



**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Empfehlungen zur Qualitäts- kontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen**

**Recommandations pour le contrôle de la qualité du béton  
au moyen de mesures de perméabilité à l'air**

**Recommendations for the quality control of concrete with  
air permeability measurements**

**TFB, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton,  
Wildegg  
F. Jacobs, Dr. sc. techn., Dipl.-Geol. BDG/SIA**

**EMPA, Dübendorf  
A. Leemann, Dr. sc. nat.**

**EPFL, Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des  
ouvrages (MCS), Lausanne  
E. Denarié, Dr. sc. techn., Dipl. Bauing. EPFL/SIA**

**SUPSI, Istituto Materiali e Costruzioni, Canobbio  
T. Teruzzi, Dr. sc. nat., Dipl. Phys. ETHZ**

**Forschungsauftrag AGB 2007/007 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Brückenforschung (AGB)**

**Dezember 2009**

**641**

**Abb. D-5 korrigiert; 2011**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).  
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.  
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade.  
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads office.  
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen**

**Recommandations pour le contrôle de la qualité du béton au moyen de mesures de perméabilité à l'air**

**Recommendations for the quality control of concrete with air permeability measurements**

TFB, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg  
F. Jacobs, Dr. sc. techn., Dipl.-Geol. BDG/SIA

EMPA, Dübendorf  
A. Leemann, Dr. sc. nat.

EPFL, Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages (MCS), Lausanne  
E. Denarié, Dr. sc. techn., Dipl. Bauing. EPFL/SIA

SUPSI, Istituto Materiali e Costruzioni, Canobbio  
T. Teruzzi, Dr. sc. nat., Dipl. Phys. ETHZ

Forschungsauftrag AGB 2007/007 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Dr. Frank Jacobs

### Mitglieder

Dr. Emmanuel Denarié

Dr. Andreas Leemann

Dr. Tiziano Teruzzi

## Begleitkommission

### Präsident

Dr. Martin Käser

### Mitglieder

Dr. Fritz Hunkeler

Dr. Walter Kaufmann

Prof. Dr. Albin Kenel

## Antragsteller

Forschungsstelle mit Projektteam

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) herunter geladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Impressum.....                                                                                         | 4       |
| Zusammenfassung .....                                                                                  | 6       |
| Résumé .....                                                                                           | 6       |
| Summary.....                                                                                           | 8       |
| Riassunto.....                                                                                         | 9       |
| <br>1. Einleitung.....                                                                                 | <br>1   |
| 1.1 Allgemeines.....                                                                                   | 1       |
| 1.2 Ziel des Projektes und Vorgehen .....                                                              | 1       |
| <br>2. Empfehlungen zur Qualitätskontrolle mit Luftpermeabilitätsmessungen nach<br>Norm SIA 262/1..... | <br>2   |
| 2.1 Vorbemerkung .....                                                                                 | 2       |
| 2.2 Auswahl und Vorbereitung der Messstellen.....                                                      | 2       |
| 2.3 Anforderungen an die Luftpermeabilitätswerte.....                                                  | 5       |
| 2.4 Konformitätsnachweis .....                                                                         | 5       |
| 2.5 Alter, Temperatur und Feuchtigkeit des Betons .....                                                | 6       |
| 2.6 Vorbereitung, Kalibrierung und Kontrolle des Messgerätes .....                                     | 6       |
| 2.7 Durchführung der Messungen .....                                                                   | 7       |
| 2.8 Ausschreibung.....                                                                                 | 9       |
| <br>Anhang A: Informationen zum Bedarf für Luftpermeabilitätsmessungen .....                           | <br>A-1 |
| A-1. Vorbemerkung.....                                                                                 | A-3     |
| A-2. Norm SIA 262 .....                                                                                | A-5     |
| <br>Anhang B: Hintergründe zur Methode der Luftpermeabilitätsmessung .....                             | <br>B-1 |
| B-1. Messmethode .....                                                                                 | B-2     |
| B-2. Einfluss von Betonfeuchte und Betontemperatur .....                                               | B-2     |
| B-3. Genauigkeit des Verfahrens .....                                                                  | B-6     |
| B-4. Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Dauerhaftigkeit .....                                    | B-8     |
| <br>Anhang C: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen .....                                         | <br>C-1 |
| C-1. Trogbrücke .....                                                                                  | C-1     |
| C-2. Tagbautunnel .....                                                                                | C-11    |
| <br>Anhang D: Überlegungen zum Konformitätsnachweis .....                                              | <br>D-1 |
| D-1. Frühere Vorschläge zum Konformitätsnachweis .....                                                 | D-1     |
| D-2. Überlegungen zum vorgeschlagenen Konformitätsnachweis .....                                       | D-2     |
| D-3. Überlegungen zu den Grenzwerten .....                                                             | D-7     |
| <br>Abkürzungen                                                                                        |         |
| Literaturverzeichnis                                                                                   |         |
| Projektabschluss                                                                                       |         |
| Verzeichnis der Berichte zur Forschung im Strassenwesen                                                |         |

## Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und Dicke des Überdeckungsbetons bestimmt in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke. Da die Betonqualität sowohl durch die Betonzusammensetzung als auch den Einbau und die Nachbehandlung beeinflusst werden kann, ist es zweckmässig, die erzielte Betonqualität am Bauteil und nicht an separat hergestellten Prüfkörpern zu bestimmen. Auch stellen der Zementgehalt und der w/z-Wert nicht immer ausreichende Grössen zur Beurteilung der Betonqualität dar.

Gemäss Norm SIA 262 ist die Dichtigkeit des Überdeckungsbetons zu überprüfen. Mit der Prüfung der Luftpermeabilität nach Norm SIA 262/1, Anhang E, steht eine zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätskontrolle des Betons zur Verfügung. Mit dieser Methode kann der allgemeine Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Schadstoffen bestimmt werden.

Bisher wurden in der Schweiz über 100 Bauteile mit der Luftpermeabilität nach SIA 262/1 untersucht. Basierend auf dem aktuellen Wissenstand werden Empfehlungen zur Bestimmung der Luftpermeabilität präsentiert. Diese Empfehlungen enthalten Vorschläge zur Ausschreibung, Durchführung und Auswertung von Luftpermeabilitätsmessungen. Bei der Durchführung der Luftpermeabilitätsmessungen sind die Anforderungen an die Bauteiltemperatur und Bauteilfeuchte zu beachten.

Auf jeder Untersuchungsfläche sind 6 Luftpermeabilitätsmessungen vorzunehmen. Ist maximal 1 Messwert höher als der vorgeschlagene Grenzwert ( $kTs = 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  für Betonsorten C, D und E nach SIA 118/262;  $kTs = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  für Betonsorten F und G nach SIA 118/262), erfüllt die Untersuchungsfläche die Anforderungen. Sind 2 der 6 Messwerte höher als der vorgeschlagene Grenzwert, können 6 weitere Messungen durchgeführt werden. Liegt von den 6 weiteren Messwerten maximal 1 Messwert über den Anforderungen, erfüllt die Untersuchungsfläche die Anforderungen. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, sind weitere Untersuchungen durchzuführen bzw. das Bauteil instandzusetzen.

Wird zukünftig vermehrt die Bestimmung der Dichtigkeit des Betons im Bauteil gefordert, wird dies auch zu Änderungen im Bauprozess in der Form führen, dass dem Einbau und der Nachbehandlung mehr Sorge getragen werden und auch weitere Methoden Verwendung finden (z.B. saugende Schalungsbahnen, Vakuumentwässerung), die die Dichtigkeit des Überdeckungsbetons verbessern und somit die Nutzungsdauer verlängern.

## Résumé

Les dernières décades ont révélé que les dégâts les plus fréquents dans les constructions étaient dûs à une durabilité insuffisante et non à une résistance insuffisante. La qualité et l'épaisseur du béton d'enrobage déterminent dans la plupart des cas la durabilité des constructions. Etant donné que la qualité du béton peut être influencée par sa composition comme par sa mise en place et sa cure, il est nécessaire de déterminer la qualité visée sur ouvrage et non sur des échantillons d'essai produits séparément. De plus, le dosage en ciment et le rapport Eau/Ciment ne sont pas toujours des indicateurs suffisants pour juger de la qualité du béton.

La norme SIA 262 exige de vérifier la compacité du béton d'enrobage. La mesure de perméabilité à l'air selon SIA 262/1, Annexe E met à disposition une méthode d'essai non destructive pour le contrôle de qualité du béton. La résistance générale du béton à la pénétration de substances délétères peut être déterminée avec cette méthode.

Jusqu'à présent, plus de 100 éléments d'ouvrages ont été examinés en Suisse, au moyen de la perméabilité à l'air selon SIA 262/1. Sur la base des connaissances actuelles, des recommandations pour la détermination de la perméabilité à l'air sur ouvrages, sont présentées. Ces recommandations contiennent des propositions pour la mise en soumission, l'exécution et l'évaluation de mesures de perméabilité à l'air sur ouvrages. Lors de l'exécution des mesures de perméabilité à l'air, on sera attentif aux exigences sur la température et l'humidité de l'élément de construction.

Sur chaque surface d'essai 6 mesures de perméabilité à l'air doivent être réalisées. Les exigences sont remplies si au plus une des mesures dépasse les valeurs limites  $kTs$  proposées ( $kTs = 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  pour les sortes de béton C, D et E selon SIA 118/262;  $kTs = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  pour les sortes de béton F et G selon SIA 118/262). Si 2 parmi les 6 valeurs de mesure dépassent les valeurs limite proposées, 6 nouvelles mesures peuvent être réalisées. Si parmi les 6 nouvelles mesures, une seule au plus dépasse les exigences, la surface de mesure remplit les exigences. Dans le cas contraire, des essais complémentaires doivent être réalisés, et le cas échéant, l'élément de construction devra être réhabilité.

La multiplication des demandes de détermination de la compacité du béton d'enrobage sur ouvrages permettra à l'avenir de changer le processus de construction en consacrant plus d'attention à la mise en place et à la cure du béton et en développant l'usage de méthodes qui améliorent la compacité du béton d'enrobage et prolongent la durabilité (par exemple : membranes de coffrage drainantes, drainage sous vide).

## Summary

Over the last decades it has been recognized that the damages to reinforced concrete structures are mainly caused by insufficient durability rather than by low strength. In most cases, the quality and thickness of the cover concrete determine the durability of the structure. Since the quality of the cover concrete is influenced not only by the mix composition but also by the placing and the curing conditions, it is appropriate to measure the achieved quality on the structure rather than on separately cast specimens. In addition, the cement content and the w/c ratio are not always suitable indicators for the concrete quality.

SIA Standard 262 requests to measure the “permeability” of the cover concrete. With the air-permeability test (SIA Standard 262/1, Annex E), a non-destructive method to assess the quality of concrete is available. With this method, it is possible to determine the general resistance of the concrete to the penetration of deleterious agents.

To date, over 100 construction elements have been examined with the SIA 262/1-E air-permeability test method in Switzerland. Based on the accumulated knowledge, recommendations for determining the air-permeability are presented. These recommendations cover proposals for the tendering, execution and evaluation of measurements of air-permeability. When conducting measurements of air-permeability, the required temperature and moisture conditions of the concrete elements must be observed and recorded.

On each surface under investigation, 6 measurements of air-permeability are conducted. If not more than 1 result exceeds the proposed limiting values ( $kTs = 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  for the concrete types C, D and E according to SIA 118/262;  $kTs = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  for the concrete types F and G according to SIA 118/262), the surface complies with the requirements. If 2 results exceed the proposed limiting values, then 6 additional measurements should be performed. If not more than 1 of the additional measurements exceeds the limiting value, the surface under investigation complies with the requirements. In case of non conformity, further investigations should be performed or a protective treatment applied to the element(s).

The multiplication of requests to determine the air permeability of cover concrete on structures will eventually lead to changes in the construction process, towards more care being dedicated to the placing and curing of concrete. It will also foster the use of methods to improve the tightness of cover concrete (such as Controlled Permeability Formwork liners or vacuum dewatering) and thus extend the durability of structures.



## Riassunto

Nel corso degli ultimi decenni si è preso coscienza del fatto che le cause più frequenti di danneggiamento delle costruzioni in calcestruzzo armato sono da attribuire a una loro insufficiente durabilità e non a una loro insufficiente resistenza meccanica. Nella maggior parte dei casi, la durabilità delle costruzioni è determinata dalla qualità e dallo spessore del copriferro. Poiché la qualità del calcestruzzo dipende non solo dalla sua composizione ma anche dalle modalità di posa in opera e di trattamento successive, è più appropriato accertare il livello di qualità raggiunto direttamente sul calcestruzzo in opera piuttosto che su provini confezionati separatamente. Inoltre, va sottolineato che talvolta grandezze quali il contenuto di legante e il rapporto acqua/legante del calcestruzzo non sono sufficienti per valutarne correttamente la qualità.

La norma SIA 262 raccomanda di procedere alla determinazione della compattezza del copriferro. La possibilità di controllare la qualità del calcestruzzo in opera in maniera non distruttiva è data dalla procedura di prova della permeabilità all'aria descritta nell'allegato E della norma SIA 262/1. Mediante questa prova è possibile determinare qual è la resistenza generale che il calcestruzzo oppone contro la penetrazione degli agenti di degrado.

Fino ad oggi in Svizzera misurazioni della permeabilità all'aria effettuate applicando la procedura descritta nella citata norma sono state eseguite su oltre 100 elementi costruttivi in calcestruzzo armato. Questo rapporto presenta una serie di raccomandazioni per la determinazione della permeabilità all'aria elaborate sulla base delle conoscenze così accumulate. Le raccomandazioni comprendono proposte concernenti le modalità di prescrizione in capitolato, di scelta delle superfici di prova, di esecuzione e di valutazione delle misurazioni di permeabilità all'aria. Il rapporto definisce pure le esigenze concernenti la temperatura e l'umidità dell'elemento costruttivo in esame che devono essere soddisfatte quando si procede alla misurazione della sua permeabilità all'aria.

Per ogni superficie di prova la procedura prevede la determinazione di 6 valori di permeabilità all'aria. Nel caso in cui non più di un valore è superiore al limite proposto per la classe di esposizione ambientale corrispondente al calcestruzzo in esame ( $kT_s = 2.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  per calcestruzzi di tipo C, D e E (designazione secondo norma SIA 118/262);  $kT_s = 0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  per calcestruzzi di tipo F e G), la superficie esaminata è considerata conforme con il livello di qualità atteso. Se 2 dei 6 valori superano il limite, è possibile procedere alla determinazione di ulteriori 6 valori di permeabilità all'aria. Nel caso in cui non più di uno di questi valori supplementari giace al di sopra del limite, i requisiti di qualità sono pure considerati soddisfatti. Qualora i criteri di conformità non fossero soddisfatti si propongono due opzioni: l'approfondimento dello stato della costruzione mediante esami supplementari, oppure, l'applicazione di trattamenti superficiali protettivi.

La futura crescente richiesta di controllo della compattezza del calcestruzzo indurrà cambiamenti dei processi costruttivi. Stimolerà in particolare gli attori coinvolti nel processo costruttivo a prestare maggiore attenzione alla fase di posa in opera e di post-trattamento del calcestruzzo e ad adottare metodi costruttivi alternativi, come ad esempio l'impiego di casseforme a permeabilità controllata o di drenaggio sotto vuoto, in grado di migliorare la compattezza del copriferro e, conseguentemente, la durabilità dell'opera.



# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und Dicke des Überdeckungsbetons bestimmen in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke. Die Eigenschaften des Überdeckungsbetons sind jedoch nicht nur von der Betonzusammensetzung sondern auch vom Einbau, den Umgebungstemperaturen und von der Nachbehandlung auf der Baustelle abhängig. Vor allem bei der Verwendung von relativ langsam reagierenden Zementen und Zusatzstoffen wie Flugaschen kann eine ungenügende Nachbehandlung zu einer erheblichen Verschlechterung der Qualität des Überdeckungsbetons führen. Die Bedeutung des w/z-Wertes zur Charakterisierung der Betonqualität schmälerte sich in letzter Zeit, da die Vielfalt an eingesetzten Zementarten und Zusatzstoffe zunahm. In Anhang A sind weitere Hinweise hierzu enthalten.

Die Qualität des eingebauten Betons ist idealerweise durch eine Untersuchung am Bauwerk zu bestimmen, da separat hergestellte Probekörper sich z.B. bei der Verdichtung und der Nachbehandlung unterscheiden. Gouws et al. (2001) untersuchten Bauteile und aus dem gleichen Beton auf der Baustelle separat hergestellte Probekörper und fanden, dass bei den Probekörpern im Schnitt die Wasseraufnahme etwa  $\frac{1}{4}$  geringer und der Chloridwiderstand etwa  $\frac{1}{3}$  höher waren, als bei den entsprechenden Bauteilen. In der Norm SIA 262 wird zur Kontrolle der Qualität des Überdeckungsbetons die Bestimmung der Luftpermeabilität erwähnt (siehe Anhang A).

Wird in Zukunft vermehrt die Bestimmung der Dichtigkeit des Betons im Bauteil gefordert, wird dies auch zu Änderungen im Bauprozess in der Form führen, dass dem Einbau und der Nachbehandlung mehr Sorge getragen werden und auch Methoden vermehrt Verwendung finden (z.B. saugende Schalungsbahnen, Vakuumentwässerung), die die Dichtigkeit des Überdeckungsbetons verbessern und somit die Nutzungsdauer verlängern.

Idealerweise sollte die Untersuchung am Bauwerk möglichst frühzeitig und zerstörungsfrei erfolgen. Sollte sich dann zeigen, dass die Anforderungen an den Beton nicht erreicht wurden, können einerseits die Ursachen ermittelt und ggf. Korrekturmassnahmen für den weiteren Bauprozess eingeführt werden. Zudem kann andererseits zu diesem frühen Zeitpunkt, an dem noch kein Schaden vorliegt, festgelegt werden, mit welchen Massnahmen, z.B. weitere Untersuchungen, Auftrag eines Oberflächenschutzsystems, die geplante Nutzungsdauer des Bauwerks dennoch sichergestellt werden kann.

## 1.2 Ziel des Projektes und Vorgehen

Folgende Ziele wurden definiert:

- o Ausarbeitung einer Empfehlung zur Bestimmung der Luftpermeabilität nach SIA 262/1
- o Durchführung eines Ringversuchs an Betonbauteilen zur Bestimmung statistischer Kenngrößen für die Bestimmung der Luftpermeabilität am Bauwerk nach SIA 262/1

Kapitel 2 enthält Empfehlungen zur Bestimmung der Luftpermeabilität nach Norm SIA 262/1, von der Ausschreibung bis zum Konformitätsnachweis. In Anhang B werden die Methode zur Bestimmung der Luftpermeabilität sowie wichtige Einflussgrößen auf die Luftpermeabilität wie die Betontemperatur und Betonfeuchte genauer erläutert. Zudem sind Hinweise zur Genauigkeit der Methode gegeben. In Anhang C sind Ergebnisse von Luftpermeabilitätsmessungen an zwei Objekten dargestellt, die durchgeführt wurden, um u.a. statistische Kenngrößen (siehe Anhang B) für die Methode zu erhalten. Anhang D umfasst Hintergrundinformationen zum vorgeschlagenen Konformitätsnachweis.



## 2 Empfehlungen zur Qualitätskontrolle mit Luftpermeabilitätsmessungen nach Norm SIA 262/1

### 2.1 Vorbemerkung

Die hier festgehaltenen Empfehlungen basieren auf den bisherigen Erfahrungen der Mitglieder der Arbeitsgruppe mit der Messmethode Luftpermeabilität an Normalbeton nach SN EN 206-1 und Geräten der Firmen proceq und Materials Advanced Services. Die Empfehlungen beziehen sich auf „übliche“ Messungen, d.h. je nach Fragestellung und Randbedingung kann es notwendig sein, davon abzuweichen.

Die Empfehlungen beinhalten Hinweise zur Auswahl und Vorbereitung der Messstellen (2.2), zum Nachweis, ob die Anforderungen erreicht wurden (Abschnitt 2.3), den notwendigen Randbedingungen (Abschnitt 2.5), der Vorbereitung des Messgerätes (Abschnitt 2.6), der Durchführung (Abschnitt 2.7) sowie der Ausschreibung der Messungen (Abschnitt 2.8).

### 2.2 Auswahl und Vorbereitung der Messstellen

Das zu untersuchende Bauwerk soll in Gruppen von Elementen eingeteilt werden, die jeweils Folgendes aufweisen:

- gleiche Anforderung an die Luftpermeabilität
- gleiche Betonsorte, d.h. gleiche Expositionsklassen, gleiche Druckfestigkeitsklasse, gleichem Grösstkorn
- gleicher Betoneinbau, d.h. Einbaumethode, Verdichtung, Nachbehandlung etc. sind im Wesentlichen gleich.

Für jedes zu untersuchende Bauwerk sind die Gruppen und die dazugehörigen Bauteile unter Angabe der Betoniertermine aufzulisten.

Jede Gruppe besteht zumeist aus mehreren Betonierabschnitten. Für jede Gruppe werden eine oder mehrere Untersuchungsflächen ausgewählt. Die Anzahl an Untersuchungsflächen kann wie folgt bestimmt werden:

- 1 Untersuchungsfläche pro 500 m<sup>2</sup> exponierter Betonoberfläche; jede angefangenen 500 m<sup>2</sup> ergeben ebenfalls eine Untersuchungsfläche
- 1 Untersuchungsfläche pro jedem dritten Arbeitstag mit Betoneinbau; jede angefangene Kadenz von 3 Arbeitstagen ergibt ebenfalls eine Untersuchungsfläche.

Das Kriterium, welches die höhere Anzahl an Untersuchungsflächen ergibt, ist anzuwenden.

In der Abbildung 1 ist die Auswahl von Untersuchungsflächen beispielhaft dargestellt.



