



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

en collaboration avec
CFF SA, Infrastructure
Génie civil

Directive

Édition 2007 V2.00

Dispositions pour garantir la durabilité des câbles de précontrainte dans les ouvrages d'art

ASTRA 12 010

ASTRA OFROU USTRA UVIAS

Impressum

Membres du groupe de travail

Schuler W.	(OFROU, président)
Abt L.	(Schmidt+Partner Bauingenieure AG, mandataire)
Büchler Dr. M.	(Société suisse de protection contre la corrosion SGK)
Elsener Dr. B.	(Institut für Baustoffkunde IfB – ETHZ)
Heimhalt M.	(CFF SA)
Lüpold K.	(Ass. suisse entr. de précontrainte VSV)
Matt P.	(Ingénieur conseil, expert)
Prongué F.	(Ass. suisse entr. de précontrainte VSV)
Reber J.-J.	(CFF SA)

Membres de la commission d'accompagnement

Lang T. P.	(CFF SA, président)
Bossart R.	(Ass. suisse entr. de précontrainte VSV)
Fischli F.	(Ass. suisse entr. de précontrainte VSV)

Éditeur

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers
Standards, recherche, sécurité
3003 Berne

CFF SA Infrastructure
génie civil
Schanzenstrasse 5
3000 Berne 65

Diffusion

La directive est téléchargeable gratuitement sur le site www.astra.admin.ch.
OFCL, vente publications fédérales, CH-3003 Berne, www.bbl.ch, art-n°: 806.322.f

© ASTRA 2007

Reproduction à usage non commercial autorisée avec indication de la source.

Avant-propos

La validité de la directive « *Dispositions pour garantir la durabilité des câbles de précontrainte dans les ouvrages d'art* » publiée en 2001 était limitée à cinq ans, soit jusqu'au 31.12.2006. Les conditions-cadre, qui ont évolué entre-temps, notamment l'introduction des nouvelles normes SIA 260 à 262:2003 ainsi que les expériences acquises dans la pratique et les résultats des nouvelles recherches, ont nécessité une révision de la directive en question.

La terminologie des normes SIA a été reprise. Remaniée, la présente directive complète ces normes ainsi que l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte par les exigences spécifiques de l'OFROU et des CFF.

Nous remercions ici les membres du groupe de travail et de la commission d'accompagnement pour leur précieux et minutieux travail.

Office fédéral des routes

Dr. Rudolf Dieterle
Directeur

CFF SA

Markus Barth
Chef Produits & systèmes

Avant-propos de l'édition 2001

La plupart des ponts du réseau des routes nationales et principales et une grande partie des ponts du réseau ferroviaire ont été construits en béton précontraint, et dans la majorité des cas, en précontrainte avec adhérence. La contribution de ces câbles est déterminante pour la sécurité structurale, pour l'aptitude au service et pour la durabilité de ces ouvrages.

Dans l'ensemble, cette technique de construction a fait ses preuves et s'est avérée très fiable. Néanmoins, un certain nombre de recherches a montré que, même en Suisse, un certain nombre de dégradations plus ou moins graves dues à la corrosion sont apparues sur des câbles de précontrainte et que d'autres cas ne peuvent pas être exclus. De plus, il n'est pas vraiment satisfaisant de ne pouvoir effectuer des contrôles non destructifs sur les câbles de précontrainte usuels avec gaines en acier.

Depuis quelque temps, on trouve sur le marché des dispositifs de précontrainte avec une protection anticorrosion améliorée (gaines en matières synthétiques et câbles isolés électriquement). Sur la base des expériences faites avec les tirants d'ancrage, l'isolation électrique des câbles peut être vérifiée de manière non destructive par des mesures de résistance électrique. En outre, l'utilisation de gaines en matières synthétiques apporte une amélioration du comportement à la fatigue.

La norme SIA 162 «Ouvrages en béton» (1989, resp. 1993) contient les réglementations relatives aux dispositifs de précontrainte. Elle rappelle à plusieurs reprises qu'il convient, selon les cas, de respecter d'autres exigences. La présente directive complète la norme SIA 162 dans la mesure où elle donne des précisions sur les exigences à satisfaire quant à la protection anticorrosion et les possibilités de contrôle pour les dispositifs de précontrainte utilisés dans la construction des ponts en béton précontraint placés sous la responsabilité de l'Office fédéral des routes et des Chemins de fer fédéraux.

La présente directive se base sur l'état actuel des connaissances techniques en la matière. Elle se veut de donner les bases pour collecter les expériences fiables effectuées avec cette méthode, et contribuer à une mise en pratique judicieuse et efficace. Elle s'adresse aux représentants des maîtres d'ouvrage, aux auteurs de projets, aux directions de travaux ainsi qu'aux exécutants.

Enfin, nous tenons tout particulièrement à remercier les membres du groupe de travail et les spécialistes d'avoir élaboré un document de qualité.

Office fédéral des routes Division Infrastructure routière

M. Egger
Vice-directeur

CFF SA / Management des installations Engineering constructions ferroviaires

Dr. U. Weidmann

Membres du groupe de travail jusqu'en 1998 :

C. Meuli	Office fédéral des routes, Berne (président)
Dr. B. Elsener	IBWK-ETHZ, Zurich (expert)
M. Grimm	VSL (Suisse) SA, Lyssach
M. Känzig	CFF SA, Berne
K. Lüpold	Ass. suisse entr. de précontrainte (VSV), Berne
P. Matt	Ingenieur-Beratung, Ittigen (expert)

Membres du groupe de travail dès 2000 :

W. Schuler	Office fédéral des routes, Berne (président)
Dr. B. Elsener	IBWK-ETHZ, Zurich (expert)
A. Gnägi	VSL (Suisse) SA, Lyssach
K. Lüpold	Ass. suisse entr. de précontrainte (VSV), Berne
P. Matt	Ingenieur-Beratung, Ittigen (expert)
Dr. M. Tschumi	CFF SA, Berne

Table des matières

	Impressum	2
	Avant-propos	3
	Avant-propos de l'édition 2001	4
1	Introduction	7
1.1	But	7
1.2	Norme de référence	7
1.3	Champ d'application	7
1.4	Entrée en vigueur et modifications	7
2	Terminologie	8
2.1	Principe	8
2.2	Degré de protection anticorrosion des câbles de précontrainte	8
3	Principes applicables dans l'élaboration du projet et son exécution	10
3.1	Choix de la catégorie de câble de précontrainte	10
3.2	Dispositifs de précontrainte	12
3.3	Surveillance des câbles de précontrainte de la catégorie c	12
4	Dispositions techniques	13
4.1	Généralités	13
4.2	Encombrement et mise en place des câbles de précontrainte	13
4.3	Dispositions techniques relatives à la mesure de la résistance électrique	13
5	Exécution	14
5.1	Généralités	14
5.2	Mise en place des câbles de précontrainte	14
5.2.1	Gainages et ancrages	14
5.2.2	Protection temporaire contre la corrosion	14
5.2.3	Injection	14
5.3	Examen des câbles de précontrainte de catégorie c	14
5.3.1	Mesures	14
5.3.2	Valeurs limites	15
5.3.3	Mesures à mettre en oeuvre si les valeurs limites ne sont pas réalisées	15
6	Tâches des différents intervenants	16
6.1	Principe	16
6.2	Responsables des études et de la direction des travaux	16
6.3	Responsables de l'exécution	16
	Annexes	17
	Glossaire	46
	Bibliographie	48
	Liste des modifications	49

1 Introduction

1.1 But

Les normes SIA 262:2003 et SIA 262/1:2003 réunissent les indications de base relatives aux dispositifs de précontrainte. Par ailleurs, la norme SIA 262/1 renvoie à la présente directive.

Sur la base des connaissances acquises depuis l'introduction de ces dispositifs de précontrainte, en particulier en ce qui concerne leur exécution, leur contrôle et leur surveillance, la présente directive apporte des compléments et des précisions aux normes mentionnées.

1.2 Norme de référence

La présente directive se base sur la norme SIA 262:2003, qui donne les indications essentielles sur la durabilité aux articles suivants :

- 2.4 Principes – Durabilité ;
- 3.4.2 Matériaux – Systèmes de précontrainte – Durabilité ;
- 4.3.8 Analyse structurale et dimensionnement – Vérification de la sécurité structurale – Fatigue ;
- 6.3 Exécution – Mise en oeuvre d'acier et d'unités de précontrainte ;
- 6.5 Exécution – Précontrainte.

1.3 Champ d'application

La présente directive s'applique à l'utilisation de câbles de précontrainte avec adhérence. Elle a valeur contraignante pour tous les ouvrages routiers financés par la Confédération ainsi que pour tous les ouvrages d'art dans le domaine de compétence des CFF SA.

1.4 Entrée en vigueur et modifications

La présente directive « *Dispositions pour garantir la durabilité des câbles de précontrainte dans les ouvrages d'art* » entre en vigueur le 01.09.2007. La « Liste des modifications » se trouve à la page 49.

2 Terminologie

2.1 Principe

En principe, il convient de se référer aux notions et définitions des normes SIA 262 et 262/1. La présente directive s'applique seulement en relation avec les normes SIA et l'Agrément technique suisse (STA = Swiss Technical Approval) des systèmes de précontrainte.

On reprendra par analogie dans l'application de la présente directive les versions révisées des normes mentionnées.

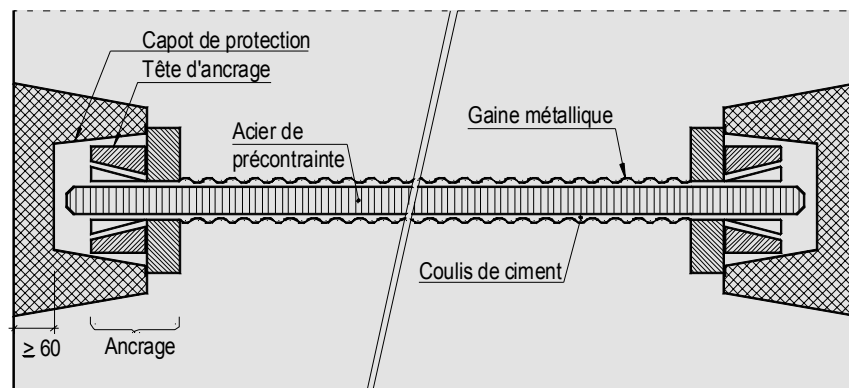
2.2 Degré de protection anticorrosion des câbles de précontrainte

En vertu de la norme SIA 262:2003, chiffre 3.4.2.2, les câbles de précontrainte se répartissent en trois catégories a, b, c selon leur mode de protection contre la corrosion (voir le schéma de la fig. 2.1) :

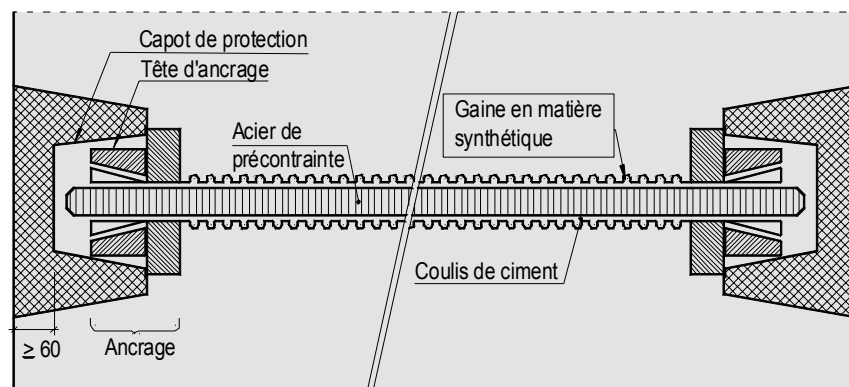
- Catégorie a : câble de précontrainte avec gaine métallique ;
- Catégorie b : câble de précontrainte avec gaine en matière synthétique ;
- Catégorie c : câble de précontrainte isolé électriquement avec gaine en matière synthétique.

Pour les câbles de précontrainte de la catégorie c, l'étanchéité de la gaine, et par là l'effet de protection contre la corrosion, peut être évaluée par mesure de l'impédance (mesure de la résistance électrique en courant alternatif entre l'acier de précontrainte et le gainage, désignée dans la suite par souci de simplification comme mesure de résistance électrique).

