

100 ans de protection contre la corrosion

Une rétrospective des activités et
de l'évolution de la SGK



Table des matières

Introduction	3
Développement historique de la SGK	4
La SGK moderne	12
Domaines d'activité de la SGK	16
Perspectives	29
Bibliographie	30

Introduction

La Société Suisse de Protection contre la Corrosion (SGK) fête cette année ses 100 ans d'existence. Un aperçu de la fondation, des activités passées et actuelles de l'association sera présenté.

Suite à l'électrification des lignes de chemin de fer en Suisse, des dommages ont été causés à plusieurs reprises aux installations d'infrastructure en raison de l'influence du courant continu. Avec la création de la Commission de corrosion en 1923, un organisme neutre et indépendant a été créé en Suisse pour traiter les problèmes de courant vagabond et contrôler les chemins de fer à courant continu. Au fil du temps, l'éventail des activités s'est élargi aux domaines d'activité les plus divers, comme la protection cathodique contre la corrosion ou la corrosion de l'acier dans le béton. La commission de corrosion a élaboré un petit recueil de directives qui résume les connaissances actuelles pour la protection contre la corrosion dans certains domaines du bâtiment, des infrastructures de transport et de l'évacuation des eaux usées, et qui est aujourd'hui reconnu comme règle de la technique. Le bureau de la SGK est devenu une entreprise moderne de prestations de services pour la protection contre la corrosion qui, outre les conseils, les contrôles et les examens de routine, effectue également des travaux de recherche à plus grande échelle et développe de nouvelles méthodes d'examen. Les connaissances qui en résultent sont transmises dans le sens d'un transfert de technologie par des publications et des offres de formation.

Développement historique de la SGK

En 1888, la ligne de tramway Vevey-Montreux-Chillon a été le premier chemin de fer électrifié à 600 V DC en Suisse. Suivirent en 1900 les premiers kilomètres de la ligne électrifiée Aigle-Leysin à 1500 V DC et en 1901, le premier tronçon de la ligne de l'Oberland bernois de Montreux (MOB) fut mis en service de Montreux jusqu'à la localité Les Avants. D'autres chemins de fer suivirent, comme l'électrification de la ligne de la Bernina (Figure 1) ou de l'ESB (Figure 2). L'électrification des chemins de fer a non seulement permis de réduire la dépendance vis-à-vis du charbon étranger, mais a également renforcé l'industrie électrotechnique suisse (Figure 3). Il n'est donc peu surprenant que toute une série de chemins de fer ainsi que des membres de la SGK issus du secteur électrotechnique fêtent également leur centenaire au cours de ces années. Ce progrès technique et l'exploitation des chemins de fer à courant continu n'ont toutefois pas été sans conséquences pour les structures tierces : les courants de traction ont entraîné de fortes influences corrosives et des dommages sur les infrastructures métalliques enterrées. Par conséquent, les premières négociations entre la Société suisse des professionnels du gaz et des eaux (SSIGE) et l'Association des chemins de fer secondaires suisses (VSS) ont eu lieu dès 1914 pour étudier les effets des courants vagabonds provoqués par les chemins de fer à courant continu sur le réseau de distribution d'eau. En 1916, une commission commune a été créée, à laquelle appartenaient également des représentants de l'Association suisse des électriciens (ASE). Celle-ci a rédigé deux rapports fondamentaux sur la corrosion due aux courants de terre des chemins de fer électriques et sur les méthodes d'analyse des conditions de corrosion des chemins de fer électriques [1, 2]. Sur cette base, 1920 principes directeurs concernant les mesures de protection contre les effets du courant vagabond ont été rédigés et les associations concernées ont recommandé à leurs membres de les respecter. Les principales recommandations de ces lignes directrices concernaient la limitation à 0,8 V de la différence de tension entre les rails et les structures influencées, ainsi que la définition d'exigences relatives à la conductivité longitudinale des rails et en particulier des joints d'about. Pour les structures influencées, il a été recommandé en premier lieu d'installer des joints isolants, tous les 20 à 25 m pour les canalisations, et en second lieu de prévoir des drainages pour évacuer les courants vagabonds.



Figure 1

Électrification des premiers tronçons de la ligne de la Bernina vers 1908
(<https://de.wikipedia.org/wiki/Berninabahn>)



Figure 2

Le chemin de fer électrique à voie étroite (ESB) Soleure-Worblaufen en 1916, année de son ouverture (source : RBS)



Figure 3

Ligne de tramway 6 vers 1930 à Genève avec une caténaire réalisée par Furrer et Frey SA
(© furrerfrey.ch/Willy Riesterer)

En 1923, la Commission de corrosion a été créée, une commission permanente commune aux organisations susmentionnées et à la Direction générale des télégraphes (DGT). Le premier président de la commission de corrosion fut le professeur J. Landry de l'EPF-Lausanne. La création d'un organe de contrôle dans le cadre de la commission de corrosion peut être considérée comme la véritable naissance de la SGK. Ses tâches primaires consistaient à effectuer des analyses générales des conditions de corrosion et des contrôles réguliers conformément aux principes directeurs élaborés par la Commission de corrosion. [3, 4]. Les principaux aspects du travail de la commission de corrosion et de l'organe de contrôle ont été régulièrement publiés dans le Bulletin du SEV jusqu'en 1963.

Dans la phase initiale, le travail de l'organe de contrôle comprenait en premier lieu le contrôle des chemins de fer à courant continu conformément aux principes directeurs et la vérification de l'influence du courant vagabond sur les câbles et les conduites dans la zone d'influence des chemins de fer. Sept ans après sa création, 21 chemins de fer avaient déjà été contrôlés. L'une des tâches principales consistait à parcourir les voies, à contrôler visuellement les raccords de rails et à effectuer des mesures de résistance en cas de raccords douteux. En 1930, 21 240 jonctions de rails ont été mesurées. Dans les années suivantes, l'ampleur des contrôles périodiques a continuellement diminué en raison des améliorations obtenues et a pris fin en 1963 avec l'introduction systématique de rails soudés. Par la suite, on a procédé à un nombre croissant d'examen spéciaux, tels que la clarification des dommages dus à la corrosion, les mesures visant à améliorer les conditions de courant de retour et les mesures de courant dans les câbles à gaine de plomb, ainsi que des examens fondamentaux de la corrosion électrolytique dans le sol [5] ont été menées. Différents thèmes qui sont encore d'actualité aujourd'hui ont été abordés pour la première fois à cette occasion. Dès 1936, les problèmes potentiels liés à l'utilisation du réseau de distribution d'eau comme terre pour les installations électriques ont été discutés, en 1945, on a trouvé pour la première fois des indices de l'intervention d'éléments galvaniques comme cause de dommages sur les canalisations et en 1950, la technique de mesure du potentiel a été introduite. En 1956, des recommandations ont été émises pour que les installations de protection contre la foudre en contact avec des canalisations en acier ou en fonte ne soient pas réalisées en cuivre afin d'éviter la présence d'éléments galvaniques. En 1961, il a été proposé de tenir les courants étrangers à l'écart des réservoirs en installant des pièces isolantes. Par la suite, différents problèmes de corrosion ont été étudiés dans les installations domestiques et de plus en plus d'études ont été menées sur les installations de réservoirs et en rapport avec les installations de mise à la terre. Des influences de courants vagabonds inconnues ou ignorées jusqu'alors ont également été

