



Traitement des sols aux liants hydrauliques.

Application à la réalisation des couches de base



Sommaire

1	Traitement des sols	11
1.1	Définitions	12
1.1.1	Définitions selon RStO 12	12
1.1.2	Termes et réglementations du traitement des sols	14
1.1.3	Relation entre les réglementations et les différentes couches concernées	16
1.2	Définitions des termes du traitement des sols	18
1.2.1	Stabilisation des sols	18
1.2.2	Amélioration des sols	18
1.2.3	Amélioration des sols renforcée	18
1.2.4	Couches de base traitées aux liants hydrauliques	18
1.3	Études géotechniques	19
1.3.1	Généralités	19
1.3.2	Description des types de sols selon DIN EN ISO 14688-1 (anciennement 4022, partie 1)	19
1.3.3	Classification des sols selon DIN 18196	20
1.3.3.1	Groupes de sols	20
1.3.3.2	Principe de la classification des sols	21
1.3.3.3	Sols à gros grains	22
1.3.3.4	Sols à grains mixtes	22
1.3.3.5	Sols à grains fins	22
1.3.3.6	Sols organogènes et organiques	22
1.3.3.7	Illustration	23
1.3.3.8	Classification des sols selon leurs caractéristiques plastiques	24
1.3.3.8.1	Détermination de la consistance	24
1.3.3.8.2	Diagramme de plasticité pour le classement des types de sols à grains fins	25
1.3.3.9	Classification des sols selon DIN 18196	26
1.4	Sensibilité au gel des sols et des roches de résistance variable	30
1.4.1	Classification des groupes de sols selon leur sensibilité au gel	30
1.4.2	Sensibilité au gel après amélioration des sols aux liants	31
1.5	Application	32
1.5.1	Amélioration des sols	32
1.5.2	Amélioration des sols renforcée	32
1.5.2.1	Réduction de l'épaisseur du corps de chaussée grâce à une amélioration de sol renforcée	34

1.5.2.2	Exigence requise pour une amélioration de sol renforcée	35
1.5.3	Stabilisation des sols	36
1.5.3.1	Stabilisation des sols sans imputation au corps de chaussée	36
1.5.3.2	Stabilisation des sols avec imputation au corps de chaussée	37
1.5.3.3	Extrait du tableau 1 de RStO 12	38
1.5.3.4	Extrait du tableau 2 de RStO 12	40
1.6	Principes applicables au terrassement	42
1.6.1	Compactage	42
1.6.2	Exigences requises pour le compactage du sol support et de la couche de forme	42
1.6.3	Exigences requises pour la plate-forme support de chaussée	43
1.6.4	Module de déformation sur la plate-forme support de chaussée (quantile minimum 10 %)	44
1.6.5	Exigences requises pour les indices de compactage	45
1.7	Contrôle qualité	46
1.7.1	Essais préalables à l'exécution des travaux	46
1.7.1.1	Essais effectués par le donneur d'ordre	46
1.7.1.2	Essais effectués par le maître d'œuvre	46
1.7.1.3	Réglementations de contrôle applicables aux essais d'aptitude	49
1.7.2	Essais en cours d'exécution des travaux	50
1.7.2.1	Type et ampleur des essais dans le cadre du traitement des sols	50
1.7.2.2	Méthodes et procédures d'essai	52
1.7.2.2.1	Méthodes d'essai pour le contrôle des indices de compactage	53
1.7.2.2.2	Procédure d'essai pour le calcul des indices de compactage	54
1.7.2.2.3	Contrôle du module de déformation, de l'épaisseur selon le profil voulu et de la planéité sur la plate-forme support de chaussée	57
1.8	Aptitude des sols et matériaux minéraux au traitement des sols	58
1.8.1	Sols aptes (selon DIN 18196)	58
1.8.2	Sols (selon DIN 18196) et matériaux partiellement aptes	58
1.8.3	Sols non aptes	58
1.8.4	Granulats naturels et artificiels et matériaux recyclés	59
1.8.5	Influence des sulfates	59
1.9	Liants	60
1.9.1	Généralités	60

