

Dalles en asphalte, une alternative pour les silos?

Comparaison entre béton, béton bitumineux et asphalte coulé

Ludo Van Caenegem, Ruedi Jakob et Alfons Schmidlin, Station fédérale de recherches en économie et technologie agricoles (FAT), CH-8356 Tänikon

Mark Weydert, Faculté universitaire des sciences agronomiques, section Génie rural, B-5030 Gembloux

Les dalles en béton des silos-tours et des silos-couloirs sont fortement attaquées par le jus de fermentation. Des essais réalisés à la FAT ont montré que la résistance au jus de fermentation dépendait en grande partie du type de granulats utilisés (sable ou graviers). Les granulats purement cristallins (comme le granit) sont nettement plus résistants que les granulats calcaires. Contrairement à ce qu'on aurait pu croire, le type de ciment ne joue qu'un faible rôle. Les ciments alternatifs, qui contiennent moins de chaux libre que le ciment Portland, ne parviennent guère à améliorer la stabilité du béton. La même affirmation est valable pour les adjuvants tels que les agents de dispersion. L'asphalte en revanche constitue une

alternative intéressante au béton. Non seulement le béton bitumineux et l'asphalte coulé sont moins sensibles aux attaques du jus de fermentation, mais il est également plus aisé d'assainir le revêtement ultérieurement. La résistance de l'asphalte dépend essentiellement de la teneur en bitume. Lorsque le revêtement est posé dans les règles de l'art, il est garanti imperméable à l'eau, qu'il s'agisse de béton bitumineux ou d'asphalte coulé. Selon des essais réalisés au LFEM, le fourrage ensilé en contact avec l'asphalte est irréprochable du point de vue physiologique. Le béton bitumineux posé en une seule couche est le procédé qui entraîne le moins de coûts sur toute la durée de vie de la dalle du silo.

Attaque par le jus de fermentation

Pendant le stockage, les fourrages tels que l'herbe et le maïs fermentent à l'abri de l'air. Lorsque la teneur en matière sèche est faible lors du remplissage du silo ($\leq 30\%$), les quantités de jus de fermentation libérées peuvent être considérables (voir rapports FAT n° 438).

La composition du jus de fermentation produit par l'ensilage de maïs est très variable (tab. 1). Le taux de matière sèche est généralement compris entre 5 et 8%. Le pH relativement faible (de 3, 6 à 4) est essentiellement dû à l'acide lactique et à l'acide acétique qui peuvent se présenter en concentrations de 10 à 20 g/kg dans le jus de fermentation.



Fig. 1: Pose d'un revêtement en béton bitumineux dans un silo-couloir à la FAT.

Sommaire	Page
Problématique	1
Attaque par le jus de fermentation	2
Etude	2
Résultats des essais	6
Aspects relatifs à la construction	8
Aspects économiques	9
Recommandations	10
Conclusions	10
Bibliographie	11

Problématique

Lors de la fermentation du fourrage grossier (maïs, herbe) dans les silos-tours et dans les silos-couloirs, il se produit plus ou moins de jus de fermentation selon la teneur en matière sèche. Le jus de fermentation contient principalement de l'acide lactique et de l'acide acétique qui, en peu de temps, attaquent la surface du béton. La désagrégation du béton exige que des réparations soient effectuées au bout de quelques années ou même que le revêtement soit renouvelé. Quant à la mise en place d'une protection superficielle (couche de peinture), soit elle dure peu de temps, soit elle entraîne des coûts élevés (passage de l'enduit). Contrairement au ciment, le bitume, lui, résiste aux acides organiques en faible concentration. C'est pourquoi le béton bitumineux et l'asphalte coulé peuvent être plus résistants que le béton, à condition que le bitume enrobe et protège suffisamment les différents granulats (sable, gravillons ou graviers). Ces revêtements de couleur noire conviennent-ils réellement pour la construction de nouveaux silos ou la réparation d'anciens? Leur résistance chimique n'est pas leur seul atout. Ils sont également imperméables à l'eau et économiques. Enfin, il reste encore à prouver que les fourrages en contact avec l'asphalte sont irréprochables du point de vue physiologique.

En association avec la chaux libre dans le ciment, les acides forment des sels. Plus ces sels sont solubles, plus l'érosion du matériau sera importante. Combiné avec la chaux, l'acide lactique forme du lactate de calcium qui, à une température de 15 °C, peut se dissoudre d'environ 5,5 g par 100 ml d'eau. La solubilité de l'acétate de calcium (sel produit à partir de chaux et d'acide acétique) dans l'eau est nettement plus élevée (environ 35 g/100 ml d'eau). Le ciment Portland, utilisé en général pour la fabrication du béton, libère environ 0,3 kg de chaux par kg de ciment au cours de l'hydratation. A l'instar du ciment dans le béton, dans l'asphalte, c'est le bitume qui sert à coller et enrober les granulats. Le bitume résiste aux solutions acétiques jusqu'à 25% et aux solutions d'acide lactique jusqu'à 10%. On pourrait donc en conclure que

Tab. 1: Composition du jus de fermentation au début des essais en g/par kg (l) de jus de fermentation

Désignation	Unité	Essais 1, 3	Essais 2, 3	Essais 4, 5
Cendres	g/kg	12	12	11
Protéines	g/l	16	11	12
Sucre	g/kg	3	< 2	3
Calcium	g/kg	1,55	1,6	< 1,0
Acide acétique	g/kg	8,6	11,1	10,2
Acide propionique	g/kg	0,2	9,3 ¹⁾	9,5 ¹⁾
Acide butyrique	g/kg	0,4	0,5	< 0,1
Acide lactique	g/kg	17,2	11,7	20,0
Ammoniac	g/l	0,35	0,2	0,14
Ethanol	g/kg	3,8	1	5,7
pH		3,9	4,0	3,8

Résultats des analyses de la Station de recherches RAP, Posieux.
¹⁾ Environ 1% d'acide propionique a été ajouté pour empêcher le développement de moisissures.

l'asphalte résiste mieux au jus de fermentation que le béton. Or, ce n'est pas forcément le cas. Outre les liants (ciment dans le béton ou bitume dans l'asphalte), les granulats (sable, gravillons ou graviers) peuvent eux aussi réagir aux acides organiques présents dans le jus de fermentation. Cette réaction dépend du type de granulats ainsi que de l'enrobé de ces différents granulats, comme le montrent des essais réalisés à la FAT.

Etude

Les essais ont porté sur la résistance chimique du béton, du béton bitumineux et de l'asphalte coulé, au jus de fermentation, ainsi que sur la perméabilité du béton bitumineux au jus de fermentation et enfin sur le caractère irréprochable du point de vue physiologique des fourrages ayant été en contact avec le béton bitumineux.