identifiées, à savoir l'entraînement de courants vagabonds via le réseau de rails des chemins de fer à courant alternatif et les conducteurs neutres du réseau électrique. Dans les années cinquante, les premières expériences ont été faites avec la méthode de protection cathodique contre la corrosion (PCC). Celle-ci a été appliquée pour la première fois en 1950 pour la protection intérieure de réservoirs d'eau chaude, en 1953 pour des installations de citernes, en 1958 pour la protection d'un pont en acier dans un lac de barrage et en 1959 pour des canalisations. Pour effectuer les mesures, des dispositifs de mesure spécifiques ont toujours été construits ou assemblés. Par exemple, dès 1938, une installation pour l'enregistrement automatique des diagrammes courant-tension a été développée et en 1951, une voiture a été achetée et équipée comme véhicule de mesure. La reconnaissance déjà élevée à l'époque de la compétence professionnelle des responsables du bureau de contrôle se reflète également dans les mandats à l'étranger qui ont pu être traités entre 1937 et 1940 à Athènes, en Palestine et à Belgrade. A partir de 1940, outre les contributions de l'association au financement du bureau de contrôle, des subventions industrielles ont été versées au bureau de contrôle par des entreprises intéressées.

Une modification profonde des activités de l'organe de contrôle a eu lieu dans les années 1963 et 1979 sous la direction du Dr R. Petermann et du professeur E. Baumann (EPFZ), alors président de la commission de corrosion. C'est à cette époque qu'ont eu lieu, entre autres, la construction de deux grands oléoducs, la mise en place du réseau suisse de gaz naturel avec des conduites à haute pression protégées par la PCC et la publication des prescriptions techniques relatives aux réservoirs PEL, qui déclaraient la protection cathodique des réservoirs de stockage enterrés en acier obligatoire pour la plupart des cas d'application. Cela a conduit à un travail intensif sur les questions d'application et d'évaluation de l'efficacité de la protection cathodique. Les expériences et connaissances ainsi acquises ont été intégrées en 1969 dans les directives C1 pour la conception, la réalisation et l'exploitation de la protection cathodique des canalisations. Il convient de mentionner en particulier la mesure du potentiel de coupure introduite en 1968 comme critère d'évaluation de l'efficacité de la protection cathodique et le développement d'un système de mesure et d'une procédure d'essai standard pour le contrôle de l'efficacité de la protection cathodique des petites installations de réservoirs. Ceux-ci ont servi de base à un guide publié en 1977 par l'Office fédéral de l'environnement dans le cadre des mesures de protection des eaux et de la directive C5 pour l'étude, la réalisation et l'exploitation de la protection cathodique des réservoirs de stockage enterrés en acier. Dans le cadre de la mise en place du réseau de gaz naturel à haute pression, une collaboration intensive s'est développée avec l'Inspection fédérale des pipelines (IFP), pour laquelle le bureau de contrôle a effectué des mesures à partir de 1968. Les dépenses nécessaires



à cet effet ont toutefois rapidement dépassé les capacités en personnel de l'organe de contrôle, de sorte que les mesures périodiques ont été effectuées par l'IFP elle-même à partir de 1972. Dès lors, l'activité de l'organe de contrôle s'est orientée vers des tâches de conseil et l'étude de problèmes spéciaux. Aujourd'hui encore, la SGK travaille pour l'IFP en tant qu'expert en protection contre la corrosion.

Le passage, dans les années soixante, de tuyaux en fonte grise à des tuyaux en fonte ductile pour les conduites d'eau et les prescriptions édictées en 1985 par l'ASE concernant la compensation de potentiel dans les installations domestiques ont également eu des répercussions importantes. La réalisation d'importantes fondations en béton armé et d'abris anti-aériens, combinée à la compensation de potentiel, a entraîné une corrosion galvanique et de nombreux dommages aux conduites d'eau relativement neuves. Ces dommages ont été aggravés par un enrobage moins soigné des canalisations, conséquence de la forte amélioration des propriétés mécaniques des tuyaux en fonte ductile, dans un sol hétérogène. La problématique de l'enrobage des conduites, de la qualité de l'isolation des conduites et de la formation d'éléments avec l'armature des structures en béton armé et l'élaboration de la directive C2 publiée en 1976 sur la protection contre la corrosion des installations métalliques enterrées ont constitué un autre point fort des activités du bureau de contrôle.

A partir de 1973 environ, on a assisté à un net transfert des activités de contrôle vers les activités de conseil et les enquêtes sur les sinistres. Outre les points forts déjà mentionnés, les cas de corrosion dans les installations domestiques, comme les chauffages au sol et les systèmes d'eau chaude, ainsi que dans les installations d'eaux usées ont été particulièrement traités. Cette évolution s'est poursuivie de manière continue sous la direction du Dr F. Stalder en tant que directeur du bureau (1980-2006) et du professeur H. Böhni (1978-2007) en tant que président de la commission de corrosion, intégrée en 1983 à la Société suisse de protection contre la corrosion (SGK). Grâce aux relations étroites avec l'Institut des matériaux de construction, de la chimie des matériaux et de la corrosion (IBWK) de l'EPFZ, dirigé par le professeur H. Böhni, la SGK a toujours disposé des bases scientifiques les plus récentes pour élaborer des solutions pratiques aux problèmes de corrosion qui lui étaient soumis par l'industrie. Cette compétence élevée a entraîné, d'une part, une forte augmentation de la demande de services et, d'autre part, l'ouverture de nouveaux domaines d'activité et la possibilité de mener des travaux de développement et de recherche. Le déménagement en 1993 dans le Technopark, où le CorrTech, un laboratoire appartenant à l'IBWK, a pu être utilisé dans le cadre d'une collaboration pour la réalisation de projets de recherche et de travaux de laboratoire communs