*Abbildung 1: Beispielhafte Festlegung von Untersuchungsflächen an 7 Tunnelwandelementen (à 60 m<sup>2</sup>), die im Wochenrhythmus hergestellt wurden; die gestrichelt umrandeten Flächen stellen die gemäss o.g. Kriterien festgelegten Untersuchungsflächen dar*

Auf jeder Untersuchungsfläche sind 6 Messstellen festzulegen. Folgendes wird dabei empfohlen:

- o Ein genügender horizontaler und vertikaler Abstand von Bauteil-, Arbeitsfugen und Öffnungen etc. ist vorzusehen (**Abbildung 2**). Dies erfolgt aus dem Grund, da die Qualität von Bauteilen im Randbereich beeinträchtigt sein kann und zumeist die Qualität der Untersuchungsfläche bestimmt werden soll. Soll gezielt die Qualität der Randbereich ermittelt werden, kann dies natürlich auch erfolgen.

- o Messpunkte in jeweils einem vertikalen und horizontalen Abstand von mindestens 20 cm wählen; dadurch soll vermieden werden, dass eng abgegrenzte horizontale oder vertikale Schwachstellen (z.B. Risse, schlechte Betonierfugen) mehrfach untersucht werden. Sollen gezielt Schwachstellen untersucht werden, kann dies natürlich auch erfolgen.

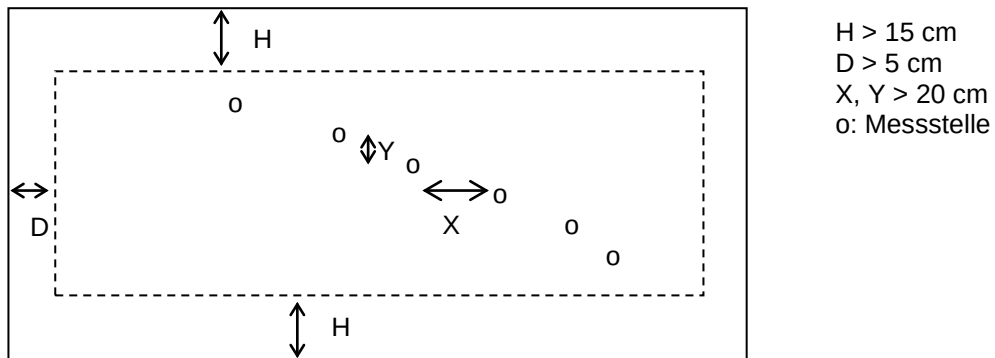


Abbildung 2: Empfehlungen zur Auswahl der Untersuchungsfläche und der Messstellen auf einer Betonwand

Bei der Auswahl der Messflächen und Messpunkte ist Folgendes zu beachten:

1. Oberflächenschutzsystem: In einem ersten Schritt ist visuell zu prüfen, ob der Beton mit einem Oberflächenschutzsystem (OS) versehen ist. Ist ein OS vorhanden, ist dies wenn möglich lokal zu entfernen, eine Messfläche ohne OS zu suchen oder zu prüfen, ob das OS einen Einfluss auf die Luftpermeabilität hat (Messungen auf Flächen mit/ohne OS). Bestehen Zweifel am Vorhandensein und/oder Einfluss des OS auf die Luftpermeabilität sind keine Messungen durchzuführen oder die Messungen durchzuführen und dies im Prüfbericht zu vermerken (z.B. „OS auf Beton, Einfluss auf Luftpermeabilität nicht bekannt“).
2. Bewehrungsüberdeckung: Die Messstellen sind zu kontrollieren, ob Bewehrung, Kabelrohre, Leitungen nahe der Oberfläche liegen (ca.  $< 2 \text{ cm}$ ). Kann dies nicht vermieden werden, ist dies auf dem Prüfbericht zu vermerken.
3. Betonoberfläche: Gemäss den heutigen, wenigen Erkenntnissen ist die Bestimmung der Luftpermeabilität z.B. an mit Schalungseinlagen erstellten Bauteilen oder abgezogenen Bauteiloberflächen möglich, sofern die Oberfläche ausreichend glatt ist. Weisen die Messstellen durch z.B. Grate eine zu grosse Rauigkeit auf, kann die Oberfläche vorsichtig manuell abgeschliffen werden.
4. Entstauben: Die Messstellen sind vor den Luftpermeabilitätsmessungen mit einer harten Bürste oder einem harten, trockenem Schwamm von anhaftendem Staub zu befreien.
5. Messstellen mit Rissen sind zu vermeiden, d.h. die Messstellen sind vorgängig auf Risse zu überprüfen, z.B. mit Aufsprühen einer Alkohollösung;
6. Die Messstellen sind zu markieren (z.B. Bleistift, Kreide), damit keine zwei Messungen an der gleichen Stelle erfolgen, an den Messstellen die Betonfeuchtigkeit bestimmt werden kann und die Messstellen nach der Messung noch (visuell) untersucht werden können, sofern Auffälligkeiten auftraten.

## 2.3 Anforderungen an die Luftpermeabilitätsmesswerte

In Abhängigkeit von der Betonsorte werden Grenzwerte von  $0.50$  und  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  der Luftpermeabilität für die Betone nach SIA 118/262 empfohlen (**Tabelle 1**). Für die Betonsorten A und B werden keine Luftpermeabilitätsgrenzwerte vorgeschlagen, da die Gefahr einer Bewehrungskorrosion zumeist gering ist. Für Betonsorten, die der Expositionsklasse XD2a genügen müssen, wird der Grenzwert von  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und für Betone, die der Expositionsklasse XD2b genügen müssen,  $0.50 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  empfohlen. Wie weiter unten aufgeführt und in Anhang D näher erläutert, handelt es sich bei den Luftpermeabilitätsgrenzwerten um keine absoluten Grenzwerte sondern um statistische Grössen.

*Tabelle 1: Vorgeschlagene Luftpermeabilitätsgrenzwerte  $k_T$ s in Abhängigkeit von den Betonsorten der Norm SIA 118/262, Revision 2009*

| Bezeichnung                                                                | A                  | B       | C                  | D                             | E                             | F                             | G                             |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Druckfestigkeitsklasse                                                     | C25/30             | C25/30  | C30/37             | C25/30                        | C25/30                        | C30/37                        | C30/37                        |
| Expositions-klassen                                                        | XC1(CH)<br>XC2(CH) | XC3(CH) | XC4(CH)<br>XF1(CH) | XC4(CH)<br>XD1(CH)<br>XF2(CH) | XC4(CH)<br>XD1(CH)<br>XF4(CH) | XC4(CH)<br>XD3(CH)<br>XF2(CH) | XC4(CH)<br>XD3(CH)<br>XF4(CH) |
| Minimaler Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]                                | 280                | 280     | 300                | 300                           | 300                           | 320                           | 320                           |
| Maximaler w/z-Wert                                                         | 0.65               | 0.60    | 0.50               | 0.50                          | 0.50                          | 0.45                          | 0.45                          |
| Empfohlener Luftpermeabilitätsgrenzwert $k_T$ s [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] | -                  | -       | 2.0                | 2.0                           | 2.0                           | 0.50                          | 0.50                          |

## 2.4 Konformitätsnachweis

Jede Untersuchungsfläche muss folgenden Bedingungen genügen:

Bedingung 1: Von 6 Luftpermeabilitätsmesswerten  $k_{Ti}$  pro Untersuchungsfläche darf nicht mehr als 1 Luftpermeabilitätsmesswert  $k_{Ti}$  den geforderten Luftpermeabilitätsgrenzwert  $k_T$ s überschreiten.

Überschreiten pro Untersuchungsfläche 2 von 6 Luftpermeabilitätsmesswerten den geforderten Luftpermeabilitätsgrenzwert  $k_T$ s, können auf der gleichen Untersuchungsfläche noch einmal 6 weitere Luftpermeabilitätsmesswerte  $k_{Ti}$  an 6 neu zu bestimmenden Stellen (siehe Abschnitt 2.2) bestimmt werden.

Bedingung 2: Nicht mehr als 1 Luftpermeabilitätsmesswert  $k_{Ti}$  der 6 neu bestimmten Luftpermeabilitätsmesswerte darf den geforderten Luftpermeabilitätsgrenzwert  $k_T$ s überschreiten.

Werden weder Bedingung 1 noch Bedingung 2 erfüllt, genügt die Untersuchungsfläche nicht den Anforderungen. In diesem Fall wird empfohlen wie folgt vorzugehen:

1. Zusammenstellung und Auswertung aller vorhandenen Angaben zur Betonqualität und Beurteilung der Ergebnisse in Hinblick auf die geplante Nutzung; als Ergebnis kann z.B. eine weitere Untersuchung des Bauteils oder eine Instandsetzung vorgeschlagen werden.
2. Weitere Untersuchung des Bauteils wie z.B. zerstörungsfreie Messung der Bewehrungsüberdeckung und Beurteilung der Ergebnisse in Hinblick auf die geplante Nutzung; als Ergebnis kann z.B. eine weitere Untersuchung des Bauteils (z.B. Bohrkernentnahmen und deren Untersuchung) oder eine Instandsetzung vorgeschlagen werden.

## 2.5 Alter, Temperatur und Feuchtigkeit des Betons

Wenn Luftpermeabilitätsmessungen an Betonbauteilen durchgeführt werden sollen, wird Folgendes empfohlen:

- Betonalter
  - o Das Betonalter soll zwischen etwa 28 und 90 Tagen betragen. Insbesondere wenn langsam reagierende Zemente wie z.B. CEM III/B oder nennenswerte Mengen an langsam reagierenden Zusatzstoffen wie Flugasche verwendet werden, ist ein minimales Betonalter von eher 2 Monaten anzustreben.

Die Luftpermeabilität wird besonders stark durch den Feuchtigkeitsgehalt und untergeordnet die Temperatur des Betons beeinflusst (Anhang B-2). Deshalb sind bei beiden Eigenschaften die nachfolgend aufgeführten Randbedingungen einzuhalten:

- Bauteiltemperatur
  - o Die Oberflächentemperatur des Betonbauteils, gemessen z.B. mit einem Infrarotthermometer, sollte mehr als 10 °C betragen. Erfahrene Anwender können je nach Situation auch bei Temperaturen zwischen 5 und 10 °C messen.
- Feuchtigkeitsgehalt des Betons, bestimmt gemäss einer der folgenden Methoden
  - o Der Feuchtigkeitsgehalt soll nicht mehr als 5.5 M.-% betragen, bestimmt mit dem CME (Fa. Tramex, beruht auf Messung der elektrischen Impedanz).
  - o Der spezifische elektrische Widerstand, gemessen mit der Wennersonde (Fa. proceq), soll bei 20 °C mindestens 10 – 20 kΩcm betragen.
    - o Der niedrigere Wert gilt eher für Betone mit Zement, der nur aus Zementklinker und keinen reaktiven Zusatzstoffen gemäss SN EN 206-1 (z.B. Flugasche) besteht.
    - o Liegt die Temperatur unterhalb von 15 °C oder oberhalb von 25 °C, ist der spezifische elektrische Widerstand für 20 °C zu berechnen. Ist für den zu untersuchenden Beton der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Widerstand nicht bekannt, kann folgender Zusammenhang verwendet werden:
      - Im Bereich zwischen 5 und 40 °C halbiert sich in etwa der spezifische elektrische Widerstand bei einer Temperaturzunahme von 20 K.
  - o Es wird empfohlen möglichst immer die gleiche Methode zur Bestimmung der Feuchtigkeit zu verwenden.

Die Einhaltung der oben angeführten Bedingungen an den Feuchtigkeitsgehalt des Betons hängt stark von den Umgebungsbedingungen (z.B. Lufttemperatur) ab und wird in der Regel erfüllt, wenn

- die Nachbehandlung vor ungefähr 3 – 4 Wochen endete
- mehr als 2 - 5 Tage seit dem letzten Eintrag von Feuchtigkeit durch z.B. Niederschlag, Spritzwasser, Tau vergangen sind.

## 2.6 Vorbereitung, Kalibrierung und Kontrolle des Messgerätes

Vor den Luftpermeabilitätsmessungen muss das Messgerät vorbereitet und kalibriert werden. Es wird empfohlen beides an jedem Messtag durchzuführen. Besteht ein Verdacht, dass das Messgerät nicht korrekt arbeitet, ist es ebenfalls erneut vorzubereiten und zu kalibrieren. Während Messpausen wird empfohlen die Messglocke auf ein undurchlässiges Material (z.B. Metall, Polycarbonat) zu setzen und das Messsystem unter Vakuum zu halten.

Unter der Vorbereitung wird verstanden, dass die Messglocke auf ein ausreichend undurchlässiges Material (z.B. Metall, Polycarbonat) gesetzt und das vollständige System während mindestens 15 Minuten evakuiert wird.

Bei der Kalibrierung wird die Messglocke auf ein ausreichend undurchlässiges Material (z.B. Metall, Polycarbonat) gesetzt und eine vollständige Kalibrierungsmessung durchgeführt. Es wird ein Druckanstieg in der Messglocke stattfinden, da immer geringste Undichtigkeiten und geringste Mengen an volatilen Stoffen im Messsystem vorhanden bleiben. Dieser Druckan-



stieg wird vom Messgerät bei den eigentlichen Messungen automatisch von den Messwerten abgezogen. Es sind mindestens zwei Kalibrierungen vorzunehmen und Folgendes ist einzuhalten:

- Bei der Kalibrierung darf der Druckanstieg nicht mehr als 5 mbar betragen.
- Die Differenz zwischen 2 aufeinanderfolgenden Kalibrierungen darf nicht mehr als 0.5 mbar betragen.
- Dies wird in der Regel nach einer ausreichenden Vorbereitung und 2 – 3 Kalibrierungen eingehalten.

Der Zeitbedarf für die Vorbereitung und Kalibrierung beträgt in der Regel weniger als eine Stunde.

In grösseren Abständen (Wochen – Monate) oder bei Zweifeln an den Messergebnissen sind zur Kontrolle Messungen auf porösen Inertstoffen mit bekannter Luftpermeabilität vorzunehmen, um die Funktionstüchtigkeit des Gerätes weitergehend zu kontrollieren. Als geeignete poröse Inertstoffe haben sich keramische Platten, alte Betonprüfkörper und Natursteine erwiesen.

## 2.7 Durchführung der Messungen

An den 6 gemäss Abschnitt 2.2 festgelegten Stellen ist die Luftpermeabilität sowie die Betonfeuchte zu bestimmen. Bei Bedarf ist die Bewehrungsüberdeckung zu messen.

Die Lage und Ergebnisse der Messungen (Luftpermeabilität, Betonfeuchte) sind, u.a. neben Hinweisen zum Bauteil, in einem Prüfprotokoll festzuhalten. Ggf. kann eine Skizze zur Veranschaulichung der Lage der Messstellen vorteilhaft sein. Nachfolgend ist ein Beispiel für ein Prüfprotokoll dargestellt.

Werden an der gleichen Untersuchungsfläche weitere 6 Stellen zur Bestimmung der Luftpermeabilität ausgewählt, sind dabei ebenfalls die Hinweise in Abschnitt 2.2 zu beachten.

**Prüfprotokoll Luftpermeabilität nach Norm SIA 262/1, Anhang E**

Auftraggeber: .....

Bauwerk: .....

Bauteil, Etappe: .....

Betonzusammensetzung / Eigenschaften: .....

Herstellungsdatum des Bauteils: .....

Bauteil Witterung ausgesetzt (Exposition)?: .....

Wetter letzten 2 Tage: .....

Wetter Messtag: .....

Lufttemperatur um ..... Uhr ..... °C um ..... Uhr ..... °C

Bauteiltemperatur um ..... Uhr ..... °C um ..... Uhr ..... °C

Messung am ..... von ..... bis ..... Uhr

Messung durchgeführt von ..... Firma .....

Luftpermeabilitätsmessgerät: .....

Feuchtemessgerät: .....

Behandlung der Oberfläche (z.B. entgraten): .....

Bemerkungen (Vorhandensein von Rissen, Oberflächenschutzsystemen, etc.): .....

Ergebnisse der Kalibrierungen: K1: ... mbar; K2: ... mbar; K3: ... mbar; K4: ... mbar;

| Mess-<br>stelle<br>[-] | Zentrum Messkam-<br>mer   |                      | Gerätemess-<br>Nr. [-] | Luftper-<br>meabilität<br>kTi<br>[10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ] | spez.<br>elektr.<br>Widerstand<br>[kΩcm] | Beton-<br>feuchte<br>[M.-%] | Bemerkungen |
|------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|-------------|
|                        | Abstand<br>von ...<br>[m] | Höhe ab<br>Boden [m] |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |
|                        |                           |                      |                        |                                                                      |                                          |                             |             |

Anzahl Messwerte &gt; kTs: .....

kTs = 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>Konform: Ja ☐ Nein ☐

|  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

Anzahl Messwerte &gt; kTs: .....

Konform: Ja ☐ Nein ☐Randbedingungen für Messungen zulässig: Ja ☐ Nein ☐ bedingt ☐ wegen .....

Bemerkungen

Unterschrift

## 2.8 Ausschreibung

Der zeitliche Aufwand für die Messungen hängt stark von der Zugänglichkeit der einzelnen Messstellen ab. Folglich ist anzugeben, wie nahe (Distanz in Meter) an das zu untersuchende Bauteil gefahren werden kann, ob vom Abstellplatz des Fahrzeuges ein ungehinderter, ebenerdiger Zugang zum Bauteil besteht (bzw. falls dies nicht zutrifft, wie die Situation sonst aussieht), ob die Messflächen auf dem Bauteil vom Boden (d.h. max. 2 m Höhe) oder Gerüst etc. aus zugänglich sind und ob Strom (220 V für den Betrieb der Vakuumpumpe) vor Ort und in welcher Entfernung vorhanden ist.

### Beispiel für Ausschreibungstext:

Am Bauwerk ..... ist am Bauteil ..... , Etappe .... (siehe beiliegende Skizze) die Luftpermeabilität nach SIA 262/1, Anhang E, zu bestimmen. An 6 Stellen ist die Luftpermeabilität am Bauteil zu messen, wobei die geometrischen Randbedingungen gemäss VSS-Bericht Nr. 641 „Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen“ (Forschungsauftrag AGB 2007/07) einzuhalten sind.

Zum Bauteil kann direkt mit einem Fahrzeug gefahren werden. Eine Leiter oder ein Gerüst sind für die Messungen nicht notwendig. Ein 220 V-Stromanschluss ist vor Ort innerhalb eines Radius von ... m vorhanden. Die Prüfflächen sind vor der Messung mit einer Bürste trocken abzubürsten. Die Messstellen sind auf mindestens 10 cm genau nachvollziehbar einzumessen.

Die Messungen dürfen nur ausgeführt werden, wenn die Randbedingungen bezüglich Temperatur und Betonfeuchte gemäss o.g. VSS-Bericht eingehalten werden. D.h. der Messtermin ist mit der Bauleitung abzusprechen und hat im Zeitraum von ... bis ... zu liegen.

An jeder Messstelle für die Luftpermeabilität ist die Betonfeuchte, z.B. mit einem Gerät zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes oder einem mit der Impedanzmessung arbeitenden Messgerät, zu bestimmen. Mindestens zu Beginn und am Ende der Messungen sind die Luft- und Betontemperatur zu bestimmen. Vor Ort müssen die Luftpermeabilitätsergebnisse ausgewertet werden, um zu beurteilen, ob 6 weitere Messungen notwendig sind.

Der Prüfbericht muss dem Muster gemäss o.g. VSS-Bericht entsprechen.

| Pos. | Bezeichnung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Einheit | Ausmass | Einheitspreis | Betrag |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------------|--------|
| 1    | Planung, Durchführung und Beurteilung der Luftpermeabilitätsmessungen gemäss VSS-Bericht 641 inkl. Messung der Luft- und Betontemperatur, des Feuchtegehaltes an 6 Stellen (=1 Serie), an denen die Luftpermeabilität bestimmt wird, die Vorbereitung und Kalibration des Luftpermeabilitätsmessgerätes sowie ein einfaches Vorbereiten der Messstellen (Abbürsten, etc.) sind in die Kosten der Messungen einzurechnen; inkl. Prüfbericht;<br>Es ist anzugeben, wie nahe an die Messfläche gefahren werden kann und, ob die Messstellen vom Boden aus bzw. wie sonst zugänglich sind |         |         |               |        |
| 1.1  | Wegentschädigung und Gerätepauschale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | St      |         |               |        |
| 1.3  | Aufwändigeres Vorbereitung von 6 Messstellen wie Entgraten, lokales Abschleifen von max. 0.5 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | St      |         |               |        |
| 1.4  | 1 Serie Luftpermeabilitäts- und Betonfeuchtemessungen;                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | St      |         |               |        |
| 1.5  | Bestimmung der Bewehrungsüberdeckung an 6 Messstellen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | St      |         |               |        |



## Anhänge

Anhang A: Informationen zum Bedarf für Luftpermeabilitätsmessungen

Anhang B: Hintergründe zur Methode der Luftpermeabilitätsmessung

Anhang C: Ergebnisse zur Trogbrücke und zum Tagbautunnel

Anhang D: Überlegungen zum Konformitätsnachweis



## Anhang A: Informationen zum Bedarf für Luftpermeabilitätsmessungen

### A-1. Vorbemerkung

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und Dicke des Überdeckungsbetons bestimmen in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke gegenüber dem heute dominierenden Schadensmechanismus: der Bewehrungskorrosion. Die Eigenschaften des Überdeckungsbetons sind jedoch nicht nur von der Betonzusammensetzung sondern auch vom Einbau, den Umgebungstemperaturen und von der Nachbehandlung auf der Baustelle abhängig. Insbesondere bei der Verwendung von relativ langsam reagierenden Zusatzstoffen wie Flugaschen oder manchen Zementarten wie Hochofenzementen oder normal reagierenden Bindemittel bei niedrigen Temperaturen kann eine ungenügende Nachbehandlung zu einer erheblichen Verschlechterung der Qualität des Überdeckungsbetons führen.