Catégorie a:



Catégorie b:



Catégorie c:

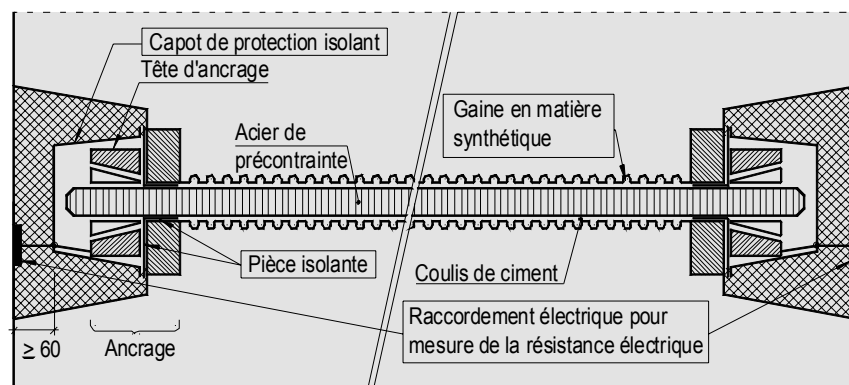


Fig. 2.1 Représentation schématique des catégories de câbles de précontrainte a, b et c.

3 Principes applicables dans l'élaboration du projet et son exécution

3.1 Choix de la catégorie de câble de précontrainte

Le choix de la catégorie de câble de précontrainte doit être effectué sur la base des critères suivants :

- Genre d'utilisation (pont route, pont rail ou pont pour trafic combiné) ;
- Exigence d'un moyen de surveillance de l'étanchéité de l'enveloppe ;
- Nature et intensité des agressions, par ex. sels de déverglaçage, courants vagabonds, fatigue ;
- Exposition des câbles de précontrainte aux actions agressives, resp. proximité ;
- Protection technique de l'ouvrage et des armatures. Par exemple présence d'une étanchéité sur le tablier ou absence de protection (p. ex. parois porteuses précontraintes des ponts en auge).

Etant donné que, dans le cas des câbles de précontrainte de la catégorie c, les exigences dépendent du type de danger, on distingue les trois critères principaux suivants :

- surveillance ;
- fatigue ;
- courant vagabond.

L'annexe I (§1.2) renferme des indications détaillées pour le classement des câbles de précontrainte dans les trois critères principaux.

Le choix doit être effectué séparément pour les câbles de précontrainte longitudinaux (direction principale de charge), pour les câbles de précontrainte d'entretoises et pour les câbles de précontrainte transversaux (dalles de tabliers) conformément au diagramme de flux de la fig. 3.1.

Le choix de la catégorie de câble de précontrainte et, le cas échéant, du critère principal doit intervenir au moment de l'établissement de la convention d'utilisation et de la base du projet.

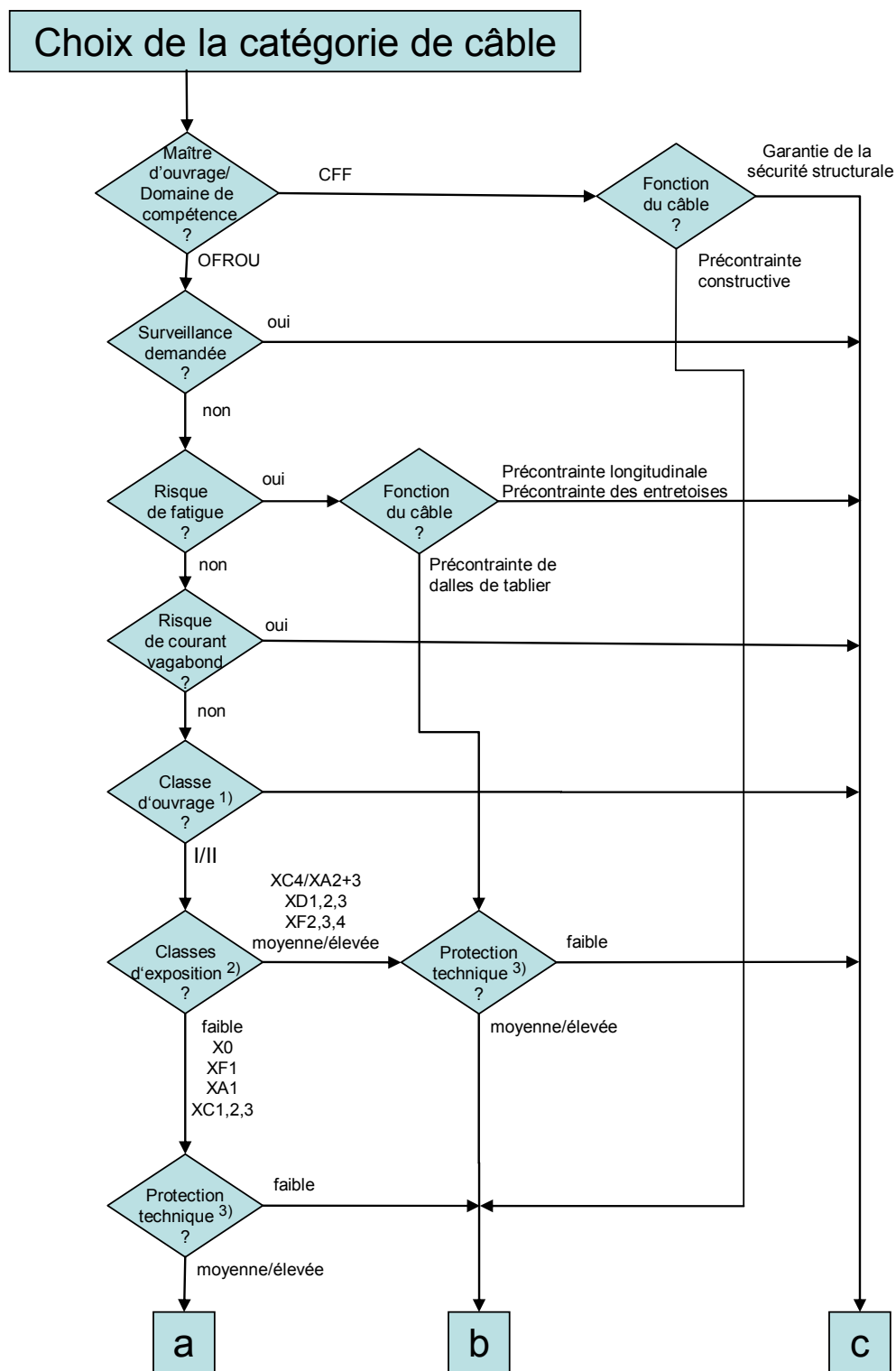


Fig. 3.1 Diagramme de flux pour le choix de la catégorie de câble de précontrainte.

¹⁾ selon SIA 261, tableau 26.

²⁾ selon SIA 262, tableau 1 et directive OFROU : Elaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales, annexe 6.

³⁾ selon directive OFROU : Elaboration des projets et construction des ouvrages d'art des routes nationales, annexe 6.

3.2 Dispositifs de précontrainte

Seuls peuvent être utilisés des dispositifs de précontrainte bénéficiant d'un Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte pour la catégorie correspondante de câbles de précontrainte.

3.3 Surveillance des câbles de précontrainte de la catégorie c

La surveillance des câbles de la catégorie c doit être effectuée pendant leur exécution et périodiquement pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage (cf. §1.4, p.24).

L'étendue et le déroulement des mesures de résistance sont à fixer :

- dans le plan de contrôle et le plan d'essais pour la phase de construction ;
- dans le plan de surveillance pour la phase d'utilisation.

4 Dispositions techniques

4.1 Généralités

Lorsqu'un ouvrage comporte des câbles de précontrainte, il faut, déjà au début de sa planification, créer les conditions initiales propices à une réalisation technique parfaite.

S'agissant de la catégorie c, on privilégiera des câbles de précontrainte plutôt courts et sans couplages. Des câbles très longs (en particulier passant par plusieurs points hauts) et/ou des câbles de précontrainte accouplés :

- sont difficiles à surveiller ;
- présentent une plus grande probabilité de défauts d'isolation ;
- sont plus sensibles aux courants vagabonds.

4.2 Encombrement et mise en place des câbles de précontrainte

Dans les zones critiques, caractérisées par une forte concentration d'armatures et de câbles de précontrainte, l'auteur du projet est tenu de démontrer graphiquement que la mise en place des éléments sera possible compte tenu des tolérances. La mise en place de l'armature et des câbles de précontrainte doit pouvoir s'effectuer sans forcer les éléments. Le béton doit pouvoir être mis en place et compacté correctement.

Les enrobages minimaux des armatures c_{nom} selon tableau 17 dans SIA 262 :2003 doivent également être respectés avec l'utilisation de gaines en matière synthétique (dans la mesure où le maître d'œuvre n'exige pas des valeurs plus élevées).

4.3 Dispositions techniques relatives à la mesure de la résistance électrique

La mesure de la résistance électrique des câbles de catégorie c exige une préparation minutieuse lors du projet. En général, on disposera des raccords électriques aux deux extrémités de chaque câble ainsi que sur les armatures (cela permet une localisation plus précise des erreurs).

En présence d'un risque de courants vagabonds, des raccords de part et d'autre sont obligatoires afin de mettre le câble à la terre en cas de nécessité ; cependant, les câbles de mesure ne sont requis qu'à une extrémité du câble.

Les raccordements et les câbles électriques doivent être conçus d'une manière à répondre aux nécessités mécaniques et électriques et à être durables. Les câbles de mesure sont à connecter à un ou plusieurs coffrets de mesure ou de raccordement.

De plus amples informations sont données à l'annexe I.

5 Exécution

5.1 Généralités

Avant de commencer les travaux, il faut s'assurer que tous les partenaires (direction des travaux, entrepreneur principal et sous-traitants) connaissent les spécificités du dispositif de précontrainte choisi. Afin d'atteindre les objectifs de qualité, il est recommandé, notamment dans le cas des câbles de précontrainte de catégorie c, de prévoir une séance initiale en temps utile.

Des conseils pratiques ainsi que des propositions sont rassemblées à l'annexe II en vue de permettre le bon déroulement des travaux et les contrôles nécessaires.

5.2 Mise en place des câbles de précontrainte

5.2.1 Gaines et ancrages

Les gaines doivent être fixées de manière à ne pas bouger pendant le bétonnage. Dans le cas des gaines en matière synthétique, on sera particulièrement attentif au coefficient de dilatation élevé (déplacements longitudinaux).

Les gaines doivent être fixées avec des liants synthétiques, les ligatures en acier ne sont pas admises.

En présence de petits rayons de courbure (inférieurs au double du rayon minimal selon les spécifications du câble de précontrainte considéré), on montera en principe, entre l'appui du câble et la gaine, à l'intérieur de la courbe du câble des coques de protection appropriées (même en cas de courbures horizontales). Celles-ci doivent obligatoirement être en matière synthétiques avec les câbles des catégories b et c.

Les événements d'injection et d'aération doivent pouvoir être fermés de façon étanche.

5.2.2 Protection temporaire contre la corrosion

Si les conditions selon SIA 262:2003 chiffre 6.3.2 (délais entre la fabrication, la mise en place, la mise en tension et l'injection) ne sont pas respectées, il y a lieu de prévoir des mesures spéciales afin de garantir une protection temporaire des aciers de précontrainte contre la corrosion. La qualité de cette protection et l'innocuité des mesures pour l'acier de précontrainte, pour la gaine, le coulis d'injection et l'adhérence entre l'acier et le coulis de ciment doivent être démontrées au moyen de procédures d'essai admises (cf. §II.1, p 31).

5.2.3 Injection

L'utilisation de gaines en matières synthétiques ne doit pas amoindrir la qualité du coulis d'injection requise en vertu de SIA 262.

5.3 Examen des câbles de précontrainte de catégorie c

5.3.1 Mesures

L'isolation électrique entre l'acier de précontrainte et l'armature sera vérifiée sur chaque câble de catégorie c à l'aide de mesures de la résistance électrique.

La planification, l'exécution et l'évaluation des mesures sont décrites à l'annexe I.

5.3.2 Valeurs limites

L'exigence d'une protection complète contre la corrosion, c'est-à-dire d'une isolation électrique entre l'acier de précontrainte et l'armature, et de l'étanchéité de l'enveloppe sont satisfaites lorsque la valeur limite selon la fig. 5.1 est respectée pour le câble mis sous tension et injecté.