Méthode

Résistance chimique

Le projet s'est déroulé en cinq essais différents de février à juillet 1998 et d'avril à

juillet 1999 au moyen de deux procédés (tab. 2). Avec le premier procédé (immersion cyclique), les échantillons étaient alternativement immergés dans le jus de fermentation du maïs pur à environ 2,5 cm de profondeur, puis séchés en surface par deux radiateurs chauffants (fig. 2). La chaîne d'entraînement effectuait une rotation par heure. Avec le second procédé (immersion permanente), les échantillons étaient immergés en permanence dans le même jus de fermentation à environ 3 cm de profondeur (fig. 3). Au bout d'une ou deux semaines, tous les échantillons ont été retirés et mis à sécher au four à 50 °C. Le but de l'opération était de les ramener à leur teneur en eau initiale. Ensuite, ils ont été nettoyés à l'aide d'une brosse en plastique (pour enlever les grains libres et les restes de moisissures) avant d'être pesés. La différence entre le poids de l'échantillon avant et après la période d'essai correspondait à la perte de poids due à l'action du jus de fermentation. La perte de poids a ensuite été recalculée pour une surface de contact de 600 cm² pour tous les échantillons. Le jus de fermentation a été renouvelé à chaque fois qu'on retirait les échantillons. Chaque type de béton, béton bitumineux et asphalte coulé était représenté par deux échantillons pour les essais 1 et 2 (immersion cyclique), et par quatre pour l'essai 4.

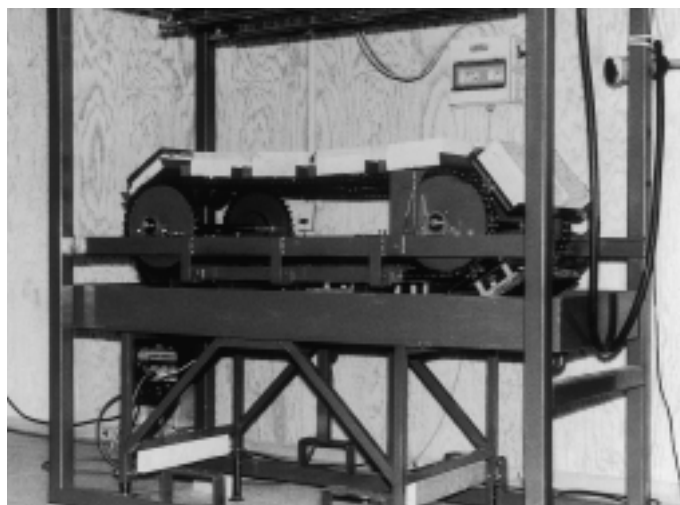


Fig. 2: Le système d'entraînement permet de plonger les échantillons de béton et d'asphalte dans le jus de fermentation et de les faire sécher en alternance.



Fig. 3: Parallèlement à l'essai sur la machine, des échantillons de béton et d'asphalte ont été plongés en permanence dans le jus de fermentation.

Comme la machine ne peut contenir que 24 échantillons, le béton 6 a été remplacé par le béton 7 dans l'essai 2. L'essai 3 (immersion permanente) porte sur un échantillon par type de béton et d'asphalte. Quant à l'essai 5 (immersion permanente), il porte sur deux échantillons par type de béton bitumineux.

Grâce à une sélection ciblée de différents types de béton et d'asphalte, les facteurs suivants ont pu être étudiés et leur influence sur la résistance chimique des matériaux analysée:

Essais 1, 2, 3:

- Types de ciment ou de bitume,
- Granulats: roche 100% cristalline, roche calcaire pure et mélange des deux,
- Valeur E/C (proportion d'eau et de ciment),
- Adjuvants dans le béton et l'asphalte.

Essais 4, 5:

- Traitement postérieur du béton,
- Adjuvant Trinidad (asphalte naturel) dans le béton bitumineux.

Perméabilité

Selon les dispositions relatives à la protection des eaux, les installations de stockage de l'ensilage doivent être étanches. L'imperméabilité à l'eau du béton bitumineux dépend en premier lieu de la compression de la dalle. L'espace vide doit si possible représenter moins de 3,5% de l'espace total. Pour contrôler l'imperméabilité à l'eau, un échantillon de chaque type de béton bitumineux a été placé dans un cylindre métallique. L'échantillon était séparé du cylindre par un agent d'étanchéité à l'épreuve des acides. Une colonne de jus

de fermentation de 2 cm de haut a été placée sur les échantillons. La partie inférieure du dispositif a été surveillée pendant six semaines pour vérifier si le jus de fermentation s'infiltrait ou non.

Caractère irrécusable sur le plan physiologique

Les revêtements des routes en asphalte sont principalement constitués de roches (92 à 94%) et d'un agent liant (5 à 7%), qui collent ces minéraux entre eux. Depuis quelques années, on utilise exclusivement du bitume comme liant. Dans les anciens revêtements de routes, on peut encore trouver du goudron à la place du bitume. Le goudron et le bitume se différencient de par leur fabrication et leur teneur en substances polluantes. Tandis que le gou-

dron est issu de la carbonisation de la houille, par exemple lors de la production de gaz de ville, le bitume, lui, provient de la séparation des éléments très volatiles tels que le benzène, kérosène, etc. Il s'agit d'un procédé de séparation purement physique. C'est pourquoi pratiquement aucune substance nocive n'est formée. Pour la production de goudron par contre, la houille se désagrège, ce qui entraîne la formation de nouvelles liaisons, parmi lesquelles une grande quantité d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Or, chacun sait que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont dangereux pour l'homme et l'environnement et que la réglementation les concernant est donc abondante (Weber 1998).

Les HAP sont produits lors de la combustion de matériaux organiques et sont omniprésents dans l'environnement. C'est la

Tab. 2: Vue d'ensemble des différents essais

	Procédé	Durée de l'essai en semaines	Matériau
Essai 1	Immersion cyclique de l'échantillon	4	Béton 1, 2, 3, 4, 5, 6 Béton bitumineux 1, 2, 3 Asphalte coulé 1, 2, 3
Essai 2	Immersion cyclique de l'échantillon	9	Béton 1, 2, 3, 4, 5, 7 Béton bitumineux 1, 2, 3 Asphalte coulé 1, 2, 3
Essai 3	Immersion permanente de l'échantillon	10	Béton 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 Béton bitumineux 1, 2, 3 Asphalte coulé 1, 2, 3
Essai 4	Immersion cyclique de l'échantillon	9	Béton 8, 9 Béton bitumineux 4, 5
Essai 5	Immersion permanente de l'échantillon	9	Béton bitumineux 4, 5



Fig. 4: Deux échantillons ont été prélevés dans chaque silo-couloir pourvu d'une dalle en béton bitumineux: un échantillon témoin (sans contact avec le sol) et un échantillon ayant été en contact direct avec le sol.

raison pour laquelle deux échantillons différents ont été prélevés dans six silos recouverts d'un sol en béton bitumineux. Le premier échantillon était un échantillon témoin (sans contact avec le sol) et le second un échantillon en contact direct avec le sol (fig. 4). Le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches (LFEM) a effectué des analyses sur la teneur de 16 HAP différentes.

lice par exemple). Le laitier de haut fourneau est un laitier finement broyé et rapidement refroidi, moins riche en chaux que le ciment Portland. Le **laitier de haut fourneau** peut remplacer jusqu'à 95% de ciment Portland. Les **cendres volantes** sont produites lors de la combustion de la houille maigre dans les centrales électriques thermiques. Elles contiennent également moins de chaux libre que le ciment

