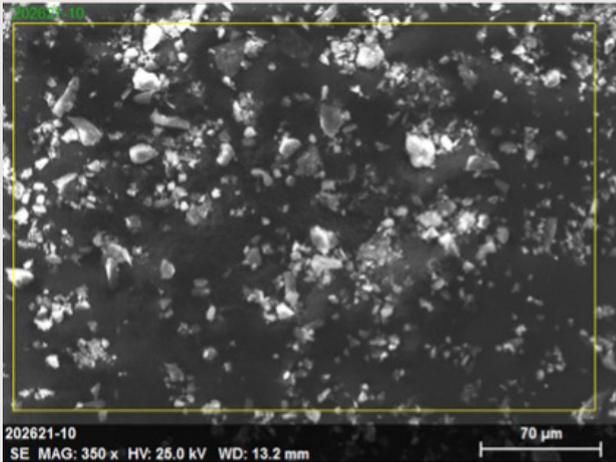


Figure 1. Schémas de diffraction des échantillons. Les réflexions clés ont été étiquetées : standard interne (C), quartz (Q), feldspath (V : plagioclase/albite et feldspath alcalin), cristobalite (Cr), minéraux de type mélilite (Me), petedunnite (Pe), bassanite (Ba), calcite (Ca), hématite (H), magnétite (M) et wüstite (W), anhydrite (An).

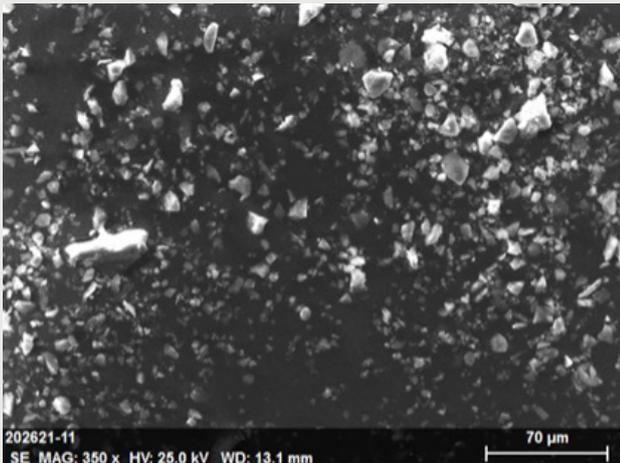
Annexe F SEM/EDAX

Filler d'UIDND-1



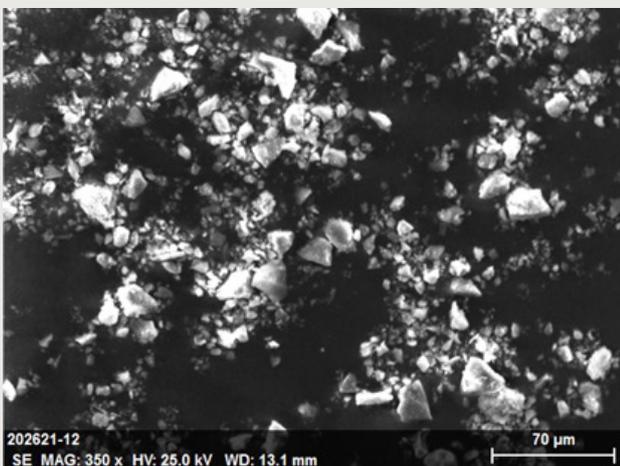
E1	AN	Série	unn. C [% en poids]	norm. C [% en poids]	Atom. C [at.%]	Erreur (1 Sigma) [% en poids]
Na	11	K-series	0,90	6,79	9,52	0,10
Mg	12	K-series	0,25	1,91	2,53	0,05
Al	13	K-series	0,90	6,79	8,11	0,08
Si	14	K-series	4,31	32,46	37,25	0,22
P	15	K-series	0,43	3,22	3,35	0,05
S	16	K-series	1,32	9,91	9,97	0,08
Cl	17	K-series	0,20	1,48	1,35	0,04
K	19	K-series	0,21	1,56	1,28	0,04
Ca	20	K-series	3,47	26,12	21,01	0,14
Fe	26	K-series	1,30	9,76	5,63	0,08
Total			13,28	100,00	100,00	