Critère principal Gaine	Valeurs limites ⁴⁾		
	Surveillance Valeur minimale de la résistance électrique-longueur normalisée ⁵⁾ $R_t (=R \cdot l_p)$	Fatigue Valeur minimale de la résistance électrique R	Courant vagabond ⁶⁾ Valeur minimale de la résistance électrique-longueur normalisée ⁵⁾ $R_t (=R \cdot l_p)$
Ø 60 mm	50 kΩm	20 Ω	250 kΩm
Ø 75 mm	50 kΩm	20 Ω	200 kΩm
Ø 100 mm	50 kΩm	20 Ω	150 kΩm
Ø 130 mm	50 kΩm	20 Ω	125 kΩm
Taux de défaillance maximal admissible	10%	0 ⁷⁾	20%

Fig. 5.1 Valeurs limites (28 jours après l'injection).

5.3.3 Mesures à mettre en oeuvre si les valeurs limites ne sont pas réalisées

Si le taux de défaillance dépasse la valeur admise, il y a lieu de localiser les endroits défectueux, de les évaluer et, cas échéant, de mettre en œuvre les mesures qui s'imposent selon annexe I.

⁴⁾ Les valeurs mesurées avant 28 jours après l'injection doivent être converties selon la loi de la racine carrée du temps (voir annexe I).

⁵⁾ La valeur mesurée de la résistance est à multiplier par la longueur l_p du câble, mais au moins par 25 m.

⁶⁾ Sur les ouvrages comportant une ligne ferroviaire à courant continu, il y a lieu de considérer également la directive C3 de la Société Suisse de Protection contre la Corrosion SGK.

⁷⁾ Dans les sections déterminantes pour la contrainte de fatigue aucun câble de précontrainte ne doit subir de défaillance.

6 Tâches des différents intervenants

6.1 Principe

Mise en projet et exécution doivent se faire sous la direction de spécialistes qualifiés ayant des connaissances spécifiques en technique de précontrainte.

Le §II.14, p.45 propose des indications spécifiques à propos de la réglementation des contrôles et des validations.

6.2 Responsables des études et de la direction des travaux

En principe s'appliquent les descriptifs de prestations du Règlement SIA 103 concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils ainsi que les compléments selon le cahier technique SIA 2027.

Les installations nécessaires pour les mesures de contrôle périodiques (mesures de la résistance électrique) pendant les phases d'élaboration et d'utilisation doivent être planifiées.

Si, dans des cas isolés, les valeurs limites de la résistance électrique selon fig. 5.1 ne sont pas atteintes, et si le taux de défaillance est relativement élevé, il est recommandé de faire appel à un spécialiste afin de procéder à une évaluation spécifique au projet.

6.3 Responsables de l'exécution

La norme SIA 118/262 décrit les tâches des partenaires contractuels (maître de l'ouvrage/entrepreneur). Les prestations sortant de ce cadre doivent être fixées en fonction du projet spécifique.

Annexes

I	Dispositions complémentaires et explications.....	19
I.1	Introduction.....	19
I.2	Classement des câbles de précontrainte en rapport avec le type de danger.....	19
I.2.1	Critère principal surveillance.....	20
I.2.2	Critère principal fatigue.....	21
I.2.3	Critère principal courant vagabond.....	21
I.3	Dispositions techniques.....	21
I.3.1	Câbles de mesure.....	21
I.3.2	Coffret de mesure.....	22
I.3.3	Spécificités liées au risque de courant vagabond.....	23
I.4	Exécution des mesures.....	24
I.4.1	Appareils de mesure et valeurs mesurées.....	24
I.4.2	Valeurs limites et valeurs indicatives.....	24
I.4.3	Programme de mesure.....	25
I.4.4	Incidences sur les valeurs mesurées.....	26
I.4.5	Exécution des mesures.....	26
I.4.6	Comportement en cas de problèmes techniques.....	27
I.5	Appréciation des résultats des mesures.....	27
I.5.1	Influences sur les mesures.....	27
I.5.2	Interprétation et mesures à prendre lorsque les valeurs limites ne sont pas atteintes.....	27
I.5.3	Signification de la valeur des résistances.....	28
I.6	Références.....	29
I.7	Appendice I1 : Mesures de résistance sur câbles de précontrainte.....	30
II	Remarques pour l'exécution et instructions de mise en place.....	31
II.1	Introduction.....	31
II.2	Livraison et entreposage des câbles de précontrainte.....	32
II.3	Mise en place des ancrages.....	33
II.4	Guidage des câbles de précontrainte.....	34
II.5	Montage des câbles de précontrainte et des gaines.....	35
II.6	Ligatures des câbles de précontrainte et des gaines.....	36
II.7	Raccords d'injection et événements.....	37
II.8	Câbles de raccordement et de mesure.....	38
II.9	Travaux tiers à proximité des câbles de précontrainte.....	39
II.10	Montage subséquent d'armatures et de garnitures, obturation du coffrage avant le bétonnage.....	40
II.11	Bétonnage, joints de dilatation et décoffrage.....	41
II.12	Coffret de mesure et raccordement des lignes de mesure.....	42
II.13	Exécution des mesures de résistance électrique.....	43
II.14	Liste de contrôle.....	45

I Dispositions complémentaires et explications

I.1 Introduction

La présente annexe complète les § 3.3, 4.3 et 5.3 de la directive en donnant des indications détaillées sur la planification, l'exécution et l'évaluation des mesures de résistance électrique des câbles de précontrainte de catégorie c. Elle décrit brièvement les risques de corrosion, les agressions et la méthode de surveillance. On trouvera de plus amples informations dans la littérature spécialisée (voir « Bibliographie », p.48).

L'isolation électrique entre la tête d'ancrage, resp. l'acier de précontrainte, et l'armature de l'ouvrage doit être vérifiée sur chaque câble de la catégorie c par mesure d'impédance (résistance électrique en courant alternatif) avec un appareil LCR. Il y a lieu de prendre en compte les critères principaux présidant au choix de la catégorie de câbles de précontrainte (directive, §3.1) aussi bien dans les dispositions techniques (§1.3) que dans les valeurs limites et de contrôle (§1.4.2) et dans l'évaluation des résultats de mesure (§1.5).

I.2 Classement des câbles de précontrainte en rapport avec le type de danger

Les câbles de précontrainte peuvent être mis en danger du fait de l'action de chlorures [1, 2, 16], de la fatigue [11] ou de courants vagabonds [3]. En effet, des dommages dus à la corrosion touchant des câbles ont été découverts de tout temps [1, 2]. On connaît des exemples d'écroulements de ponts ou de bâtiments à l'étranger [4, 5]. Il n'est pas possible d'évaluer l'état de corrosion des aciers de précontrainte dans des gaines métalliques au moyen de méthodes non destructives [6, 7, 8]. C'est la raison pour laquelle, depuis les années nonante, en Suisse, outre des gaines en acier (pour la catégorie de câbles a), qui ne garantissent qu'une protection limitée contre la corrosion, on utilise également des systèmes à gaines en matières synthétiques (pour les câbles des catégories b et c) [9, 10]. Cela permet, non seulement de réaliser une meilleure protection contre la corrosion, mais encore de faire en sorte que les câbles aient un meilleur comportement à la fatigue [11]. S'agissant des câbles dotés d'une isolation électrique totale (catégorie c), il en résulte des avantages supplémentaires tels que protection contre les courants vagabonds [3, 14] et possibilité de contrôler la protection anticorrosion pendant toute la durée d'utilisation par le biais de mesures de résistance électrique [12, 13].

La relation entre, d'une part, l'intensité des agressions et de l'exposition et, d'autre part, la qualité de la protection technique et de la catégorie de câble est représentée à la fig. I.1.

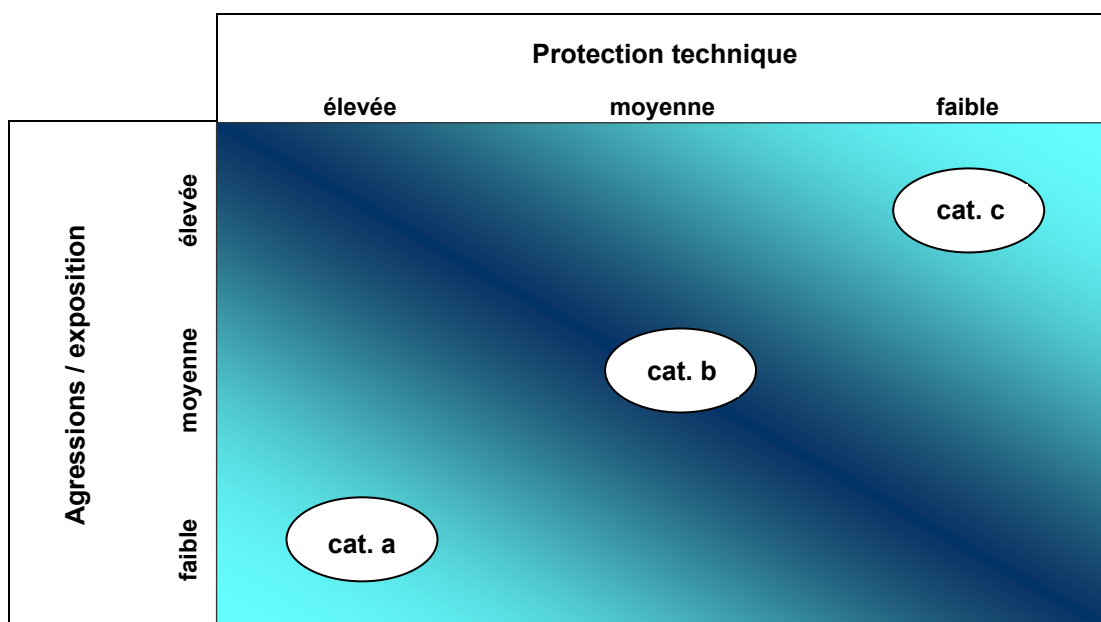


Fig. I.1 Choix de la catégorie de câbles de précontrainte en fonction de la protection technique prévue et, respectivement, des agressions potentielles et de l'exposition [16].

La directive distingue trois critères principaux en relation avec le danger pesant sur les câbles de précontrainte (directive, §3.1) :

- surveillance ;
- fatigue ;
- courant vagabond.

A priori, dans les trois cas, il faut tendre à une résistance électrique aussi élevée que possible. Les valeurs limites à respecter pour cette résistance sont différenciées en fonction des critères mentionnés ci-dessus. Alors que, s'agissant du critère «fatigue», seul un court-circuit entre l'armature et le câble doit être exclu, ce qui est déjà le cas avec une faible résistance, le critère «moyen de surveillance» nécessite une résistance sensiblement plus élevée pour des questions de technique de mesure. Enfin, pour éviter des courants vagabonds nuisibles dans des câbles de précontrainte, des exigences maximales sont posées à l'isolation électrique.

I.2.1 Critère principal surveillance

Les éléments suivants peuvent plaider en faveur d'une plus grande durabilité et d'une meilleure possibilité de surveiller les câbles de précontrainte, et partant, en faveur du choix de la catégorie c :

- L'expérience montre qu'il faut s'attendre à de la corrosion lorsqu'un ouvrage est exposé à une charge élevée de chlorures, car la protection technique primaire prévue (p.ex. étanchéité) peut faillir. Dans de tels cas, la possibilité de surveiller le dispositif facilite l'identification des câbles en danger [12, 13]. De plus, la localisation possible de l'endroit endommagé [3] améliore dans une grande mesure la prise de décision lors des mesures de remise en état qu'il faudra mettre en œuvre plus tard.
- Étant donné que le remplacement de câbles de précontrainte dont l'état de corrosion est incertain est très coûteux, voire impossible, et que, dans de nombreux cas, cela porte préjudice à l'exploitation de l'ouvrage, il faut clarifier la nécessité d'une surveillance déjà durant la phase de planification et la fixer dans la convention d'utilisation et la base du projet.

I.2.2 Critère principal fatigue

L'utilisation de systèmes à gaines en matière synthétique homologués évite le contact métallique entre l'acier de précontrainte et les supports de câble ou l'armature. Il s'ensuit un comportement nettement meilleur à la fatigue (cela évite la fatigue due au frottement) [11].