de la SGK, a constitué une étape importante dans ce sens. Par la suite, le nombre de collaborateurs du bureau est passé de deux à six. Au fil du temps, cette activité de laboratoire est devenue une partie indispensable des activités de la SGK, si bien qu'après le départ à la retraite du professeur Böhni, un laboratoire propre a été créé. Celui-ci est spécialement équipé pour effectuer des analyses électrochimiques et rend de précieux services non seulement pour le déroulement des projets de recherche, mais aussi pour les analyses techniques des matériaux, les études dans le domaine de la corrosion de l'acier dans le béton et l'examen de cas de dommages issus d'applications industrielles. Les nouveaux domaines de travail les plus importants ont été les ouvrages en béton armé, les ancrages et les câbles de précontrainte ainsi que les installations d'eau et d'eaux usées. Les projets internationaux ont pris de plus en plus d'importance. Pour l'industrie du bâtiment en Allemagne, des études approfondies ont été menées sur la durabilité des armatures de raccordement dans le béton armé, déplacées ultérieurement dans des trous de forage. Celles-ci ont conduit au développement d'une méthode d'essai qui a été reconnue au niveau international et reprise par l'EOTA pour l'homologation européenne. [6]. De plus, des projets de recherche ont été menés pour l'industrie gazière allemande. Outre ces activités de laboratoire, des études de terrain sur la protection cathodique contre la corrosion ont été menées en Arabie saoudite (Figure 4) et en Iran.



Figure 4

Examens dans une station de pompage en Arabie saoudite

Sous la direction actuelle du Dr M. Büchler en tant que directeur (depuis 2006) et sous la présidence de M. Lörtscher (2007-2015), les activités de la SGK ont pu être développées. En particulier, l'expérience approfondie de M. Lörtscher dans le domaine des chemins de fer, de l'alimentation électrique des chemins de fer et de l'infrastructure ferroviaire ainsi que de la mise à la terre a conduit à un renforcement dans le domaine de la technique ferroviaire et des courants vagabonds (Figure 5). Il s'en est suivi des commandes pour des chemins de fer à courant continu en Australie (Figure 6) et en Inde (Figure 7) et les compétences approfondies dans le domaine de la PCC ont abouti à la direction technique de trois projets de recherche pluriannuels de la DVGW par la SGK. Ces projets de recherche ont conduit au développement de la règle technique DVGW GW 28. Avec l'importance croissante de la normalisation internationale, Dr M. Büchler a pris en 2012 la fonction de convener de l'ISO TC 156 WG 10 pour la PCC des structures enterrées et immergées. Parallèlement à ces projets de recherche sur la PCC, la SGK a mis en place des cours de formation complets. De 2015 à 2017, la SGK a été présidée par R. Wendelspiess. En sa qualité de directeur de l'Inspection des pipelines, le domaine thématique de la PCC a été intensifié et la SGK a dirigé un groupe de travail européen pour la révision des critères de la PCC. En 2017, le collaborateur de la SGK, Dr U. Angst, a repris la fonction de professeur à l'EPF de Zurich et est devenu par la suite président de la SGK. Après 10 ans d'interruption, le lien direct entre la SGK et l'EPF a ainsi été rétabli avec le professeur U. Angst. D'importantes synergies ont à nouveau pu être exploitées, ce qui a renforcé la fonction de la SGK en tant qu'interface entre l'application industrielle et l'université. Actuellement, neuf collaborateurs sont employés par la SGK. Avec deux électrotechniciens, deux ingénieurs en matériaux, deux ingénieurs civils et un ingénieur mécanicien, la SGK est en mesure de traiter les aspects les plus divers de la corrosion et de la protection contre la corrosion, mais aussi de la mise à la terre, de la technique ferroviaire et de la protection des personnes. La reconnaissance internationale de la compétence professionnelle, mais aussi la position neutre entre les exploitants d'installations qui influencent et ceux qui sont influencés, conduit à un fort engagement international, comme le montrent des projets en France, en Allemagne, en Angleterre, aux Pays-Bas et en Espagne, mais aussi en Afrique du Sud, en Australie et en Israël.



Figure 5

Saisie de la répartition du courant de fuite sur le réseau CFF au Tessin



Figure 6

Études sur les courants vagabonds à Gold Coast (Australie)



Figure 7

Mesures dans le métro de Bangalore (Inde)

La SGK moderne

But et organisation de la SGK

La SGK a pour but de promouvoir la protection contre la corrosion dans les domaines techniques et scientifiques en Suisse en général et parmi ses membres en particulier. C'est une organisation indépendante et innovante, active dans le domaine de la protection contre la corrosion, qui encourage et pratique le transfert de technologie de la science vers la pratique et représente les intérêts de ses membres dans les instances nationales et internationales. En outre, elle propose des prestations de service dans le domaine de la protection contre la corrosion, qu'elle offre en tant qu'organisation neutre à but non lucratif, orientée vers le marché et couvrant ses frais.

Conformément au code civil, la SGK est une association dont le siège est à Zurich. Elle est certifiée ISO 9001 depuis 2005. Les principaux organes de la SGK sont l'assemblée générale, le comité directeur et le bureau qui exécute les tâches de la SGK. Pour traiter les problèmes techniques de corrosion et réaliser des études, le comité directeur forme une commission technique permanente, la commission de corrosion. Elle n'a pas de personnalité juridique propre. La commission de corrosion établit des principes directeurs pour la prévention des dommages dus à la corrosion.