Portland et permettent de baisser le rapport eau/ciment. Les **fumées de silice** quant à elles constituent un sous-produit de l'industrie du silicium. Elles rendent le béton très résistant à la compression et de par l'extrême finesse des particules qui les composent, elles augmentent l'imperméabilité du béton. Les bétons 1, 2, 3, 4, 5 et 7 contiennent des granulats purement cristallins alors que le béton 6 contient de la roche calcaire pure. Les granulats grossiers représentent environ 50% du volume total du béton. On parle de roche cristalline, lorsqu'elle est cristallisée en profondeur à haute température (granit) ou pression (gneiss). Le rapport eau/ciment du béton 2 est 20% plus élevé que celui des bétons 1, 3, 4, 5, 6 et 7 (0,6 contre 0,5). L'eau de gâchage du béton se compose de l'humidité introduite par les granulats et de l'eau ajoutée. Pour l'hydratation du béton, il faut compter 0,3 à 0,4 l d'eau de gâchage par kg de ciment (rapport eau/ciment, E/C = 0,3 à 0,4). Pour que le béton puisse être travaillé, il faut lui ajouter plus d'eau que ce qui serait nécessaire pour l'hydratation seule. Toutefois, il est recommandé de ne pas dépasser une valeur E/C de 0,5. Le béton 7 contient un agent dispersant (Mowolith LDM 6680) dans une proportion de 15% par rapport à la masse du ciment (15% de 325 kg = 49 kg). Les adjuvants agissent chimiquement ou physi-

Types de béton étudiés

Essais 1, 2 et 3

Les essais 1 à 3 ont porté au total sur sept types de béton différents. Ces types de béton se distinguent par le type de ciment utilisé, les granulats, le rapport eau/ciment ou par l'adjuvant (tab. 3). Les bétons 1, 2, 6 et 7 contiennent du ciment de Portland pur, les bétons 3, 4 et 5 contiennent du ciment composite (laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumées de silice). Pour fabriquer du béton traditionnel, on utilise du ciment Portland pur, qui est produit dans les fours à ciment à très hautes températures, à partir de roches contenant du calcaire, du silicium et de l'aluminium. Dans la phase de durcissement du béton, le ciment Portland libère jusqu'à 0,3 kg de chaux par kg de ciment. Outre le ciment Portland, il existe des ciments composites dans lesquels une part du ciment Portland est remplacée par des adjuvants minéraux (laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumées de si-

Tab. 3: Propriétés des échantillons de béton utilisés dans les essais 1, 2 et 3

	Ciment	Granulat	Adjuvant	Rapport eau/ciment
B 1	325 kg/m³ de ciment Portland	Roche cristalline	Plastifiant réducteur d'eau 3 kg/m³	0,52
B 2	325 kg/m³ de ciment Portland		Plastifiant réducteur d'eau 3 kg/m³	0,61
B 3	250 kg/m³ de ciment Portland 75 kg/m³ de cendres volantes	Roche cristalline	Plastifiant réducteur d'eau 5 kg/m³	0,52
B 4	300 kg/m³ de ciment Portland 25 kg/m³ de fumées de silice	Roche cristalline	Plastifiant réducteur d'eau 5 kg/m³	0,50
B 5	98 kg/m³ de ciment Portland 227 kg/m³ de laitier de haut fourneau	Roche cristalline	Plastifiant réducteur d'eau 5 kg/m³	0,52
B 6	325 kg/m³ de ciment Portland	Roche calcaire	Plastifiant réducteur d'eau 3 kg/m³	0,51
B 7	325 kg/m³ de ciment Portland	Roche cristalline	Mowolith 49 kg	0,50

Fabrication et résultats d'analyses VSH, Versuchstollen, Hagerbach AG, Sargans.

quement. Il existe par exemple des plastifiants qui réduisent les besoins du béton en eau, des entraîneurs d'air, des hydrofuges de masse, des accélérateurs et des retardateurs de prise. Les agents de dispersion hydrofuges ont pour but de rendre le contact entre les granulats et le jus de fermentation plus difficile et donc, de retarder l'attaque des matériaux par ce dernier.

Essai 4

L'essai 4 a permis de tester l'influence du traitement de protection du béton après mise en place sur sa résistance chimique (tab. 4). Une fois la dalle installée, la résistance du béton se développe plus ou moins rapidement suivant la température et la classe de résistance du ciment. Lorsque la température est de 20 °C, le béton habituel (C25/30) atteint au bout de trois jours environ 30 à 40% de sa résistance sur 28 jours. Lorsque les températures sont plus basses, la vitesse de durcissement diminue. Pendant la phase de durcissement du béton, il faut veiller à ce que le béton contienne suffisamment d'eau en maintenant l'humidité, de façon à ce que l'hydratation soit suffisante et que la surface devienne étanche et solide. Lorsque les conditions météorologiques sont chau-

des et sèches, le béton peut perdre plus d'1 l d'eau par m² et par heure après sa pose. Sans mesures spéciales, cette évaporation entraîne rapidement le dessèchement de la surface. Pour empêcher ce phénomène, il suffit de pulvériser régulièrement de l'eau sur le béton, de le couvrir d'un film plastique ou de le vaporiser de Curing Compounds (produit anti-évaporant à base de paraffine). Lorsque le temps est humide, le béton doit être protégé pendant au moins trois jours après sa pose, lorsque le temps est sec, pendant au moins cinq jours. Durant l'essai, quatre échantillons de béton (béton 9) ont été recouverts d'un film plastique immédiatement après leur fabrication (sur un chantier), pendant que quatre autres échantillons (béton 8) ont été exposés aux conditions météorologiques.

Types de béton bitumineux et d'asphalte coulé étudiés

Tout comme le béton, le béton bitumineux et l'asphalte coulé sont composés de granulats minéraux et d'un liant. Comme le ciment dans le béton, le bitume joue le rôle de liant dans l'asphalte. Contraire-

ment au béton bitumineux, l'asphalte coulé n'est pas cylindré. Il est posé à une température plus élevée (environ 230 °C) que le béton bitumineux. Dans l'asphalte coulé, le pourcentage de bitume se calcule de la façon suivante: il doit au moins permettre de remplir complètement les cavités ou d'avoir un léger surplus de liant. Dans le béton bitumineux, le pourcentage de cavités est variable suivant le domaine d'application. L'asphalte coulé est seulement utilisé comme couche de couverture (2,5 à 4 cm) placée sur une couche de base (béton ou béton bitumineux). Le béton bitumineux est posé par la plupart des entreprises routières tandis que l'asphalte coulé est réservé aux entreprises spécialisées.

Essais 1, 2 et 3

Le béton bitumineux 1 est un béton asphalté (BA, couche de couverture en asphalte) qui contient des bitumes modifiés avec des polymères (PmB). Le béton bitumineux 2 est un asphalte avec matrice en gravillons (SMA, couche de couverture résistante à l'usure) avec une forte teneur en bitume et de l'asphalte naturel (Trinidad). Enfin, le béton bitumineux 3 est une couche de support (HMT) qui contient des bitumes normaux (tab. 5).

L'asphalte coulé 1 contient des bitumes normaux et de l'asphalte naturel (Trinidad). L'asphalte coulé 2 contient des bitumes normaux tandis que l'asphalte coulé 3 contient des bitumes modifiés avec des polymères et de l'asphalte naturel (Trinidad).