Sommaire

1.9.2	Types de liants	60
1.9.3	Action des liants	60
1.9.3.1	Chaux	60
1.9.3.2	Ciments	62
1.9.3.3	Liants mixtes	62
1.9.4	Liants à caractéristiques particulières	63
1.9.4.1	Liants à émission réduite de poussière	63
1.9.4.2	Liants hydrophobes	63
1.9.5	Domaines d'application des liants	64
1.9.6	Temps de traitement des liants	66
1.9.7	Temps de réaction des liants	66
1.10	Eau	68
1.11	Influences météorologiques	70
1.11.1	Précipitations	70
1.11.2	Vent	70
1.11.3	Température	71
1.12	Traitements des sols – Exécution des travaux	72
1.12.1	Procédés de mélange	72
1.12.2	Adjonction de liant sans poussière	72
1.12.3	Mixed-in-Place (procédé de mélange en place)	74
1.12.3.1	Principes du procédé de mélange en place (pour tous les domaines du traitement des sols)	74
1.12.4	Exigences requises pour le traitement des sols	80
1.12.4.1	Quantité de liant	80
1.12.4.2	Indices de compactage	80
1.12.4.3	Justification de la quantité de liant	82
1.12.4.4	Surface	82
1.12.4.5	Planéité	82
1.12.4.6	Épaisseur de pose	82
1.13	Travaux de remblaiement	84
1.13.1	Définitions	84

1.13.2	Matériaux	84
1.13.2.1	Zone de drainage	84
1.13.2.2	Zone de remblai et de recouvrement	84
1.13.3	Compactage	85
1.14	Remplissage de tranchées de canalisation	86
1.14.1	Généralités	86
1.14.2	Incorporation du liant	86
1.14.3	Compactage	86
2	Couches de base traitées aux liants hydrauliques	91
2.1	Généralités	91
2.2	Terminologie	92
2.3	Couches de base traitées aux liants hydrauliques selon ZTV Beton-StB et stabilisation des sols selon ZTV E-StB	93
2.4	Principes de réalisation	94
2.4.1	Généralités	94
2.5	Essais – Définitions	95
2.5.1	Essai initial (essai d'aptitude)	95
2.5.2	Contrôle de production interne	95
2.5.3	Essai d'auto-contrôle	97
2.5.4	Essai de contrôle	97
2.6	Matériaux	98
2.6.1	Sols et granulats pour couches stabilisées	98
2.6.2	Granulats et mélanges granulaires pour couches de base traitées aux liants hydrauliques	99
2.6.3	Granulats et mélanges granulaires pour couches de base en béton	102
2.6.4	Liants hydrauliques	103
2.6.5	Eau	104
2.6.6	Additifs/adjuvants pour béton	104
2.7	Exigences requises pour les couches de base traitées aux liants hydrauliques	105
2.7.1	Dimensionnement	105
2.7.2	Corps de chaussée traité au liant	105

Sommaire

2.7.3	Épaisseurs de pose minimum	105
2.7.3.1	Couches stabilisées	105
2.7.3.2	Couches de base traitées aux liants hydrauliques	105
2.7.3.3	Couches de base en béton	106
2.7.4	Réalisation des bordures des couches de base	106
2.7.4.1	Informations détaillées sur la réalisation des bordures	107
2.7.5	Drainage des couches de base	108
2.7.6	Exécution à basse et haute température, et en cas de gel	108
2.7.7	Épaisseur selon le profil voulu	108
2.7.8	Planéité	108
2.7.9	Tolérances d'épaisseur de pose	109
2.7.10	Entailles ou joints	109
2.7.11	Traitement ultérieur	110
2.7.11.1	Tableau synoptique des exigences requises pour les couches de base traitées aux liants hydrauliques selon ZTV Beton-StB	112
2.8	Réalisation des couches stabilisées	114
2.8.1	Exigences requises pour les enrobés pour couches stabilisées	114
2.8.2	Production	114
2.8.3	Procédé de mélange en place	114
2.8.4	Procédé de mélange en centrale	115
2.8.5	Pose et compactage	116
2.8.6	Exigences requises pour le taux de compactage	116
2.9	Réalisation des couches de base traitées aux liants hydrauliques	117
2.9.1	Exigences requises pour l'enrobé	117
2.9.2	Production, transport et pose	117
2.9.3	Exigences requises pour la couche terminée	118
2.10	Type et ampleur des essais	119
2.10.1	Essai initial sur couches stabilisées	119
2.10.2	Essai initial sur couches de base traitées aux liants hydrauliques	121
2.10.3	Essais d'auto-contrôle et de contrôle sur couches stabilisées	122
2.10.4	Essais d'auto-contrôle et de contrôle sur couches de base traitées aux liants hydrauliques	124