La grande compétence professionnelle, les contacts internationaux via les comités de normalisation, mais surtout la collaboration constructive au sein des membres dans le cadre de groupes de travail a largement contribué au succès de la SGK. La création, il y a 100 ans, d'un organisme neutre spécialisé dans le traitement des problèmes de corrosion a permis de jeter les bases essentielles de la réussite ultérieure : Influenceurs et influencés se sont assis autour d'une table, ont exposé les problèmes techniques et ont créé une stratégie commune pour les résoudre. Aujourd'hui encore, les discussions au sein des groupes de travail sont toujours constructives et orientées vers la recherche de solutions. Il ne fait

aucun doute que l'eau, le gaz, l'électricité, les chemins de fer et les routes sont des éléments essentiels de l'infrastructure suisse et qu'il n'est pas toujours possible d'exclure les conflits d'intérêts entre les personnes qui influencent et celles qui sont influencées dans certains cas. Il va de soi que les règles techniques doivent être respectées et que les coûts liés à la résolution des problèmes qui surviennent malgré tout doivent être partagés entre les parties concernées conformément à la ligne directrice C4.

Ce type de collaboration constructive est rare au niveau international. C'est pourquoi, lors d'interventions à l'étranger, la SGK a souvent pour mission d'informer et de former les entreprises participantes afin d'identifier des solutions constructives.



Directives, organismes nationaux et internationaux

Afin de permettre l'application des connaissances actuelles dans la pratique et d'éviter ainsi les dommages à titre préventif, la SGK a publié au total 7 directives qui sont, si nécessaire, révisées et adaptées aux prescriptions et normes actuelles. Les directives C1, C2, C3, C4 et C5 ont été reconnues en Suisse comme règles de la technique par le législateur. [7].

La SGK a toujours entretenu des relations nationales et internationales avec différents organismes spécialisés et participe activement à leurs activités. Dès 1927, elle représente la Suisse au sein du CCI (Comité consultatif international des communications téléphoniques à grande distance) et devient membre de la CMI (Commission mixte internationale pour les expériences relatives à la protection des lignes téléphoniques) en 1929. Depuis 1972, elle est membre du CEOCOR, le Comité européen d'étude de la corrosion et de la protection contre la corrosion des systèmes de canalisations. Ses congrès annuels sont d'un très haut niveau technique et les dernières connaissances y sont toujours présentées. La culture de discussion ouverte et constructive a également permis que toutes les normes européennes et internationales pertinentes pour la PCC soient issues de documents de travail du CEOCOR. Trois collaborateurs du bureau ont été élus présidents de secteur et de commission au sein de cette organisation et Dr M. Büchler en assure actuellement la présidence.

Depuis 20 ans, des collaborateurs de la SGK sont également actifs dans la normalisation nationale (SIA) et internationale (CEN, CENELEC et ISO). Là, des connaissances pertinentes issues des travaux de recherche de la SGK ont pu être directement intégrées dans les normes internationales.

Transfert de connaissances

L'un des grands efforts de la SGK est de transférer dans la pratique les dernières connaissances et solutions dans le domaine de la corrosion et de la protection contre la corrosion et de les rendre accessibles au public. Cela se fait par le biais de conférences, de publications dans des revues spécialisées, de l'édition de directives, de l'organisation de cours de formation et de la participation à différents groupes de travail. Depuis 1980, plus de 300 publications de la SGK ont été éditées. En plus des publications annuelles, une dizaine de conférences sont données à chaque fois lors de manifestations nationales et internationales. De plus, les membres de la SGK sont informés des dernières connaissances techniques, des développements normatifs et des activités de la SGK dans le cadre des assemblées générales annuelles.

Les formations jouent également un rôle important dans le transfert des connaissances. En 2006, une première norme concernant les compétences du personnel PCC a été publiée, qui a été transformée en norme ISO en 2017 et qui réglemente ainsi les exigences posées au personnel spécialisé dans le monde entier. [8]. La SGK a développé des cours de formation/préparation pour les domaines des sols et du béton armé, qui sont proposés depuis 2008 en allemand, français et anglais. La grande qualité de ces cours entraîne également une grande participation des pays voisins et des formations de plusieurs jours ont déjà eu lieu en Belgique, aux Pays-Bas, en Angleterre et en Australie. En plus de ces cours spécifiques sur la PCC, la SGK organise à chaque fois des cours de formation sur mesure les plus divers pour les entreprises et les associations, qui tiennent compte des exigences spécifiques et des conditions marginales respectives, comme par exemple la formation du personnel ferroviaire du métro de Sofia (Bulgarie) pour l'exécution pratique des mesures de contrôle périodiques de la protection contre les courants vagabonds.

Collecte et évaluation des données

La saisie technique de mesure des influences variables dans le temps a toujours été une compétence centrale de la SGK. Le développement et la construction de dispositifs de mesure appropriés ainsi que leur utilisation dans des conditions parfois exigeantes ont marqué le travail dans le passé et ont contribué de manière essentielle au savoir-faire technique. Le progrès technique avec la saisie et le traitement numériques des données a donc aussi considérablement modifié l'environnement de travail de la SGK. En 1995, des dispositifs de surveillance ont été installés pour la première fois sur le pont de l'Europe à Zurich après l'application d'un nouveau revêtement d'étanchéité de la chaussée afin de suivre l'influence de

la déshydratation du pont sur la vitesse de corrosion. Ces procédés ont été affinés en permanence et ont conduit SGK à développer différents capteurs destinés à être utilisés dans le cadre du monitoring continu des ouvrages en béton armé. L'acquisition de compétences pour le traitement de grandes quantités de données a permis non seulement d'améliorer considérablement l'évaluation des ouvrages en béton armé, mais aussi d'approfondir la compréhension des mécanismes de dégradation en cours et d'identifier les facteurs d'influence pertinents. [9].

Les connaissances acquises grâce à la télésurveillance ont été utilisées dans le cadre d'un projet de recherche de la DVGW pour le développement d'une Smart-PCC qui déterminait en temps réel la situation d'influence des canalisations et réglait les conditions d'exploitation optimales respectives à l'aide d'une commande active. Dans le cadre d'un groupe de travail commun du CECOR et de l'EFC (European Federation of Corrosion), de nouvelles approches ont été élaborées pour l'évaluation de l'efficacité de la PCC. Celles-ci permettent une surveillance automatisée même en cas d'influence combinée des courants alternatif et continu.