Le bitume est constitué en grande partie d'hydrocarbures et de faibles quantités de soufre et d'oxygène. Les bitumes existent à l'état brut dans la nature (par exemple, à Trinidad, à Cuba ou au Venezuela), mais sont essentiellement produits à partir de la distillation du pétrole.

La viscosité et la résistance à la pénétration varient suivant la composition du bitume. Elles sont caractérisées par un nombre (de 30 à 220). Plus le nombre est bas, plus le bitume est visqueux et plus la température à laquelle le bitume se ramollit est élevée. Plus le bitume est visqueux et plus le risque est grand de voir des fissures se former, mais moins le revêtement peut s'abîmer après s'être amolli en été.

Des polymères (tels que le polyuréthane, le polystyrol) peuvent être ajoutés aux bitumes normaux pour améliorer certaines de leurs propriétés (durée de vie, résistance mécanique, adhérence). Pour réduire le risque de ségrégation (écoulement des liants), il est possible d'ajouter des fil-

Tab. 4: Propriétés des échantillons de béton étudiés dans l'essai 4

	Ciment	Granulats	Rapport eau/ciment	Protection du béton après mise en place
B 8	325 kg/m ³ de ciment Portland	Roche cristalline + roche calcaire	0,50	Non
B 9	325 kg/m ³ de ciment Portland	Roche cristalline + roche calcaire	0,50	Oui

Fabrication et données, Centrale à béton Aadorf.

Tab. 5: Propriétés des échantillons de béton bitumineux (Bb) et d'asphalte coulé (AC) étudiés dans les essais 1, 2 et 3

	Désignation	Bitumes	Adjuvant
Bb 1	BA 11N (béton asphalté)	PmB, 5,8%	
Bb 2	SMA 11S (asphalte avec matrice en gravillons)	B80/100, 6,6%	Trinidad, 1%
Bb 3	HMT 11L (béton bitumineux pour couche de support)	B80/100, 5,3%	
AC 1	ACT 8S	B40/50, 6,8%	Trinidad, 1,1%
AC 2	AC 8S	B40/50, 7,7%	
AC 3	ACT 11S	PmB, 6,8%	Trinidad, 1,1%

Fabrication et résultats d'analyses, Batigroup, Berne.

Tab. 6: Propriétés des échantillons de béton bitumineux (Bb) étudiés dans les essais 4 et 5

	Désignation	Bitumes	Adjuvant
Bb 4	HMT 16L	B80/100, 5,8%	
Bb 5	HMT 16L	B80/100, 5%	Trinidad, 1,5%

lers spéciaux comme le zéobite ou des adjuvants comme les fibres de cellulose.

Essais 4, 5

Les résultats des essais 1, 2 et 3 n’ont pas permis de constater de manière évidente l’influence de l’asphalte naturel (Trinidad). C’est pourquoi au cours des essais suivants (4 et 5), on a comparé le béton bitumineux avec et sans adjuvant Trinidad (tab. 6).

Résultats des essais

Le ciment composite n’améliore que légèrement la résistance

Comme la décomposition du ciment par le jus de fermentation suppose la présence de chaux libre, on pourrait s’attendre à ce que les ciments composites qui présentent la plus faible proportion de chaux libre soient ceux qui permettent d’obtenir le béton le plus résistant.

Les résultats montrent qu’en cas d’immersion cyclique, les fumées de silice (B 4) n’exercent aucune influence sur la perte de poids des matériaux. Quant aux cendres volantes (B 3) et au laitier de haut fourneau (B 5), leur influence est infime (fig. 5). En ce qui concerne les échantillons immergés en permanence, l’influence positive des ciments composites est un peu plus nette. Toutefois, les derniers résultats doivent être interprétés avec prudence, car ils portent à chaque fois uniquement sur un seul échantillon. Dans le cas de l’immersion cyclique, il s’agit en revanche de la moyenne de quatre échantillons (hormis pour le béton 6 et 7: uniquement deux échantillons). Les résultats plutôt décevants obtenus avec les ciments composites peuvent s’expliquer comme suit: une grande partie de la perte de poids est due non à la décomposition du mortier (mélange de sable et de ciment), mais à la décomposition des granulats. L’évaluation visuelle des échantillons après les essais montre que la roche cristalline (environ 95% du granit selon le rapport de test pétrographique) était elle aussi attaquée par le jus de fermentation. La plupart des

petites pierres situées à la surface de coupe ont même été plus gravement érodées que le mortier alentour.

Le calcaire ne constitue pas un bon granulat

L’essai, qu’il ait été réalisé avec immersion cyclique ou immersion permanente, montre très clairement l’influence du type de roche (fig. 5). Les échantillons contenant du calcaire pur (B 6) comme granulats ont perdu nettement plus de poids que les autres échantillons qui ont été fabriqués à partir d’une roche cristalline pure.

Un rapport élevé eau/ciment diminue la résistance du béton

L’influence négative d’un important rapport E/C sur la résistance du béton (B 2) au jus de fermentation apparaît de façon moins nette avec les échantillons immergés de façon cyclique qu’avec l’échantillon immergé en permanence (fig. 5).

Les adjuvants influencent relativement peu la résistance du béton

L’agent dispersant qu’est la Mowolith LDM 6680 (B 7) ne présente qu’une faible efficacité durant l’essai (fig. 5). L’augmentation, légère, de la résistance du béton entraîne des coûts supplémentaires de l’ordre de Fr. 150.–/m³.

Il vaut la peine de protéger le béton après sa mise en place

Les résultats des essais montrent que les pertes de poids sont nettement plus élevées lorsque les échantillons de béton (B 8) n’ont pas été protégés après leur mise en place (fig. 7). Cet essai a été réalisé uniquement dans les conditions d’immersion cyclique.

Les bitumes à base de polymères n’améliorent que légèrement la résistance de l’asphalte

Les résultats des essais 1, 2 et 3 montrent que l’apport de polymères ne permet pas d’assurer une amélioration significative que ce soit avec le béton bitumineux (Bb 1) ou avec l’asphalte coulé (AC 3).

Aucune influence positive de l’asphalte naturel (Trinidad)

La supposition avancée à l’issue des deux premiers essais, selon laquelle les très fai-

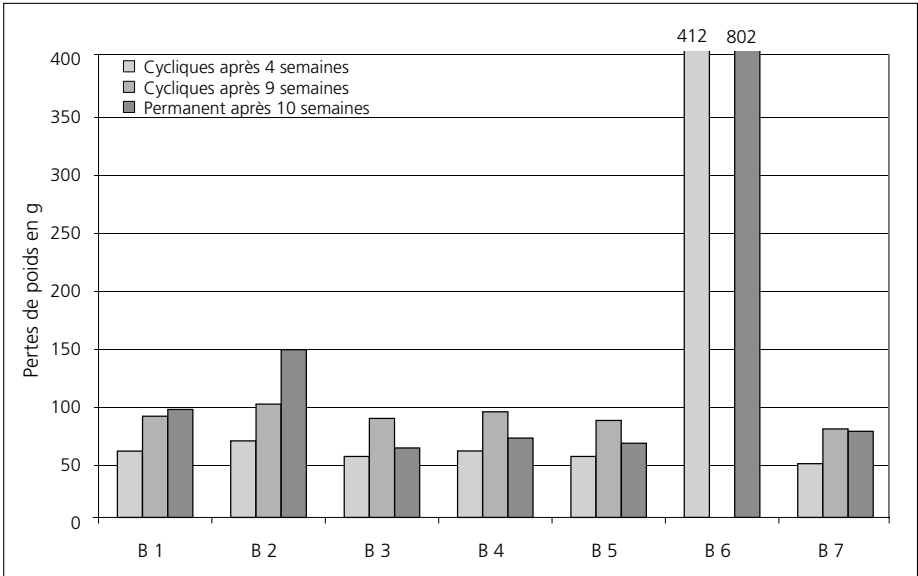


Fig. 5: Récapitulatif des résultats des essais 1, 2 et 3. Pertes de poids moyennes de sept types de béton différents, avec les deux procédés, immersion cyclique et immersion permanente dans le jus de fermentation.