I.2.3 Critère principal courant vagabond

On peut déterminer l'influence possible de courants vagabonds sur un ouvrage avant sa réalisation au moyen de la démarche suivante (il est recommandé de faire effectuer les mesures nécessaires par un spécialiste) :

- Il peut y avoir risque de courant vagabond si des lignes ferroviaires à courant continu sont présentes dans un rayon de 10 km. Si l'ouvrage est situé à une distance inférieure à 100 m de la voie d'une ligne ferroviaire à courant alternatif reliée à une ligne à courant continu par le système de mise à la terre, un risque est possible jusqu'à une distance de 50 km du nœud des deux systèmes de mise à la terre. Par ailleurs, un courant vagabond peut avoir une influence à une distance de 100 m d'installations de protection cathodiques.
- Si, après cette évaluation, il y a risque de courant vagabond, il y a lieu de mesurer les gradients de tension sur la longueur maximale de l'ouvrage projeté pendant la plus forte influence du courant vagabond. Si l'influence moyenne positive ou négative est supérieure à 100 mV, il s'ensuit que le courant vagabond a une influence critique, et il faut choisir des câbles de précontrainte de catégorie c.
- Si la mesure des gradients de tension ne met pas en évidence un courant vagabond critique, des câbles de catégorie c ne sont pas nécessaires. Mais, vu que la charge du courant vagabond peut se modifier du fait de la présence de l'ouvrage, des mesures doivent être effectuées une fois celui-ci réalisé et, cas échéant, des mesures de protection appropriées mises en œuvre en vertu de la directive C3 [14] (p.ex. installation d'un drainage de courant vagabond).

I.3 Dispositions techniques

I.3.1 Câbles de mesure

Pour garantir une surveillance sûre et durable, il est indispensable que les câbles de mesure soient robustes et que les branchements soient effectués dans les règles de l'art. Le tracé des câbles électriques avec leurs détails techniques seront consignés dans la documentation de l'ouvrage.

Les câbles de mesure établissent la liaison électrique entre, d'une part les raccordements aux câbles de précontrainte et à l'armature, et d'autre part les contacts dans le coffret de mesure. On utilisera à cet effet des câbles de cuivre d'au moins 2.5 mm² de section, dotés d'une isolation étanche à l'eau.

De préférence, le contact électrique avec le câble de précontrainte sera établi dans les ancrages au moyen de brides d'attache vissées. Dans la mesure du possible, et à condition que le coût ne soit pas disproportionné, on établira aussi des raccordements électriques aux deux extrémités des câbles de précontrainte, même si ceux-ci ne sont pas influencés par des courants vagabonds, et on les dotera de câbles de mesure. Cela simplifie la localisation de défauts et permet de contrôler le bon fonctionnement des raccordements. Lorsqu'un câble de mesure ne peut être amené qu'à un ancrage d'un câble de précontrainte, il doit être dédoublé.

Les câbles de mesure doivent être posés dans des tubes électriques qui doivent être reliés directement aux presse-étoupe des capots de protection isolants des ancrages des câbles de précontrainte au moyen de gaines souples contractibles. La possibilité existe aussi de noyer directement les câbles de mesure dans le béton. Dans ce cas, les câbles doivent avoir une barrière de diffusion intégrée (feuille d'aluminium), pouvoir résister aux actions mécaniques (opération de bétonnage) et être stables en milieu alcalin.

Une fois les câbles de mesure installés, il y a lieu de vérifier que les raccordements électriques ont été correctement effectués.

Les fig. I.2 et I.3 présentent le schéma de disposition des installations destinées à la mesure de la résistance pour les critères principaux «fatigue» et «surveillance».

Des règles complémentaires s'appliquent lorsqu'il y a incidence d'un courant vagabond (cf. §I.3.3).

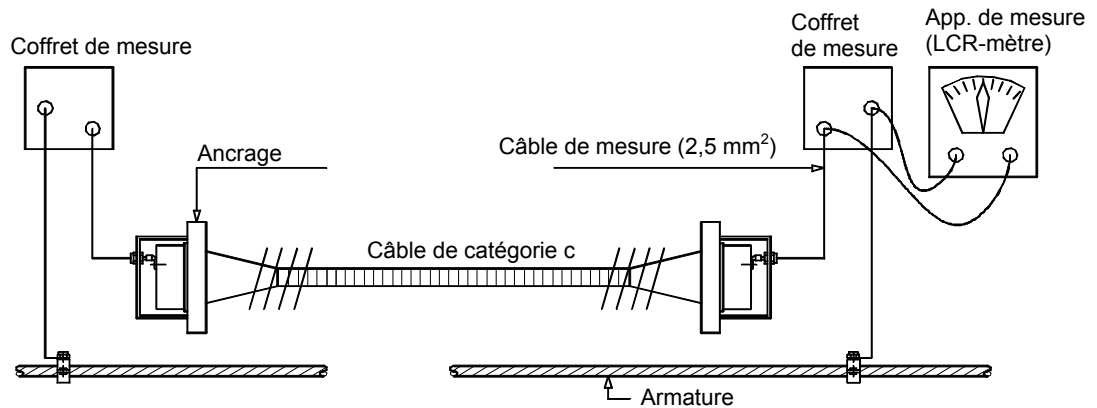


Fig. I.2 Disposition des installations pour la mesure de la résistance en cas de raccordement aux deux extrémités du câble de précontrainte.

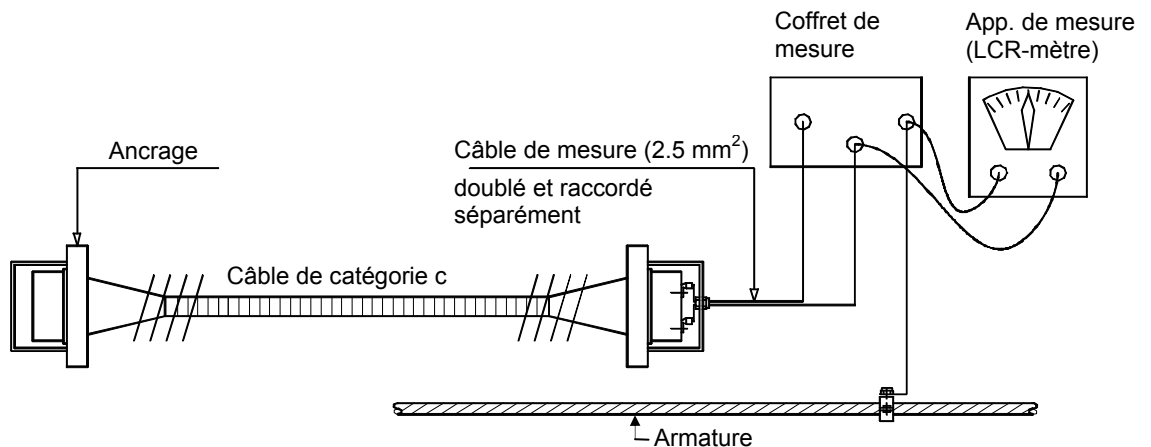


Fig. I.3 Disposition des installations pour la mesure de la résistance en cas de raccordement à une extrémité du câble de précontrainte.

I.3.2 Coffret de mesure

Les câbles de mesure doivent être reliés à des coffrets de mesure. Ceux-ci doivent être protégés contre les intempéries et les actions mécaniques, et placés en des endroits faciles d'accès, le plus près possible des ancrages.

Un raccordement d'armature doit être établi à partir de chaque coffret. Dans le cas de raccordement par serrage, l'armature doit être parfaitement polie avant d'être connectée à la borne.

Les coffrets doivent être dotés, au point le plus bas, d'un orifice d'aération muni d'une grille de protection contre les insectes. On évitera les éléments galvanisés car leur durée de vie se réduit fortement lorsque les conditions sont défavorables.

Les éléments conducteurs et les vis de contact galvanisés ne sont pas autorisés pour les raccordements électriques. On montera de préférence des fiches de raccordement isolées de 4 mm sur une plaque en matière synthétique ou en acier inoxydable. Tous les

raccordements doivent être étiquetés. Les câbles de mesure doivent être brasés aux fiches et isolés durablement au moyen d'une gaine contractible.

I.3.3 Spécificités liées au risque de courant vagabond

De part et d'autre de l'ouvrage, on disposera des barres collectrices longitudinales (faisceaux d'armature parfaitement reliées électriquement sur toute la longueur de l'ouvrage par soudage ou serrage sur des surfaces de contact polies), qui doivent être reliés les unes aux autres par des barres collectrices transversales au moins aux extrémités de l'ouvrage.

A proximité de chacun des deux ancrages des câbles de précontrainte doit être prévu un coffret de raccordement auquel un raccord aussi court que possible, en cuivre d'une section d'au moins 25 mm^2 , doit être établi avec une barre collectrice longitudinale.

Le raccordement des deux extrémités des câbles de précontrainte aux coffrets de raccordement est absolument nécessaire. Ces câbles de raccordement servent non seulement aux mesures, mais encore à la dérivation des courants vagabonds lorsque la résistance électrique des câbles de précontrainte est insuffisante.

La résistance totale maximale admissible des câbles de raccordement et des pontages éventuellement nécessaires dépend de la conductibilité spécifique de chaque câble de précontrainte. Dans des ouvrages spécifiques, il est nécessaire d'utiliser des câbles en cuivre de 4 mm^2 de section par mètre de longueur de câble de raccordement (c'est-à-dire que pour une longueur de câble de raccordement de 5 m, la section doit être d'au moins 20 mm^2). On trouvera une méthode de calcul détaillée dans [3].

Les coffrets de raccordement doivent être conçus comme les coffrets de mesure, et disposés aussi près que possible des ancrages, à l'abri des intempéries. Entre les coffrets de raccordement et de mesure, les câbles de mesure seront disposés comme indiqué au §I.3.1. Il est également possible de combiner coffrets de mesure et de raccordement.

Les câbles de précontrainte qui s'étendent sur moins de 30% de la longueur de l'ouvrage et qui ont moins de 100 m de longueur ne sont pas en danger pour autant que l'ouvrage ne soit pas parcouru par une ligne ferroviaire à courant continu. Dans ce cas, on appliquera la directive C3 [14] et on fera appel à un spécialiste.

La fig. I.4 montre schématiquement la disposition des installations servant à la mesure de la résistance en cas de risque de courant vagabond.

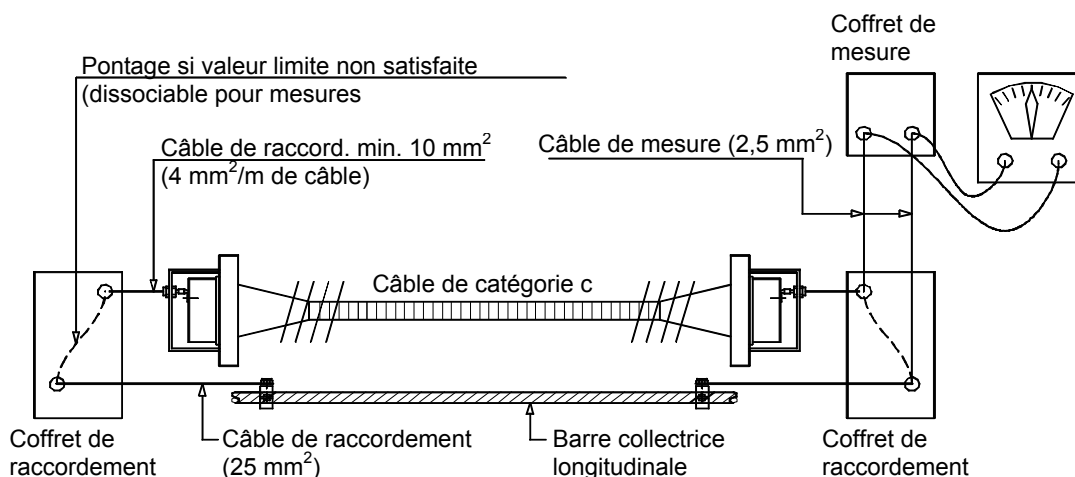


Fig. I.4 Disposition des installations pour la mesure de la résistance en cas de risque de courant vagabond.

I.4 Exécution des mesures

I.4.1 Appareils de mesure et valeurs mesurées

Les appareils de mesure à utiliser doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- Fréquence de mesure : • 1 kHz tension alternative.
- Tension : • min. 0,5 V tension alternative.
- Domaine de mesure : affichage numérique pour :
 - composant ohmique de résistance en courant alternatif R : 0,1 Ω à 10 M Ω : résolution dans l'échelle inférieure : 0,1 Ω ;
 - composant capacitif C : 0,1 nF à 100 μ F ;
 - facteur de perte D : 0,001 à 10.
- Appareil de mesure : • Les appareils de mesure doivent pouvoir couvrir les composants ohmiques et capacitifs de la mesure de résistance en courant alternatif. Modèle usuel du commerce pour les mesures LCR : p.ex. ESCORT ELC-131, respectivement ESCORT ELC-132A.

Les paramètres suivants doivent être consignés dans un procès-verbal :

- Résistance R :
La résistance ohmique R au courant diminue proportionnellement à la longueur de la gaine ainsi qu'avec l'augmentation et du nombre et de la taille des défauts dans la gaine.
- Capacité C :
La capacité C est proportionnelle à la longueur de la gaine et caractéristique du type de gaine utilisé.
- Facteur de perte D :
Le facteur de perte D (quotient de la résistance ohmique à la résistance capacitive) est indépendant de la longueur de la gaine.