Recherche et Développement

La compétence principale de la SGK réside dans la saisie et l'évaluation des problèmes de corrosion par des techniques de mesure. Il en résulte un accès direct aux questions actuelles qui se posent parfois à la suite de nouvelles technologies. Il y a 100 ans, il s'agissait des problèmes d'influence résultant de l'exploitation des chemins de fer en courant continu, à la fin des années 80, des dommages ont été causés aux tuyauteries protégées cathodiquement par l'influence du courant alternatif et ces dernières années, l'utilisation accrue des énergies renouvelables basées sur l'énergie solaire a conduit à des questions d'influence dues aux courants de fuite DC des onduleurs. En outre, il existe des questions non résolues concernant la transmission de courant continu à haute tension ainsi que l'ajout d'hydrogène au méthane et son effet sur la durabilité des tuyauteries. Ces dernières années, la SGK s'est penchée sur la question de l'influence du courant alternatif et du courant continu dans le cadre de vastes projets de recherche et a largement contribué à l'élaboration des normes correspondantes. Actuellement, l'accent est mis sur la contribution du vecteur énergétique hydrogène à la formation de fissures dans les conduites. Mais la contribution de l'hydrogène formé par la PCC à l'endommagement des tuyauteries ou des câbles de précontrainte est également étudiée de manière intensive par la SGK. Il s'agit à la fois d'acquérir une compréhension fondamentale des facteurs d'influence chimiques et physiques pertinents et d'identifier des critères d'évaluation objectifs pour estimer un éventuel danger.

Domaines d'activité de la SGK

L'activité de la SGK s'étend à tous les problèmes de corrosion des métaux dans les milieux aqueux. Elle s'occupe principalement des infrastructures enterrées comme les canalisations dans le sol, mais aussi l'acier d'armature dans le béton, l'acier inoxydable dans les eaux usées, le laiton dans l'eau potable ou les voies ferrées dans les tunnels. Mais il aborde également des questions spécifiques comme la résistance des implants dentaires, des produits de nettoyage dans l'industrie alimentaire ou la formation de fissures dans les systèmes de production de vapeur. Nous présentons ci-après un aperçu des principaux domaines d'activité de la SGK.

Installations enterrées

Courants vagabonds

La première édition de la directive C3 sur les courants vagabonds de la SGK, rédigée en 1977, a été constamment actualisée et étendue. Un élément essentiel des mesures de protection contre les courants vagabonds consiste à éviter leur propagation en séparant systématiquement la ligne de retour du chemin de fer de la mise à la terre de l'exploitant du réseau. Outre l'évaluation métrologique de la charge de courant vagabond d'un ouvrage avant sa construction, la conception de mesures de protection et le contrôle de l'exécution/ de l'efficacité des mesures de protection, par exemple le contrôle exigeant de la séparation des systèmes de mise à la terre, ont constitué les principales activités de la SGK dans ce domaine.



Détection du rayon de danger de courant vagabond d'une piste en courant continu

A partir de 2001, une nouvelle méthode de mesure de l'isolation électrique des rails a été introduite et utilisée pour les mesures de réception des voies ferrées nouvellement construites. Il en a résulté la possibilité d'estimer le rayon d'influence critique des voies, ce qui a permis pour la première fois de déterminer par le calcul les influences des courants vagabonds dans la phase de planification. L'élaboration d'une méthode d'évaluation pour la saisie du risque de corrosion des installations protégées cathodiquement et influencées par un courant vagabond a également été essentielle. [10]. Ces connaissances et les méthodes de mesure correspondantes sont directement intégrées dans la réglementation internationale [11] et, par la suite, dans la nouvelle directive C3 publiée en 2022.

Corrosion par courant alternatif

En 1989, un gazoduc suisse a été endommagé pour la première fois par la corrosion causée par des courants alternatifs. [12]. Ce nouveau type de corrosion a entraîné des études approfondies sur les gazoducs, qui ont montré que de nombreux gazoducs suisses sont plus ou moins fortement influencés par les courants alternatifs (Figure 9). Le mécanisme d'endommagement a été étudié dans le cadre de vastes travaux de recherche au niveau national et international. La percée a eu lieu en 2003, lorsque la SGK a pu expliquer scientifiquement le mécanisme de la corrosion. [13]. Seule la connaissance des processus sous-jacents a permis de concevoir de nouvelles mesures de protection et d'élaborer des critères de dangerosité qui ont été vérifiés dans le cadre d'autres projets de recherche et repris dans la réglementation internationale. [14]. Ces constatations ont été complétées par deux observations essentielles: Il est techniquement impossible d'empêcher la corrosion par courant alternatif. La profondeur d'attaque maximale possible peut toutefois être limitée. Ces



Figure 9

Conduite de gaz à haute pression sous l'influence d'une tension alternative

conclusions ont été intégrées dans la règle technique DVGW GW 28 B1 et sont actuellement également reprises dans la révision de la directive C1.

Protection cathodique

Dans les années 90, la SGK s'est fortement engagée dans l'uniformisation des termes, des exigences et des méthodes de mesure, qui étaient jusqu'alors appliqués de manière très différente dans différents pays. Dans le cadre du CEOCOR, elle a joué un rôle déterminant dans l'élaboration de guides généralement reconnus, qui ont ensuite servi de base aux normes européennes et internationales.

Les connaissances acquises dans le cadre de la recherche sur la corrosion par courant alternatif ont également des conséquences sur l'évaluation de l'efficacité du système PCC (Figure 10) et les conditions de fonctionnement optimales. Contrairement aux attentes antérieures, il s'est avéré que la corrosion par courant alternatif est favorisée par des courants de protection cathodique élevés, raison pour laquelle le risque de corrosion a été réduit dans de nombreuses installations en adaptant la protection. Cela a inévitablement conduit à des conflits avec la garantie d'un niveau de protection suffisant. Par la suite, la SGK a développé des modèles numériques qui reproduisent correctement les effets chimiques, physiques et électrochimiques qui se produisent réellement ainsi que leurs interactions. Leurs effets sur l'évaluation de l'efficacité ont été discutés et publiés au niveau international. [15]. Cela a permis de créer les bases pour l'évaluation de l'efficacité de la PCC, même en cas d'influence combinée AC et DC. [10]. Ces concepts seront d'une grande importance dans le cadre de l'utilisation accrue de lignes de transmission à haute tension en courant continu et de l'utilisation accrue d'onduleurs dans le contexte



Contrôle de l'efficacité du KKS sur une canalisation

des énergies alternatives. Ces nouvelles approches sont actuellement intégrées dans la révision de la directive C1.



Installations de réservoirs

La SGK a participé activement à l'élaboration de la norme européenne relative à la PCC des réservoirs de stockage enterrés en acier. [16] a participé à la rédaction de ce rapport. Grâce à cette expérience, la directive C5 a pu être rééditée en 2018, avec un champ d'application élargi aux réservoirs d'eau et de biogaz.