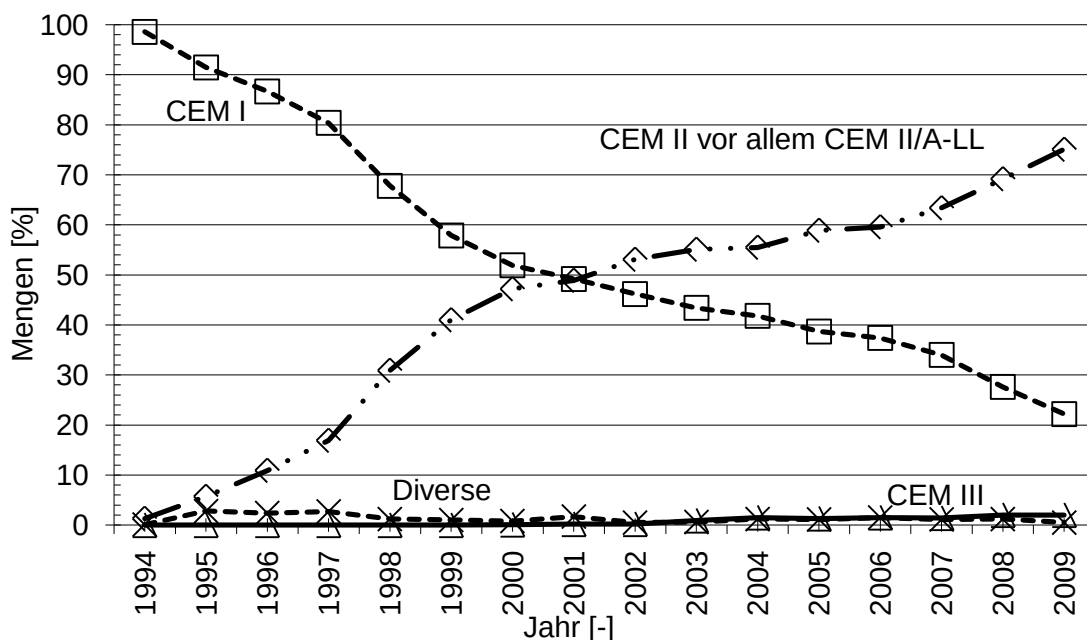


Abbildung A- 1: Verbrauch von verschiedenen Zementarten in der Schweiz über die Zeit

Durch den zunehmenden Einsatz von reaktiven Zusatzstoffen als auch verschiedenen Zementarten (**Abbildung A- 1, Tabelle A- 1**), die neben dem Zementklinker weitere reaktive Bestandteile (z.B. Flugasche, Hüttensand) enthalten, schmälert sich auch die Bedeutung des  $w/z$ - bzw.  $w/z_{eq}$ -Wertes zur Charakterisierung der Betonqualität. Dies zeigt sich beispielhaft an 605 Daten zum Chloridwiderstand von Beton (**Abbildung A- 2**), die von Betonwerken aus den meisten Teilen der Schweiz ermittelt wurden. Es ist kein klarer Zusammenhang zwischen dem  $w/z$ -Wert und dem Chloridwiderstand erkennbar.

Tabelle A- 1: Zugelassene Zementarten in Abhängigkeit von den Expositionsklassen, aus Tab. NA.3 der SN EN 206-1, Stand 2009

| Expositionsklassen | X0, XC1, XC2, XC3 | XC4, XD1, XD2, XD3, XF1, XF3, | XF2, XF4     |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|--------------|
| CEM I              | Zugelassen        | Zugelassen                    |              |
| CEM II/A-LL        |                   | Zugelassen                    |              |
| CEM II/B-LL        |                   | Nicht zugelassen              |              |
| CEM II/A-M (A-D)   |                   | Zugelassen                    |              |
| CEM II/A-D         |                   |                               |              |
| CEM II/A-S         |                   |                               |              |
| CEM II/A-M (V-LL)  |                   |                               |              |
| CEM II/B-M (V-LL)  |                   |                               |              |
| CEM II/B-T         |                   |                               |              |
| CEM III/A          |                   | Zugelassen                    | Nicht zugel. |
| CEM III/B          |                   | Zugelassen                    |              |

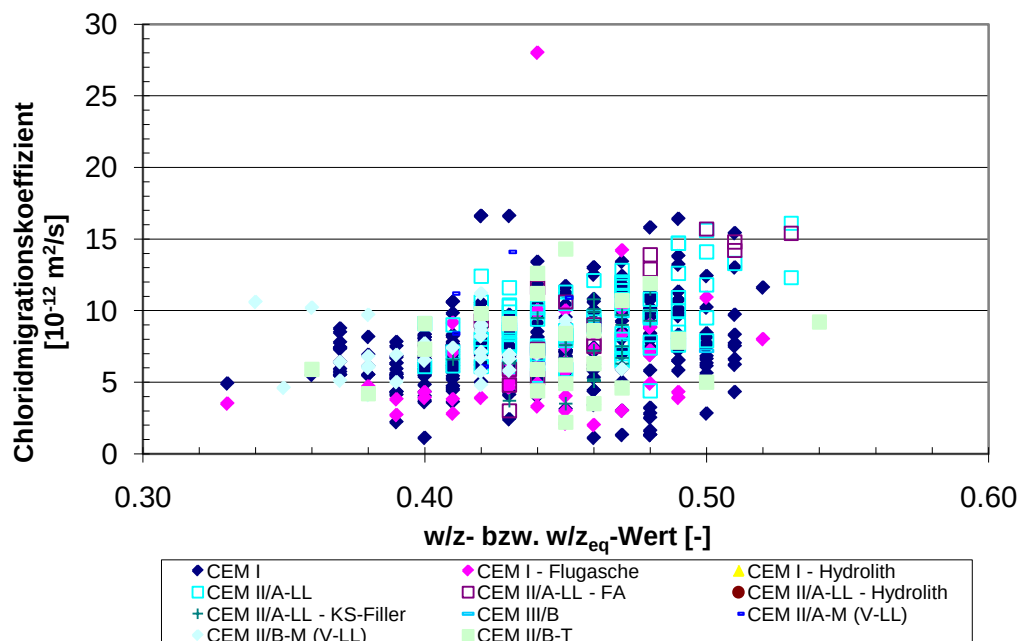


Abbildung A- 2: Chloridmigrationskoeffizient nach SIA 262/1, Anhang B, in Abhängigkeit vom w/z- bzw. w/z<sub>eq</sub>-Wert und Bindemittel, aus Jacobs & Leemann, 2007.

Die Qualität des eingebauten Betons ist idealerweise durch eine Untersuchung am Bauwerk zu bestimmen, da separat hergestellte Probekörper sich z.B. bei der Verdichtung und der Nachbehandlung unterscheiden. Gouws et al. (2001) untersuchten Bauteile und aus dem gleichen Beton auf der Baustelle separat hergestellte Probekörper und fanden, dass bei den Probekörpern im Schnitt die Wasseraufnahme 23 % geringer und der Chloridwiderstand 29 % höher waren, als bei den entsprechenden Bauteilen. Zu einem ähnlichen Ergebnis wurde auch mit Luftpermeabilitätsmessungen gekommen. In *Abbildung B- 8*, unten, sind Ergebnisse von Messungen am separat hergestelltem „Prüfkörper Tunnel“ und im „Tunnel“ (Tunnelwand) selber dargestellt. Es zeigt sich ein teilweise beträchtlicher Unterschied.

Idealerweise sollte die Untersuchung am Bauwerk möglichst frühzeitig und zerstörungsfrei erfolgen. Bei der Bestimmung der Luftpermeabilität nach SIA 262/1 handelt es sich um eine zerstörungsfreie Prüfung, die in den 90er Jahren zur Qualitätskontrolle am Bauwerk im Rahmen von zwei ASTRA-Projekten (Torrent & Ebensperger 1993, Torrent & Frenzer 1995) entwickelt wurde. In weiteren ASTRA-Projekten wurde die Methode angewandt bzw. näher untersucht (Roelfstra et al. 2001, Brühwiler et al. 2005, Jacobs 2006).

Sollte sich bei Luftpermeabilitätsmessungen in einem frühen Betonalter zeigen, dass die Anforderungen an den Beton nicht erreicht wurden, können einerseits die Ursachen ermittelt und ggf.



Korrekturmaßnahmen für den weiteren Bauprozess eingeführt werden. Zudem kann andererseits zu diesem frühen Zeitpunkt, an dem noch kein Schaden vorliegt, festgelegt werden, mit welchen Massnahmen, z.B. weitere Untersuchungen, Auftrag eines Oberflächenschutzsystems, die geplante Nutzungsdauer des Bauwerks dennoch sichergestellt werden kann.

## A-2. Norm SIA 262

In der Norm SIA 262 „Betonbau“, die auf den Eurocode 2 basiert, sind Expositionsklassen zur Beschreibung der wichtigsten Umwelteinflüsse auf Beton enthalten (**Tabelle A- 2**). In der Norm SN EN 206-1 sind die Anforderungen an Beton in Abhängigkeit von den Expositionsklassen angegeben. In **Abbildung A- 3** sind die Expositionsklassen beispielhaft an Bauteilen dargestellt. Bei der Revision der Norm SIA 118/262 im Jahr 2009 wurden Betone definiert, die Anforderungen an die o.g. Expositionsklassen erfüllen (**Tabelle A- 3**).

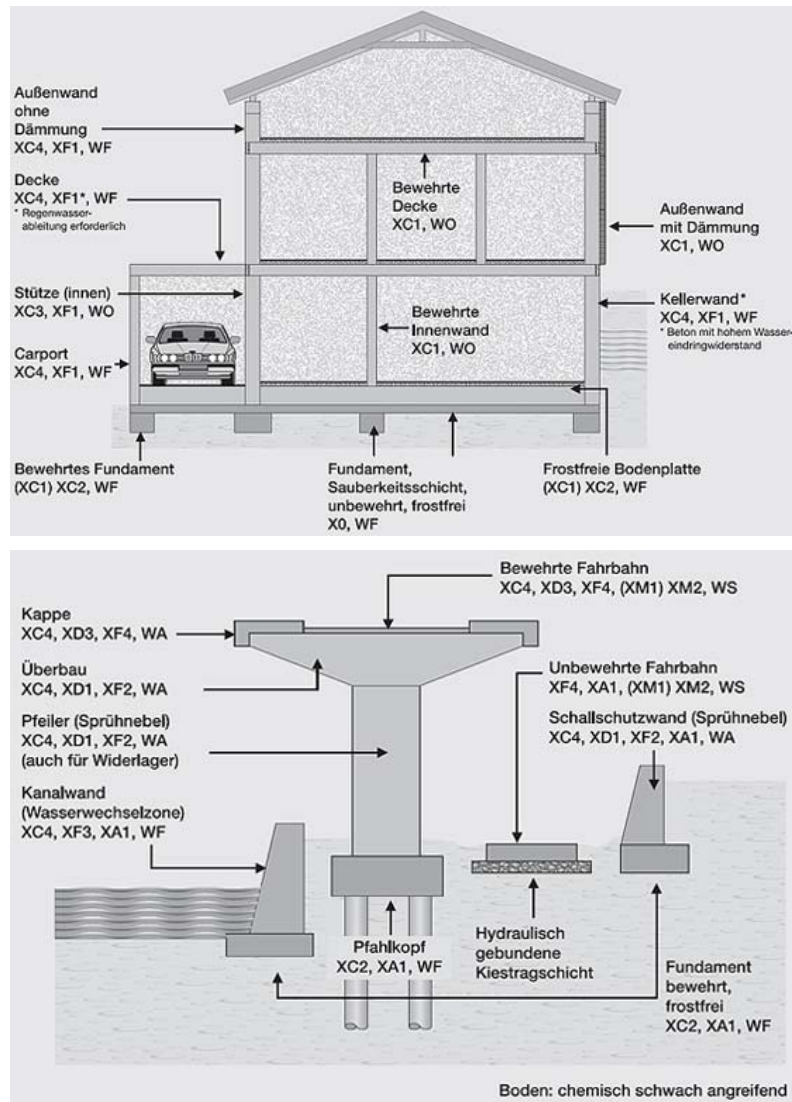


Abbildung A- 3: Beispielhafte Illustration der Expositionsklassen bei ausgewählten Bauteilen; XM: deutsche Expositionsklassen für Verschleiss, WA, WS, WF: deutsche Klassen zur Beurteilung des AAR-Risikos, aus HeidelbergCement

**Tabelle A- 2: Expositionsklassen zur Beschreibung der wichtigsten Umwelteinflüsse auf Beton, aus SIA 262**

| Expositions-<br>klasse <sup>1)</sup>                                                                                                                                                       | Umwelteinflüsse                                                                     | Beispiele von Bauteilen                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1) keine Schädigung                                                                                                                                                                        |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| X0                                                                                                                                                                                         | sehr tiefe Luftfeuchtigkeit,<br>keine Frost-Tau-Wechsel,<br>kein chemischer Angriff | Unbewehrter Beton, bewehrter Beton bei sehr tiefer Luftfeuchtigkeit                                                               |
| 2) Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton                                                                                                                                           |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| XC1                                                                                                                                                                                        | trocken oder ständig nass                                                           | Bauteile im Gebäudeinnern bei geringer Luftfeuchtigkeit                                                                           |
| XC2                                                                                                                                                                                        | nass, selten trocken                                                                | langzeitig wasserbenetzte Oberflächen                                                                                             |
| XC3                                                                                                                                                                                        | mässig feucht                                                                       | Bauteile im Gebäudeinnern bei mässiger oder hoher Luftfeuchtigkeit (z.B. Wäschereien), vor Regen geschützte Oberflächen im Freien |
| XC4                                                                                                                                                                                        | wechselnd nass<br>und trocken                                                       | wasserbenetzte Oberflächen, die nicht der Klasse XC2 zuzuordnen sind                                                              |
| 3) Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride (z.B. von Taumitteln)                                                                                                                      |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| XD1                                                                                                                                                                                        | mässig feucht                                                                       | Bauteile im Sprühnebelbereich von Strassenverkehrsflächen                                                                         |
| XD2                                                                                                                                                                                        | nass, selten trocken                                                                | Schwimmbecken, Bauteile im Kontakt mit chloridhaltigen Industrieabwässern                                                         |
| XD3                                                                                                                                                                                        | wechselnd nass<br>und trocken                                                       | Teile von Brücken, Parkdecks oder Stützmauern, die chloridhaltigem Spritzwasser ausgesetzt sind                                   |
| 4) Bewehrungskorrosion bei Kontakt mit Meerwasser                                                                                                                                          |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| XS1                                                                                                                                                                                        | salzhaltige Luft                                                                    | Aussenbauteile in Küstennähe                                                                                                      |
| XS2                                                                                                                                                                                        | ständig unter Wasser                                                                | Bauteile, die ständig unter Wasser liegen                                                                                         |
| XS3                                                                                                                                                                                        | wechselnd nass<br>und trocken                                                       | Bauteile im Bereich wechselnder Wasserstände                                                                                      |
| 5) Gefügeschädigung des Betons bei Frosteinwirkung mit oder ohne Taumittel                                                                                                                 |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| XF1                                                                                                                                                                                        | mässige Wassersättigung,<br>ohne Taumittel                                          | vertikale Oberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind                                                                        |
| XF2                                                                                                                                                                                        | mässige Wassersättigung,<br>mit Taumittel                                           | vertikale Oberflächen im Bereich taumittelhaltigen Sprühnebels                                                                    |
| XF3                                                                                                                                                                                        | hohe Wassersättigung,<br>ohne Taumittel                                             | horizontale Oberflächen, die Regen und Frost ausgesetzt sind                                                                      |
| XF4                                                                                                                                                                                        | hohe Wassersättigung,<br>mit Taumittel                                              | Brückenplatten, die Taumitteln ausgesetzt sind; Oberflächen, die Sprühnebel oder Spritzwasser und Frost ausgesetzt sind           |
| 6) Chemischer Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser <sup>2)</sup>                                                                                                                 |                                                                                     |                                                                                                                                   |
| XA1                                                                                                                                                                                        | schwacher Angriff                                                                   | siehe Norm SN EN 206-1                                                                                                            |
| XA2                                                                                                                                                                                        | mässiger Angriff                                                                    | siehe Norm SN EN 206-1                                                                                                            |
| XA3                                                                                                                                                                                        | starker Angriff                                                                     | siehe Norm SN EN 206-1                                                                                                            |
| <sup>1)</sup> Die Bezeichnung gemäss Norm SN EN 206-1 enthält nach der Klassenbezeichnung die Abkürzung des Namens des Landes (CH); z.B. XD2(CH).<br><sup>2)</sup> siehe Norm SN EN 206-1. |                                                                                     |                                                                                                                                   |

Tabelle A- 3: Betonsorten gemäss Norm SIA 118/262, Revision 2009, gültig ab 1.1.2010

| Bezeichnung<br>Anforderungen <sup>1)</sup>                            | Sorte A <sup>2)</sup><br>(Anna) | Sorte B<br>(Berta)        | Sorte C<br>(Cäsar)        | Sorte D<br>(T1)                 | Sorte E<br>(T2)                 | Sorte F<br>(T3)                 | Sorte G<br>(T4)                 |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Übereinstimmung <sup>3)</sup>                                         | Beton nach<br>SN EN 206-1       | Beton nach<br>SN EN 206-1 | Beton nach<br>SN EN 206-1 | Beton nach<br>SN EN 206-1       | Beton nach<br>SN EN 206-1       | Beton nach<br>SN EN 206-1       | Beton nach<br>SN EN 206-1       |
| Druckfestigkeitsklasse                                                | C25/30                          | C25/30                    | C30/37                    | C25/30                          | C25/30                          | C30/37                          | C30/37                          |
| Expositions-<br>klasse<br>(Kombination der auf-<br>geführten Klassen) | XC2(CH)                         | XC3(CH)                   | XC4(CH),<br>XF1(CH)       | XC4(CH),<br>XD1(CH),<br>XF2(CH) | XC4(CH),<br>XD1(CH),<br>XF4(CH) | XC4(CH),<br>XD3(CH),<br>XF2(CH) | XC4(CH),<br>XD3(CH),<br>XF4(CH) |
| Nennwert des Grösst-<br>korns                                         | D <sub>max</sub> 32             | D <sub>max</sub> 32       | D <sub>max</sub> 32       | D <sub>max</sub> 32             | D <sub>max</sub> 32             | D <sub>max</sub> 32             | D <sub>max</sub> 32             |
| Klasse des Chloridge-<br>halts <sup>4)</sup>                          | Cl0,10                          | Cl0,10                    | Cl0,10                    | Cl0,10                          | Cl0,10                          | Cl0,10                          | Cl0,10                          |
| Konsistenzklasse                                                      | C3                              | C3                        | C3                        | C3                              | C3                              | C3                              | C3                              |
| Frost-Tausalz-<br>widerstand <sup>5)</sup>                            | nein                            | nein                      | nein                      | mittel                          | hoch                            | mittel                          | hoch                            |

1) Es sind die Anforderungen aufgeführt, die gemäss der Norm SIA 262, Ziffer 3.1.1.2, festzulegen sind.

2) Die Sorte A deckt auch die Anforderungen der Expositions-klasse XC1(CH) ab.

3) Norm SN EN 206-1:2000 *Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*.

4) Die angegebene Klasse des Chloridgehalts ist für Stahl- und Spannbeton geeignet.

5) Prüfungen gemäss Norm SIA 262/1 *Betonbau – Ergänzende Festlegungen*, Anhang A, B und C für die Wasserleitfähigkeit (WL), Chloridwiderstand (CW) und Frost-Tausalzwiderstand (FT). Bei den Prüfungen gelten die Grenzwerte und Kriterien gemäss Neufassung der Ziffer 8.2.3.2 des nationalen Anhangs der Norm SN EN 206-1 (Mitteilung der NK 262 zum Beschluss vom 18.4.2008, [www.sia.ch/206-1](http://www.sia.ch/206-1)).

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit sind gemäss Norm SIA 262, Ziffer 2.4.3, abgestimmt auf die Expositions- und die Nutzung, in der Regel verschiedene Massnahmen zu ergreifen, beispielsweise:

- o Verwenden von Ausgangsstoffen, welche die Herstellung einer gleichbleibenden, genügenden Betonqualität ermöglichen
- o Herstellen von Beton mit ausreichendem Widerstand gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und schädlichen Stoffen
- o Herstellen eines dichten Überdeckungsbetons
- o Einhalten einer genügenden Bewehrungsüberdeckung
- o Vorsehen einer wirksamen Entwässerung der Betonoberflächen
- o Vorspannen des Tragwerks
- o Vermeiden von Rissen
- o Begrenzen der Rissbreiten
- o Aufbringen eines Oberflächenschutzes
- o Verwenden von Bewehrung mit erhöhtem Korrosionswiderstand
- o Anwenden eines kathodischen Korrosionsschutzes.

In der Norm SIA 262, Ziffer 5.2.2, sind die Mindestwerte der Bewehrungsüberdeckung  $c_{nom}$  (inkl. Vorhaltemass) festgelegt, die, falls keine besonderen Schutzmassnahmen durch einen Oberflächenschutz getroffen werden oder keine besonderen Verhältnisse vorliegen, einzuhalten sind (**Tabelle A- 4**). Die zulässigen Masstoleranzen betragen +10 mm und –0 mm (gemeint ist hier wahrscheinlich die Bewehrungsüberdeckung ohne Vorhaltemass). In der Revision 2010 der Norm SIA 262 soll das Vorhaltemass mit voraussichtlich 10 mm spezifiziert werden.

Die Qualität des Überdeckungsbetons wird gemäss Norm SIA 262, Ziffer 6.4.2 unter anderem beeinflusst durch:

- o Zusammensetzung des Betons
- o Form und Abmessungen des Bauteils
- o Bewehrungsgehalt und Bewehrungsanordnung
- o Art und Vorbehandlung der Schalung
- o Art der Verarbeitung des Betons
- o Dauer und Art der Nachbehandlung
- o Korrosionswiderstand der Bewehrung.

In Ziffer 6.4.2 der Norm SIA 262 wird zudem gefordert, dass „die erreichte Dichtigkeit des Überdeckungsbetons [...] mit Durchlässigkeitsprüfungen (z.B. Luftpermeabilitätsmessungen) am Bauwerk oder an vom Bauwerk entnommenen Bohrkernen zu überprüfen“ ist. Hinweise zur

Durchführung der Luftpermeabilitätsmessungen gibt die Norm SIA 262/1, Anhang E.