Pour une longueur de câble l_p connue, les valeurs spécifiques (c'est-à-dire indépendantes de la longueur) dérivées des valeurs mesurées sont les suivantes :

- résistance-longueur normalisée $R_l = R / l_p$ [Ω m], [k Ω m]
- capacité-longueur normalisée $C_l = C / l_p$ [nF/m]

I.4.2 Valeurs limites et valeurs indicatives

Sur la base de mesures en laboratoire et sur chantier, mais également des expériences pratiques, on obtient, pour les systèmes à gaines en matières synthétiques avec les événements et raccords d'injection ainsi que des raccords de gaine correctement exécutés, des valeurs limites et des valeurs indicatives spécifiques.

Les valeurs limites de la résistance à respecter sont indiquées à la fig. 5.1 de la directive.

Lorsque les valeurs limites de la résistance électrique selon fig. 5.1 de la directive ne sont pas respectées, les valeurs de mesure de la capacité et du facteur de perte donnent de précieuses indications pour expliquer et localiser des défauts. Elles doivent donc être relevées avec les mesures de la résistance.

Les valeurs indicatives de la capacité et le facteur de perte seront tirées de l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte (STA).

Critère principal surveillance

La détection précoce de dangers potentiels menaçant les aciers de précontrainte du fait de l'infiltration d'eau et de chlorures dans la gaine est d'autant meilleure que la résistance électrique du câble de précontrainte est élevée. Par conséquent, du point de vue de la surveillance, les longs câbles de précontrainte et les câbles de précontrainte dotés de

coupleurs sont moins favorables que des câbles courts.

Critère principal fatigue

Pour améliorer la résistance à la fatigue, une valeur limite basse suffit car seuls les courts-circuits (contacts métalliques entre l'acier de précontrainte et l'appui du câble de précontrainte ou l'armature) doivent être évités. En combinaison avec les deux autres critères principaux (surveillance et courants vagabonds), on appliquera les valeurs limites supérieures correspondantes.

Critère principal courant vagabond

Éviter l'action d'un courant vagabond sur les aciers de précontrainte nécessite des valeurs de résistance aussi élevées que possible. Par conséquent, du point de vue du risque de courants vagabonds, les longs câbles de précontrainte et les câbles de précontrainte dotés de coupleurs sont moins favorables que des câbles courts.

I.4.3 Programme de mesure

Les responsables des études et de l'exécution fixent les mesures à exécuter dans le plan de contrôle et le plan d'essai pour la phase d'exécution, et dans le plan de surveillance pour la phase d'utilisation. La fig. 1.5 établit les relations entre moment du contrôle, signification des résultats, et mesures possibles à prendre.

Phase d'exécution et d'utilisation (mesures obligatoires)	Valeur et signification des mesures	Mesures
Mesures avant la première et après la dernière étape de mise en tension	Des courts-circuits (c'est-à-dire valeurs de la résistance ohmique $R < 10 \Omega$) peuvent être constatés dans un ancrage ou suite à une blessure de la gaine avec contact de l'acier sur l'armature. La capacité et le facteur de perte ne sont pas significatifs du fait de l'absence du coulis d'injection.	Identifier et, si nécessaire, remettre en état les parties défectueuses. Compte tenu du taux de défaillances autorisé selon fig. 5.1 de la directive, l'entreprise de précontrainte propose des dispositions et demande l'accord de la direction des travaux.
Mesure après l'injection	Mesure à effectuer env. 28 jours après l'injection. Les valeurs limites à atteindre sont à tirer de la fig. 5.1 de la directive.	Si le taux de défaillance admis selon fig. 5.1 de la directive est dépassé, il faut en rechercher les causes, évaluer les répercussions et, cas échéant, prendre les dispositions qui s'imposent.
Autres mesures ultérieures à effectuer au moment de la réception et pendant la phase d'utilisation conformément au plan de surveillance.	En règle générale, les valeurs de la résistance ohmique R vont croissant, la capacité C reste inchangée et le facteur de perte D diminue (hydratation et séchage du béton et du coulis). Si la valeur mesurée de la résistance ohmique R baisse de plus de 50%, c'est le signe d'une infiltration d'humidité à un des endroits endommagés de la gaine.	Des variations majeures doivent être évaluées par un expert. Les infiltrations d'humidité dans l'ouvrage sont à localiser et à supprimer. Il sera év. judicieux d'effectuer d'autres mesures à intervalles plus rapprochés.

Fig. 1.5 Relations entre le moment des mesures, la valeur contraignante et la signification des résultats et les mesures à prendre.

I.4.4 Incidences sur les valeurs mesurées

Moment de la mesure

Souvent, les mesures obligatoires doivent être effectuées moins de 28 jours après l'injection ou ne peuvent l'être qu'au-delà des 28 jours. Les mesures en laboratoire et sur le terrain ont montré que la résistance électrique du béton et du coulis d'injection augmente constamment avec le temps, proportionnellement à la racine carrée du temps (loi de la racine carrée du temps). La formule suivante permet de convertir la résistance R_t mesurée au temps t en une résistance R après une durée de 28 jours :

$$R = R_t \beta(t - t_0)$$

$$\beta(t - t_0) = (28 / t - t_0)^{0.5} \quad t_0 \text{ désigne l'âge du béton au moment de l'injection}$$

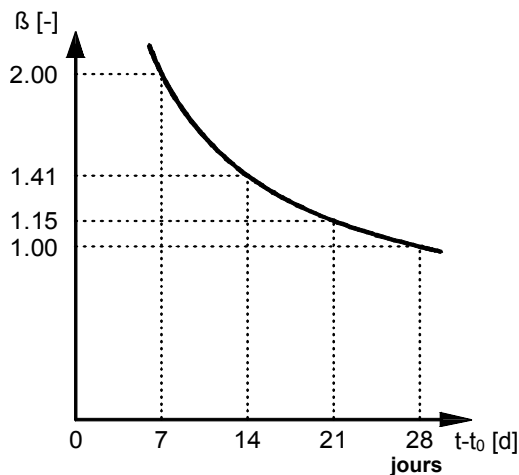


Fig. I.6 Facteur de conversion β permettant de tenir compte de l'incidence du temps sur la résistance électrique mesurée.

Dans la pratique, la conversion est superflue pour des mesures effectuées au-delà 28 jours ; ce qui est déterminant, c'est la tendance de la résistance à augmenter continuellement pendant toute la durée d'utilisation.

Température

Les mesures de la résistance électrique dépendent de la température du béton : des températures plus élevées entraînent des résistances plus basses. L'influence de la température dépend par ailleurs de l'humidité du coulis d'injection et du béton. Les fluctuations peuvent atteindre un maximum de 30% pour une plage de température de 10 à 30 °C. Comme la température locale du sol n'est généralement pas connue et qu'elle peut varier sur la longueur du câble de précontrainte, on renonce à proposer une correction liée à l'influence de la température.

I.4.5 Exécution des mesures

L'exécution des mesures est simple. Elle exige toutefois une procédure stricte et une appréciation critique des résultats quant à leur plausibilité.

L'ensemble des valeurs de la résistance ohmique R , de la capacité C et du facteur de perte D doivent être mesurées et protocolées pour chaque câble. Le §1.7 p.30, « Appendice I1 : Mesures de résistance sur câbles de précontrainte » donne un exemple d'une fiche de protocole.

Les conditions extérieures pendant les mesures doivent être consignées dans un protocole (temps, température de l'air).

I.4.6 Comportement en cas de problèmes techniques

La poussière et les films d'humidité constituent les plus grandes sources d'erreur.

Si les valeurs sont toujours supérieures au maximum de l'échelle de mesure ou si elles sont très variables, on vérifiera les connexions à l'appareil de mesure (faux contacts, prises arrachées ou fiches salies).

Si les problèmes persistent même lors de mesures effectuées des deux côtés du câble, l'erreur provient de l'appareil de mesure.

I.5 Appréciation des résultats des mesures

I.5.1 Influences sur les mesures

La résistance électrique mesurée R est celle d'un montage en parallèle de toutes les résistances des zones comportant des « points faibles » (éléments de construction à résistance réduite) telles que raccords de gaines, ancrages, coupleurs, orifices d'injection, conduits d'aération ainsi que de véritables blessures de la gaine. La détection de blessures ou de « points faibles » d'une gaine est d'autant plus facile que la résistance électrique est élevée, autrement dit que le câble comporte un minimum d'éléments ayant une résistance réduite.

Les facteurs suivants influent systématiquement sur les mesures de R , C et D :

- Longueur et section de la gaine du câble :
La résistance R diminue proportionnellement à la longueur du câble ; la capacité C d'une gaine augmente proportionnellement à sa longueur et dépend de son diamètre et de son épaisseur. Le facteur de perte D est indépendant de la longueur, mais se modifie légèrement selon le diamètre de la gaine.
- Nature des ancrages :
Les ancrages ont une résistance électrique limitée. Cela a une incidence disproportionnée sur la résistance électrique d'un câble de précontrainte, surtout s'il est court.
- Type de gaine :
Les gaines soudées ou raccordées mécaniquement présentent une capacité C et un facteur de perte D légèrement supérieurs aux gaines d'une seule pièce de même longueur.
- Résistance électrique spécifique du béton et du coulis de ciment :
La résistance électrique spécifique du béton et du coulis de ciment dépend de la loi de la racine carrée du temps, de la température, de l'humidité et du degré d'hydratation du ciment. La résistance augmente quand le degré d'hydratation augmente (âge), quand l'humidité diminue et quand la température baisse.
- Nombre et forme des tubes d'injection et des événements :
Après injection, les raccords d'injection et les événements sont remplis de coulis, c'est-à-dire qu'ils peuvent constituer une liaison électrolytique avec le béton environnant et donc l'armature passive. Il est impératif d'obturer tous les tubes d'injection et tous les événements avec des capuchons ou des bouchons en plastique hermétiques (voir annexe II). Sans ces obturations étanches, ils constituent des points faibles, et on mesurera des valeurs de la résistance ohmique R inférieures et des valeurs du facteur de perte D supérieures à ce qu'elles seraient dans le cas d'une obturation étanche.
- Nombre et ampleur des blessures de la gaine :
Ils sont précisément l'objectif de la surveillance au moyen d'instruments de mesure.

I.5.2 Interprétation et mesures à prendre lorsque les valeurs limites ne sont pas atteintes

Si la valeur limite exigée selon la fig. 5.1 de la directive est atteinte, on peut confirmer que le câble dispose d'une bonne protection pour le type de danger considéré (critère principal selon §I.2). En fonction de cela, il résulte des évaluations différentes pour le cas où la résistance électrique n'atteint pas la valeur limite.

Une mesure de la densité du flux magnétique le long des câbles de précontrainte permet de localiser des courts-circuits et des défauts relativement importants d'un câble sur l'ouvrage terminé. Cependant, plus l'enrobage de béton du câble est grand et plus il y a d'armature dans la zone du point faible, plus la mesure et l'interprétation seront complexes [3].

Critère principal surveillance

L'expérience montre que la valeur limite n'est pas toujours atteinte par tous les câbles. Mais une résistance électrique insuffisante ne signifie pas nécessairement une moindre durabilité. Même dans des zones de blessures de la gaine en matière synthétique, l'acier de précontrainte reste dans un milieu alcalin créé par le coulis d'injection et le béton environnant. Par conséquent, il reste passif et protégé contre la corrosion. Cela empêche la formation d'un macroélément. Si des chlorures pénètrent à l'intérieur de ces zones du fait de transports d'humidité, la chute de la résistance électrique permettra de le détecter précocement (avant l'apparition de la corrosion).

Le cas échéant, il faudra déterminer la position des points faibles. Cette information a une grande importance pour les relevés de l'état des ouvrages et l'évaluation des données de surveillance. Si les points faibles se situent dans des zones critiques sous l'angle de l'infiltration de chlorures, des mesures de protection complémentaires peuvent être prises, par exemple l'amélioration de l'étanchéité, toutefois, cela perturbe la protection technique et la surveillance.

Critère principal fatigue

Le contact métallique entre un câble et l'armature comporte le risque d'une fatigue par frottement. Par conséquent, tout câble de précontrainte doit avoir une résistance électrique minimale pour pouvoir exclure ce phénomène.