Depuis 1983, la SGK est responsable, sur mandat de CARBURA, de la protection contre la corrosion des grandes installations de réservoirs avec stockage obligatoire (Figure 11). Celles-ci sont examinées périodiquement quant aux risques liés aux courants vagabonds et galvaniques. Les mesures de protection possibles, telles que la formation d'îlots galvaniques, la protection cathodique contre la corrosion, l'installation de pièces isolantes et d'éclateurs, sont à chaque fois harmonisées et coordonnées avec le concept de mise à la terre de l'installation. Cela permet également de répondre aux exigences en matière de sécurité des personnes et de protection contre les explosions.

Bandes et installations de mise à la terre

L'activité de la SGK se caractérise par le fait qu'elle n'étudie pas uniquement les effets des influences électriques sur les structures tierces. Le soutien aux chemins de fer en ce qui concerne la protection contre la corrosion de l'infrastructure ferroviaire et la minimisation des influences sur les structures tierces constituent une activité essentielle.



Figure 11

Examen de la corrosion dans une installation de réservoirs

La compréhension fondamentale des exigences en matière de retour et de mise à la terre, ainsi que le développement et l'optimisation de méthodes d'évaluation des influences attendues lors de la phase de planification des installations ferroviaires, fournissent un soutien important. Comme lors des années de fondation de la SGK il y a 100 ans, les contrôles réguliers des installations ferro-viaires représentent toujours une activité importante. Bien entendu, le contrôle du pontage des joints de rails n'est plus nécessaire que dans de rares cas. Au lieu de cela, le contrôle de l'isolation des rails ainsi que du fonctionnement des séparations galvaniques est une tâche centrale pour la mise en œuvre des prescriptions de la directive C3. Le succès de la SGK, notamment dans les projets ferroviaires internationaux, réside dans les procédés de mesure et d'évaluation développés ainsi que dans les méthodes sophistiquées de localisation des défauts d'isolation.

Cette compétence est largement mise à profit dans le contexte des investissements intensifs dans l'infrastructure ferroviaire construite en Suisse il y a environ 100 ans, mais aussi dans le développement des transports publics à l'étranger, et continue de constituer un domaine d'activité important de la SGK.

Eau et eaux usées

Captage et distribution d'eau

Avec l'utilisation accrue d'aciers inoxydables, les captages d'eau, comme les puits (Figure 13), des problèmes de corrosion sont souvent apparus suite à la formation d'éléments galvaniques entre les pompes/la robinetterie en fonte et l'acier inoxydable. Les mesures de protection qui ont fait leurs preuves dans ce cas sont la réalisation



Mesures du courant vagabond sur la ligne de la Bernina

de séparations galvaniques ou l'application d'une protection cathodique. L'expérience a malheureusement montré que les mesures prises restent souvent inefficaces en raison de défauts de planification et/ou de l'absence de contrôles de réception.

Ces dernières années, les recherches sur les systèmes d'approvisionnement en eau enterrés et l'élaboration de mesures visant à réduire les dommages causés par la corrosion dans le réseau de canalisations ont également constitué un point fort du travail. Une grande partie de ces dommages est due à la formation d'éléments galvaniques entre les conduites d'eau et l'armature des ouvrages en béton armé. Pour résoudre ce problème, il était nécessaire de s'éloigner de la conduite d'eau en tant que mise à la terre et de séparer l'installation domestique des conduites enterrées, comme le recommande la fiche technique W 1015 de la SSIGE [19], y compris pour les constructions déjà existantes. En étroite collaboration avec l'Inspection fédérale des installations à courant fort (ESTI), des solutions ont été mises au point, qui permettent à la fois de garantir la sécurité des personnes et d'utiliser des tuyaux dotés d'un revêtement de haute qualité, notamment isolant électrique. Dans la ville de Zurich, ces mesures de protection contre la corrosion ont permis de réduire la charge corrosive du réseau d'eau et de diminuer le nombre de ruptures de conduites de plus de 1000 en 1985 à environ la moitié aujourd'hui. [17].

Vers la fin du siècle dernier, des dégradations des revêtements en mortier de ciment ont été observées dans de nombreux réservoirs d'eau potable sous la forme de taches, généralement brunes, et de ramollissements locaux. Dans le cadre d'un projet de recherche, il a été démontré que ces effets étaient dus à la corrosion galvanique du béton. [18]. Cette corrosion galvanique sur un matériau inorganique non métallique peut être limitée par les mêmes mesures de protection que celles appliquées aux matériaux métalliques : Courant de protection ou séparations galvaniques.



Figure 13

Examen de la corrosion dans un puits

Centrales électriques

Les problèmes de corrosion galvanique ne se limitent pas à l'approvisionnement en eau, mais apparaissent également, par analogie, dans les installations hydroélectriques (Figure 14). Le problème de la corrosion sur les canalisations (Figure 15) ainsi que les questions relatives à la qualité de l'enrobage constituent donc toujours des domaines d'activité importants.

Installations de traitement des eaux usées

Pendant le mandat du Dr R. Petermann, environ 60 % des stations d'épuration des eaux usées suisses ont été construites. Malheureusement, on ne jugeait pas nécessaire à l'époque de faire appel à un spécialiste de la corrosion. Par conséquent, des dommages massifs et



Figure 14

Étude de la corrosion galvanique sur une centrale au fil de l'eau



Figure 15

Évaluation de la protection contre la corrosion sur une conduite d'eau sous pression

coûteux sont apparus après des périodes d'exploitation relativement courtes et les mêmes erreurs ont été commises à plusieurs reprises. Afin de les éviter, ou du moins de les réduire, la SGK a élaboré la directive C6 sur la protection contre la corrosion dans les installations d'eaux usées, publiée en 1990. Afin que les mesures qui y sont proposées puissent être mises en œuvre dans la pratique à un coût économiquement acceptable et qu'elles soient acceptées, il était essentiel que l'Inspection fédérale des installations à courant fort élabore, parallèlement à la directive C6, la directive STEP. Celle-ci traite des aspects électrotechniques et de la sécurité des personnes qui y sont liés. Il convient de mentionner en particulier la possibilité d'alimenter des composants électriques montés de manière isolée via des unités de délimitation pour des raisons de corrosion (Figure 16).