bles pertes de poids (fig. 6) du béton bitumineux 2 (asphalte avec matrice en gravillons SMA) étaient dues essentiellement à l'adjuvant Trinidad (asphalte naturel), n'a pas été confirmée par les quatrième et cinquième essais. Ces essais n'ont pu mettre en évidence aucune différence significative entre les échantillons contenant du Trinidad (Bb 5) et ceux n'en contenant pas (Bb 4), que ce soit avec le procédé d'immersion cyclique ou avec celui d'immersion permanente (fig. 7).

La résistance élevée du revêtement spécial SMA est sans doute due à sa composition spécifique. En raison de la forte teneur en bitume, les cavités sont remplies de mastic d'asphalte, de sorte que la couche de couverture après le cylindrage ne contient qu'une très faible proportion d'espace vide. Les revêtements SMA peuvent uniquement être posés à l'aide de machines.

Comparaison entre le béton, le béton bitumineux et l'asphalte coulé

Une comparaison des pertes de poids dans les essais 1 à 3 montre (fig. 5 et 6) que les bétons bitumineux 1 (BA) et 3 (HMT) perdent quasiment autant de poids que les bétons 1, 3, 4, 5 et 7. Il ne faut cependant pas oublier que les bétons ont été fabriqués à partir de matériau cristallin pur, tandis que les granulats du béton bitumineux contenaient également du calcaire (environ 30%). Dans les essais 4 et 5, les granulats étaient constitués d'un mélange de roche cristalline et de calcaire, que ce soit pour le béton ou pour le béton bitumineux HMT. La différence entre le béton habituel (prélevé sur un chantier) et le béton bitumineux HMT est évidente. La perte de poids du béton bitumineux ne représente qu'environ 25% de celle du béton (fig. 7). La résistance chimique de l'asphalte coulé est environ deux fois supérieure à celle des bétons bitumineux 1 et 3 et à peu près égale à celle du béton bitumineux 2 (SMA) (fig. 6).

Le béton bitumineux est étanche à l'eau

Pendant toute la période d'observation (six semaines), la partie inférieure des trois échantillons est restée entièrement sèche. On peut donc en conclure que l'étanchéité du béton bitumineux est suffisante dans les silos couloirs, sachant que dans ce type de silos, seule une faible pression statique peut s'exercer en raison de la pente vers la rigole d'évacuation.

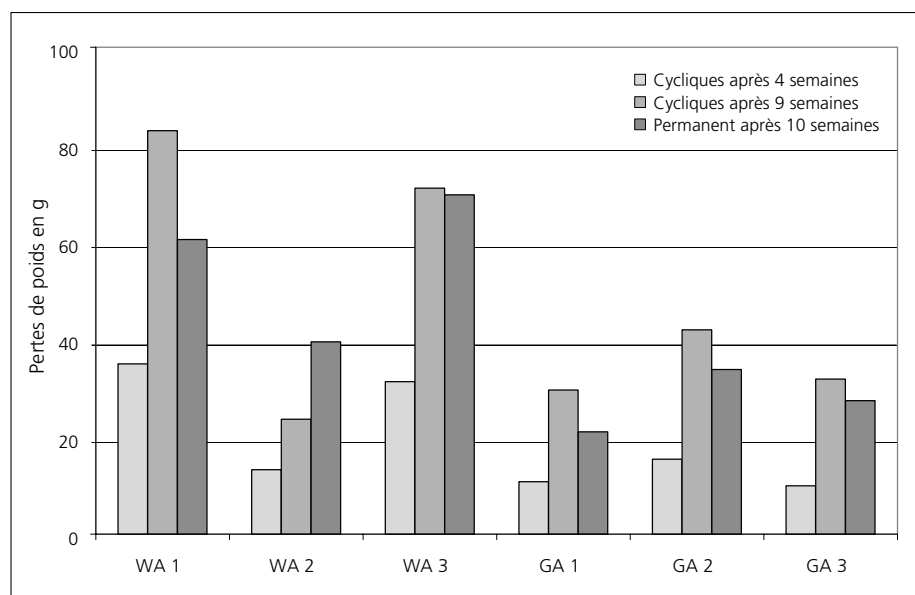


Fig. 6: Récapitulatif des résultats des essais 1, 2 et 3. Pertes de poids moyennes de trois types de béton bitumineux (Bb) et de trois types d'asphalte coulé (AC) avec les deux procédés, immersion cyclique et immersion permanente dans le jus de fermentation.

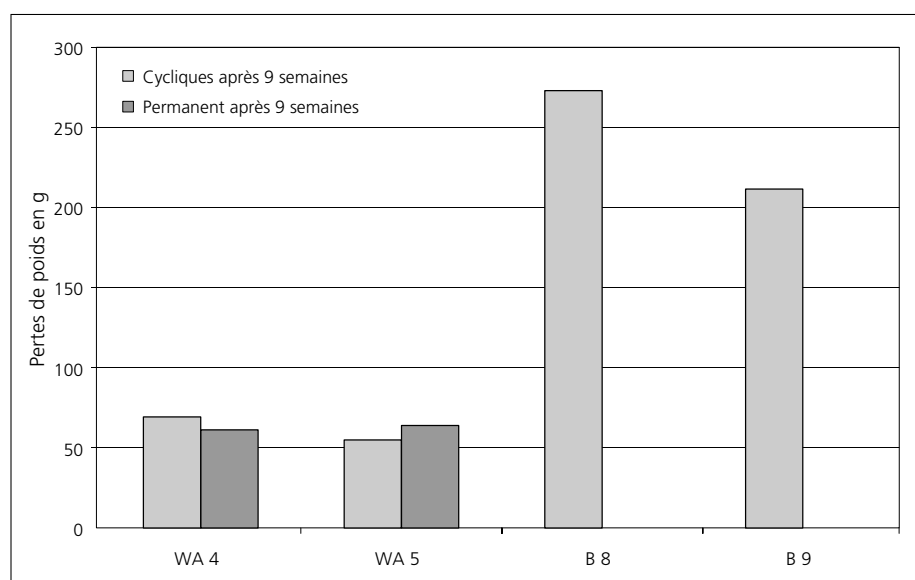


Fig. 7: Récapitulatif des résultats des essais 4 et 5. Pertes de poids moyennes de deux types de béton bitumineux (Bb) et de deux types de béton différents (B), avec les deux procédés, immersion cyclique et immersion permanente dans le jus de fermentation.

Etant donné que l'asphalte coulé ne présente pratiquement aucun pore en raison de l'excédent de bitume et de sa composition, son étanchéité à l'eau ne fait aucun doute.