Filler d'UIDND-2



E1	AN	Série	unn. C [% en poids]	norm. C [% en poids]	Atom. C [at.%]	Erreur (1 Sigma) [% en poids]
Na	11	K-series	1,20	6,91	9,73	0,12
Mg	12	K-series	0,50	2,86	3,81	0,06
Al	13	K-series	1,52	8,69	10,42	0,11
Si	14	K-series	5,43	31,18	35,92	0,27
P	15	K-series	0,58	3,31	3,46	0,05
S	16	K-series	1,27	7,27	7,33	0,08
Cl	17	K-series	0,26	1,48	1,35	0,04
K	19	K-series	0,17	0,97	0,80	0,03
Ca	20	K-series	4,25	24,39	19,69	0,16
Fe	26	K-series	2,25	12,93	7,49	0,09
Total			17,43	100,00	100,00	

Filler d'UIDND-3



E1	AN	Série	unn. C [% en poids]	norm. C [% en poids]	Atom. C [at.%]	Erreur (1 Sigma) [% en poids]
Na	11	K-series	1,55	6,60	9,42	0,14
Mg	12	K-series	0,38	1,61	2,17	0,05
Al	13	K-series	2,14	9,14	11,12	0,14
Si	14	K-series	7,54	32,20	37,62	0,36
P	15	K-series	0,49	2,11	2,23	0,05
S	16	K-series	1,29	5,51	5,63	0,08
Cl	17	K-series	0,32	1,37	1,27	0,04
K	19	K-series	0,23	0,97	0,82	0,04
Ca	20	K-series	6,00	25,63	20,99	0,21
Fe	26	K-series	3,48	14,86	8,73	0,13
Total			23,42	100,00	100,00	

Annexe G Essai de moussage des fillers d'UIDND

Méthode :

Ajouter 15 g de filler d'UIDND + 150 ml d'eau déminéralisée dans un cylindre de mesure de 500 ml. Remuez à l'aide d'une tige en verre et mesurez la quantité de mousse créée.

Utilisez un tuyau fin pour injecter de l'air comprimé dans le fond du cylindre de mesure pendant 30 secondes.

Mesurez la quantité de mousse une fois que les bulles d'air les plus grosses et les moins stables ont disparu.

Résultats :

Filler	UIDND-1	UIDND-2	UIDND-3
Quantité de mousse après mélange avec de l'eau (ml de mousse/gramme de filler)	1,3	1,3	0,3
Quantité de mousse (stable) après avoir injecté de l'air (ml de mousse/gramme de filler)	1,7	0,7	0,7
Teneur en air du mortier (% V/V)	10,0	11,5	6,8

Remarque : Précision de mesure d'environ 0,3 ml/g

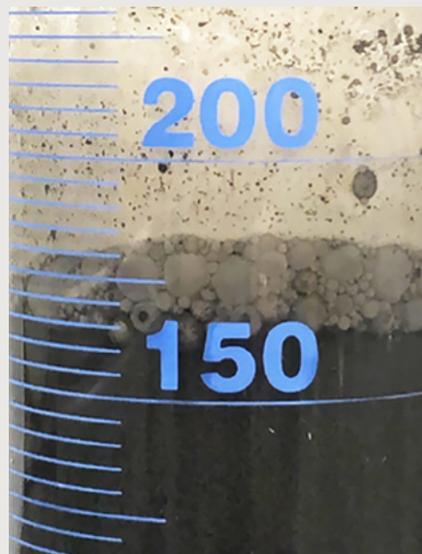
Interprétation :

Les trois fillers créent de la mousse lorsqu'ils sont doucement mélangés (remués) ; lorsque de l'air est introduit, la quantité de mousse augmente (un peu) dans le filler d'UIDND-1 et d'UIDND-3.

Avec le filler d'UIDND-2, la quantité de mousse diminue.

Il est intéressant de noter que beaucoup moins de mousse s'est formée sur l'échantillon UIDND-3 lors de l'agitation, par rapport à UIDND-1 et UIDND-2, ce qui correspond à la teneur en air significativement plus faible du mortier contenant UIDND-3 (ligne inférieure du tableau).

Il semblerait donc que des composants moussants (= tensioactifs) soient présents. Une proportion importante des bulles d'air formées sont inférieures à 1 mm et sont difficiles à éliminer du mortier par vibration/chocs.



Colofon

Recommandation CROW-CUR 128: 2021
Filler d'UIDND dans du béton non armé à consistance
de terre humide

[éditeur](#)

CROW, Ede

[référence du document](#)

AA128:2021

[photo de couverture](#)

Blue Phoenix Group

[pod](#)

Scanlaser bv, Zaandam

[production](#)

CROW