La directive C6 a connu un grand succès avec plus de 2000 exemplaires vendus. Grâce à elle, des améliorations décisives ont pu être apportées à la planification, à la construction et à l'équipement des installations, notamment en ce qui concerne la conception et la qualité de traitement des aciers inoxydables et des revêtements. Cela s'est traduit par un net recul des dommages. Si des problèmes importants surviennent encore aujourd'hui, ils sont généralement dus à l'absence de concepts de protection anticorrosion spécifiques aux installations ainsi qu'à la définition peu claire des responsabilités et au manque de coordination des travaux. Ces points ont été pris en compte lors de la dernière révision de la directive par des compléments correspondants. Aujourd'hui, on ne construit pratiquement plus de nouvelles installations, mais on réalise surtout des transformations ou des extensions. Dans ce cas, les conditions spécifiques à chaque installation étant différentes, l'élaboration de solutions spécifiques à l'installation revêt une importance particulière. La directive fournit également les bases nécessaires à cet effet, mais il



Contrôle de la protection anticorrosion dans une station d'épuration des eaux usées

est recommandé de faire appel à un spécialiste de la corrosion pour l'élaboration d'un concept global. Les concepts développés pour les installations d'eaux usées sont aujourd'hui de plus en plus utilisés pour les installations de production d'énergie.

Béton armé

En étroite collaboration avec l'IBWK et le canton Grisons, la mesure du champ potentiel a été introduite en Suisse dans les années 80 pour l'examen non destructif des constructions en béton armé et a été adaptée à l'état actuel de la technique. La mesure du champ potentiel est aujourd'hui utilisée de manière routinière pour déterminer l'état des armatures des ponts routiers (Figure 17). Durant la même période, l'application de la PCC pour la réfection du tablier du tunnel du San Bernardino a également été étudiée. Les connaissances acquises à cette occasion constituent la base de la directive C7 pour la conception, l'exécution et la surveillance de la protection cathodique contre la corrosion des structures en béton armé. La protection contre la corrosion des structures en béton armé gagne aujourd'hui rapidement en importance. Cela conduit non seulement à un nombre croissant de projets de la SGK, mais aussi à d'importants développements normatifs. Dr M. Brem a participé à la révision de la norme SN EN ISO 12696 [19] et actuellement, différentes études sont en cours à la SGK afin d'améliorer l'évaluation de l'effet protecteur du procédé par des mesures et de simplifier la mise en œuvre dans l'application.

Outre ces méthodes désormais bien établies de relevé de l'état et de remise en état, le monitoring sur de nombreuses structures fournit, grâce à la saisie continue des données, des informations importantes pour l'évaluation de l'efficacité des mesures de protection. Grâce



Relevé d'état sur un pont en béton armé

aux compétences internationalement reconnues du Dr M. Brem, des projets ont été menés en Afrique du Sud, en France et en Italie.



Ancres et câbles de tension

Dans les années 80 et 90, la protection contre la corrosion des tirants d'ancrage dans le sol et dans la roche a été améliorée de manière décisive grâce aux mesures prises pour séparer les tirants de l'armature des structures en béton et à l'utilisation de tubes de gainage en plastique (Figure 18). Lors de la construction de la gare de Stadelhofen, on a toutefois constaté, que la protection contre la corrosion ne répondait pas initialement aux attentes en raison d'une pose peu soignée. La SGK a alors développé des méthodes de mesure et des critères de contrôle de la qualité de la pose, qui ont été généralement reconnus et qui sont prescrits dans les normes et directives actuelles. [20]. La protection contre la corrosion des micropieux, de plus en plus souvent utilisés pour des raisons économiques, a fait l'objet d'essais en laboratoire et sur le terrain. Dans ce contexte, outre la surveillance à long terme des ouvrages existants, l'utilisation d'aciers inoxydables comme matériau alternatif a été introduite ces dernières années.

Dans les zones exposées aux courants vagabonds, les câbles de tension sont isolés de l'armature des ouvrages, notamment des ponts. Or, pendant la construction, des contacts involontaires avec l'armature se produisent régulièrement. Pour localiser ces points de contact, la SGK a développé ces dernières années des méthodes, qui se sont avérées très efficaces dans la pratique.



Analyse de la corrosion sur les ancrages d'une paroi de pieux

Autres infrastructures et sites industriels

Tunnels

La SGK a réalisé différentes études dans des tunnels ferroviaires et routiers. Dans le tunnel de base de la Furka, de fortes pertes de section ont été constatées sur les rails après seulement 5 ans d'exploitation. Les raisons en ont été des infiltrations d'eau et l'humidité relative élevée qui en résulte, la présence d'un fusible de ligne à courant continu et un apport de chlorure d'une importance inattendue. Cela a conduit à la conclusion que dans les tunnels ferroviaires avec transport de voitures, le dégel de la neige contenant du sel de déneigement entraîne une forte augmentation de la corrosion, dont il faut tenir compte par un choix approprié des matériaux et des adaptations constructives.

Dans les tunnels routiers, l'accent a été mis sur les phénomènes de corrosion au niveau des suspensions des faux-plafonds, des conduites d'hydrantes et des installations dans l'espace de circulation (Figure 19). Dans la plupart des cas, les «qualités standard» d'acier inoxydable encore souvent utilisées n'y sont pas ou que partiellement résistantes. Pour les éléments de construction importants pour la sécurité, il est donc nécessaire d'utiliser des aciers inoxydables fortement alliés ou des matériaux alternatifs. Cette situation est prise en compte dans la norme SIA 179 [21]. Sur la base de l'évaluation des expériences faites dans les tunnels routiers suisses, un projet de recherche de l'OFROU mené par la SGK a proposé un choix des composants en fonction des risques.



Figure 19

Examen de la corrosion sur le faux plafond d'un tunnel routier

Les systèmes d'eau d'extinction, notamment les conduites d'hydrantes et leurs conduites d'alimentation, constituent souvent un autre point problématique. Diverses dégradations dues à la corrosion, notamment au contact avec l'armature du tunnel et les installations de mise à la terre, sont apparues ici, ce qui aurait pu, en cas d'urgence, compromettre le bon fonctionnement des installations.