L'asphalte ne présente aucun risque du point de vue physiologique

Selon les analyses du LFEM, les échantillons de fourrage en contact avec le sol et les échantillons sans contact avec le sol ne présentent pas de différences significati-

ves en ce qui concerne leurs teneurs en hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Sur la base des connaissances actuelles, la distribution aux animaux de rente d'aliments avec des valeurs si basses de HAP ne pose aucun problème. Il n'existe certes aucune limite supérieure concernant la teneur en HAP des aliments pour animaux. Les valeurs obtenues lors des analyses sont toutefois de l'ordre des indications figurant dans les ouvrages scientifiques sur les aliments pour animaux séchés artificiellement (Guidon 1999).

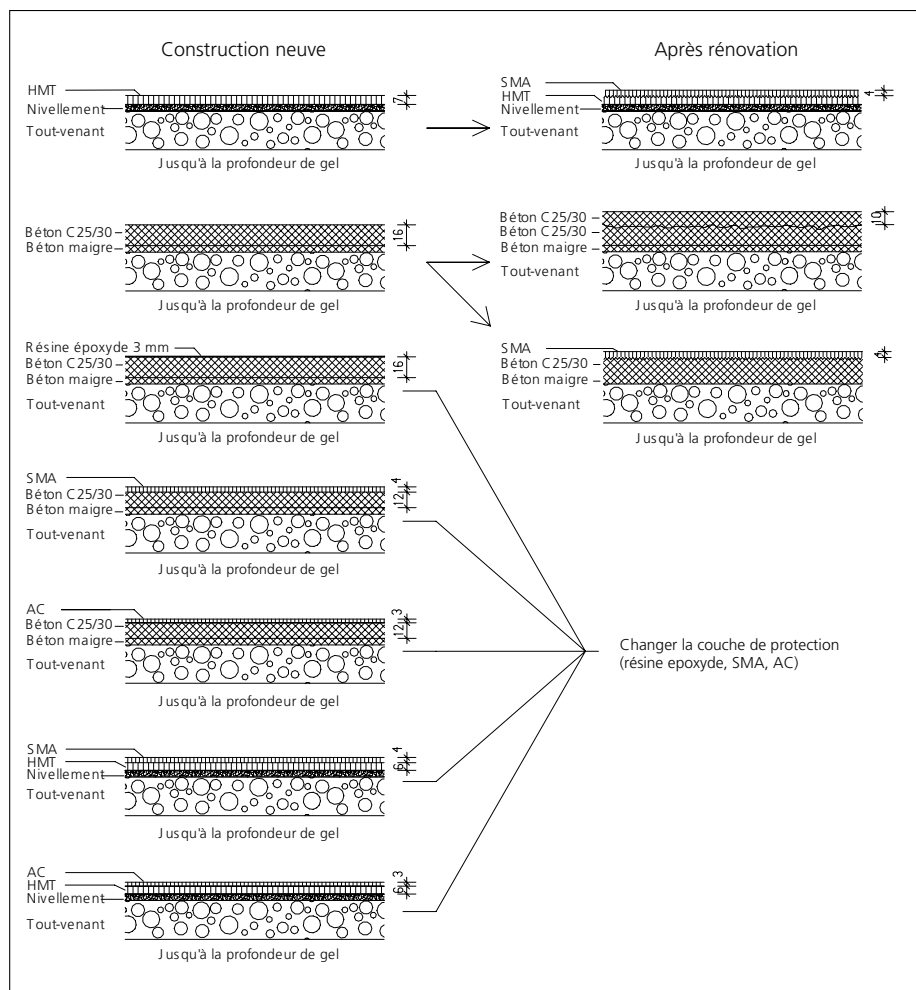


Fig. 8: Structure possible des revêtements de dalles de silos pour les constructions neuves et les réparations.

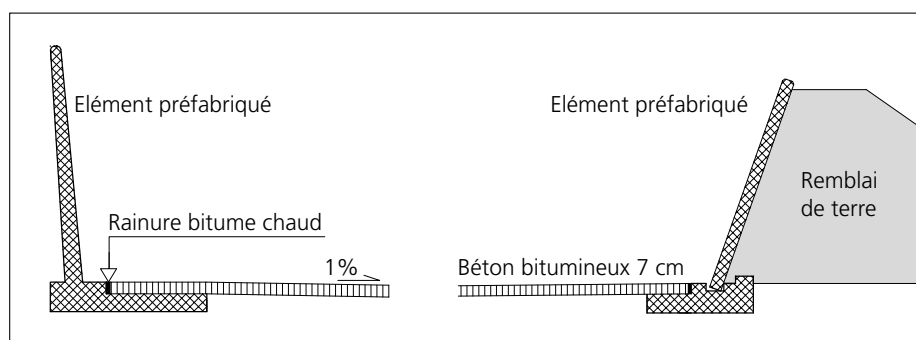


Fig. 9: Pour que la paroi et la dalle soient reliées de manière étanche, il est recommandé de ne pas arrêter le revêtement au pied de la paroi, mais de le faire passer par dessus. Élément préfabriqué dégagé à gauche et élément préfabriqué type Traunstein à droite.

Les analyses du LFEM portent sur des revêtements d'asphalte neufs. Bien qu'on n'utilise plus de goudron de nos jours, les nouveaux revêtements peuvent comporter une part de goudron provenant du recyclage de revêtements plus anciens (Hugener 1998). C'est pourquoi il est indispensable de renoncer à employer de l'asphalte recyclé dans les silos.

Aspects relatifs à la construction

Il existe plusieurs possibilités en ce qui concerne la structure des couches composant les dalles de silos (fig. 8). Chaque structure doit d'une part, résister aux contraintes imposées par les outils et les machines et

d'autre part, respecter les exigences en matière de protection des eaux.

Dans le cas de constructions neuves, les revêtements peuvent comporter une ou plusieurs couches. Les impératifs économiques ne sont pas les seuls en cause dans le choix de la structure du revêtement. Il faut également tenir compte des exigences liées à la construction et à l'organisation de l'exploitation. Une dalle en béton bitumineux implique que les parois du silo n'aient pas besoin d'être ancrées dans la dalle pour assurer leur stabilité. Il s'agit alors soit de parois indépendantes (éléments préfabriqués sur pieds en forme de L ou de T), soit de parois appuyées sur un remblai (silo type Traunstein). Ces derniers exigent la construction de chaque côté d'une bande en béton avec rainure. Pour que la paroi fasse corps avec la dalle, il est recommandé de faire en sorte que le revêtement recouvre une partie du pied de la paroi et non uniquement l'espace situé entre les deux parois. A cet endroit précis, le pied de la paroi en béton est moins épais de 7 cm (correspondant à l'épaisseur du revêtement) (fig. 9). Pour soulager les joints latéraux, le revêtement affiche une pente en direction du centre dans le sens transversal. Les expériences pratiques montrent que la liaison entre la dalle et la paroi en béton présente le plus grand risque de non-étanchéité. Le joint dit TOK (couche de bitume élastique, 30 x 10 mm) qui est en général placé entre le béton et l'asphalte lors de la pose du revêtement, n'assure pas une étanchéité absolue. Il est recommandé de ne pas poser le béton bitumineux jusqu'à la paroi, mais de prévoir une rainure suffisamment large (environ 2 cm) entre la paroi et le revêtement. Une fois que le béton a refroidi et s'est rétracté, il convient de combler la rainure par du bitume chaud.