Si l'on mesure un court-circuit, celui-ci doit être localisé. Il faut vérifier si le contact avec l'armature passive se situe dans un endroit sensible à la fatigue par frottement. Dans ce cas, il y a lieu d'élucider les conséquences d'une défaillance locale totale du câble considéré.

Critère principal courant vagabond

Pour que la protection contre les courants vagabonds soit maximale, tous les câbles doivent présenter une résistance électrique aussi élevée que possible. Si l'isolation électrique est perturbée, la protection contre les courants vagabonds reste élevée lorsqu'il est possible d'éviter des écarts de tension à l'intérieur d'un câble.

Tous les câbles ne satisfaisant pas les valeurs limites doivent être reliés à l'armature, tout en respectant les sections correspondantes des câbles de raccordement et de pontage aux deux extrémités. Pour mesurer la résistance électrique pendant la phase d'utilisation, le pontage doit être ouvert.

I.5.3 Signification de la valeur des résistances

Valeurs mesurées

- Résistance $R < 20 \Omega$

Indépendamment de la longueur du câble, on peut conclure sans aucun doute à un contact électrique entre l'acier de précontrainte et l'armature passive. Il n'est pas possible de tirer de plus amples informations de telles valeurs. Les valeurs de la capacité C et du facteur de perte D n'ont aucune signification. Dans ce cas, une surveillance n'est plus possible. Si le court-circuit se situe à un emplacement sensible à la fatigue par frottement, la résistance du câble à la fatigue s'en trouvera diminuée.

- Résistance $R \geq 20 \Omega$

Les exigences s'appliquant à la fatigue sont satisfaites. Toutefois des points faibles se trouvent dans la gaine. Indépendamment de la longueur du câble, on peut exclure un contact électrique entre l'acier de précontrainte et l'armature passive. Une surveillance des câbles est possible en principe, mais la sensibilité de la mesure dépend de la résistance. Elle augmente lorsque la résistance augmente.

- Résistance-longueur normalisée $R_l \geq 50 \text{ k}\Omega\text{m}$
Les exigences s'appliquant à la fatigue et à la surveillance sont satisfaites. De telles valeurs correspondent à une isolation électrique élevée des câbles injectés et comportant de petits points faibles, insignifiants du point de vue de la durabilité (moyen de surveillance et fatigue).
- Résistance-longueur normalisée $R_l \geq$ valeur limite pour les courants vagabonds
Les exigences s'appliquant à la fatigue, à la surveillance et à la protection contre les courants vagabonds sont satisfaites. De telles valeurs correspondent à une isolation électrique et à une étanchéité très élevées des câbles de précontrainte.
- Résistance-longueur normalisée $R_l > 500 \text{ k}\Omega\text{m}$
Ce cas correspond à une isolation électrique totale du câble avec une étanchéité complète des événements, des tubes d'injection et des raccords de gaine. Il n'y a pas de points faibles.

Comparaison des valeurs mesurées sur les différents câbles

Les comparaisons avec d'autres câbles de même longueur et de même type ainsi que les comparaisons avec des valeurs de mesures antérieures sont importantes dans l'interprétation des valeurs de mesure :

- Les comparaisons avec d'autres câbles permettent de conclure très rapidement s'il s'agit d'un seul câble insuffisant ou si une erreur systématique a été faite. S'agissant de câbles de même type, les valeurs mesurées de la capacité C doivent diverger de moins de $\pm 5\%$.
- La comparaison avec des mesures antérieures sur le même câble permet de détecter (en cas de résistances régulièrement décroissantes) une pénétration d'humidité par des blessures de la gaine. Mais cela est d'autant plus complexe que la résistance électrique R du câble est faible.

I.6 Références

Voir Bibliographie, p. 48.

I.7 Appendice I1 : Mesures de résistance sur câbles de précontrainte

Ouvrage :

Mesure effectuée par :

Appareil de mesure :

Câble de précontrainte			Mesures	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure	Mesure	
Numéro	Description		N & Visa	1	2.....	3.....	4.....	5.....	6.....	7.....	
.....	Type..... date injection longueur Ø gaine Résistance électrique R val. limite de : surveillance fatigue cour. vagabonds val. indicat. de : capacité C fact. de perte D		Date								
		m	Météo								
		mm	Température								
			Mesure R								
		kΩ	respectée ?								
		20 Ω	respectée?								
		kΩ	respectée?								
		nF	Mesure C								
		-	Mesure D								
			Type..... date injection longueur Ø gaine Résistance électrique R val. limite de : surveillance fatigue cour. vagabonds val. indicat. de : capacité C fact. de perte D		Date						
m	Météo										
mm	Température										
	Mesure R										
kΩ	respectée ?										
20 Ω	respectée?										
kΩ	respectée?										
nF	Mesure C										
-	Mesure D										
.....	Type..... date injection longueur Ø gaine Résistance électrique R val. limite de : surveillance fatigue cour. vagabonds val. indicat. de : capacité C fact. de perte D				Date						
		m	Météo								
		mm	Température								
			Mesure R								
		kΩ	respectée ?								
		20 Ω	respectée?								
		kΩ	respectée?								
		nF	Mesure C								
		-	Mesure D								

II Remarques pour l'exécution et instructions de mise en place

II.1 Introduction

La réussite de l'application de la technique de précontrainte dans les constructions en béton nécessite l'observation de quelques règles importantes au moment de la planification et de l'exécution des travaux. A priori, ces règles sont valides pour les trois catégories de câbles de précontrainte. Les exigences spécifiques posées aux différents dispositifs de précontrainte sont fixées dans l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte.

La présente annexe traite et illustre les opérations critiques sur le chantier. Les travaux devant être exclusivement accomplis par les entreprises de précontrainte, telles la mise en tension et l'injection ne sont pas documentées ici.

La liste de contrôle (cf. §II.14, p.45) renferme les principales étapes et les contrôles nécessaires pour réaliser un ouvrage comportant des câbles de précontrainte.

Les responsabilités et les étapes d'exécution importantes doivent être clarifiées à l'occasion d'une séance de démarrage réunissant tous les partenaires et dans le cadre d'une instruction du personnel de chantier.

Protection temporaire contre la corrosion

Si les délais entre la fabrication, la mise en place, la mise en tension et l'injection selon SIA 262:2003 chiffre 6.3.2 ne sont pas respectés, il y a lieu de prévoir des mesures spéciales afin de garantir une protection temporaire des aciers de précontrainte contre la corrosion. Des suggestions à cet effet figurent dans les documents suivants :

- R. Werner, Dr. M. Faller, Dr. P. Richner, P. Matt (2004), „**TEKORS - Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern – Wirksamkeit und Praxistauglichkeit**“, Forschungs- und Arbeitsbericht 14.01, EMPA Dübendorf [17] ;
- R. Werner, M. Faller (2007), „**Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern (TEKplus) – Wissenschaftlich, technische Begleitung der Umsetzung in die Praxis**“, Forschungsbericht Nr. 614, VSS Zürich [18].

Remarques particulières relatives aux câbles de la catégorie c

Le potentiel des câbles de précontrainte de la catégorie c ne peut être mis à profit que si, pendant chacune des phases d'exécution, tous les partenaires agissent avec le plus grand soin et dans l'optique de l'objectif à atteindre.

Les installations nécessaires pour les mesures de la résistance électrique à effectuer durant la phase d'exécution et tout au long de l'exploitation de l'ouvrage doivent être planifiées à l'avance et mises au concours avec les travaux d'entrepreneur. Elles doivent être décrites dans la documentation de l'ouvrage.

II.2 Livraison et entreposage des câbles de précontrainte

La livraison des éléments des câbles de précontrainte sur un chantier peut varier suivant le procédé de construction, les conditions du chantier, le dispositif de précontrainte et l'entreprise de précontrainte :



Fig. II.1 Câbles de précontrainte réalisés en usine, avec ancrages montés.



Fig. II.2 Gains et torons préalablement posés avant le bétonnage.



Fig. II.3 Entreposage faux et inapproprié.



Fig. II.4 Entreposage correct des gains.

Remarques :

Les principales mesures concernant la livraison, le déchargement et l'entreposage corrects des câbles de précontrainte et de leurs composants sur le chantier sont fixées dans l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte applicable au dispositif utilisé.

Les gains et les éléments en matière synthétique des raccords de gains et des ancrages doivent être traités avec soin et entreposés proprement afin d'éviter de nuire à l'isolation électrique.

Un seul point faible de la gaine isolée électriquement suffit pour abaisser fortement les valeurs d'isolation de tout le câble.

II.3 Mise en place des ancrages



Fig. II.5 Ancrages fixés au coffrage.

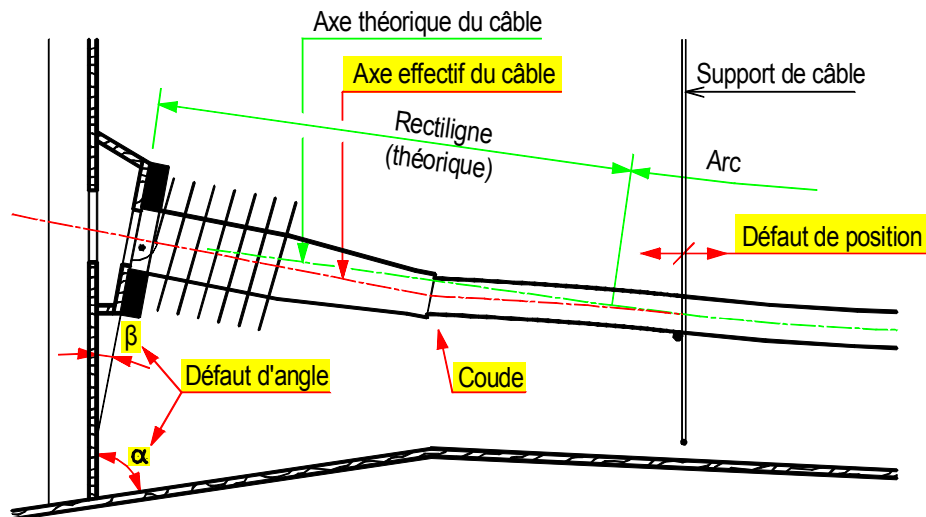


Fig. II.6 Conditions géométriques.

Remarques :

Les détails du coffrage de reprise doivent être planifiés par l'auteur du projet en fonction des données techniques du système, et exécutés correctement par l'entreprise.

La surface de coffrage doit être perpendiculaire à l'axe du câble de précontrainte et assurer que la longueur demandée des segments raccordés soit respectée. La plaque d'appui doit être vissée de manière à être solidaire du coffrage.

II.4 Guidage des câbles de précontrainte

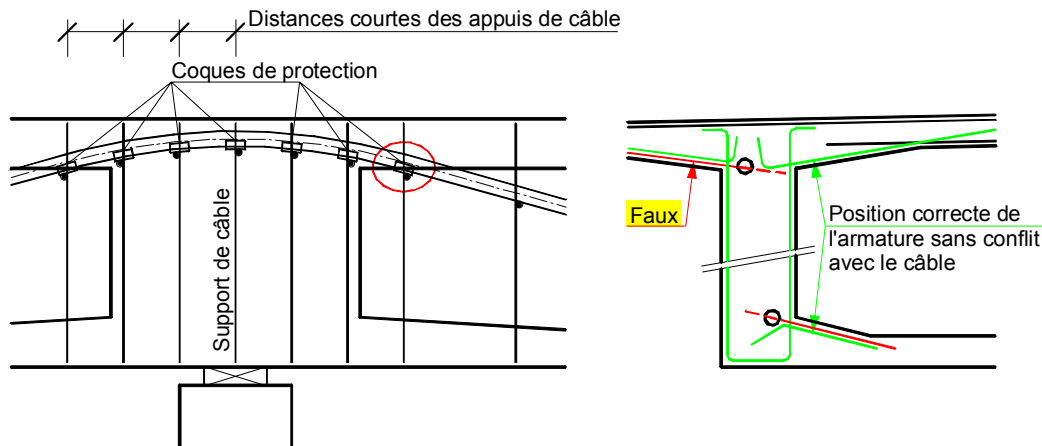


Fig. II.7 Supports de câbles de précontrainte pour de petits rayons et conflit entre armatures de dalles et câbles.



Fig. II.8 Passage en S câble de précontrainte/étrier pas pris en compte dans le plan d'armature, pas de coques de protection contre les étriers à l'intérieur de la courbe que fait le câble.

Remarques :

Les points de conflit entre câbles de précontrainte et armature, en particulier aux intersections avec faible biais entre le plan de câble et de l'armature doivent être soigneusement conçus.