Matériaux

Les installations de laboratoire mises en place en 2004 ont permis de traiter davantage de questions relatives aux matériaux. Différents projets de développement et de recherche ont été menés sur l'optimisation des alliages non ferreux, des études comparatives dans le cadre de l'homologation de matériaux alternatifs pour les conduites d'eau potable avec raccords à sertir ainsi que sur les possibilités d'utilisation de différents aciers inoxydables comme aciers d'armature. En outre, la SGK a développé, dans le cadre de vastes études de laboratoire, le contrôle de la corrosion pour les aciers d'armature installés ultérieurement. [6]. Cette procédure a été transposée dans des règlements internationaux.

Pour les essais de matériaux et le contrôle de qualité, la SGK a développé l'ec-pen, un outil récompensé en 2001 par le Prix suisse de la technologie, qui permet d'effectuer rapidement et simplement des essais électrochimiques sur n'importe quel élément de construction pratique et sur place. [22]. Ces dernières années, l'ec-pen a été utilisé avec grand succès par la SGK pour le contrôle de la qualité des constructions soudées et des fabrications spéciales en acier inoxydable. L'un des grands avantages de ce contrôle est qu'il permet de se prononcer directement sur la résistance à la corrosion des éléments de construction et des installations terminés. Il s'est avéré que celle-ci était souvent fortement altérée par des modifications de la surface et de la structure dues à la fabrication ainsi qu'à un traitement ultérieur insuffisant. L'ec-pen permet également d'évaluer objectivement l'efficacité des mesures de post-traitement telles que le décapage ou l'électro polissage, ainsi que les optimisations apportées aux procédés de soudage.

Revêtements

La SGK dispose de deux collaborateurs formés et certifiés en tant qu'inspecteurs de revêtements.

Son activité comprend principalement l'évaluation de l'état des constructions métalliques revêtues, l'élaboration de recommandations pour les mesures de remise en état et la réalisation de mesures d'assurance qualité sur l'objet. Sur mandat de la SSIGE, elle effectue en outre des contrôles externes pour les tuyaux en fonte avec revêtements intérieurs PUR. Par ailleurs, il existe une étroite collaboration avec les CFF pour les questions de protection contre la corrosion.

Perspectives



Il est du devoir de la SGK d'être toujours à la pointe des connaissances et de la technique afin de pouvoir continuer à offrir à ses membres et clients un conseil optimal. Les travaux de recherche visant à développer des bases et des méthodes de mesure continueront donc à l'avenir d'être considérés comme une priorité afin de répondre aux défis du tournant énergétique, du développement des transports publics et de l'utilisation durable des ressources. La prévention de la corrosion extérieure n'est pas seulement pertinente pour la sécurité de fonctionnement des canalisations et des réservoirs de substances dangereuses pour les liquides et donc pour la protection de l'environnement. Au contraire, une protection efficace contre la corrosion assure également le maintien de la valeur et contribue ainsi considérablement à la durabilité de l'infrastructure. Cela est important d'une part pour des raisons économiques. D'autre part, l'utilisation de procédés de réparation efficaces est également pertinente en ce qui concerne l'utilisation parcimonieuse des ressources.

Bibliographie

1. G. d. S.E.V., «Die Korrosion durch Erdströme elektrischer Bahnen», Bulletin des SEV 7 und 9 (1918).
2. H. Zangger, «Die Methoden zur Untersuchung der Korrosionsverhältnisse bei elektrischen Bahnen, allgemeine Ergebnisse solcher bei schweizerischen Strassenbahnen und die Mittel zur Verbesserung», Bulletin des SEV 10 und 11 (1918).
3. G. d. S.E.V., «Leitsätze betreffend Schutzmassnahmen zur Verminderung der Korrosion an Rohren und Kabeln durch Erdströme elektrischer Bahnen». (Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei AG, Zürich, 1928).
4. H. Zangger, «Die Organisation der Arbeiten der Schweizerischen Korrosionskommission und ihrer Kontrollstelle und einige der bisher erzielten Ergebnisse», Bulletin des SEV 13 (1929).
5. Bourquin, «Versuche über die elektrolytische Korrosion von in Erde verlegten, metallenen Objekten unter konstanter Gleichspannung in Zürich und Neuhausen», Bulletin des SEV 25 (1939).
6. TR 023, «Assessment of post-installed rebar connections» (2006)
7. SR 746.12, «Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (Rohrleitungssicherheitsverordnung, RLSV)» (2021)
8. SN EN ISO 15257, «Kathodischer Korrosionsschutz - Qualifikationsgrade von mit kathodischem Korrosionsschutz befassten Personen - Grundlage für ein Zertifizierungsverfahren (ISO 15257:2017)» (2017)
9. M. Brem, J. Lohner, M. Büchler, «A longterm study on the effect of a hydrophobic treatment on the moisture balance and durability of a reinforced concrete structure in a road tunnel», MATEC Web Conf. 364, 04005 (2022).
10. M. Büchler, «On the mechanism of cathodic protection and its implications on criteria including AC and DC interference conditions», Corrosion 76, 451 (2020).

11. SN EN ISO 21857, «Vermeidung von durch Streuströme beeinflusster Korrosion an Rohrleitungssystemen» (2021)
12. D. Bindschedler, F. Stalder, «Wechselstrominduzierte Korrosionsangriffe auf eine Erdgasleitung», GWA 71, 307 (1991).
13. M. Büchler, «Alternating current corrosion of cathodically protected pipelines: Discussion of the involved processes and their consequences on the critical interference values», Materials and Corrosion 63, 1181 (2012).
14. SN EN ISO 18086, «Determination of AC corrosion — Protection criteria» (2021)
15. U. Angst et al., «Cathodic protection of soil buried steel pipelines – a critical discussion of protection criteria and threshold values», Materials and Corrosion 11, 9 (2016).
16. SN EN 13636, «Kathodischer Korrosionsschutz von unterirdischen metallenen Tankanlagen und zugehörigen Rohrleitungen» (2004)
17. A. Rieder, «Substanzerhaltung als Daueraufgabe», GWA 08/07, 615 (2007).
18. C.-H. Voûte, M. Büchler, F. Wenk, A. Rieder, «FleckenFigurung in Trinkwasserreservoirs», Aqua & Gas 6/2015, 32 (2015).
19. EN ISO 12696, «Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton (ISO 12696:2022)» (2022)
20. SIA 267, «Geotechnik» (2013)
21. SIA 179, «Befestigungen in Beton und Mauerwerk» (2019)
22. M. Büchler, C.-H. Voûte, D. Bindschedler, F. Stalder, «The ec-pen in quality control: Determining the corrosion resistance of stainless steel on-site», NDTCE (2003).