Si le choix porte sur une dalle en béton, celui-ci doit contenir si possible peu de granulats calcaires, présenter un faible rapport eau/ciment, être bien étanche et après sa mise en place, être protégé contre le dessèchement (couverture d'un film plastique ou arrosage) durant quatre à sept jours en fonction des conditions météorologiques.

Il existe deux possibilités pour rénover une dalle en béton. Première possibilité: on nettoie et retire tous les éléments qui se sont détachés de l'ancienne plaque. Puis, on pose un nouveau revêtement en béton suffisamment épais (environ 10 cm) sur l'ancien. Deuxième possibilité: l'ancien revêtement est fraisé en surface et recouvert d'une couche de 3 à 4 cm d'épaisseur de béton bitumineux (SMA) ou d'asphalte



Fig. 10: Le revêtement de résine époxyde (bandes) dans le silo-couloir de la FAT est encore intact au bout de sept ans.

coulé. Comme le fraisage en surface ne permet pas d'aplanir les irrégularités les plus importantes, il n'est pas possible de rénover un ancien revêtement en posant une mince couche de résine époxyde. Selon les indications du fabricant, pour rénover une dalle en béton recouverte dès le départ de résine époxyde, il devrait suffire de colmater la surface. Dans un premier temps, il faut préparer la surface en posant une couche de fond et d'agent adhésif. Les zones endommagées mécaniquement doivent éventuellement être améliorées.

Un revêtement de résine époxyde peut durer très longtemps dans la mesure où il n'est pas endommagé mécaniquement (fig. 10).

Lorsqu'il s'agit de rénover des revêtements de couleur noire (béton bitumineux ou asphalte coulé), l'ancien revêtement doit être enlevé en partie (couche de support) ou en totalité (couche de protection) à l'aide d'une fraise, avant de poser toute nouvelle couche de protection. Il est recommandé d'utiliser un revêtement SMA comme couche de protection.

Aspects économiques

Suivant la structure du revêtement, les investissements, la durée de vie de la dalle et les frais de réparation ne sont pas les mêmes (tab. 7).

Il est très difficile d'estimer la durée de vie du revêtement. Sur la base des résultats d'essais réalisés à la FAT et d'essais antérieurs, il faut s'attendre à ce que la dalle en béton non protégé soit attaquée nettement plus rapidement et plus violemment que les autres types de dalle. D'un autre côté, la dalle en béton est épaisse, ce qui veut dire que la perte de quelques centimètres ne remettra pas en cause sa portance et son imperméabilité à l'eau dans la mesure où elle ne présente pas de fissures. Le moment choisi pour les rénovations dépend non seulement de l'usure du revêtement, mais aussi des exigences que l'agriculteur pose à ce propos. Un revêtement rugueux est difficile à nettoyer et ne facilite pas l'évacuation du jus de fermentation, ce qui accélère encore sa destruction. Lorsque les animaux ont accès au silo (affouragement libre-service), les exigences liées à la qualité de la dalle sont encore plus élevées que si le silo sert uniquement au passage des machines pour l'ensilage et le désilage. Pour des raisons de simplicité, on est parti du principe que dans toutes les variantes, l'ensemble de l'installation avait une durée de vie de 25 ans. Au bout de 15 ans, la dal-

Tab. 7: Comparaison de sept variantes de dalles en béton

	Béton	Béton + Résine époxyde	Béton + SMA	Béton + AC	HMT	HMT + SMA	HMT + AC
Struct. du revêtement	Béton 16 cm	Résine époxyde Béton 16 cm	SMA 4 cm Béton 12 cm	SMA 4 cm Béton 12 cm	HMT 7 cm	SMA 4 cm HMT 6 cm	AC 3 cm HMT 6 cm
Durée de vie de toute l'installation	25	25	25	25	25	25	25
Rénovation au bout de 15 ans	Amélioration de la surface, nouvelle couche de béton 10 cm	Amélioration de la surface, nouveau revêtement	Passage de la fraise et changement de la couche de protection	Élimination et changement de la couche de protection	Passage de la fraise en surface et couche de protection 4 cm	Passage de la fraise et changement de la couche de protection	Élimination et changement de la couche de protection
Coût total ¹⁾ %	100	125	113	131	85	106	127
Coûts de mise en place Fr./m ²	95	155	118	133	80	108	128
Coûts de réparation ²⁾ Fr./m ²	10						
Coûts de rénovation ³⁾ Fr./m ²	56	20	59	Évaluation	59	59	74
Portance	Elevée	Elevée	Elevée	Elevée	Déformation possible en cas de charges élevées	Bonne	Bonne
Surface	Surface très attaquée au bout de peu de temps	Surface lisse, facilite le nettoyage	Bonne résistance chimique	Bonne résistance chimique	Surface attaquée au bout de peu de temps	Bonne résistance chimique	Bonne résistance chimique
Pertes de volume lors des rénovations	5 à 8% suivant la hauteur du silo	Pas de perte de volume	Pas de perte de volume	Pas de perte de volume	Pas de perte de volume	Pas de perte de volume	Pas de perte de volume
Prestations propres	Possibilité de construire la totalité de l'installation en prestations propres	Possibilité de construire la totalité de l'installation en prestations propres	Seule la couche de support (béton) peut être effectuée par l'exploitant lui-même	Seule la couche de support (béton) peut être effectuée par l'exploitant lui-même	Seules les fondations peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même	Seules les fondations peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même	Seules les fondations peuvent être effectuées par l'exploitant lui-même

¹⁾ Coût total au bout de 25 ans de mise en place, rénovation et réparation y comp. taux d'intérêt 4%.

²⁾ Coûts de réparation intermédiaires au bout de dix ans.

³⁾ Rénovation de la dalle au bout de 15 ans.

le est entièrement remise à neuf. Lorsque la dalle est en béton non protégé, on constate déjà au bout de quelques années, que la surface est très endommagée localement, surtout là où s'écoule le jus de fermentation. Il faut donc s'attendre à devoir effectuer des travaux de réparation avant la rénovation complète de la dalle.