2.10.5	Essais d'auto-contrôle et de contrôle sur couches de base en béton	125
2.11	Valorisation des granulats d'enrobé de récupération et des matériaux de récupération à base de poix dans les couches de base traitées aux liants hydrauliques	
2.11.1	Généralités	126
2.11.2	Matériaux de base – Granulats	126
2.11.3	Adjuvants	126
2.11.4	Stockage des matériaux de récupération à base de poix	127
2.11.5	Mélanges granulaires	127
2.11.6	Exigences	127
2.11.7	Essai initial	127
	Bibliographie	128
	Réglementations techniques	129

1.6 Principes applicables au terrassement

1.6.1 Compactage

Au début des travaux de compactage, le maître d'œuvre doit procéder à des essais pratiques afin de prouver que les exigences requises en termes de compactage seront satisfaites.

L'épaisseur du recouvrement (ou l'épaisseur maximum de la couche améliorée) doit être dimensionnée de façon à atteindre la compacité prescrite sur toute l'épaisseur de la couche.

Les zones de talus sont soumises à des conditions particulières en termes de compactage ou d'exécution des travaux, ce qui peut avoir des répercussions sur la largeur de recouvrement d'une digue lors d'une stabilisation des sols ou d'une stabilisation du corps de chaussée.

Pour la pose de matériaux sensibles aux intempéries, les surfaces de recouvrement doivent être mises en place avec un dénivélé d'au moins 6 %.

1.6.2 Exigences requises pour le compactage du sol support et de la couche de forme

Le sol support ou la couche de forme des routes et chemins doivent être compactés de façon à remplir les exigences suivantes : quantile minimum

de 10 % pour le taux de compactage D_{Pr} ou quantile maximum de 10 % pour la teneur en air occlus n_a .

Zone	Groupes de sols	D_{Pr} en %	n_a en % volumique
Plate-forme support de chaussée jusqu'à 1,00 m de profondeur pour les digues, plate-forme support de chaussée jusqu'à 0,50 m de profondeur pour les tranchées	GW, GI, GE SW, SI, SE GU, GT, SU, ST	100	–
1,00 m en dessous de la plate-forme de chaussée jusqu'à l'assise de la digue	GW, GI, GE SW, SI, SE GU, GT, SU, ST	98	–
Plate-forme support de chaussée jusqu'à l'assise de la digue, plate-forme support de chaussée jusqu'à 0,50 m de profondeur pour les tranchées	GU*, GT*, SU*, ST* U, T, OU ¹⁾ , OT ¹⁾	97	12 ²⁾

¹⁾ Ces exigences ne s'appliquent aux groupes de sols OU et OT que si leur aptitude et les conditions de pose ont fait l'objet d'une étude particulière et ont été déterminées en accord avec le donneur d'ordre.

²⁾ Si les sols ne font pas l'objet d'une stabilisation ou d'une stabilisation renforcée, l'exigence du quantile maximum de 10 % pour la teneur en air occlus est recommandée
· en cas de pose de sols à grains mixtes et à grains fins sensibles à l'eau de 8 %vol,
· en cas de pose de roches de résistance variable de 6 %vol.
Cette information doit être mentionnée dans le cahier des charges.

1.6.3 Exigences requises pour la plate-forme support de chaussée

La plate-forme support doit être réalisée selon le profil voulu tout en étant plane et portante.

Exigences en termes de précision du profil :

Écart ± 3 cm par rapport à la hauteur de consigne

± 2 cm s'il est prévu de poser une couche de base liée par dessus

Le dévers de la plate-forme support de chaussée doit être :

$\geq 4,0$ % en cas de sols et de matériaux sensibles à l'eau

$\geq 2,5$ % après un traitement des sols aux liants

La réduction du dévers après un traitement des sols permet de réaliser d'énormes économies potentielles en ce qui concerne le matériau du corps de chaussée.