*Tabelle A- 4: Mindestwerte der Bewehrungsüberdeckung (inkl. Vorhaltemass), aus Norm SIA 262;*

| Bewehrungsüberdeckung<br>$c_{nom}$ [mm] | Expositionsklasse gemäss Tabelle 1               |     |     |     |                                                 |     |     |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------------------------|-----|-----|
|                                         | 2) Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton |     |     |     | 3) Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride |     |     |
|                                         | XC1                                              | XC2 | XC3 | XC4 | XD1                                             | XD2 | XD3 |
| Betonstahl                              | 20                                               | 35  |     | 40  | 40                                              | 55  |     |
| Spannstahl bzw. Spannglied              | 30                                               | 45  |     | 50  | 50                                              | 65  |     |

## Anhang B: Hintergründe zur Methode der Luftpermeabilitätsmessung

In Kapitel B-1 wird die Messmethode näher erläutert. Kapitel B-2 beschreibt die Gründe zur Festlegung der maximalen Betonfeuchte und minimalen Betontemperatur. In Kapitel B-3 sind Daten zur Genauigkeit der Luftpermeabilität angegeben und Kapitel B-4 enthält Angaben zum Zusammenhang zwischen der Luftpermeabilität und weiteren Dauerhaftigkeitskenngrößen.

### B-1. Messmethode

Bei dieser Messmethode werden mit der im Beton vorhandenen Luft Permeabilitätsmessungen vor Ort durchgeführt. In einer Prüfkammer ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) und einem diese Kammer umgebenden Schutzring (**Abbildung B- 1**), die beide zur Betonoberfläche hin geöffnet sind, wird mit einer Vakuumpumpe ein Unterdruck erzeugt; je nach Beton und Messgerät beträgt dieser ca. 10 - 40 mbar. In der Prüfkammer wird der Druckaufbau ab dem Zeitpunkt  $t_0$  (Beendigung der Evakuierung der Messkammer) durch die durch den Beton einströmende Luft in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Aus der zeitlichen Druckänderung und weiteren Kenngrößen wird die Luftpermeabilität berechnet. Der die Prüfkammer umgebende Schutzring bezweckt, dass die Luft nur eindimensional in die Prüfkammer hinein strömt, d.h. nur aus dem Bauteilinneren stammt (siehe Pfeile in **Abbildung B- 1**).

Die Berechnung der Luftpermeabilität beruht auf folgender Gleichung (Torrent & Frenzer 1995):

$$k_T = \left( \frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left( \frac{\ln \left( \frac{p_a + \Delta p}{p_a - \Delta p} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right)^2$$

$k_T$ : Luftpermeabilität [ $\text{m}^2$ ]

$V_c$ : Volumen der Messkammer [ $\text{m}^3$ ]

$A$ : Querschnittsfläche der Messkammer [ $\text{m}^2$ ]

$\mu$ : dynamische Viskosität der Luft; als konstant mit  $2.0 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$  angenommen; liegt tatsächlich, je nach Temperatur bei  $1.7 - 1.9 \cdot 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$

$\varepsilon$ : luftgefüllte Betonporosität [-], als konstant mit 0.15 angenommen; liegt bei Beton zumeist niedriger

$t$ : Ende der Messung [s]

$t_0$ : Beginn der Messung (nach der Evakuierung des Messkammer) [s]

$p_a$ : Luftdruck [ $\text{N/m}^2$ ]

$\Delta p$ : Druckdifferenz zwischen  $t_0$  und  $t$  (Ende der Messung) in der Messkammer [ $\text{N/m}^2$ ]

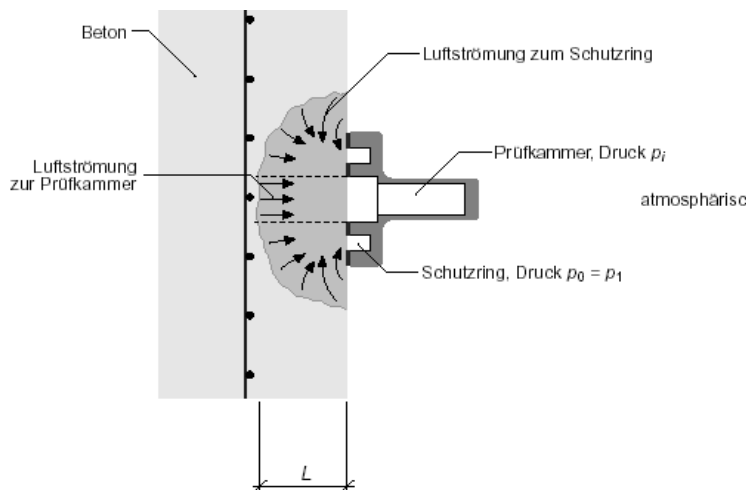


Abbildung B- 1: Skizze des Versuchsprinzips der Luftpermeabilitätsmessung vor Ort, aus Norm SIA 262/1

Die Luftpermeabilität kann je nach Betonzusammensetzung, Verdichtung, Nachbehandlung, Mikrorissen etc. über mehrere Zehnerpotenzen variieren (**Abbildung B- 2**). Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurden Messgeräte der Firmen proceq („Torrent Permeability

Tester“ TPT) und Materials Advanced Services („Permea-TORR“ PT) verwendet.

## B-2. Einfluss von Betonfeuchte und Betontemperatur

Wird die Luftpermeabilität von Beton gemessen, ist der Wassergehalt des Betons von entscheidender Bedeutung, da sich das Wasser in den Poren befindet und den Luftfluss behindert. Verschiedene Untersuchungen wurden durchgeführt, um den Einfluss der Betonfeuchte auf die Luftpermeabilität zu studieren, von denen nachfolgend einige präsentiert werden.

Torrent & Ebensperger (1993) bestimmten die Luftpermeabilität und den spezifischen elektrischen Widerstand (Wenner-Methode) während der Trocknung von Beton mit Portlandzement nach mehrmonatiger Wasserlagerung. Sie ermittelten, dass nur durch die Trocknung sowohl die Luftpermeabilität als auch der spezifische elektrische Widerstand ansteigen. Um den Einfluss eines unterschiedlichen Wassergehaltes, angegeben als spezifischer elektrischer Widerstand, bei der Luftpermeabilität zu berücksichtigen, wurde das in **Abbildung B- 2** dargestellte Nomogramm entwickelt. Weist ein Beton eine hohe Luftpermeabilität und einen hohen spezifischen elektrischen Widerstand auf (Punkt A), ist der Beton einerseits trocken und andererseits von hoher Durchlässigkeit. Ist jedoch die Luftpermeabilität gering und der spezifische elektrische Widerstand hoch (Punkt B), liegt ein trockener Beton mit einer geringen Luftpermeabilität vor. Sind sowohl die Luftpermeabilität als auch der spezifische elektrische Widerstand niedrig (Punkt C), handelt es sich um einen relativ nassen Beton, dessen Durchlässigkeit mit einer Trocknung deutlich zunehmen würde.

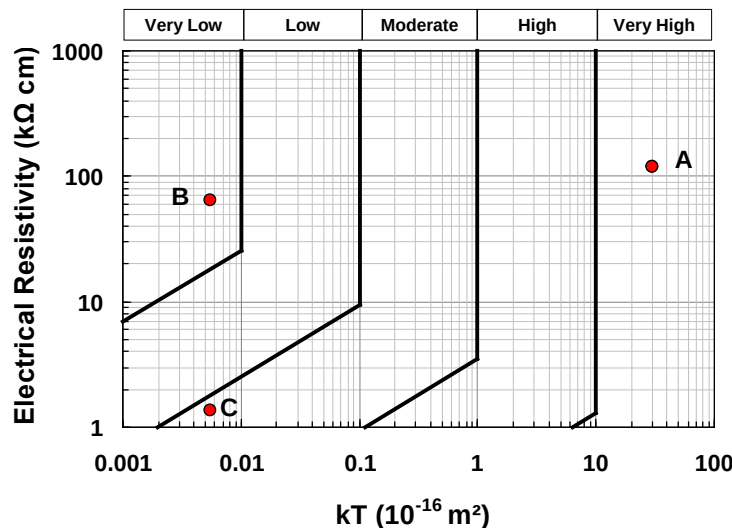


Abbildung B- 2: Nomogramm zur Darstellung des Einflusses der Betonfeuchte, dargestellt als spezifischer elektrischer Widerstand, auf die Luftpermeabilität für Beton mit Portlandzement, aus Torrent & Frenzer (2005)

Sollte die Luftpermeabilität um den Einfluss der Betonfeuchte korrigiert werden (korrigierte Luftpermeabilität  $kT'$ ), wurde folgende Formel von Torrent & Frenzer (1995) vorgeschlagen, die auf den Zusammenhängen von **Abbildung B- 2** basiert:

$$kT' = \text{Max} \left( kT, \frac{3.5 kT^{0.57}}{ER} \right)$$

In Jacobs (2006) sowie Torrent & Luco (2007) sind die Grenzen dieses Ansatzes durch z.B. Zusatzstoffe des Typs II gemäss EN 206-1, Zemente CEM III oder auch eine Karbonatisierung bzw. einen Chlorideintrag in Beton aufgezeigt.

Romer (2005a) lagerte Betonwürfel mit w/z-Werten zwischen 0.35 und 0.62 bei Temperaturen zwischen 5 und 20 °C sowie relativen Luftfeuchtigkeiten zwischen 35 und 90 % und bestimmte daran nach 28 Tagen als auch nach 1 Jahr die Luftpermeabilität. Mit zunehmender Lagerungsdauer nahm die Betonfeuchtigkeit ab (**Abbildung B- 3**) und die Luftpermeabilität zu (**Abbildung**

**B- 4).** Bei den in der Praxis zumeist zu erwartenden relativen Luftfeuchten von 70 bis 90 % muss gemäss **Abbildung B- 4** mindestens 1 Monat nach Betonherstellung gewartet werden, bis sich die Luftpermeabilität einigermaßen stabilisiert, d.h. sich kaum noch mit weiter zunehmender Lagerungsdauer (bis 1 Jahr) ändert.

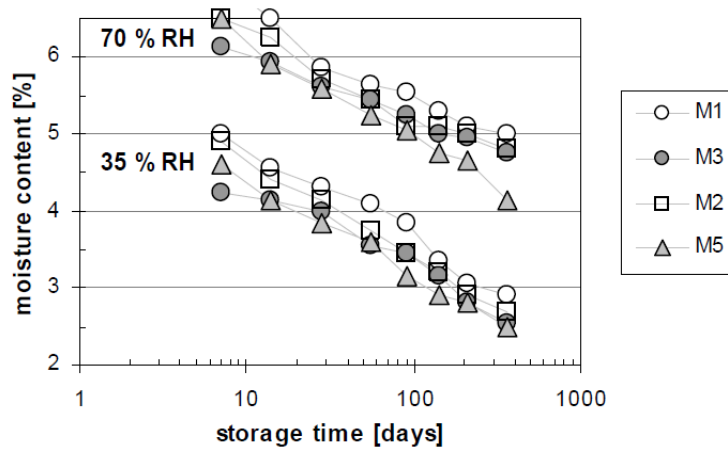


Abbildung B- 3: Mittels Impedanzmessung bestimmte Betonfeuchte in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer für verschiedene bei 20°C gelagerte Betone (M1: w/z = 0.35; M2: w/z = 0.4, M3: w/z = 0.40; M5: w/z = 0.62), aus Romer (2005a)

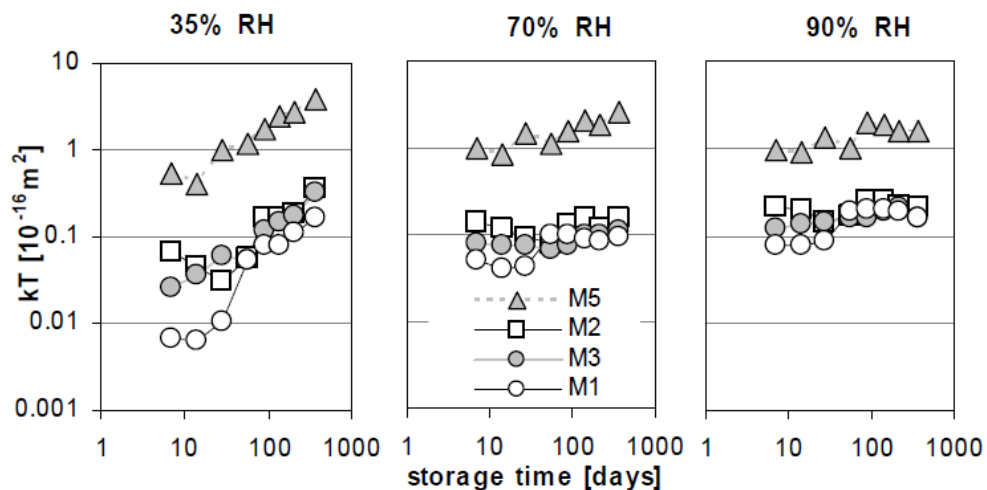


Abbildung B- 4: Einfluss der Lagerungsdauer auf die Luftpermeabilität von Beton (M1: w/z = 0.35; M2: w/z = 0.4, M3: w/z = 0.40; M5: w/z = 0.62), aus Romer (2005a)

Bei Beton mit einem w/z-Wert von 0.62, gelagert bei 20 °C, und relativen Feuchten zwischen 35 und 90 %, war der Druckanstieg erwartungsgemäss proportional zur Wurzel der Zeit. Demgegenüber wurde bei einem geringeren w/z-Wert beobachtet, dass der Druckanstieg nicht immer proportional zur Wurzel der Zeit verlief. In **Abbildung B- 5** ist dies für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0.48 dargestellt. Bei sehr trockener Lagerung (35 %) war der Druckanstieg linear, bei einer Lagerung bei 70 % und noch ausgeprägter bei 90 % war der Druckanstieg immer weniger linear. Als Erklärung hierfür wurde das Verdunsten von Wasser bei den in der Messkammer vorherrschenden niedrigen Luftdrücken angegeben. Daraus kann gefolgert werden, dass ein nicht linearer Druckanstieg auf einen hohen Wassergehalt im Beton hinweist und, dass es von Vorteil sein könnte, wenn die Messungen bei Drücken oberhalb des Wasserdampfdruckes (ca. 25 mbar bei 20 °C) durchgeführt werden könnten (was nicht mit dem TPT, jedoch dem PT möglich ist). Aus den mittels Impedanzmessung bestimmten Betonfeuchten in **Abbildung B- 3** ergibt sich, dass die Betone mit einem Verlauf, der nicht proportional zur Wurzel der Zeit war, in **Abbildung B- 5** eine mittels Impedanzmessung bestimmte Betonfeuchte von 5.5 M.-% und mehr aufwiesen. Wird somit oberhalb der Betonfeuchte von 5.5 M.-% gemessen, ergeben sich vor allem nicht lineare Druckanstiege und folglich Verfälschungen bei den Luftpermeabilitätsergebnissen. Besteht ein Verdacht auf zu hohe Betonfeuchten, ist der Druckanstieg in Funktion der Wurzel der Zeit



darzustellen: Zeigt sich kein Zusammenhang, der ungefähr proportional zur Wurzel der Zeit ist, ist das Ergebnis der Luftpermeabilität mit Vorsicht zu betrachten.

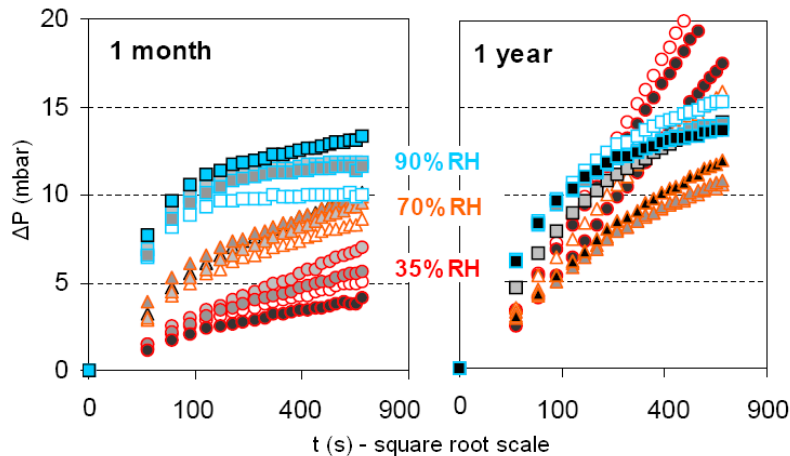


Abbildung B- 5: Druckanstieg in Abhängigkeit von der Wurzel der Messdauer für Beton mit einem w/z-Wert von 0.48, aus Romer (2005a)

Bei niedrigen Lagerungstemperaturen und hohen relativer Luftfeuchtigkeit wurde von Romer (2005a) ein starker Einfluss der Temperatur auf die Luftpermeabilität ermittelt (**Abbildung B- 6**). Die Ursache hierfür ist nicht klar, könnte jedoch auch auf dem Wassergehalt (Verdunsten von Wasser während der Messung) im Beton beruhen. Je höher der w/z-Wert des Betons war, desto geringer war der Einfluss der Temperatur auf die Luftpermeabilität. Niedrigere Temperaturen führten fast immer zu einer geringeren Luftpermeabilität. Werden auch hier die bei 20 °C ermittelten Betonfeuchten (**Abbildung B- 3**) betrachtet, sind bei dem Betonalter von 28 Tagen und einer Lagerung bei 70 oder 90 % r.F. Betonfeuchten von etwa 5.5 M.-% für den Beton M5 (w/z = 0.62) und von über 5.5 M.-% für die Betone mit niedrigerem w/z-Wert zu erwarten. D.h. alle Betone bis auf den mit w/z = 0.62 sind bei 20 °C nass, weshalb eine Bestimmung der Luftpermeabilität im Sinne dieser Empfehlung nicht möglich ist. Durch die Lagerung bei Temperaturen < 20 °C und eine entsprechend langsamere Austrocknung ergeben sich noch höhere Betonfeuchten. D.h. diese Betone sind nasser als (siehe weiter unten) für die Luftpermeabilitätsmessungen empfohlen wird.

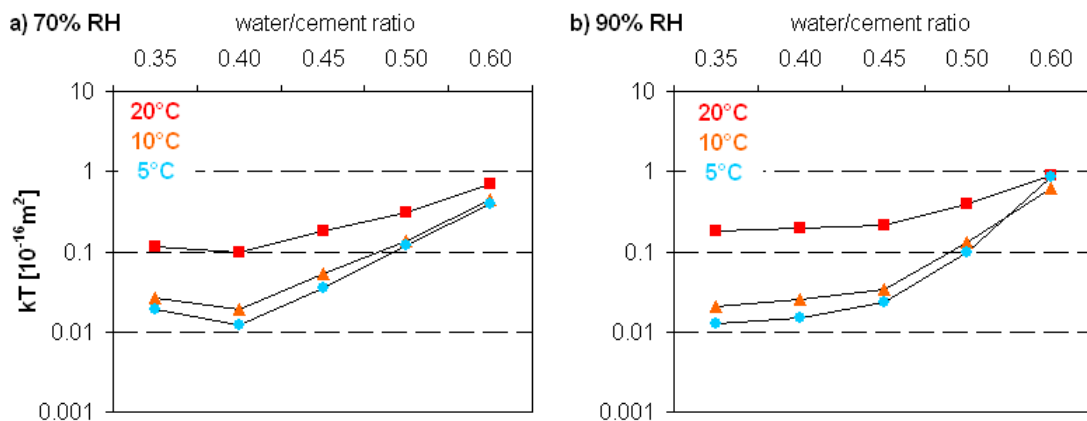


Abbildung B- 6: Einfluss der Lagerungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit auf die Luftpermeabilität von 28 Tage alten Beton mit einem unterschiedlichen w/z-Wert, die Messungen wurden bei den entsprechenden Temperaturen durchgeführt, aus Romer (2005a)

Im Rahmen der Untersuchungen des RILEM NEC (Torrent & Luco 2007) wurden Betonelemente mit w/z-Werten von 0.40, 0.55 und 0.60 hergestellt, 1 Woche bei 20 °C und 70 % r.F. sowie danach für etwa 2 Monate bei 20 °C und 70 % r.F. gelagert. An einem Teil der Betonelemente wurde dann die Luftpermeabilität bestimmt (= normale Lagerung). Andere Betonelemente wurden 7 Tage vor den Luftpermeabilitätsmessungen unterschiedlich behandelt:

- Lagerung bei 10 °C (= kalte Lagerung „cold“)



- Lagerung während eines Tages unter Wasser und danach für 6 Tage bei 20 °C und 90 % r.F. (feuchte Lagerung „moist“).

Die Luftpermeabilitätsmessungen wurden bei verschiedenen Klimata (20 °C und 70 % r.F., 10 °C, 20 °C und 90 % r.F.) durchgeführt. Zwischen 6 und 8 Luftpermeabilitätsmessungen wurden an jedem Betonelement vorgenommen. Bei diesen Versuchen wurde nur ein geringer (vernachlässigbarer) Einfluss der Temperatur (10 statt 20 °C) und Betonfeuchte auf die Luftpermeabilität festgestellt (**Abbildung B- 7**). Die Betonfeuchte wurde u.a. in einem Bohrloch in 25 mm Tiefe gemessen und ist im rechten Teil der **Abbildung B- 7** dargestellt und lag zwischen 82 und 91 %. Die spezifischen elektrischen Widerstände (Wenner-Methode) lagen zwischen 11 und 41 kΩcm. Werden die bei 10 °C gemessenen Werte von 15 und 18 kΩcm um den Einfluss der Temperatur korrigiert, d.h für 20 °C mit der Faustformel (5 % pro 1 °C, siehe unten) berechnet, ergeben sich Werte von etwa 8 und 9 kΩcm. Zwischen beiden Labors wurde eine sehr gute Übereinstimmung der Luftpermeabilitätsmesswerte festgestellt (**Abbildung B- 8**, oben), wobei die Messungen an verschiedenen Stelle erfolgten.