Si l'on compare les coûts totaux (prix de l'entrepreneur) au bout de 25 ans (coûts de mise en place, réparation et rénovation avec un taux d'intérêt de 4%), on constate, comme on pouvait s'y attendre, que la variante la moins chère est celle où le revêtement est fait d'une seule couche. Si l'on part du prix de l'entrepreneur, un revêtement en béton bitumineux HMT de 7 cm est meilleur marché qu'une dalle en béton. En cas de mise en place par l'exploitant lui-même, le béton constitue cependant la solution qui permet de réduire les coûts au maximum. Pour des raisons de compactage, l'asphalte doit être posé par une entreprise spécialisée. En outre, les dalles en béton bitumineux composées d'une seule couche posent des exigences élevées en ce qui concerne la couche de fondation. Elle doit être suffisamment épaisse et plane, et être très compactée. Lorsqu'il y a plusieurs couches, les variantes avec asphalte coulé sont les plus chères. Le coût total de la dalle en béton avec revêtement en résine époxyde est presque

Tab. 8: Recommandations pour améliorer la durée de vie des dalles de silo en béton ou en asphalte

Mode de construction de la dalle	Recommandations
Dalle en béton	Béton catégorie C25/30 (300 à 325 kg de ciment Portland)
	Granulats cristallins, autant que possible
	Rapport eau/ciment < 0,5
	Après pose de la plaque en béton, couvrir d'un film plastique pendant trois à cinq jours
Béton bitumineux en une seule couche	Type: HMT au moins 7 cm
	Teneur élevée en bitume
	Granulats cristallins, autant que possible
	Ne pas utiliser d'asphalte recyclé
	Compacter et niveler parfaitement la couche de fondation
Béton bitumineux en plusieurs couches	Couche portante HMT, couche de protection SMA
	Granulats cristallins, autant que possible
	Ne pas utiliser d'asphalte recyclé dans la couche de protection

aussi important que celui de la variante en asphalte coulé (AC), malgré les frais de rénovation plus réduits. Cette situation est due aux frais de fabrication élevés au départ.

ce que le béton frais ne se dessèche pas pendant le procédé de durcissement. Le béton bitumineux et l'asphalte coulé perdent du poids nettement plus lentement que le béton, à condition que tous les deux soient composés des mêmes granulats.

Lorsque l'attaque du jus de fermentation est de longue durée, la fonction protectrice du bitume autour des granulats s'affaiblit. L'apport d'asphalte naturel Trinidad ou de bitume modifié avec des polymères n'augmente pas les capacités de résistance du matériau. La très bonne stabilité de l'asphalte avec matrice en gravillons par rapport aux autres variétés de béton bitumineux est due à sa teneur élevée en bitume. Le béton bitumineux bien compacté peut être considéré comme imperméable à l'eau à condition que le raccord entre la dalle et les parois ait été effectué par un spécialiste. L'asphalte ne présente aucun risque du point de vue physiologique à condition de ne pas utiliser de matériaux recyclés. Sur toute la durée de vie de la dalle, le béton bitumineux posé en une seule couche constitue la solution qui entraîne les frais globaux les plus réduits (calculés selon les prix de l'entrepreneur). D'un autre côté, le béton convient mieux si l'exploitant veut effectuer les travaux par lui-même. Pour la rénovation du béton proprement dit et du béton bitumineux, il est recommandé de poser une couche de protection en asphalte avec matrice en gravillons.

Recommandations

Suite aux essais, nous pouvons recommander d'utiliser le béton bitumineux comme alternative aux dalles de silo en béton. Quel revêtement convient le mieux? Béton ou asphalte? Cela dépend non seulement de la résistance chimique, mais aussi de la rentabilité économique et de la construction des parois. La pose d'un revêtement en asphalte implique que les parois n'aient pas besoin d'être ancrées dans la dalle pour assurer leur stabilité. Le béton bitumineux est la solution dont le coût global est le plus faible, mais présente un inconvénient: il ne peut être mis en place par l'exploitant lui-même. Il est possible d'influencer considérablement la durée de vie du béton et de l'asphalte (tab. 8). Pour le béton, comme pour l'asphalte, les granulats jouent un grand rôle en ce qui concerne la stabilité du revêtement. Il est recommandé si possible, de n'utiliser que des roches cristallines.

Conclusions

Les essais montrent clairement que le granulat calcaire ne convient pas du tout comme granulat pour le béton qui est en contact avec le jus de fermentation. La roche cristalline qui est sans aucun doute nettement plus résistante que le calcaire, est elle aussi attaquée par le jus de fermentation. Une grande partie de la perte de poids du béton est due à la destruction du granulat (cristallin). Par conséquent, le remplacement (partiel) du ciment Portland par des produits moins sensibles aux acides comme les cendres volantes, les fumées de silice ou les laitiers de haut fourneau ne peut réduire la destruction que de manière limitée. Les agents dispersants hydrophobes comme la Mowolith qui enrobent les granulés devraient empêcher que ces derniers soient en contact direct avec le jus de fermentation. L'essai montre toutefois que cette protection est insuffisante et qu'elle ne dure pas.

La stabilité chimique du béton peut être considérablement améliorée si l'on veille à

Explications des abréviations

AC	asphalte coulé
BA	béton asphalté
Bb	béton bitumineux
Cendres volantes	produit de combustion de la houille maigre
Fumées de silice	sous-produit de l'industrie du silicium
Granulats	sable, gravillons et graviers présents dans le béton ou dans l'asphalte
HAP	hydrocarbures aromatiques polycycliques
HMT	béton bitumineux pour couche de support
Laitier de haut fourneau	laitier finement broyé
PmB	bitume modifié avec des polymères
Rapport eau/ciment	rapport entre la quantité d'eau et de ciment
Roche cristalline	granit et gneiss
SMA	asphalte avec matrice en gravillons

Bibliographie

Guidon B., 1999. Stellungnahme zu den PAH in Futtermitteln. Mitteilung vom 12. November 1999.

Hugener M., 1998. Recycling von Strassenbelägen – ein Umweltproblem? *Chimia* 52, Nr. 5.

Weber A., 1998. Regelungen – national und international. Informationstag PAH EAWAG, November 1998.

Weydert M., 1998. Etude de la résistance chimique du béton, du béton bitumineux et de l'asphalte coulé aux acides organiques. Diplomarbeit. Universität B-Gembloux.

Des demandes concernant les sujets traités ainsi que d'autres questions de technique et de prévention agricoles doivent être adressées aux conseillers cantonaux en machinisme agricole indiqués ci-dessous. Les publications peuvent être obtenues directement à la FAT (CH-8356 Tänikon). Tél. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90,
E-Mail: info@fat.admin.ch, Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat>

BE	Furer Willy, Ecole d'Agriculture, 2732 Loveresse	Tél. 032 481 42 71
FR	Berset Roger, Institut agricole, 1725 Grangeneuve	Tél. 026 305 58 49
GE	AGCETA, 15, rue des Sablières, 1217 Meyrin	Tél. 022 341 35 40
JU	Knobel Beat, Institut agricole, 2852 Courtemelon	Tél. 032 420 74 39
NE	Bendel Etienne, SNVA, 2053 Cernier	Tél. 032 854 05 30
TI	Müller Antonio, Office de l'Agriculture, 6501 Bellinzona	Tél. 091 814 35 53
VD	Patrick Munier, Ecole d'Agriculture, Marcelin, 1110 Morges	Tél. 021 801 14 51
	Hofer Walter, Ecole d'Agriculture, Grange-Verney, 1510 Moudon	Tél. 021 995 34 57
VS	Roduit Raymond, Ecole d'Agriculture, Châteauneuf, 1950 Sion	Tél. 027 606 77 70
SRVA	Mouchet Pierre-Alain, CP 128, 1000 Lausanne 6	Tél. 021 619 44 61
SPAA	Grange-Verney, 1510 Moudon	Tél. 021 995 34 28

Les «Rapports FAT» paraissent environ 20 fois par an. Abonnement annuel: Fr. 50.—. Commandes d'abonnements et de numéros particuliers: FAT, CH-8356 Tänikon. Tél. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90.
E-Mail: info@fat.admin.ch – Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat>
Les Rapports FAT sont également disponibles en allemand (FAT-Berichte).– ISSN 1018-502X.