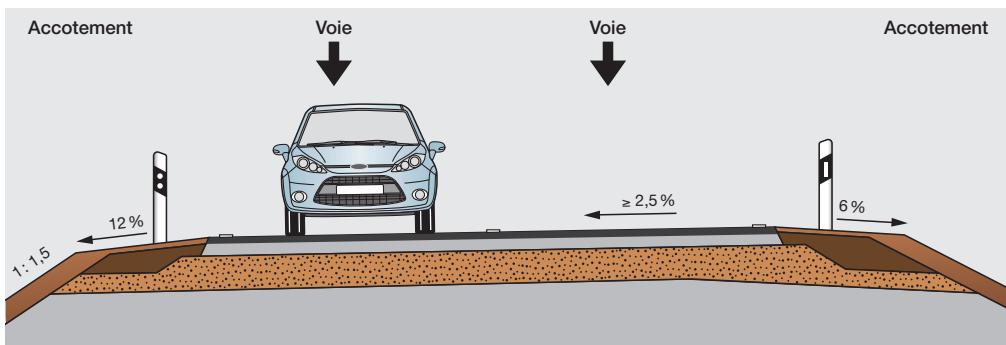
Exemple : $q_{\text{Chaussée}} = 2,5$ %

$q_{\text{Plate-forme support de chaussée}} = 4,0$ %

Largeur de la plate-forme support de chaussée = 6,00 m

→ **Économie : env. $0,30 \text{ m}^3/\text{m}$**

Il est nécessaire de prévoir une contre-pente pour la plate-forme support de chaussée sur le bord le plus élevé de la chaussée.



La formation des bords lors d'un traitement des sols réalisé au niveau de la plate-forme support de chaussée exige le cas échéant – selon la technique des machines ou de la mise en œuvre – des travaux de surprofilage dans le cas de digues.

1.12 Traitement des sols – Exécution des travaux

1.12.1 Procédés de mélange

On distingue généralement entre deux procédés de mélange pour la production du mélange sol-liant.

> **Mixed-in-Plant (procédé de mélange en centrale)**

Si, pour des raisons techniques ou de rentabilité, le procédé de mélange en place est impossible (par exemple présence de cheminées de visite, tracés de routes, élargissement de routes, aires de chantiers, fossés, etc.), il est possible de poser un mélange sol-liant produit selon le procédé de mélange en centrale.

La production d'un mélange sol-liant selon le procédé de mélange en centrale dans le cadre du traitement des sols n'est généralement pas rentable.

> **Mixed-in-Place (procédé de mélange en place)**

Le procédé de mélange en place est le procédé de pose le plus courant pour le traitement des sols.

Le malaxeur roule sur la couche préparée pour le traitement de sol et incorpore le liant appliqué au préalable ainsi que la quantité d'eau éventuellement requise.

Pour ce qui concerne l'enchaînement des différentes étapes, différentes variantes sont possibles selon le lieu de prélèvement et le chantier de pose.

> **Forme spéciale**

S'il est impossible de mettre en œuvre un malaxeur sur le chantier de pose (dans le cas d'élargissements de chaussée, de remplissage de tranchées de canalisation, à proximité de localités où il faut éviter les dispersions de liant, etc.), la répartition et l'incorporation du liant peut avoir lieu dans la zone d'enlèvement. Le mélange sol-liant est ensuite transporté sur le chantier, puis posé et compacté.

1.12.2 Adjonction de liant sans poussière

Intégré en option aux WR 240, WR 240 i ou WR 250, l'épandeur de liant «S-Pack» (Spreader-Pack) permet un épandage de liant sans poussière dans les travaux de recyclage à froid et de stabilisation de sol. Régulé par microprocesseur, il répand de la chaux ou du ciment directement devant le rotor de fraisage et de malaxage. C'est en particulier sur les chantiers d'autoroutes, dans les zones industrielles et commerciales aux réglementations strictes en termes d'émissions, dans les zones résidentielles ou encore dans les parcs naturels, que l'épandeur intégré «S-Pack»

permet d'assurer un traitement du liant en toute fiabilité et surtout sans formation de poussière. Le remplissage complet de l'épandeur s'effectue en moins de cinq minutes, et il suffit de deux heures au «S-Pack» pour vider un camion-silo courant de 27 tonnes. L'utilisation et la surveillance du processus d'épandage s'effectuent de manière intuitive depuis l'écran de contrôle. L'extrême manœuvrabilité tout terrain de la série WR permet une application de liant précise et fiable là où les lourds épandeurs de liant automoteurs ne peuvent plus être utilisés.