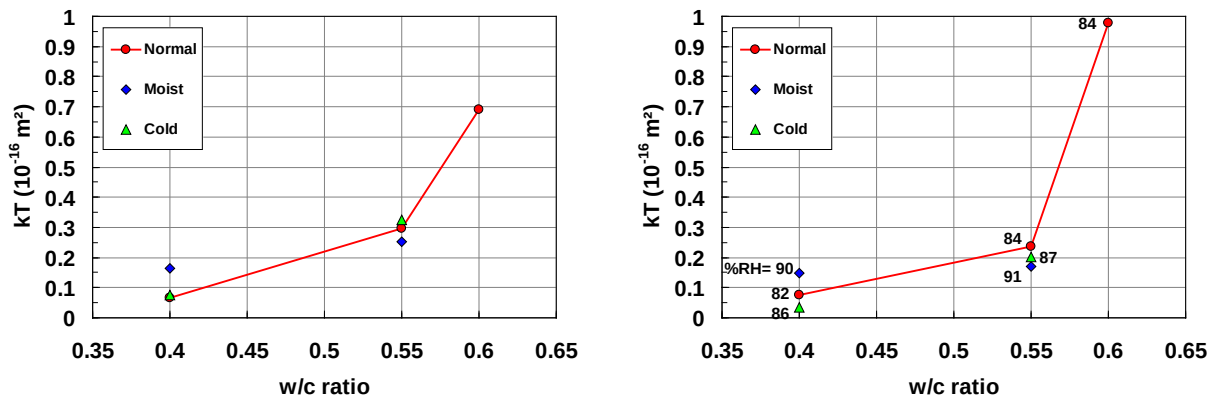


Abbildung B- 7: Luftpermeabilitäten (geometrische Mittelwerte), gemessen von TFB (links) und IETcc (rechts) beim RILEM Vergleichsversuch, aus Torrent & Luco (2007)

Basierend auf den o.g. Untersuchungsergebnissen und weiteren Erfahrungen (z.B. Jacobs 2006) wurden nachfolgende Randbedingungen für die Luftpermeabilitätsmessungen empfohlen. Vor allem bei Betonen mit niedriger Luftpermeabilität ( $kT < 0,2 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ) kann der Einfluss der Betonfeuchte und Betontemperatur sehr gross sein, wenn von den empfohlenen Randbedingungen abgewichen wird.

- Die Oberflächentemperatur des Betons sollte mehr als 10 °C betragen. Erfahrene Anwender können je nach Situation auch bei Temperaturen zwischen 5 und 10 °C messen.
- Es liegen keine Hinweise zu maximal zulässigen Temperaturen vor. Jedoch wird empfohlen das Messgerät (Druckregeleinheit, Messkammer) nicht der direkten Sonne auszusetzen.
- Der Feuchtigkeitsgehalt soll nicht mehr als 5,5 M.-% betragen, bestimmt mit dem CME (Fa. Tramex, Messung der elektrischen Impedanz).
- Der spezifische elektrische Widerstand, gemessen mit der Wenner-sonde (Fa. proceq), soll bei 20 °C mindestens 10 – 20 kΩcm betragen. Weicht die Temperatur um mehr als 5 K von 20 °C ab, ist der spezifische elektrische Widerstand bei 20 °C zu berechnen. Ist für den zu untersuchenden Beton der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Widerstand nicht bekannt, kann folgender Zusammenhang verwendet werden:
  - Im Bereich zwischen 5 und 40 pro °C halbiert sich der spezifische elektrische Widerstand bei einer Temperaturerhöhung um 20 K.
- Die in einem zur Luft hin abgeschlossenen und etwa 25 mm tiefen Bohrloch gemessene relative Luftfeuchtigkeit soll nicht mehr als 90 % betragen.

## B-3. Genauigkeit des Verfahrens

Beim RILEM NEC Vergleichsversuch (Torrent & Luco 2007) wurde im Labor an Laborbeton die Luftpermeabilität mit zwei TPT-Geräten von zwei Personen an verschiedenen Stellen bestimmt. Die Abweichung betrug im Mittel weniger als 10 % (**Abbildung B- 8**, oben). Bei Messungen an einer Wand im Naxbergtunnel durch zwei verschiedene Personen mit zwei TPT-Geräten in einem Abstand von 1 Jahr (TFB 1 Jahr später und bei einem Betonalter von 3 Jahren) wurde ein enger Zusammenhang gefunden. Die Abweichung betrug im Mittel etwa Faktor 2. Die von beiden Personen gemessenen spezifischen elektrischen Widerstände waren ähnlich, d.h. lassen auf ähnliche Feuchtigkeitsgehalte der Betone schliessen. Worauf die Unterschiede zurückzuführen sind (z.B. durch Zementhydratation, Karbonatisierung, Verschmutzungen, temperaturbedingter Einfluss auf Luftpermeabilität), kann nicht beurteilt werden.

In **Abbildung B- 8**, unten, ist bei den Messpunkten „Tunnel“ ersichtlich, wie gering die Luftpermeabilitätsmesswerte variieren, wenn an den genau gleichen Stellen in einem Abstand von ca. 1 Stunde mit zwei Geräten (TPT, PT) die Luftpermeabilität gemessen wird. Die anderen Messungen mit PT und TPT wurden ebenfalls in einem Abstand von wenigen Stunden durchgeführt. Generell zeigt sich ein enger Zusammenhang. Mit dem PT (Fa. MAS) werden eher niedrigere Luftpermeabilitäten als mit dem TPT (Fa. proceq) gemessen; bei abnehmender Luftpermeabilität wird der Unterschied grösser und erreicht bei Luftpermeabilitäten von  $0.1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und kleiner einen Unterschied von bis zu einem Faktor 2. Wird die Luftpermeabilität mit zwei Geräten desselben Herstellers gemessen, ist von einer geringeren Abweichung auszugehen, da die Durchführung der Messungen herstellerbedingt gering variieren<sup>1</sup>.

Im Rahmen der Luftpermeabilitätsmessungen an zwei Bauwerken (Anhang C) wurden die in **Tabelle B- 1** dargestellten statistischen Kenngrössen ermittelt. Hierzu wurden die negativen dekadischen Logarithmen der Luftpermeabilitätsmesswerte berechnet und damit die Wiederholstandardabweichung und Vergleichsstandardabweichung gemäss ISO 5725 berechnet. Da sich die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen kaum unterscheiden, beruht die Streuung des Messverfahrens primär auf Betoninhomogenitäten und kaum auf dem die Methode anwendenden Labor (Prüfer, Prüfgerät). Die beim Tagbautunnel ermittelten höheren Standardabweichungen weisen auf die grössere Schwankung der Betonqualität als bei der Brücke hin.

*Tabelle B- 1: Statistische Kenngrössen zur Bestimmung der Luftpermeabilität nach Norm SIA 262/1; bei der Brücke wurden 15 Messungen von 5 Teams mit dem TPT und beim Tagbautunnel mindestens 6 Messungen mit dem TPT und PT vorgenommen*

| Bauwerk      | Bauteil             | Wiederholstandardabweichung | Vergleichsstandardabweichung |
|--------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Brücke       | Trogwand Etappe XI  | 0.348                       | 0.356                        |
|              | Trogwand Etappe D-E | 0.541                       | 0.541                        |
|              | Beide Trogwände     | 0.444                       | 0.448                        |
| Tagbautunnel | Element 41 E        | 0.709                       | 0.761                        |
|              | Element 42 E        | 0.368                       | 0.439                        |
|              | Element 41 W        | 0.789                       | 0.789                        |
|              | Alle Elemente       | 0.622                       | 0.663                        |

<sup>1</sup> Beim Torrent Permeability Tester wird bei Drücken zwischen 10 und 20 mbar die Messung gestartet, beim Permea-Torr wird die Messung bei 30 mbar gestartet.

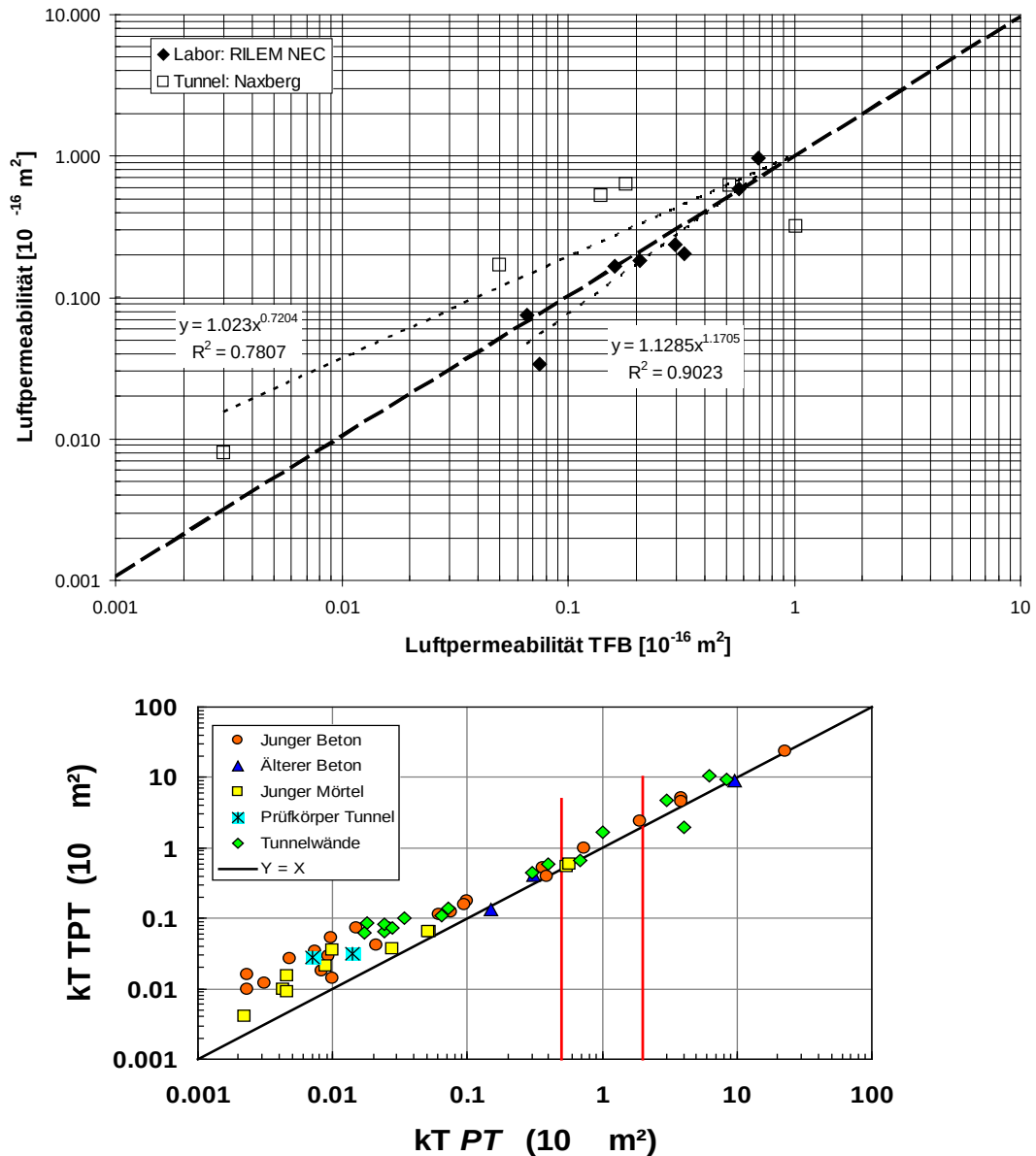


Abbildung B- 8: oben: Luftpermeabilitätsmessungen auf den gleichen Flächen und unterschiedlichen Stellen von jeweils zwei Labors mit TPT (TFB, Conciatori & Maitre 2002), in einem Abstand von einem Jahr gemessene Luftpermeabilitäten am Naxbergtunnel (Jacobs 2006) sowie beim Vergleichsversuch RILEM NEC (Torrent & Luco 2007) mit 2 TPT an den gleichen Prüfkörpern, jedoch verschiedenen Messstellen ermittelte Luftpermeabilitäten und unten: mit TPT und PT gemessene Luftpermeabilitäten an den gleichen Stellen (Torrent 2009b); die beide roten Linie stellen die zwei in Abschnitt 2.3 definierten Grenzwerte kTs dar; im Bereich der Grenzwerte ergeben beide Messgeräte im Rahmen der Messgenauigkeit gleiche Messwerte

## B-4. Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Dauerhaftigkeit

Verschiedene Untersuchungen gingen der Frage nach, ob die Luftpermeabilität zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit herangezogen werden kann. Nachfolgend wird dies am Beispiel verschiedener Dauerhaftigkeitskenngrössen und dem geometrischen Mittelwert der Luftpermeabilität vorgestellt.

Immamoto et al. (2008) ermittelten einen engen Zusammenhang zwischen der Luftpermeabilität und der Dauer bis zu einer Karbonatisierungstiefe von 30 mm (**Abbildung B- 9**). Die Dauer bis zur Karbonatisierungstiefe von 30 mm wurde durch Extrapolation der Karbonatisierungstiefe nach 4 Jahren abgeschätzt.

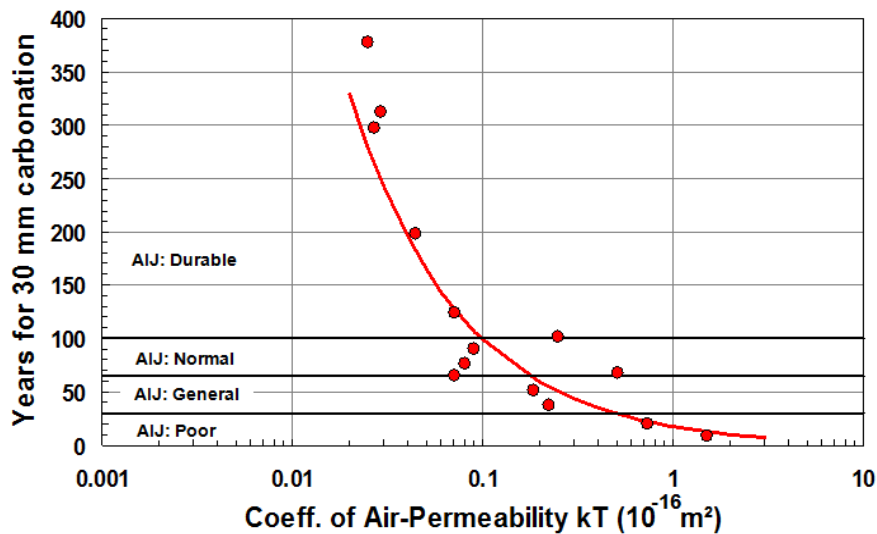


Abbildung B- 9: Geschätztes Alter für eine Karbonatisierungstiefe von 30 mm in Abhängigkeit von der Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  von Beton, nach Immamoto et al. (2008); AIJ: Japanische Karbonatisierungsklassen.

An älteren Schweizer Brücken wurde sowohl die Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  als auch die Karbonatisierungstiefe bestimmt (**Abbildung B- 10**). Es zeigt sich ein loser Zusammenhang; dies ist verständlich, da die Karbonatisierungstiefe nicht nur von der Materialeigenschaft Luftpermeabilität sondern auch stark von der Betonfeuchte (Exposition) abhängt. Mit der Luftpermeabilität kann somit nur das Potential für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Die nach mindestens 30 Jahren ermittelten Karbonatisierungstiefen stellen ungefähr die maximale Karbonatisierungstiefe des Betons dar. Bei einer Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  von maximal  $0.5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  liegt die Karbonatisierungstiefe bei zumeist maximal 10 mm während der Nutzungsdauer von 60 und mehr Jahren. Dies stimmt gut mit den Ergebnissen einer Untersuchung von Teruzzi (2009) an einem 35 Jahre alten Gebäude überein. Ebenfalls zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit Mackechnie & Alexander (2002), wenn die Umrechnung der dort ermittelten Sauerstoffpermeabilitätswerte gemäss Angaben von Romer & Leemann (2005) in Luftpermeabilitätswerte erfolgt.

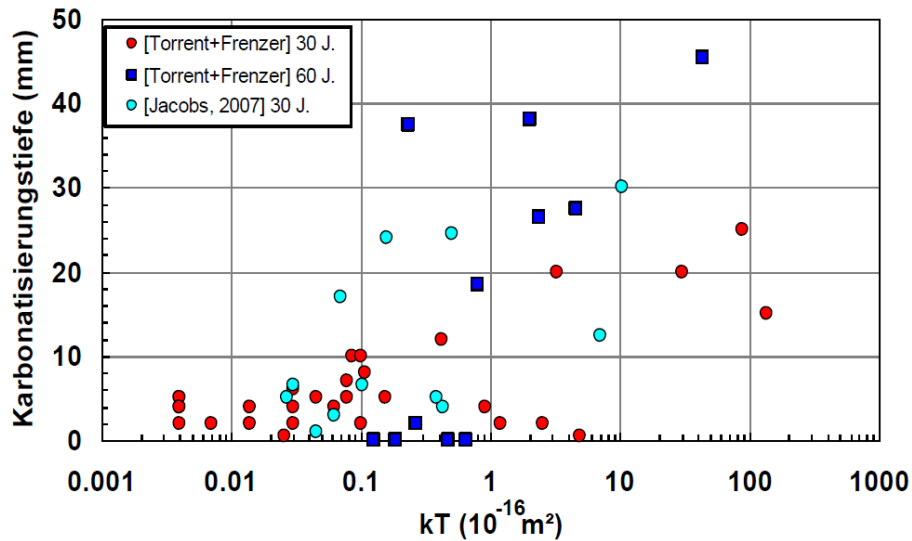


Abbildung B- 10: Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungstiefe und der Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  bei Beton aus Schweizer Brücken, aus Torrent & Frenzer (1995) und Jacobs (2007)

Bei einer älteren Schweizer Brücke wurde der Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau und die Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  an der Betonoberfläche bestimmt (**Abbildung B- 11**). Hier gewährleistet eine Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  von maximal etwa  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  einen zumeist noch akzeptablen Gehalt an Chloriden, um keine chloridinduzierte Korrosion zu erhalten.

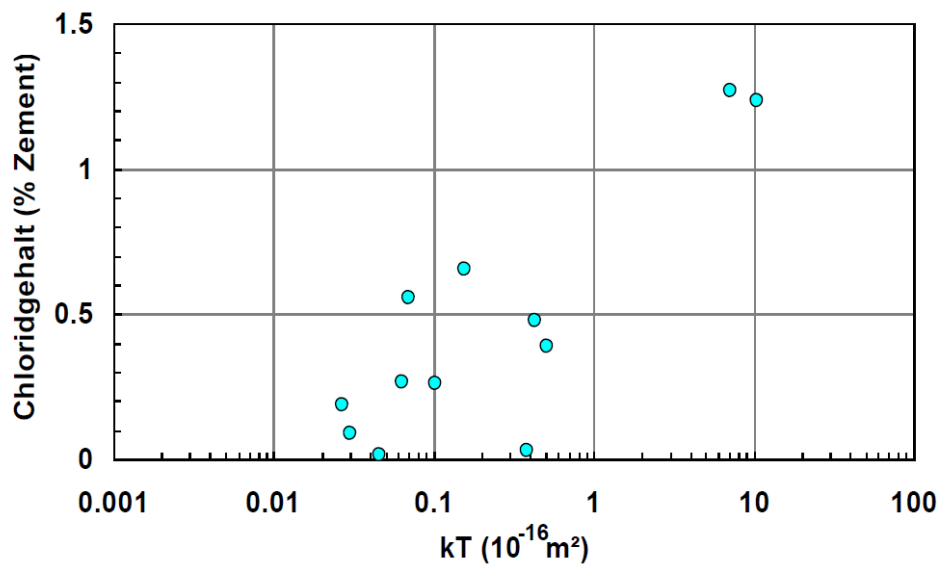


Abbildung B- 11: Luftpermeabilität  $kT_{gm}$  an der Betonoberfläche und Chloridgehalt auf Bewehrungsniveau, aus Jacobs (2007)

Torrent (2009a) wertete verschiedene Literatur aus und fand zwischen dem im Labor ermittelten Chlорideintrag in Beton und der Luftpermeabilität einen engen Zusammenhang (**Abbildung B- 12**)

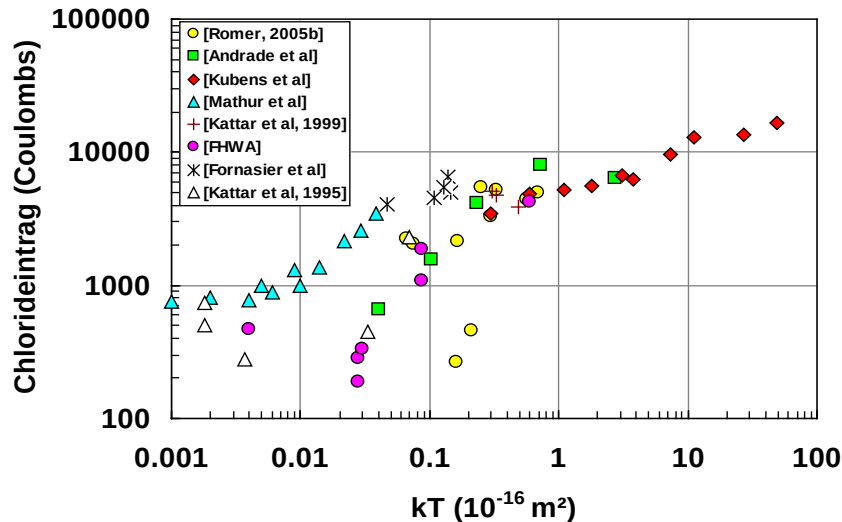


Abbildung B- 12: Zusammenhang zwischen der Luftpermeabilität und dem Chlorideintrag (ASTM C1202) in Beton, aus Torrent (2009)

Zwischen der mittleren Wassereindringtiefe und der Luftpermeabilität wurde ebenfalls ein Zusammenhang ermittelt (**Abbildung B- 13**). Beton mit einer Luftpermeabilität von nicht mehr als  $0,1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (rote Linie) zeigte eine geringe mittlere Wassereindringtiefe (maximal 30 mm).