Dans la zone de grandes courbures (petits rayons de flexion horizontaux et verticaux), les câbles de précontrainte doivent être soutenus à de courtes distances conformément à l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte et aux indications de l'auteur du projet, cela au moyen d'appuis appropriés de telle sorte qu'ils décrivent une courbe régulière.

Dans toutes les zones critiques où la déviation d'un câble de précontrainte forme un rayon de courbure inférieur au double du rayon minimal selon l'Agrément technique suisse des systèmes de précontrainte (STA), des coques de protection conformes au dispositif doivent être disposées sur la partie intérieure de la courbure afin d'éviter des déformations locales de la gaine ou des dommages pendant l'opération de mise en tension.

Pour les câbles des catégories b et c, il existe des coques de protection en matière synthétique.

L'épaisseur des coques de protection doit être prise en compte dans les hauteurs des supports de câbles.

II.5 Montage des câbles de précontrainte et des gaines

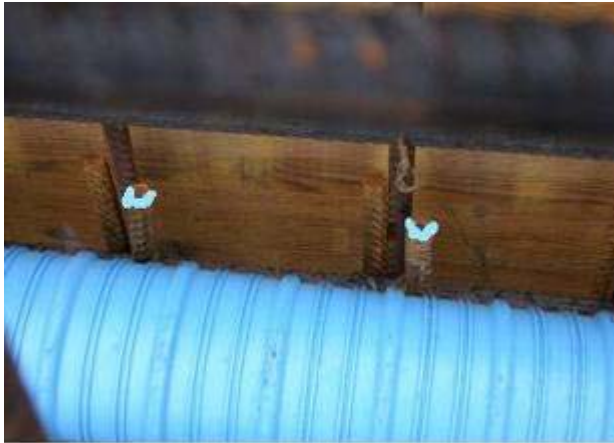


Fig. II.9 Gaine endommagée lors du montage à cause des arêtes tranchantes aux extrémités des barres d'armature (la matière arrachée à la gaine est visible sur l'armature).



Fig. II.10 Gaine comprimée par des éléments de montage.

Remarques :

Les barres d'armature repliées ou coupées ne doivent pas mettre en danger les gaines.

II.6 Ligatures des câbles de précontrainte et des gaines



Fig. II.11 Les coques de protection en acier et les ligatures ne sont pas autorisées avec les câbles de précontrainte des catégories b et c.



Fig. II.12 Coques de protection et ligatures en matières synthétiques.

Remarques :

Les câbles de précontrainte, resp. les gaines et les coques de protection, doivent être fixés suffisamment solidement aux appuis des câbles pour que leur position ne change ni sous l'effet de variations de température ni lors du bétonnage.

En principe, les câbles de précontrainte doivent être fixés au moyen de ligatures en matières synthétiques.

Les gaines vides bétonnées doivent être assurées de manière appropriée contre tout risque de soulèvement.

II.7 Raccords d'injection et événements



Fig. II.13 Raccords d'injection avec blocs d'évidement.

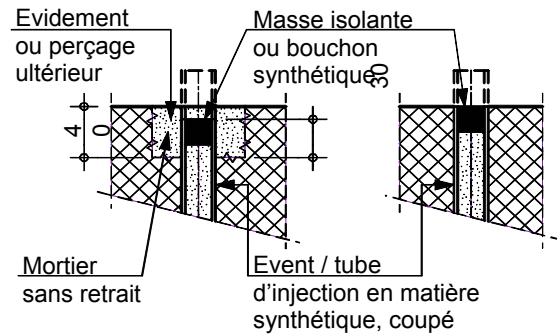


Fig. II.14 Exemples d'obturation.

Remarques :

Les mesures de détail destinées à garantir des raccords d'injection et des événements parfaits doivent être convenues avec l'entreprise et coordonnées avec les autres activités du chantier (les raccords d'injection et les événements sont gênants pour le réglage du béton frais avec la latte vibrante et lors de la couverture de celui-ci ; de plus, il y a risque d'endommager les tubes lorsqu'on circule sur la dalle du tablier ou qu'on y stocke des matériaux de construction).

Le travail de remise en état de raccords défectueux pour une injection parfaite et une obturation conforme au système est conséquent.

L'application de l'injection sous vide permet d'éliminer les raccords d'injection et les événements aux points hauts des câbles, ce qui est particulièrement avantageux notamment pour réaliser des surfaces parfaites sur les dalles du tablier.

II.8 Câbles de raccordement et de mesure



Fig. II.15 Installation subséquente en saillie p.ex. dans des chambres de culées protégées et fermées.



Fig. II.16 Tubes vides pour câbles de raccordement et de mesure.

Remarques :

La disposition des câbles et des coffrets de mesure et de raccordement doit être planifiée et fixée par l'auteur du projet.

La conception des installations doit être adaptée aux conditions locales et fixée, éventuellement, en collaboration avec une entreprise spécialisée dans la technique de mesure.

Les câbles seront de préférence noyés dans le béton entre l'ancrage et les coffrets de mesure et de raccordement prévus, et seront donc planifiés avec précision dans le cadre du déroulement des travaux.

Les câbles montés après-coup hors du béton (installation en saillie) doivent être posés dans les règles de l'art, et protégés contre les dommages et le vandalisme.

II.9 Travaux tiers à proximité des câbles de précontrainte



Fig. II.17 Soudage sans mesure de protection est interdit.



Fig. II.18 Nette de protection mise en place durant le travail avec une meule à disque.

Remarques :

A proximité d'ancrages et de gaines, en particulier en matières synthétiques, les travaux suivants sont strictement interdits sans mesures de protection adéquates :

Opération :

- soudage
- découpage au chalumeau
- manipulation d'objets tranchants (p.ex. pièces en acier avec des bavures)

Risque pour le câble de précontrainte :

fonte des éléments synthétiques à cause de la chaleur ou formation de trous dus à des perles de soudure comme ci-dessus, en plus danger d'incendie
blessures des gaines

Il est interdit de souder sur l'acier de précontrainte et sur les éléments d'ancrage.

Pour préserver la gaine contre tout écrasement ou dommage, de quelque façon que ce soit, il faut éviter d'y poser des charges ou de marcher dessus.

II.10 Montage subséquent d'armatures et de garnitures, obturation du coffrage avant le bétonnage

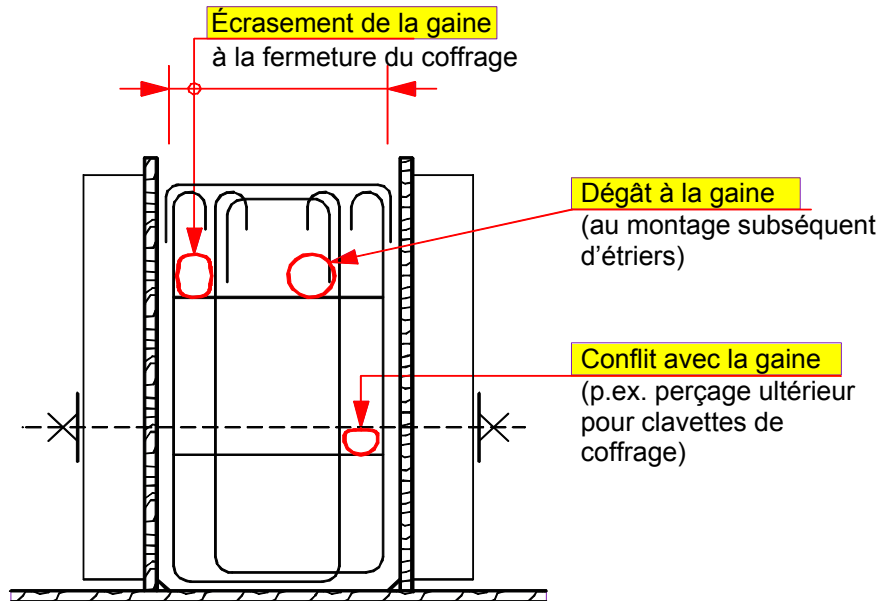


Fig. II.19 Risque d'endommagement de la gaine à la fermeture des écarteurs.

Remarques :

La prudence est de mise lors de la mise en place :

- d'étriers au voisinage de points hauts ;
- d'armature de cisaillement, plaques pour chevilles ;
- d'écarteurs de coffrage.

De telles pièces à monter après-coup peuvent être mises en place au voisinage de gaines et d'ancrages uniquement en l'absence de contraintes mécaniques.

Les incompatibilités doivent être éliminées avec le concours de la direction des travaux.

Tout dommage causé à des câbles de précontrainte doit être immédiatement signalé à l'entreprise de précontrainte pour que la réparation puisse se faire dans les règles de l'art avant le bétonnage.

Lors de la fermeture du coffrage, aucune barre d'armature ne doit être pressée contre la gaine car cela pourrait provoquer des déformations de celle-ci.

II.11 Bétonnage, joints de dilatation et décoffrage



Fig. II.20 Risque de formation de plis dans la gaine en raison d'un tronçon de raccordement court.



Fig. II.21 Surlongueur suffisante pour réaliser une courbure régulière du câble de précontrainte.

Remarques :

Lors du coulage et du compactage du béton frais, on appliquera les mesures de précaution usuelles pour éviter tout dommage.

Les niches des ancrages doivent être dégagées avec prudence afin de ne pas endommager les pièces des ancrages ou les tubes vides réservés aux câbles de raccordement et de mesure.

Les joints de dilatation de gaines continues sont particulièrement délicats à cause du danger d'endommagement local de la gaine (p.ex. au moment du décoffrage) et de formation de plis.

II.12 Coffret de mesure et raccordement des lignes de mesure

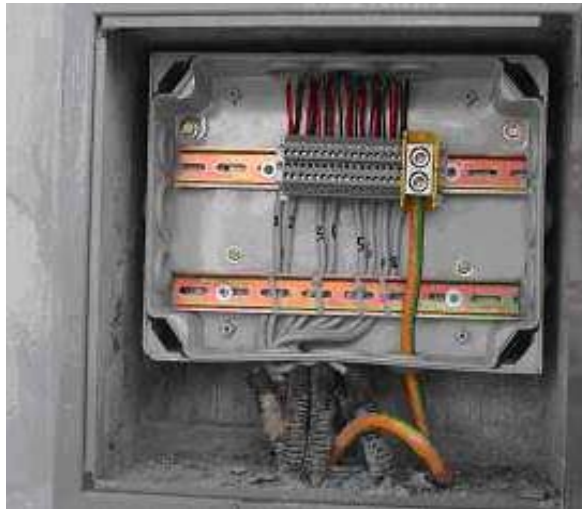


Fig. II.22 Coffrets de mesure improvisés sont inacceptables.



Fig. II.23 Coffret de mesure robuste en matériaux résistant à la corrosion.

Remarques :

Le recours à des spécialistes en électrotechnique (entreprise spécialisée dans la technique de mesure) est recommandé.

II.13 Exécution des mesures de résistance électrique



Fig. II.24 Mesures pendant la phase des travaux.



Fig. II.25 Mesures sur l'ouvrage installé.

Remarques :

Le nombre et la date des mesures sont fixés spécifiquement pour chaque projet compte tenu des directives et consignés dans les plans de contrôle et d'essais (phase d'exécution) et dans le plan de surveillance (phase d'utilisation).

Dans la réalité, les conditions définissant la date des mesures s'écartent des conditions idéales :

- l'humidité sur la plaque d'isolation ou dans les événements ouverts peut provoquer des points de contact électrolytiques ;
- avant le raccordement des câbles de mesure, on mesure en général la résistance entre l'armature et les parties métalliques de l'ancrage ;
- en présence de coulis d'injection d'âges différents dans un câble de précontrainte couplé, c'est le coulis le plus jeune et présentant le plus haut taux d'humidité qui est déterminant.

Les câbles de précontrainte couplés ou le mauvais temps, en particulier, peuvent générer des variations marquées de la résistance électrique. Cela doit être pris en compte dans l'évaluation des valeurs mesurées (voir aussi les remarques de l'annexe I).