2.2 Terminologie

Selon la technologie, le matériau de départ et le procédé de mélange, les couches de base traitées aux liants hydrauliques se divisent en

> Couche stabilisée aux liants hydrauliques

La stabilisation des sols est un procédé de construction permettant d'augmenter la résistance des couches de base non liées aux sollicitations dues à la circulation et au climat. Le mélange granulaire est compacté ultérieurement. On ajoute aux sols ou aux mélanges granulaires des liants hydrauliques et de l'eau selon un procédé de mélange en place ou en centrale.

- Procédé de mélange en place

Le malaxeur roule sur la couche préparée en vue d'être stabilisée ; il la scarifie et y incorpore le liant hydraulique prévu ainsi que la quantité d'eau nécessaire.

- Procédé de mélange en centrale

Le sol ou le mélange granulaire est mélangé au liant prévu et à l'eau (addition d'eau) dans des centrales stationnaires, puis acheminé sur le chantier pour y être posé.

> Couches de base liées aux liants hydrauliques

(HGT, fabriquées uniquement selon le procédé de mélange en centrale)

Les couches de base liées aux liants hydrauliques sont constituées de mélanges granulaires concassés et/ou non concassés et de liants hydrauliques. La distribution granulométrique doit être comprise dans la plage granulaire définie. L'enrobé doit être fabriqué dans des centrales d'enrobage.

> Couches de base en béton

Les couches de base en béton sont des couches de base en béton selon DIN EN 206-1 et DIN 1045-2.



2.3 Couches de base traitées aux liants hydrauliques selon ZTV Beton-StB et stabilisation des sols selon ZTV E-StB

Épaisseur des couches de base traitées aux liants hydrauliques selon ZTV Beton-StB				Épaisseur de la couche stabilisée dans le sol support ou la couche de forme selon ZTV E-StB	
Couche de surface en enrobé Couche de base en enrobé	Couche de surface en béton	Pavage	Corps de chaussée en béton	Couche de surface en enrobé Couche de base en enrobé	Couche de surface en béton

Matériau non geléf (posé ou déjà en place)

Couches de base traitées aux liants hydrauliques

Couche stabilisée du sol support ou de la couche de forme

Sol support (sols des classes F2/F3)

Module de déformation sur la plate-forme support de chaussée $E_{2,2} \geq 45 \text{ MN/mm}^2$

Taux de compactage de la couche stabilisée $D_{Pr} \geq 98 \%$

2.6.3 Granulats et mélanges granulaires pour couches de base en béton

Granulats décrits au paragraphe 2.6.2, granulats et mélanges granulaires pour couches de base liée aux liants hydrauliques, avec la restriction que le SFA approprié ne peut pas être utilisé comme

additif aux granulats, mais uniquement comme adjuvant. Les courbes granulométriques à respecter découlent des exigences des normes DIN EN 206-1 et DIN 1045-2 (cf. également annexe 8).



2.6.4 Liants hydrauliques

On utilise comme liants des ciments selon DIN EN 197 ou DIN 1164-10 conformément au tableau ou bien des liants hydrauliques pour sol

ou couche de base selon DIN 18506 (classes de rigidité 12,5 et 32,5).

Ciments courants	Désignation des ciments courants	Constituants principaux		
CEM I	Ciment Portland			
CEM II	Ciment Portland de haut fourneau	A/B	S	Sable de haut fourneau
	Ciment Portland à la fumée de silice	A	D	Fumée de silice
	Ciment Portland à la pouzzolane	A/B	P/Q	Pouzzolane
	Ciment Portland aux cendres volantes	A	V	Cendre volante
	Ciment Portland au schiste calciné	A/B	T	Schiste calciné
	Ciment Portland au calcaire	A	LL	Calcaire
CEM II-M	Ciment Portland composé	A	S-D, S-T, S-LL	
			S-P, S-V	
			D-T, D-L, D-P	
			D-V	
			T-LL	
			P-V, P-T, P-LL	
		B	V-T, V-LL	
			S-D, S-T, S-P	
			D-T, D-P	
			P-T	
CEM III	Ciment de haut fourneau	A	S	
		B	S	
CEM IV	Ciment de pouzzolane	B	P ¹⁾	
CEM V	Ciment composé	A	S-P ²⁾	

¹⁾ Uniquement valable pour le trass selon DIN 51043 comme constituant principal jusqu'à 40 %m max.

²⁾ Uniquement valable pour le trass selon DIN 51043 comme constituant principal