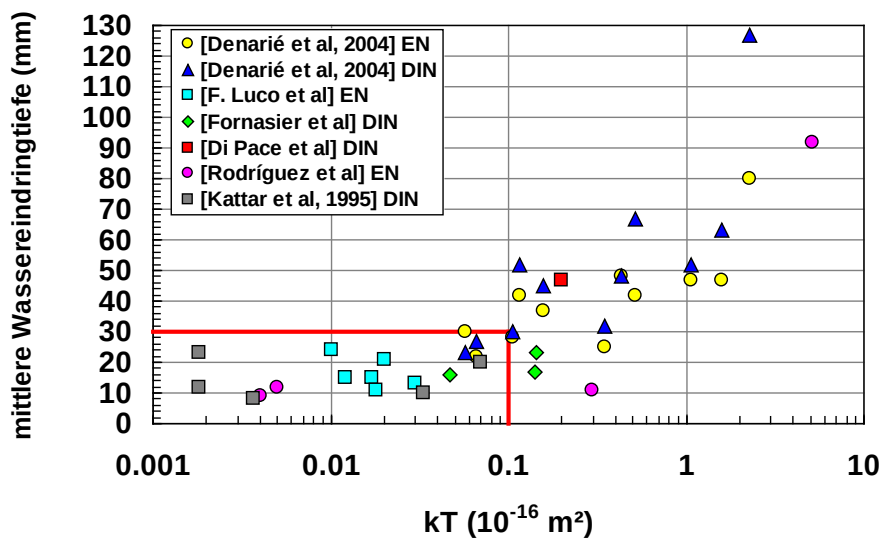


Abbildung B- 13: Luftpermeabilität  $kT$  und mittlere Wassereindringtiefe (geprüft nach EN 12390-8 oder DIN 1048) von Beton, aus Torrent (2009a);

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich zwischen der Luftpermeabilität und weiteren Dauerhaftigkeitseigenschaften nur teilweise enge Zusammenhänge zeigen (können). Dies hat folgende Gründe:

- Die Exposition eines Bauteils ist verschieden, d.h. bei Beton mit gleicher Luftpermeabilität wird je nach Exposition
  - mehr oder weniger Tausalz durch z.B. Spritzwasser in Beton eingetragen; dies hängt u.a. von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge, dem Anstand des Bauteils von der Fahrbahn, der Menge des gestreuten Salzes ab
  - der Beton unterschiedlich nass, was z.B. den Karbonatisierungsfortschritt stark beeinflusst.
- Die chemischen Eigenschaften des Betons (z.B. Bindevermögen gegenüber Tausalzen) werden mit der Luftpermeabilität nicht erfasst.
- Die Eigenschaften werden an verschiedenen Betonvolumina (Tiefen, Flächen) bestimmt.

Zwischen der Luftpermeabilität  $k_T$ , gemessen an der Betonoberfläche, und der Sauerstoffpermeabilität (Cembureau-Methode, oft als Referenzmethode für die Permeabilität gewählt), gemessen an Bohrkernen, zeigt sich ein enger Zusammenhang (**Abbildung B- 14**). Die Sauerstoffpermeabilität ist etwa halb so gross wie die Luftpermeabilität. Ursache hier sind die Annahmen bei der Luftpermeabilität (siehe hierzu auch Romer, 2005a, Jacobs, 2006).

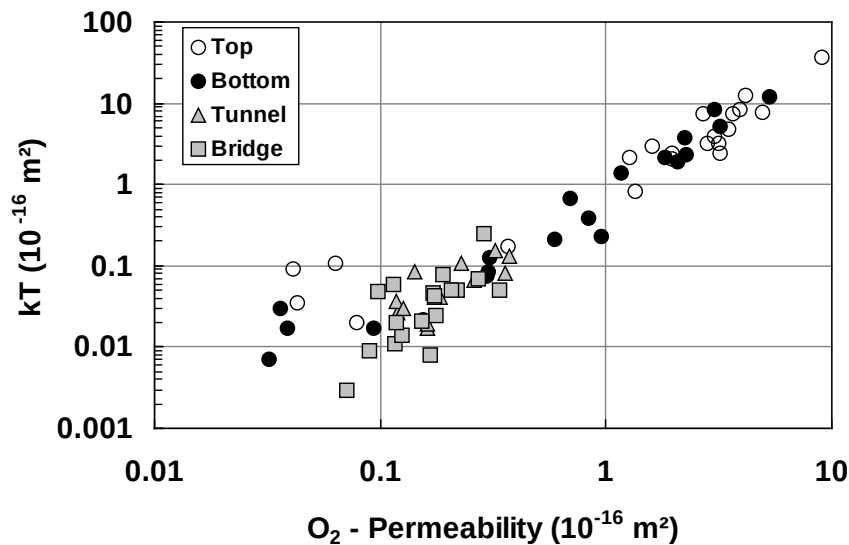


Abbildung B- 14: Zusammenhang zwischen der Luftpermeabilität  $k_T$  und der Gaspermeabilität von Beton, Daten aus Torrent & Luco (2007)

In Brühwiler et al. (2005), Romer & Leemann (2005), Jacobs (2006), Teruzzi (2009) und weiteren Arbeiten (siehe Literaturliste) sind weitere Beispiele für eine enge Korrelation zwischen Dauerhaftigkeitseigenschaften und der Luftpermeabilität enthalten.





## Anhang C: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen

In Kapitel C-1 werden die Daten zur Trogbrücke und in Kapitel C-2 die zum Tagbautunnel dargestellt.

### C-1. Trogbrücke

An der Trogbrücke wurden von 5 Teams Luftpermeabilitätsmessungen an zwei Bauteilen (Trogwände) und verschiedenen Messstellen vorgenommen, die zu verschiedenen Zeiten mit dem gleichen Beton hergestellt wurden. Die Messungen fanden am gleichen Tag und zwar im Betonalter von 43 und 167 Tagen statt. Um die Qualität der Betonbauteile möglichst genau zu kennen, wurden Daten von der Frischbetonkontrolle und Festbetonprüfung beider Bauwerke ausgewertet. Zur weiteren Information werden noch Ergebnisse von Untersuchungen ausserhalb dieses Projektes präsentiert, die im Alter von 35 Tagen vorgenommen wurden.

Die Trogbrücke wurde 2007/08 erbaut. An zwei Betonieretappen (D-E, XI) der Trogwände (**Abbildung C- 1**) die zu verschiedenen Zeiten mit Beton C 30/37, XD3(CH), XF3(CH), Dmax32, CI 0.10, C3 hergestellt wurden, wurde die Luftpermeabilität ermittelt. **Tabelle C- 1** enthält die Ergebnisse von Betonprüfungen. Gemäss diesen Angaben weist der Beton der Etappe D-E bei vergleichbaren Frischbetoneigenschaften eine deutlich höhere Druckfestigkeit als der Beton der Etappe XI auf.

Im Betonalter von ca. 35 Tagen wurde an 12 Bohrkernen aus der Ostwand der Etappe D-E eine Wasserleitfähigkeit nach SIA 262/1 von 4.1 bis 4.7 g/m<sup>2</sup>h ermittelt. Die 35 Tage-Luftpermeabilität wies einen geometrischen Mittelwert kTgm von  $0.02 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  bei einer gemessenen Betonfeuchte von zumeist > 5.5 M.-% (mittels Impedanzmessung bestimmt) bzw. einem spezifischen elektrischen Widerstand von ca. 12 kΩcm auf. Die bei der Luftpermeabilitätsmessung ermittelte Betonfeuchte deutete darauf hin, dass der Beton so nass ist, dass viele Poren mit Wasser gefüllt sind und deshalb die Luftpermeabilitätsmesswerte nicht repräsentativ (zu niedrig) für den Beton sind. Gemäss den Ergebnissen der Frisch- und Festbetonprüfungen handelte es sich um einen Beton, dessen Eigenschaften der Zusammensetzung entsprechen.

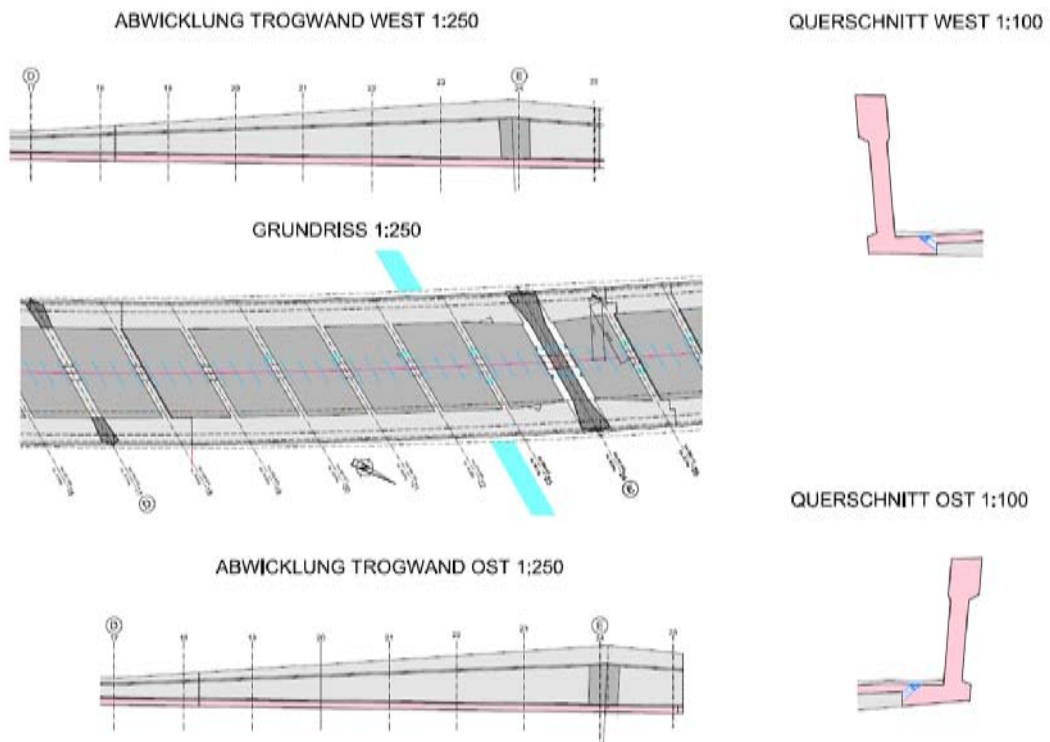


Abbildung C- 1: Planausschnitt der Trogbrücke bei Etappe D-E

Tabelle C- 1: Ergebnisse von Frisch- und Festbetonprüfungen

| Bauteil, Datum                                             | Prüfergebnisse Frischbeton |            |                                   |                        |            | Würfel                            | Druckfestigkeiten<br>nach ... Tagen<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |    |     |
|------------------------------------------------------------|----------------------------|------------|-----------------------------------|------------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|----|-----|
|                                                            | Temperatur<br>[°C]         |            | Rohdichte<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Luftgehalt<br>[Vol.-%] | w/z<br>[-] | Rohdichte<br>[kg/m <sup>3</sup> ] |                                                             |    |     |
|                                                            | Luft                       | Be-<br>ton |                                   |                        |            |                                   | 3                                                           | 5  | 28  |
| Trogwände,<br>Etappe D-E:<br><br>am 10.1.2008<br>betoniert | 1                          | 12         | 2441                              | 0.1                    | 0.43       | 2450                              |                                                             |    | 68  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2444                              |                                                             |    | 67  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2460                              |                                                             |    | 71  |
|                                                            | 2                          | 14         | 2438                              | 1.3                    | 0.42       |                                   |                                                             |    |     |
|                                                            | 2                          | 13         | 2440                              | 1.2                    | 0.45       | 2441                              |                                                             |    | 67  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2438                              |                                                             |    | 68  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2442                              |                                                             |    | 69  |
| Mittelwert                                                 | 2                          | 13         | 2440                              | 0.9                    | 0.43       | 2446                              |                                                             |    | 68  |
| Standardabw.                                               | 0.6                        | 1.0        | 1.5                               | 0.67                   | 0.015      | 8.0                               |                                                             |    | 1.4 |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            |                                   |                                                             |    |     |
| Trogwände,<br>Etappe XI,<br><br>am 13.5.2008<br>betoniert  | 24                         | 22         | 2436                              | 1.6                    | 0.44       | 2450                              | 35                                                          |    |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2445                              | 34                                                          |    |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2438                              | 33                                                          |    |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2435                              |                                                             | 39 |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2439                              |                                                             | 39 |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2446                              |                                                             | 40 |     |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2444                              |                                                             |    | 47  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2436                              |                                                             |    | 45  |
|                                                            |                            |            |                                   |                        |            | 2439                              |                                                             |    | 47  |
| Mittelwert                                                 | 24                         | 22         | 2436                              | 1.6                    | 0.44       | 2441                              |                                                             |    | 46  |
| Standardabw.                                               |                            |            |                                   |                        |            | 5.1                               |                                                             |    | 1.3 |

Die Messungen der Luftpermeabilität im Rahmen dieses Projektes wurden im Alter von 43 und 67 Tagen vorgenommen. Weitere Angaben zu den Umgebungsbedingungen und dem Beton der Etappen am Messtag enthält **Tabelle C- 2**. Die Messwerte des spezifischen elektrischen Widerstandes deuten im Gegensatz zu denen der mittels Impedanzmessung bestimmten Betonfeuchte auf einen sehr feuchten Beton hin. Eine mögliche Erklärung für den Unterschied können die hohen Bewehrungsgehalte bei nicht sehr hoher Betonüberdeckung sein, die zu einer scheinbaren Erniedrigung des Betonwiderstands führen.

*Tabelle C- 2: Angaben zu den Messungen am 25.6.2008; \*mit "/" sind Daten verschiedener Labors getrennt angegeben;\*\* zwei Teams konnten keinen spezifischen elektrischen Widerstand bestimmen.*

| Etappe                     |                                                                                                                                                    | D-E, Ostwand                                                       | XI, Westwand                             | Bemerkung                                           |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Alter bei Messung          | [d]                                                                                                                                                | 167                                                                | 43                                       |                                                     |
| Uhrzeit                    | [h]                                                                                                                                                | 9 - 12                                                             | 13 - 18                                  |                                                     |
| Lufttemperatur*            | [°C]                                                                                                                                               | 24 - 29 /<br>23 - 26 /<br>26 - 34                                  | 32 - 34 /<br>30 - 32 /<br>32 - 35        |                                                     |
| relative Luftfeuchtigkeit* | [%]                                                                                                                                                | 41 - 56 /<br>51 - 64 /<br>27 - 54                                  | 24 - 33 /<br>34 - 42 /<br>26 - 35        |                                                     |
| Wetter                     | letzten zwei Tage vor Messtag: trocken, z.T. bewölkt<br>Messtag: trocken, sonnig, keine direkte Sonneneinstrahlung auf Messflächen während Messung |                                                                    |                                          |                                                     |
| Luftdruck                  | [hPa]                                                                                                                                              | 963 - 965                                                          | 963 - 965                                |                                                     |
| Betontemperatur            | [°C]                                                                                                                                               | 26 - 28 /<br>27 - 30                                               | 30 - 32 /<br>32 - 34                     |                                                     |
| Betonfeuchte               | [kΩcm]                                                                                                                                             | 5 - 10                                                             | 5 - 10                                   | spezifischer elektrischer Widerstand**              |
| Betonfeuchte*              | [M.-%]                                                                                                                                             | 4.2 - 4.7 /<br>4.7 - 5.0                                           | 4.3 - 4.7 /<br>4.6 - 4.9                 | mittels Impedanzmessung bestimmt                    |
| Bewehrungsüberdeckung      | [mm]                                                                                                                                               | 30 - 51                                                            | 40 - 56                                  | ohne Kontrolle an Sondage                           |
| Betonoberfläche            |                                                                                                                                                    | mit Spuren von Blüten;<br>z.T. mit sehr feinen Rissen (w < 0.1 mm) | z.T. mit sehr feinen Rissen (w < 0.1 mm) | Risse durch Aufsprühen von Alkohol sichtbar gemacht |

**Abbildung C- 2** und **Abbildung C- 3** enthalten einen Überblick über die Etappen mit den etwa 0.3 x 0.3 m<sup>2</sup> grossen, durch Klebestreifen abgetrennten und mit Nummern markierten Messfelder. Die unterste Reihe mit Messfeldern wies einen Abstand von ca. 0.2 m ab Unterkante Wand auf. Innerhalb jedes Messfeldes konnte das Messteam die Stelle für die Messung frei wählen; ebenso war die Reihenfolge der Messungen an den Messfeldern freigestellt. Die Messungen erfolgten mit TPT-Messgeräten (**Abbildung C- 4**).



**Abbildung C- 2: Messfelder der Etappe XI**



Abbildung C- 3: Messfelder der Etappe D-E





Abbildung C- 4: Messungen an Etappe XI

Die Ergebnisse der Messungen sind tabellarisch in **Tabelle C- 5** sowie graphisch in **Abbildung C- 5** und **Abbildung C- 6** in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Messung sowie von der Höhe des Messortes dargestellt. Bei Etappe XI nahm die Luftpermeabilität bei 3 von 5 Teams und bei Etappe D-E bei 4 von 5 tendenziell zu, je später die Messung erfolgte (**Abbildung C- 5**). Mit zunehmender Höhe der Messstelle nahm bei beiden Etappen bei 4 von 5 Teams die Luftpermeabilität tendenziell zu (**Abbildung C- 6**). Messstellen mit so feinen Rissen, dass diese erst durch das Aufsprühen einer Alkohollösung sichtbar wurden, zeigte nicht immer eine erhöhte Luftpermeabilität. Auch wiesen nicht alle Messstellen mit erhöhten Luftpermeabilitäten nachweislich (feine) Risse auf.

Bei der Kalibrierung der Messgeräte

- vor den ersten Messungen (Etappe D-E) betrug der Druckanstieg bei der Kalibrierung 2 bis 4 mbar
- nach den Messungen an der Etappe D-E bei der ersten Kalibrierung etwa 8 mbar
- nach den Messungen der Etappe XI bei der Kalibrierung etwa 5 mbar.

Warum der Druckanstieg zwischen der Kalibrierung vor der ersten Messung und nach den Messungen an Etappe D-E von maximal 4 mbar auf etwa 8 mbar erfolgte, ist nicht ganz klar. Als Ursachen kommen eventuell hohe Temperaturen der Regeleinheit (z.T. ca. 43 °C) und vor allem die Adsorption von Wasserdampf im Messgerät (Schläuchen) in Frage.

Aus den oben genannten Sachverhalten kann Folgendes abgeleitet werden:

- Die Durchlässigkeit des Betons beider Etappen nimmt tendenziell mit zunehmender Höhe der Messstelle zu; Jacobs (2006) fand gleiches aber auch konträres Verhalten.
- Es liegen keine klaren Hinweise vor, dass mit zunehmender Anzahl an Messungen Änderungen am Messgerät bzw. Messwert auftreten.

**Tabelle C- 3** enthält einen Zusammenzug der Ergebnisse zur Luftpermeabilität. Danach liegen bei Etappe XI die geometrischen Mittelwerte der Labors zwischen  $0.10$  und  $0.20 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und bei Etappe D-E bei  $0.12$  bis  $0.25 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Die Standardabweichungen sLOG liegen bei Etappe XI zwischen  $0.30$  und  $0.45$  und bei Etappe D-E zwischen  $0.32$  und  $0.68$ . Die Betonoberfläche von Etappe D-E mit sichtbaren Entmischungen weist bei ähnlicher Luftpermeabilität eine deutlich hö-

here Standardabweichung als Etappe XI (ohne sichtbare Entmischungen) auf. Die an Prüfkörpern ermittelte höhere 28 Tage-Druckfestigkeit des Betons der Etappe D-E und eine deshalb eventuell eher höhere Dichtigkeit des Betons konnte mit der Luftpermeabilitätsmessung nicht bestätigt werden. Dies zeigt eindrucksvoll den Unterschied zwischen der Untersuchung von separat hergestellten Prüfkörpern und dem Bauteil selber.

Gemäss der Auswertung nach ISO 5725 auf Basis der negativen logarithmierten Messwerte liegen keine Ausreisser bei den Luftpermeabilitätsmesswerten vor. Bei dieser Auswertung wurden auch die Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen berechnet (**Tabelle C- 3**). Die Wiederholstandardabweichung gibt an, wie sehr sich zwei Messungen von einem Labor am gleichen Beton (verschiedene Messfelder) unterscheiden. Die Vergleichsstandardabweichung gibt an, wie sehr sich zwei Messungen von zwei Labors am gleichen Beton unterscheiden. Danach beträgt für das Messverfahren die Wiederholstandardabweichung 0.444 und die Vergleichsstandardabweichung 0.448, d.h. der Unterschied zwischen beiden ist sehr gering. Dies weist darauf hin, dass die Luftpermeabilität sehr viel stärker durch Inhomogenitäten im Beton als Geräteinflüsse bestimmt wird.

*Tabelle C- 3: Geometrische Mittelwerte  $kT [10^{-16} \text{ m}^2]$  und Standardabweichungen sLOG der Luftpermeabilität, gemessen mit TPT;*

|                            | SUPSI | EMPA | RT   | EPFL | TFB  | Wiederhol-<br>standardab-<br>weichung | Vergleichs-<br>standardab-<br>weichung |
|----------------------------|-------|------|------|------|------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| Etappe XI                  |       |      |      |      |      |                                       |                                        |
| Mittelwert                 | 0.20  | 0.16 | 0.17 | 0.19 | 0.10 |                                       |                                        |
| Standardabweichung<br>sLOG | 0.30  | 0.45 | 0.33 | 0.32 | 0.32 | 0.348                                 | 0.356                                  |
| Etappe D-E                 |       |      |      |      |      |                                       |                                        |
| Mittelwert                 | 0.22  | 0.25 | 0.17 | 0.12 | 0.13 |                                       |                                        |
| Standardabweichung<br>sLOG | 0.42  | 0.58 | 0.61 | 0.32 | 0.68 | 0.541                                 | 0.540                                  |
| Etappen XI, D-E            |       |      |      |      |      | 0.444                                 | 0.448                                  |

Vor der ersten Kalibration wurde die Luftpermeabilitätsmessgeräte TPT mit auf der Stahlplatte aufgesetzter Saugglocke während etwa 30 Minuten evakuiert. Beim Umsetzen des Messgerätes von Etappe D-E zu Etappe XI wurden die Messgeräte für ca. 2 – 5 Minuten ausgeschaltet. Zumeist kurz nach dem Einschalten erfolgte dann die Kalibration. Die Ergebnisse sind in **Tabelle C- 4** dargestellt. Insbesondere die Kalibration zwischen beiden Messtappen aber auch diejenige nach Etappe XI führte zu deutlich höheren Druckanstiegen. Als Ursachen kommen die direkte Sonnenstrahlung auf die Regeleinheit sowie in das Messgerät aus dem Beton eingetragene Feuchtigkeit in Frage.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen, aufgetragen für jedes Team, in Abhängigkeit von der Reihenfolge (Nr. 1 bis 15) (**Abbildung C- 5**) und der Höhe des Messortes (**Abbildung C- 6**) aufgetragen.