II.14 Liste de contrôle

(ne renferme que les travaux significatifs pour les câbles de précontrainte et doit être adapté à chaque cas)

Activité	Exécutant ¹⁾	Auto-risation	Document	Contrôle et tolérances
Pose des appuis de câbles de précontrainte	EN			
Mise en place des ancrages/niches	EN			
Réception des appuis de câble : - contrôle hauteur, écart par rapport aux valeurs de consigne	DT	DT	x	selon SIA 262 ³⁾ $\leq \pm 5 \text{ mm}$ ($h \leq 2 \text{ m}$) ou $\leq \pm 10 \text{ mm}$ ($h > 2 \text{ m}$)
Pose des gaines vides, resp. des câbles de précontrainte fabriqués en usine	EN			
Contrôle visuel de l'étanchéité	EN (EP)		x	
Introduction de l'acier de précontrainte (si fabrication sur chantier)	EP			
Pose des câbles de mesure ou de leurs gaines ²⁾	EL (EN)			
Réception des câbles de précontrainte : - contrôles : - position horizontale, écart valeurs de consigne - contrôles visuels guidage câbles - coques de protec., ligatures, câble de mesure	DT	DT	x	selon SIA 262 ³⁾ $\leq \pm 15 \text{ mm}$ ligne continue? complet, conforme?
Mesure de résistance avant le bétonnage ²⁾	EP (DT,EL)	DT	x	Mesure pour détection de courts-circuits ⁴⁾
Bétonnage	EN			
Ev. montage après-coup de l'acier de précontrainte	EP			
Mesure de résistance avant la mise en tension ²⁾	EP (DT,EL)		x	Mesure pour détection de courts-circuits ⁴⁾
Mise en tension, contrôle chemins de dilatation	EP		x	
Mesure de résistance après mise en tension ²⁾	EP (DT,EL)		x	Mesure pour détection de courts-circuits ⁴⁾
Autorisation de sectionner l'acier de précontrainte excédentaire : - contrôle chemins de dilatation, écart val. de consigne	DT	DT	x	selon SIA 262 ³⁾ $\leq \pm 15\%$ câble d'un tenant $\leq \pm 5\%$ en moyenne
Montage des capots de protection/injection	EP			
Mesure de résistance avant l'injection ²⁾	EP (DT,EL)		x	Mesure pour détection de courts-circuits ⁴⁾
Injection	EP		x	
Mesure de résistance après l'injection ²⁾	EP (DT,EL)		x	valeurs limites et taux max. de défaillance selon fig. 5.1 de la directive
Fermeture des niches d'ancrage, etc.	EN			
Mesure de résistance après 28 jours env. ²⁾	EP (EL)	DT	x	valeurs limites et taux max. de défaillance selon fig. 5.1 de la directive

Légende :

DT direction des travaux
 EN entrepreneur (contremaître, ferrailleur)
 EP entreprise de précontrainte
 EL entreprise électrique, entreprise de technique de mesure

1) Cas normal, les indications entre parenthèses représentent les alternatives possibles, à fixer dans les dossiers de soumission ou lors de la séance de démarrage

2) Seulement pour la catégorie c

3) Sous réserve de valeurs plus basses selon plan de contrôle

4) Des mesures correctives pourraient être encore possible dans ces états ; voir annexe I, fig. I.5

Glossaire

Français		Deutsch	
Barre collectrice	File d'armatures, reliées électriquement, posées dans le sens longitudinal de l'ouvrage	Längssammelleiter	Elektrisch leitend verbundener Bewehrungsstrang in Bauwerkslängsrichtung
Boîtier de mesures	Boîtier placé à un endroit abrité et accessible auquel sont raccordés les câbles électriques	Messkasten	An geschützter, zugänglicher Stelle angebrachter Kasten, in dem die Messkabel zusammengeführt werden
Boîtier de raccordement	Boîtier, placé à un endroit abrité, le plus près possible des ancrages, et auquel aboutissent les câbles de raccordement et les câbles de mesure	Anschlusskasten	An geschützter Stelle in nächster Nähe der Verankerungen angebrachter Kasten, in dem die Anschluss- und Messkabel zusammengeführt werden
Câble de mesure	Liaison entre la tête d'ancrage resp. entre l'armature et le boîtier de mesures	Messkabel	Isolierte elektrische Verbindung zwischen Ankerkopf bzw. Bewehrung und Messkasten
Câble de raccordement	Liaison électrique isolée entre la tête d'ancrage respectivement l'armature et le boîtier de raccordement	Anschlusskabel	Isolierte elektrische Verbindung zwischen Ankerkopf bzw. Bewehrung und Anschlusskasten
Capacité C	Résultat de mesure du LCR-mètre, permet le contrôle de la gaine (longueur, diamètre)	Kapazität C	Messwert des LCR Meters, erlaubt Prüfung des Hüllrohrs (Länge, Durchmesser)
Coques de protection	Élément synthétique placé entre la gaine et le support de câble	Schutzschalen (früher Halbschalen)	Kunststoffzwischenlage zwischen Hüllrohr und Spanngliedunterstützung
Critère principal courants vagabonds	Critère déterminant pour le choix de la catégorie de précontrainte et du niveau de la valeur limite dans le but d'éviter la corrosion des câbles de précontrainte par les courants vagabonds	Hauptkriterium Streustrom	Massgebendes Kriterium für die Wahl der Spanngliedkategorie und die Höhe der einzuhaltenden Grenzwerte zur Verhinderung der Spanngliedkorrosion infolge Streuströmen
Critère principal fatigue	Critère déterminant pour le choix de la catégorie de précontrainte et du niveau de la valeur limite dans le but d'éviter tout contact métallique entre le câble de précontrainte et l'armature	Hauptkriterium Ermüdung	ChloridenMassgebendes Kriterium für die Wahl der Spanngliedkategorie und die Höhe des einzuhaltenden Grenzwertes zur Vermeidung metallischen des Kontakts zwischen Spannstahl und Bewehrung
Critère principal surveillance	Critère déterminant pour le choix de la catégorie de précontrainte et du niveau de la valeur limite dans le but de contrôler l'étanchéité de la gaine du câble de précontrainte pour éviter la pénétration d'humidité et de chlorures	Hauptkriterium Überwachbarkeit	Massgebendes Kriterium für die Wahl der Spanngliedkategorie und die Höhe des einzuhaltenden Grenzwertes zur Kontrolle der Dichtigkeit der Schutzhülle des Spanngliedes gegen Eindringen von Feuchtigkeit und Chloriden
Event	Event situé au point haut pour l'évacuation de l'air durant l'injection du câble	Entlüftungsrohr	Während Injektion des Spanngliedes verschliessbares Entlüftungsrohr an Hochpunkt
Facteur de perte D	Valeur de contrôle de la qualité de l'isolation électrique, indépendante de la longueur	Verlustfaktor D	Längenunabhängiger Kontrollwert der Qualität der elektrischen Isolation
Gradient de tension	Chute de tension provoquée par le flux de courant dans le béton	Spannungsgradient	Durch Stromfluss verursachter Spannungsfall im Beton
LCR-mètre	Appareil pour la mesure simultanée du coefficient d'auto-induction (L), de la capacité (C) et de la résistance (R)	LCR-Meter	Messgerät für die gleichzeitige Bestimmung von Induktivität (L), Kapazität (C) und Widerstand (R)

Français		Deutsch	
Raccord d'injection	Raccord au câble de précontrainte, prévu pour injecter les câbles et pouvant être scellé	Injektionsanschluss	Verschliessbarer Anschluss ans Spannglied zur Injektion der Spannglieder
Résistance R [Ω]	Valeur absolue (valeur de mesure) de la résistance électrique	Widerstand R [Ω]	Absolutwert (Messwert) des elektrischen Widerstandes
Résistance électrique-longueur normalisée R_l [Ωm]	Valeur de la résistance électrique dépendant de la longueur du câble	Längennormierter elektrischer Widerstand R_l [Ωm]	Längenabhängiger Wert des elektrischen Widerstandes
Résultats de mesures	Valeurs de l'auto-induction, de la capacité et de la résistance, mesurées à l'aide du LCR-mètre	Messwerte	Die mittels LCR-Meter bestimmten Werte für die Induktivität, die Kapazität und den Widerstand
Risque de corrosion	Risque justifié d'une corrosion future de l'armature	Korrosionsgefährdung	Begründetes Risiko, dass die Bewehrung in Zukunft korrodieren kann
Support de câble	Support de la gaine permettant de donner au câble la géométrie requise	Spanngliedunterstützung (früher Kabelhalter)	Unterstützung des Hüllrohres zur Gewährleistung der verlangten Geometrie
Taux de défauts	Proportion des câbles de précontrainte ne satisfaisant pas au critère principal concernant la protection contre la corrosion	Ausfallquote	Anteil der Spannglieder, die die Grenzwerte entsprechend dem massgebenden Hauptkriterium bezüglich der Korrosionsgefährdung nicht einhalten
Valeur de contrôle	Résultat de mesure, relevé pour valider les mesures mais pour lequel il n'y a pas de valeur limite à respecter	Kontrollwert	Messwert, welcher zur Prüfung der Korrektheit der Messung erfasst wird, für den aber kein Grenzwert vorliegt
Valeur limite	Valeur minimum exigée	Grenzwert	Mindestwert

Bibliographie

-
- [1] F. Hunkeler, H. Ungricht, P. Matt (1998), „**Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern**“, Forschungsbericht Nr. 534, VSS Zürich.
-
- [2] U. Nürnberger (1980), „**Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen**“, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 308, Bonn Bad Godesberg.
-
- [3] M. Büchler, Y. Schiegg, C.-H. Voüte (2005), „**Elektrisch isolierte Spannglieder: Einsatz in Gegenden mit Streuströmen und Lokalisierung von Kurzschlüssen und Fehlstellen**“, Forschungsbericht Nr. 585, VSS Zürich
-
- [4] P. Matt (1994), „**Brücken in Spannbeton - Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Spannsystemen**“, Heft 21, S. 390 – 394, Schweizer Ingenieur und Architekt.
-
- [5] U. Nürnberger (1998), „**Corrosion induced failures in prestressed concrete structures and preventive measures**“, Otto Graf Journal 9, pp. 218 – 250, FMPA Stuttgart.
-
- [6] P. Matt (1990), „**Qualitätsgesicherte und überwachbare Spannsysteme im Brückenbau**“, Forschungsbericht Nr. 192, VSS Zürich.
-
- [7] B. Elsener, H. Böhni, R. Bräunlich, A. Markees (1997), „**Zerstörungsfreie Spannkabelprüfung mit reflektometrischer Impulsmessung**“, Forschungsbericht Nr. 528, VSS Zürich.
-
- [8] P. Matt (1993), „**Spannsysteme – Zerstörungsfreie Prüfung bei bestehenden Brücken und überwachbare Systeme der Zukunft**“, SIA Dokumentation D 099 Erhaltung von Brücken, S. 95-103, Schweiz. Ingenieur und Architektenverein Zürich.
-
- [9] J. Ayats, A. Gnägi, B. Elsener (2002), „**Electrical Isolation as Enhanced Protection for Post-Tensioning Tendons in Concrete Structures**“, Proc. Int. fib Congress Osaka, Vol. 6, Session 8, pp. 169 – 176, Japan Prestressed Concrete Engineering Association.
-
- [10] fib technical report: (2000), „**Corrugated plastic ducts for internal bonded post-tensioning**“, bulletin 7, fib Lausanne.
-
- [11] SIA Dokumentation D 0133 (1997), „**Ermüdung von Betonbauten**“, SIA Zürich.
-
- [12] B. Elsener, L. Toller, C.-H. Voüte, H. Böhni (2002), „**Überprüfen des Korrosionsschutzes von Spanngliedern in Kunststoffhüllrohren**“, Forschungsbericht Nr. 564, VSS Zürich.
-
- [13] B. Elsener (2004), „**Langzeitüberwachung vorgespannter Tragwerke**“, Tec21 Nr. 22, Tec Dossier 130 „Werkstoff Beton“, S. 14 – 17, SIA Zürich.
-
- [14] SGK (2001), „**Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen**“, Richtlinie C3, Zürich.
-
- [15] F. Hunkeler, P. Matt, U. von Matt, R. Werner (2005), „**Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden**“, Forschungsbericht Nr. 588, VSS Zürich.
-
- [16] J.P. Fuzier, H.R. Ganz, P. Matt (2005), „**Durability of post-tensioning tendons**“, fib recommendation bulletin 33, fib Lausanne.
-
- [17] R. Werner, Dr. M. Faller, Dr. P. Richner, P. Matt (2004), „**TEKORS - Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern – Wirksamkeit und Praxistauglichkeit**“, Forschungs- und Arbeitsbericht 14.01, EMPA Dübendorf.
-
- [18] R. Werner, M. Faller (2007), „**Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern (TEKplus) – Wissenschaftlich, technische Begleitung der Umsetzung in die Praxis**“, Forschungsbericht Nr. 614, VSS Zürich.
-

Liste des modifications

Édition	Version	Date	Modifications
2001	1.00	2001	Entrée en vigueur de l'édition 2001.
2007	2.00	01.09.2007	Entrée en vigueur de l'édition 2007.