**Abbildung C- 7** zeigt, basierend auf den Messwerten der Brücke, den üblicherweise zu erwartenden Einfluss der Messwertanzahl auf den Standardfehler. Bei weniger als 6 Messungen nimmt der Standardfehler deutlich zu.

Tabelle C- 4: Ergebnisse der am 25.6.2008 vor Ort durchgeführten Kalibration der Luftpermeabilitätsgeräte

| Kalibration                                                                      | SUPSI | EMPA                | RT                  | EPFL | TFB                 |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------|---------------------|------|---------------------|
| vor Etappe D-E [mbar]                                                            | 2.3   | 2.7                 | 3.8                 | 4.0  | 3.2                 |
|                                                                                  | 2.6   | 2.7                 | 2.8                 | 3.3  | 3.8                 |
|                                                                                  |       |                     |                     | 3.6  |                     |
| vor Etappe XI [mbar]                                                             | 7.9   | 7.6                 | 2.9                 | 1.4  | 8.9                 |
|                                                                                  | 6.1   | 6.4                 | 2.9                 | 2.2  | 9.4                 |
|                                                                                  | 4.6   | 5.4                 |                     |      | 8.3                 |
|                                                                                  | 2.5   | 2.2                 |                     |      | 4                   |
|                                                                                  | 2.3   | 2.3                 |                     |      | 3.1                 |
|                                                                                  |       |                     |                     |      | 1.7                 |
| nach Etappe XI [mbar]                                                            | 4.9   | 4.4                 | nicht ge-<br>messen | 4.6  | 6.6                 |
|                                                                                  |       |                     |                     |      |                     |
| Luftpermeabilitätsmessung an<br>der TFB-Keramikplatte [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ] | 0.93  | nicht ge-<br>messen | 0.94                | 1.00 | nicht ge-<br>messen |

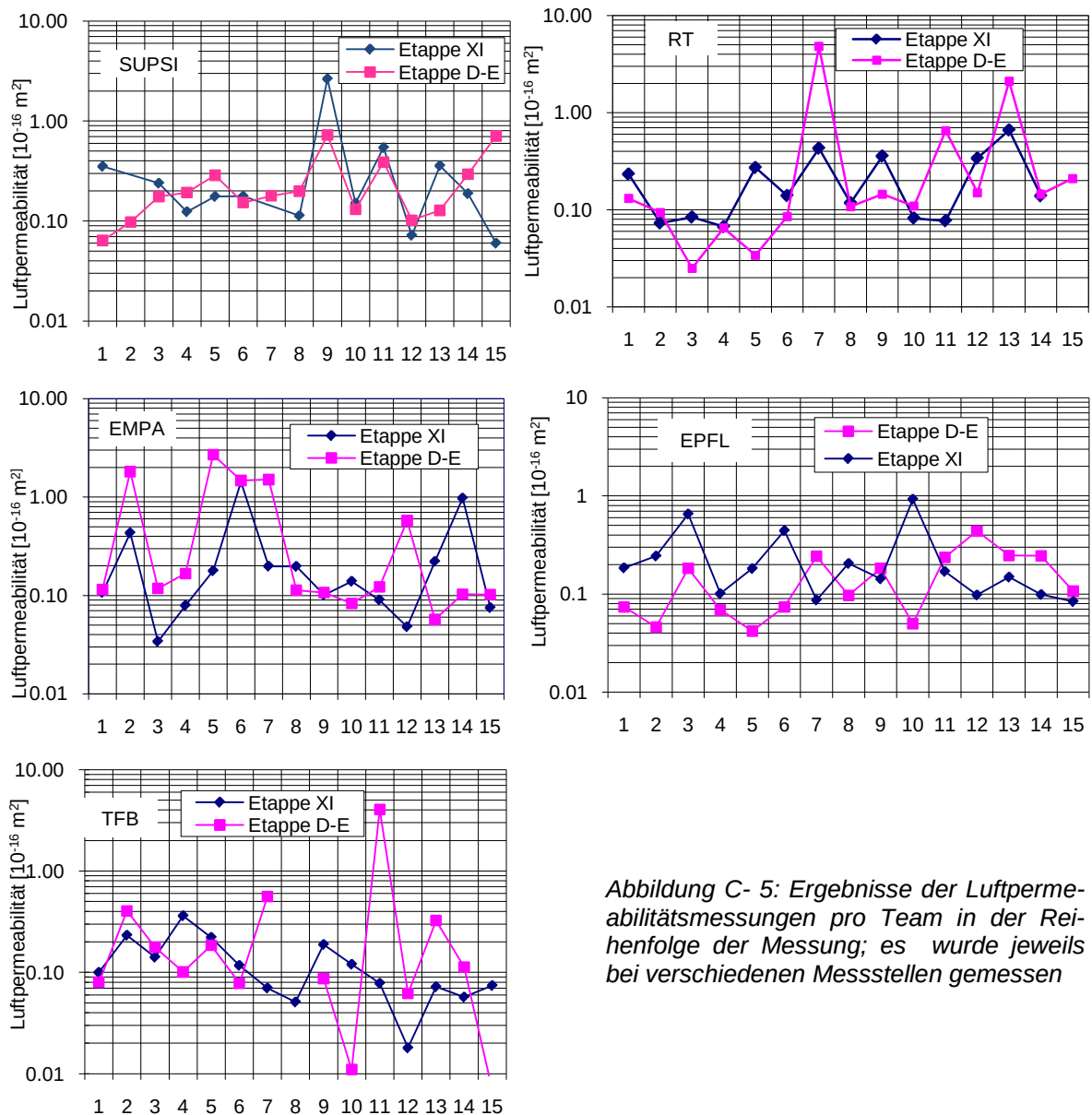


Abbildung C- 5: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen pro Team in der Reihenfolge der Messung; es wurde jeweils bei verschiedenen Messstellen gemessen

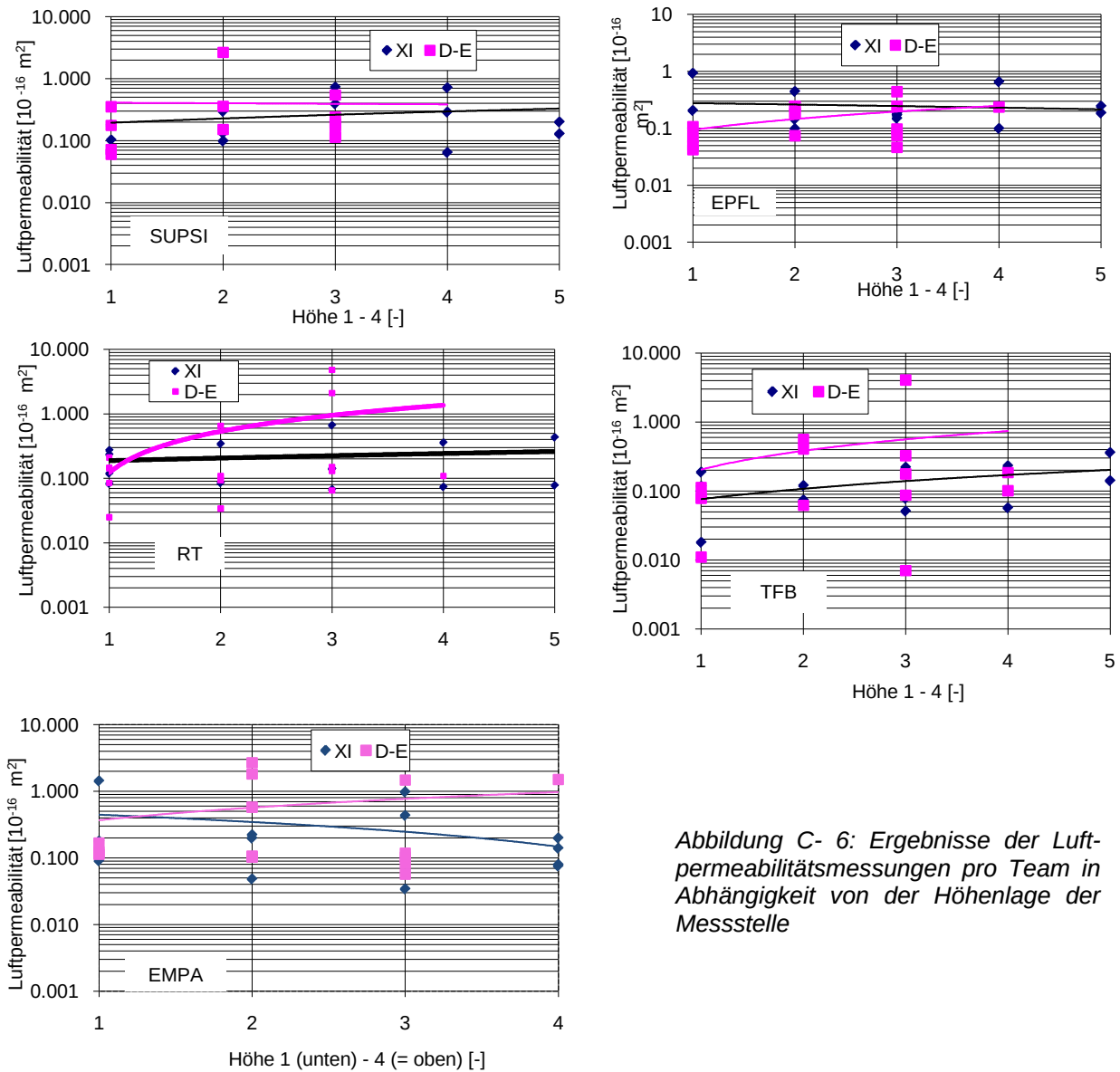


Abbildung C- 6: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen pro Team in Abhängigkeit von der Höhenlage der Messstelle

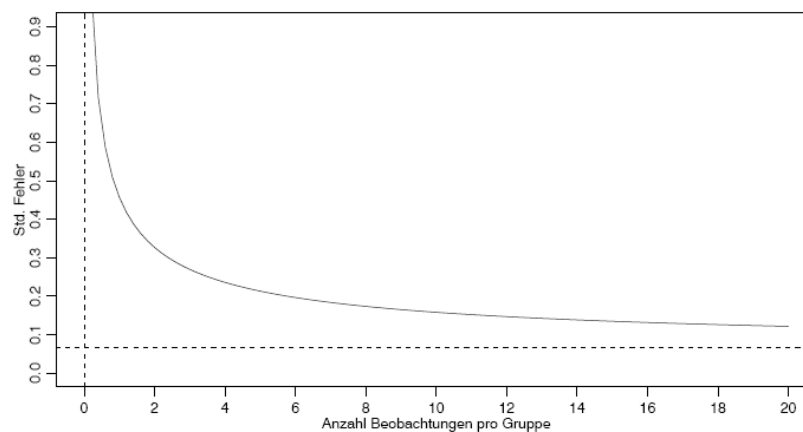


Abbildung C- 7: Standardfehler als Funktion der Anzahl Messwerte gemäss Merlini (2008)



Tabelle C- 5: Ergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen; Ort (Nummer des Rechtecks) und Luftpermeabilitätsmesswerte (kT) in  $10^{-16} \text{ m}^2$

| SUPSI      |       | EMPA |      | RT  |       | EPFL |       | TFB |       |
|------------|-------|------|------|-----|-------|------|-------|-----|-------|
| Ort        | kT    | Ort  | kT   | Ort | kT    | Ort  | kT    | Ort | kT    |
| Etappe XI  |       |      |      |     |       |      |       |     |       |
| 5          | 0.10  | 4    | 0.09 | 3   | 0.08  | 2    | 0.09  | 1   | 0.10  |
| 10         | 0.18* | 9    | 0.18 | 8   | 0.12  | 7    | 0.21  | 6   | 0.12  |
| 15         | 0.18  | 14   | 1.43 | 13  | 0.23  | 12   | 0.93  | 11  | 0.19  |
| 20         | 0.29  | 19   | 0.05 | 18  | 0.27  | 17   | 0.08  | 16  | 0.02  |
| 25         | 0.13* | 24   | 0.22 | 23  | 0.34  | 22   | 0.44  | 21  | 0.07  |
| 30         | 0.15* | 29   | 0.11 | 28  | 0.08  | 27   | 0.14* | 26  | 0.07  |
| 35         | 0.10* | 34   | 0.20 | 33  | ----  | 32   | 0.10  | 31  | 0.12  |
| 40         | 0.39  | 39   | 0.98 | 38  | 0.66  | 37   | 0.10* | 36  | 0.07  |
| 45         | 0.73* | 44   | 0.03 | 43  | 0.14  | 42   | 0.18  | 41  | 0.22  |
| 50         | 0.19* | 49   | 0.43 | 48  | 0.14  | 47   | 0.17* | 46  | 0.05  |
| 55         | 0.71* | 54   | 0.10 | 53  | 0.07  | 52   | 0.15  | 51  | 0.08  |
| 60         | 0.29  | 59   | 0.08 | 58  | 0.36  | 57   | 0.65  | 56  | 0.23  |
| 65         | 0.06* | 64   | 0.14 | 63  | 0.07  | 62   | 0.10  | 61  | 0.06  |
| 70         | 0.13  | 69   | 0.08 | 68  | 0.08  | 67   | 0.19  | 66  | 0.14  |
| 75         | 0.20  | 74   | 0.20 | 73  | 0.43  | 72   | 0.24* | 71  | 0.36  |
|            |       |      |      |     |       |      |       |     |       |
| kTgm       | 0.20  |      | 0.16 |     | 0.17  |      | 0.19  |     | 0.10  |
| sLOG       | 0.30  |      | 0.45 |     | 0.33  |      | 0.32  |     | 0.32  |
| Etappe D-E |       |      |      |     |       |      |       |     |       |
| 4          | 0.35* | 2    | 0.11 | 1   | 0.21  | 3    | 0.11  | 5   | 0.08  |
| 9          | 0.18  | 7    | 0.12 | 6   | 0.15  | 8    | 0.05  | 10  | 0.078 |
| 14         | 0.07  | 12   | 0.17 | 11  | 0.09  | 13   | 0.04  | 15  | 0.011 |
| 19         | 0.06  | 17   | 0.12 | 16  | 0.03  | 18   | 0.07  | 20  | 0.113 |
| 24         | n.m.  | 22   | 0.11 | 21  | 0.15  | 23   | 0.27  | 25  | 0.404 |
| 29         | 2.65* | 27   | 1.81 | 26  | 0.65  | 28   | 0.18  | 30  | 0.561 |
| 34         | 0.15* | 32   | 2.70 | 31  | 0.11  | 33   | 0.24  | 35  | n.m.  |
| 39         | 0.36* | 37   | 0.10 | 36  | 0.03  | 38   | 0.07  | 40  | 0.062 |
| 44         | 0.24* | 42   | 0.58 | 41  | 0.09  | 43   | 0.18  | 45  | 0.177 |
| 49         | 0.18* | 47   | 0.08 | 46  | 2.11  | 48   | 0.44  | 50  | 0.007 |
| 54         | 0.11  | 52   | 0.12 | 51  | 0.15  | 53   | 0.10  | 55  | 4.06  |
| 59         | 0.54* | 57   | 1.47 | 56  | 4.81* | 58   | 0.07  | 60  | 0.087 |
| 64         | 0.19  | 62   | 0.10 | 61  | 0.07  | 63   | 0.05  | 65  | 0.325 |
| 69         | 0.12* | 67   | 0.06 | 66  | 0.13  | 68   | 0.25  | 70  | 0.101 |
| 74         | n.m.  | 72   | 1.51 | 71  | 0.11  | 73   | 0.24  | 75  | 0.185 |
|            |       |      |      |     |       |      |       |     |       |
| kTgm       | 0.22  |      | 0.25 |     | 0.17  |      | 0.12  |     | 0.13  |
| sLOG       | 0.42  |      | 0.58 |     | 0.61  |      | 0.32  |     | 0.68  |

n.m.: nicht messbar

\*: Riss durch Aufsprühen von Alkohol gesehen

kTgm: geometrischer Mittelwert der Luftpermeabilitätsmesswerte [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]

sLOG: Standardabweichung der negativen dekadischen Logarithmen der Luftpermeabilitätsmesswerte

**Anwendung des in Kapitel 2 vorgeschlagenen Konformitätsnachweisverfahrens**

Der Beton wurde als XD3(CH), XF3(CH) ausgeschrieben. Gemäss SN EN 206-1 bedeutet XF3(CH) keine und XD3(CH) eine Anwesenheit von Tausalzen; d.h. diese Kombination ist nach SN EN 206-1 nicht möglich. Für XF3(CH) wird in Tabelle 1 kein Luftpermeabilitätsgrenzwert und für XD3(CH) einer von  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  vorgeschlagen.

Es sind drei Fälle zu unterscheiden:

- I. Nach Bedingung 1 darf maximal 1 von 6 Luftpermeabilitätsmesswerten den Luftpermeabilitätsgrenzwert überschreiten.
- II. Sind genau 2 Luftpermeabilitätsmesswerte höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert, dürfen erneut 6 Luftpermeabilitätsmessungen durchgeführt werden. Von den 6 neuen Messwerten darf nur 1 höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert sein. D.h. von 12 Luftpermeabilitätsmesswerten dürfen maximal 3 über dem Luftpermeabilitätsgrenzwert liegen.
- III. Sind mehr als 2 Luftpermeabilitätsmesswerte höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert, erfüllt das untersuchte Bauteil nicht die Anforderungen an die Luftpermeabilität.

Gemäss Tabelle C-5 wurde von den Teams eine unterschiedliche Anzahl an Luftpermeabilitätsmessungen durchgeführt. D.h. die o.g. Bedingungen sind auf die entsprechende Anzahl an Luftpermeabilitätsmessungen umzurechnen (Tabelle C-10). Sind 2 von 6 Messwerten höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert hätten 6 neue Messungen vorgenommen werden können; wurden keine weiteren Messungen vorgenommen, gilt die Anforderung als nicht erfüllt, da der Nachweis nicht erbracht wurde, dass maximal 1 der 6 neuen Messwerte oberhalb des Luftpermeabilitätsgrenzwerts liegt.

Für Etappe XI zeigt sich, dass die Anforderung von  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von allen Teams erreicht wurde; d.h. der Beton in diesem Bauteil erfüllt die Anforderungen für XD3(CH).

Für Etappe D-E zeigt sich, dass die Anforderung von

- $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 4 Teams erreicht und von 1 Team nicht erreicht wurde.
- $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von allen Teams erreicht wurde;

Insgesamt deuten die Luftpermeabilitätsergebnisse darauf hin, dass beide Bauteile die Anforderungen an die Expositionsklasse XD3(CH) mit  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  erfüllen.

*Tabelle C- 6: Auswertung der Luftpermeabilitätsmesswerte des Tagbautunnels*

| Labor                                         | SUPSI    | EMPA     | RT       | EPFL     | TFB      |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Etappe XI</b>                              |          |          |          |          |          |
| Anzahl $> 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 2 von 15 | 2 von 15 | 1 von 14 | 2 von 12 | 0 von 15 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | ja       | ja       | ja       | ja       |
| Anzahl $> 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 0 von 15 | 0 von 15 | 0 von 14 | 0 von 12 | 0 von 15 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | ja       | ja       | ja       | ja       |
| <b>Etappe D-E</b>                             |          |          |          |          |          |
| Anzahl $> 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 2 von 13 | 5 von 15 | 3 von 15 | 0 von 15 | 2 von 15 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | nein     | ja       | ja       | ja       |
| Anzahl $> 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 1 von 13 | 0 von 15 | 2 von 15 | 0 von 15 | 1 von 15 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | ja       | ja       | ja       | ja       |

## C-2. Luftpermeabilitätsmessungen Tagbautunnel

Beim Tagbautunnel wurden pro Woche im Schnitt 1 bis 1.5 Wandabschnitte betoniert (**Abbildung C- 8**). Jede Etappe war etwa 12 m lang und mehr als 4 m hoch. An drei Wandetappen wurden von drei Teams und vier Messgeräten Luftpermeabilitätsmessungen auf den gleichen Flächen aber an verschiedenen Messstellen durchgeführt. Zu einem zweiten Zeitpunkt, etwa einen Monat später, wurden von zwei Teams mit zwei verschiedenen Luftpermeabilitätsmessgeräten (PT, TPT) erneut Messungen an den drei Wandetappen, diesmal jedoch an jeweils den gleichen Stellen durchgeführt. Um die Qualität der Betonbauteile möglichst genau zu kennen, wurden Daten von der Frischbetonkontrolle und Festbetonprüfung ausgewertet. In **Tabelle C- 7** sind die Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen der drei untersuchten Betonierabschnitte vom Tagbautunnel angegeben. Es wurde ein Beton C30/37, XD3(CH), XF1(CH), CI0.1, CT 1.10 verwendet.

Im Alter von etwa 3 Monaten wurden aus den drei Etappen Bohrkern ( $\varnothing = 50 \text{ mm}$ ) aus 0 – 5 cm Tiefe gezogen und daran die Wasserleitfähigkeit und der Chloridwiderstand, jeweils nach SIA 262/1, bestimmt. Es zeigten sich zwischen den Etappen kaum Unterschiede. Die mittleren Wasserleitfähigkeiten lagen bei 4 – 5  $\text{g/m}^2 \text{ h}$  und die mittleren Chloridwiderstände bei 14 – 16  $\cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

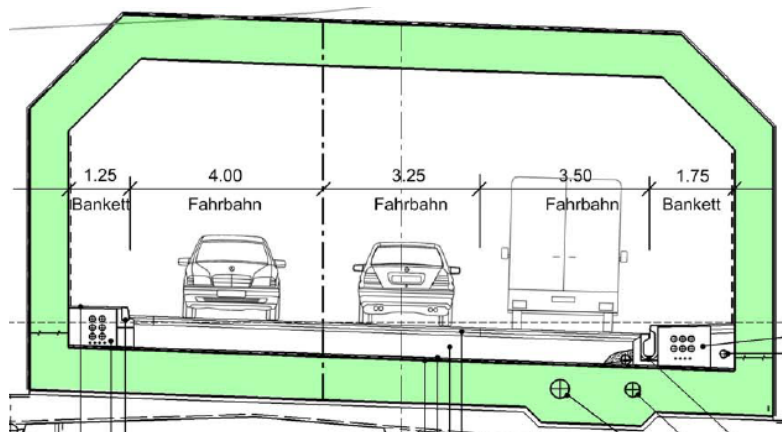


Abbildung C- 8: Profil des Tagbautunnels

Tabelle C- 7: Ergebnisse von Frisch- und Festbetonprüfungen

| Bauteil, Datum                       | Prüfergebnisse Frischbeton |       |                                |                     |         | Festbeton                      |                              |
|--------------------------------------|----------------------------|-------|--------------------------------|---------------------|---------|--------------------------------|------------------------------|
|                                      | Temperatur [°C]            |       | Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ] | Luftgehalt [Vol.-%] | w/z [-] | Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ] | 28 T-Druckfestigkeiten [MPa] |
|                                      | Luft                       | Beton |                                |                     |         |                                |                              |
| Etappe 41E<br>betoniert am 27.3.2009 | 13.4                       | 15.1  | 2380                           | 1.6                 | 0.47    | 2380                           | 47.3                         |
| Etappe 42E<br>betoniert am 3.4.2009  | 12.0                       | 16.4  | 2370                           | 2.6                 | 0.45    |                                |                              |
| Etappe 42W<br>betoniert am 30.3.2009 | 10.6                       | 14.8  | 2400                           | 1.2                 | 0.49    |                                |                              |
|                                      | 11.0                       | 15.2  | 2440                           | 1.6                 | 0.42    |                                |                              |

Alle Luftpermeabilitätsmessungen wurden so durchgeführt, dass von den Bauteilfugen und der Arbeitsfuge zur Bodenplatte ein Mindestabstand von 0.5 m eingehalten wurde. Da unter Verkehr Spritzwasser vor allem im unteren Teil der Betonieretappen zu erwarten ist, wurde bis in eine Höhe von maximal ca. 2.5 m ab Arbeitsfuge zur Bodenplatte die Luftpermeabilität bestimmt.

Am 19.5.2009 wurde mit vier Messgeräten (3 TPT, 1 PT) die Luftpermeabilität bestimmt. Innerhalb der drei Untersuchungsflächen konnte jedes Team seine sechs Messstellen frei wählen.

Wenn sich grössere Schwankungen in den Luftpermeabilitätsergebnissen zeigten, konnte jedes Teams weitere Messungen durchführen. Alle Messstellen wurden markiert, damit nicht an der gleichen Messstelle mehrere Messungen erfolgten. Am 20.6.2009 wurden erneut von zwei Teams mit zwei verschiedenen Messgeräten (TPT, PT) Luftpermeabilitätsmessungen an jeweils mindestens 5 Stellen pro Untersuchungsfläche durchgeführt. Die Luftpermeabilitätsmessungen erfolgten diesmal an exakt den gleichen Messstellen in einem zeitlichen Abstand von ca. 1 Stunde. **Tabelle C- 8** enthält Angaben zu den Umgebungsbedingungen bei den Luftpermeabilitätsmessungen.

*Tabelle C- 8: Umgebungsbedingungen während der Luftpermeabilitätsmessungen*

|                                 | Etappe 41E<br>betoniert am 27.3.2009 |             | Etappe 42E<br>betoniert am 3.4.2009 |             | Etappe 41W<br>betoniert am 30.3.2009 |             |
|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|
| Betonalter                      | 53                                   | 85          | 46                                  | 78          | 50                                   | 82          |
| Lufttemperatur [°C]             | 14.3 – 18.1                          | 17.5 - 17.9 | 17.1 – 17.9                         | 17.5 - 17.9 | 16.2                                 | 17.5 - 17.9 |
| Betontemperatur [°C]            | 15.0 – 15.3                          | -           | 14.1 – 16.4                         | -           | 15.0 – 17.6                          | -           |
| Relative Luftfeuchtigkeit [%]   | 49                                   | -           | 50                                  | -           | 64                                   | -           |
| Betonfeuchte [M.-%]             | 4.4 – 5.0                            | 3.8 – 4.2   | 4.2 – 4.8                           | 4.0 – 4.7   | 4.0 – 4.7                            | 3.7 – 4.0   |
| Spez. elektr. Widerstand [kΩcm] | < 10                                 | -           | < 15                                | -           | < 10                                 | -           |

**Abbildung C- 9** und **Tabelle C- 10** enthalten die bei beiden Messtagen ermittelten Luftpermeabilitäten sowie die geometrischen Mittelwerte pro Team und Etappe. In **Tabelle C- 9** sind die Einzelergebnisse der Luftpermeabilitätsmessungen tabellarisch zusammengestellt und die nach ISO 5725 ermittelte Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung angegeben. Bei den Luftpermeabilitätsergebnissen sowie den Standardabweichungen zeigen sich grössere Streuungen im Vergleich zur untersuchten Brücke (siehe vorne). Auch die Ergebnisse der Frischbetonkontrollen weisen auf grössere Schwankungen in der Betonqualität hin.

*Tabelle C- 9: Geometrische Mittelwerte  $kTgm$  ( $10^{-16} m^2$ ) und Standardabweichungen  $sLOG$  [-] der Luftpermeabilitätsmessungen sowie weitere statistische Kenngrössen gemäss ISO 5725*

|              | SUPSI        | RT   | RT   | TFB  |  | TFB          | RT   | Alle Messungen | Wiederholstandardabweichung | Vergleichsstandardabweichung |
|--------------|--------------|------|------|------|--|--------------|------|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Alter        | 46 – 53 Tage |      |      |      |  | 78 – 85 Tage |      |                |                             |                              |
| Messgerät    | TPT          | TPT  | PT   | TPT  |  | TPT          | PT   |                |                             |                              |
| Etappe 41E   |              |      |      |      |  |              |      |                |                             |                              |
| kTgm         | 0.25         | 1.0  | 0.10 | 0.20 |  | 0.20         | 0.08 | 0.19           |                             |                              |
| sLOG         | 0.41         | 1.36 | 0.56 | 0.68 |  | 0.57         | 0.73 | 0.74           | 0.48                        | 0.51                         |
| Etappe 42E   |              |      |      |      |  |              |      |                |                             |                              |
| kTgm         | 0.08         | 0.11 | 0.02 | 0.07 |  | 0.47         | 0.20 | 0.10           |                             |                              |
| sLOG         | 0.19         | 0.52 | 0.17 | 0.09 |  | 1.08         | 1.23 | 0.71           | 0.37                        | 0.44                         |
| Etappe 41W   |              |      |      |      |  |              |      |                |                             |                              |
| kTgm         | 0.36         | 0.14 | 0.53 | 0.14 |  | 0.90         | 0.85 | 0.32           |                             |                              |
| sLOG         | 0.64         | 0.31 | 1.17 | 0.88 |  | 0.72         | 0.85 | 0.84           | 0.79                        | 0.79                         |
| Alle Etappen |              |      |      |      |  |              |      |                |                             |                              |
| kTgm         |              |      |      |      |  |              |      | 0.19           |                             |                              |
| sLOG         |              |      |      |      |  |              |      | 0.79           | 0.55                        | 0.58                         |

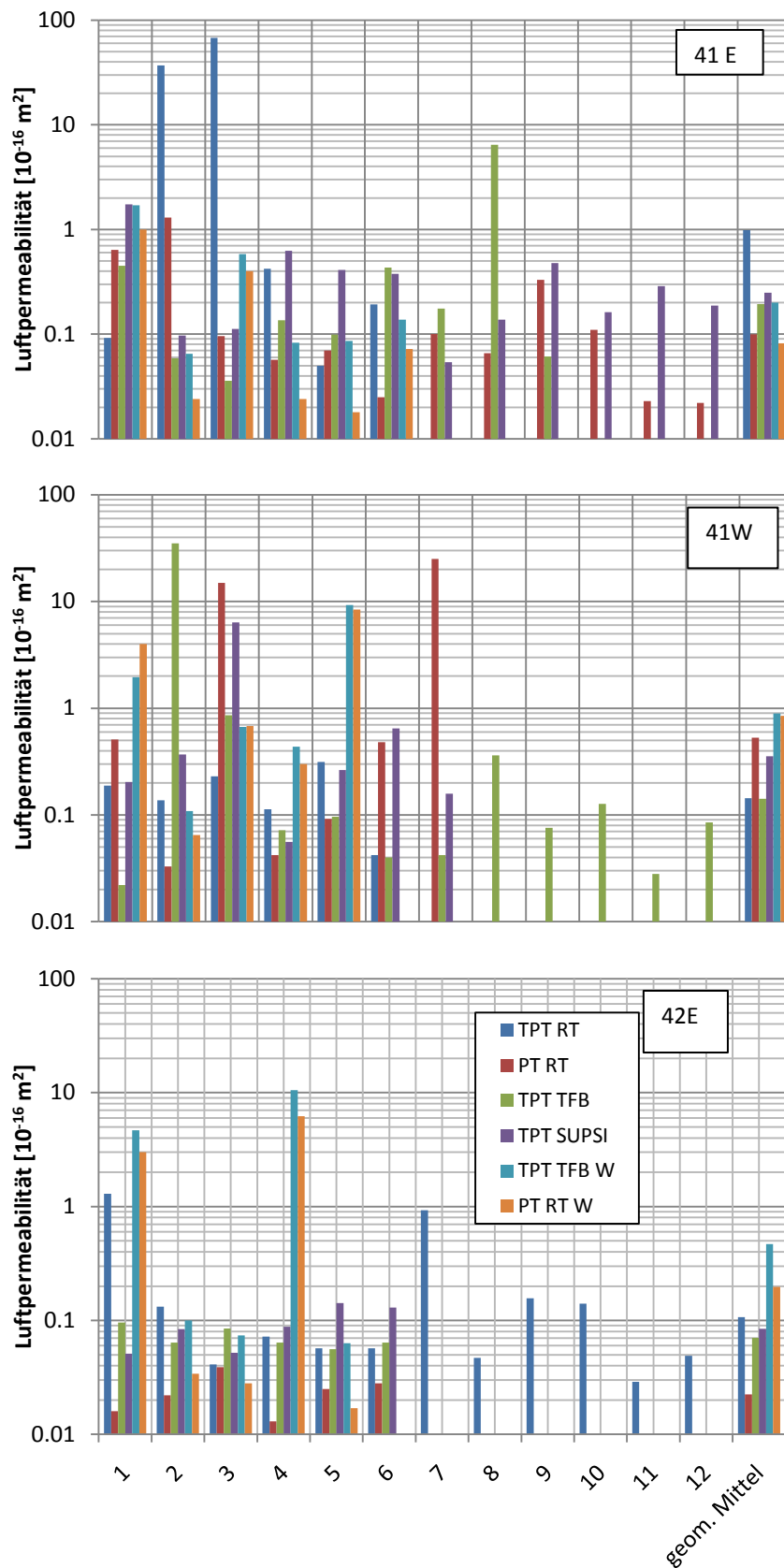


Abbildung C- 9: An drei Etappen gemessene Luftpermeabilitäten; TPT: Messgerät von proceq; PT: Messgerät von Materials Advanced Science; W: Durchführung von Messungen in einem Betonalter von 78 bis 85 Tagen; ansonsten Messungen nach 46 – 53 Tagen

Tabelle C- 10: Luftpermeabilitätsmesswerte  $kT$  ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) der drei Etappen; W: Durchführung von Messungen in einem Betonalter von 78 bis 85 Tagen; ansonsten Messungen nach 46 – 53 Tagen

| Labor              | TPT RT | PT RT | TPT TFB | TPT SUPSI | TPT TFB W | PT RT W |
|--------------------|--------|-------|---------|-----------|-----------|---------|
| <b>Etappe 41 E</b> |        |       |         |           |           |         |
| Messwerte          | 0.09   | 0.64  | 0.45    | 1.74      | 1.70      | 1.00    |
|                    | 36.87  | 1.30  | 0.06    | 0.10      | 0.07      | 0.02    |
|                    | 67.60  | 0.10  | 0.04    | 0.112     | 0.58      | 0.4     |
|                    | 0.42   | 0.06  | 0.136   | 0.63      | 0.08      | 0.02    |
|                    | 0.05   | 0.07  | 0.10    | 0.41      | 0.09      | 0.02    |
|                    | 0.19   | 0.03  | 0.43    | 0.38      | 0.14      | 0.07    |
|                    |        | 0.10  | 0.18    | 0.05      |           |         |
|                    |        | 0.07  | 6.44    | 0.14      |           |         |
|                    |        | 0.33  | 0.06    | 0.48      |           |         |
|                    |        | 0.11  |         | 0.16      |           |         |
|                    |        | 0.03  |         | 0.29      |           |         |
|                    |        | 0.02  |         | 0.19      |           |         |
| kTgm               | 0.99   | 0.10  | 0.19    | 0.25      | 0.20      | 0.08    |
| sLOG               | 29     | 0.38  | 2.09    | 0.46      | 0.65      | 0.39    |
| <b>Etappe 42 E</b> |        |       |         |           |           |         |
| Messwerte          | 1.29   | 0.02  | 0.10    | 0.05      | 4.67      | 3.00    |
|                    | 0.13   | 0.02  | 0.06    | 0.08      | 0.10      | 0.03    |
|                    | 0.04   | 0.04  | 0.09    | 0.05      | 0.07      | 0.03    |
|                    | 0.07   | 0.01  | 0.06    | 0.09      | 10.50     | 6.20    |
|                    | 0.06   | 0.03  | 0.06    | 0.14      | 0.06      | 0.02    |
|                    | 0.06   | 0.03  | 0.06    | 0.13      |           |         |
|                    | 0.93   |       |         |           |           |         |
|                    | 0.05   |       |         |           |           |         |
|                    | 0.16   |       |         |           |           |         |
|                    | 0.14   |       |         |           |           |         |
|                    | 0.03   |       |         |           |           |         |
|                    | 0.049  |       |         |           |           |         |
| kTgm               | 0.11   | 0.02  | 0.07    | 0.08      | 0.47      | 0.20    |
| sLOG               | 0.41   | 0.01  | 0.02    | 0.04      | 4.59      | 2.75    |
| <b>Etappe 41 W</b> |        |       |         |           |           |         |
| Messwerte          | 0.19   | 0.51  | 0.02    | 0.20      | 1.96      | 4.00    |
|                    | 0.14   | 0.03  | 35.01   | 0.37      | 0.11      | 0.07    |
|                    | 0.23   | 15.00 | 0.86    | 6.37      | 0.67      | 0.68    |
|                    | 0.11   | 0.04  | 0.07    | 0.06      | 0.44      | 0.30    |
|                    | 0.31   | 0.09  | 0.10    | 0.26      | 9.24      | 8.40    |
|                    | 0.04   | 0.48  | 0.04    | 0.65      |           |         |
|                    |        | 25    | 0.04    | 0.16      |           |         |
|                    |        |       | 0.36    |           |           |         |
|                    |        |       | 0.08    |           |           |         |
|                    |        |       | 0.13    |           |           |         |
|                    |        |       | 0.03    |           |           |         |
|                    |        |       | 0.09    |           |           |         |
| kTgm               | 0.14   | 0.53  | 0.14    | 0.36      | 0.90      | 0.85    |
| sLOG               | 0.10   | 10    | 10      | 2.31      | 3.84      | 3.57    |

**Anwendung des in Kapitel 2 vorgeschlagenen Konformitätsnachweisverfahrens**

Der Beton wurde als XD3(CH), XF1(CH) ausgeschrieben. Gemäss SN EN 206-1 bedeutet XF1(CH) keine und XD3(CH) eine Anwesenheit von Tausalzen; d.h. diese Kombination ist nach SN EN 206-1 nicht möglich. Für XF1(CH) wird in Tabelle 1 ein Luftpermeabilitätsgrenzwert von  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und für XD3(CH) einer von  $0.50 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  vorgeschlagen.

Es sind drei Fälle zu unterscheiden:

- I. Nach Bedingung 1 darf maximal 1 von 6 Luftpermeabilitätsmesswerten den Luftpermeabilitätsgrenzwert überschreiten.
- II. Sind genau 2 Luftpermeabilitätsmesswerte höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert, dürfen erneut 6 Luftpermeabilitätsmessungen durchgeführt werden. Von den 6 neuen Messwerten darf nur 1 höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert sein. D.h. von 12 Luftpermeabilitätsmesswerten dürfen maximal 3 über dem Luftpermeabilitätsgrenzwert liegen.
- III. Sind mehr als 2 Luftpermeabilitätsmesswerte höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert, erfüllt das untersuchte Bauteil nicht die Anforderungen an die Luftpermeabilität.

Gemäss Tabelle C-9 wurde von den Teams eine unterschiedliche Anzahl an Luftpermeabilitätsmessungen durchgeführt. D.h. die o.g. Bedingungen sind auf die entsprechende Anzahl an Luftpermeabilitätsmessungen umzurechnen (Tabelle C-10). Sind 2 von 6 Messwerten höher als der Luftpermeabilitätsgrenzwert hätten 6 neue Messungen vorgenommen werden können; wurden keine weiteren Messungen vorgenommen, gilt die Anforderung als nicht erfüllt, da der Nachweis nicht erbracht wurde, dass maximal 1 der 6 neuen Messwerte oberhalb des Luftpermeabilitätsgrenzwerts liegt.

Für Etappe 41 E zeigt sich, dass die Anforderung von

- $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 4 Teams erreicht und von 2 Teams nicht erreicht wurde; die 2 Teams hätten weitere 6 Messungen durchführen können, d.h. es besteht die Chance, dass auch diese 2 Teams die Anforderungen erreicht hätten.
- $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 5 Teams erreicht und von 1 Team nicht erreicht wurde; das 1 Team hätten weitere 6 Messungen durchführen können, d.h. es besteht die Chance, dass auch dieses Team die Anforderungen erreicht hätten.

Für Etappe 42 E zeigt sich, dass die Anforderung von

- $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 4 Teams erreicht und von 2 Teams nicht erreicht wurde.
- $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 4 Teams erreicht und von 2 Teams nicht erreicht wurde;

Für Etappe 41 W zeigt sich, dass die Anforderung von

- $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 2 Teams erreicht und von 4 Teams nicht erreicht wurde; 2 Teams hätten weitere 6 Messungen durchführen können.
- $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  von 4 Teams erreicht und von 2 Teams nicht erreicht wurde; die 2 Teams hätten weitere 6 Messungen durchführen können, d.h. es besteht die Chance, dass auch diese Teams die Anforderungen erreicht hätten.

Insgesamt deuten die Luftpermeabilitätsergebnisse darauf hin, dass kein Bauteil die Anforderungen weder an die Expositionsklasse XD3(CH) mit  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  noch an XF1(CH) mit  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  klar erfüllt. Da sich kaum ein Unterschied in der Beurteilung für XD3(CH) und XF1(CH) zeigt, deutet auf nicht sehr wenige hohe Luftpermeabilitätsmesswerte hin.

Tabelle C- 11: Auswertung der Luftpermeabilitätsmesswerte des Tagbautunnels

| Labor                                         | TPT RT   | PT RT    | TPT TFB  | TPT SUPSI | TPT TFB W | PT RT W |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|---------|
| <b>Etappe 41 E</b>                            |          |          |          |           |           |         |
| Anzahl $> 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 2 von 6  | 2 von 12 | 1 von 9  | 2 von 12  | 2 von 6   | 1 von 6 |
| Anforderung erfüllt                           | nein     | ja       | ja       | ja        | nein      | ja      |
| Anzahl $> 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 2 von 6  | 0 von 12 | 1 von 9  | 0 von 12  | 0 von 6   | 0 von 6 |
| Anforderung erfüllt                           | nein     | ja       | ja       | ja        | ja        | ja      |
| <b>Etappe 42 E</b>                            |          |          |          |           |           |         |
| Anzahl $> 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 2 von 12 | 0 von 6  | 0 von 6  | 0 von 6   | 2 von 5   | 2 von 5 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | ja       | ja       | ja        | nein      | nein    |
| Anzahl $> 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 0 von 12 | 0 von 6  | 0 von 6  | 0 von 6   | 2 von 5   | 2 von 5 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | ja       | ja       | ja        | nein      | nein    |
| <b>Etappe 41 W</b>                            |          |          |          |           |           |         |
| Anzahl $> 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 0 von 6  | 2 von 7  | 2 von 12 | 2 von 7   | 3 von 6   | 3 von 6 |
| Anforderung erfüllt                           | ja       | nein     | ja       | nein      | nein      | nein    |
| Anzahl $> 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ [-] | 0 von 6  | 2 von 7  | 1 von 12 | 1 von 7   | 1 von 6   | 2 von 6 |
| Anforderung erfüllt                           | Ja       | nein     | Ja       | ja        | Ja        | nein    |



## Anhang D: Überlegungen zum Konformitätsnachweis

Nachfolgend werden zuerst in Kapitel D-1 frühere Vorschläge zum Konformitätsnachweis allgemein vorgestellt und erläutert. Anschliessend werden in Kapitel D-2 Hintergründe zum vorgeschlagenen Konformitätsnachweis dargelegt und abschliessend werden in Kapitel D-3 die Grenzwerte kurz erläutert.

### D-1. Frühere Vorschläge zum Konformitätsnachweis

Verschiedene Forscher zeigten, dass die Luftpermeabilitätsmesswerte  $kT_i$  einer log-normal Verteilung folgen (Torrent, 2001; Brühwiler et al. 2005, Conciatori 2005, Denarie et al., 2005, Quoc et al. 2006, Misak et al. 2008) (**Abbildung D- 1**). Jacobs & Hunkeler (2006) fanden manchmal eine multimodale log-normale Verteilung. Deshalb basierten die Konformitätsnachweise auf den logarithmierten Messwerten und nicht den Messwerten selber. Zu untersuchende Flächen wurden mit dem geometrischen Mittelwert charakterisiert, wodurch sich wenige Extremwerte kaum auf den Mittelwert auswirkten.

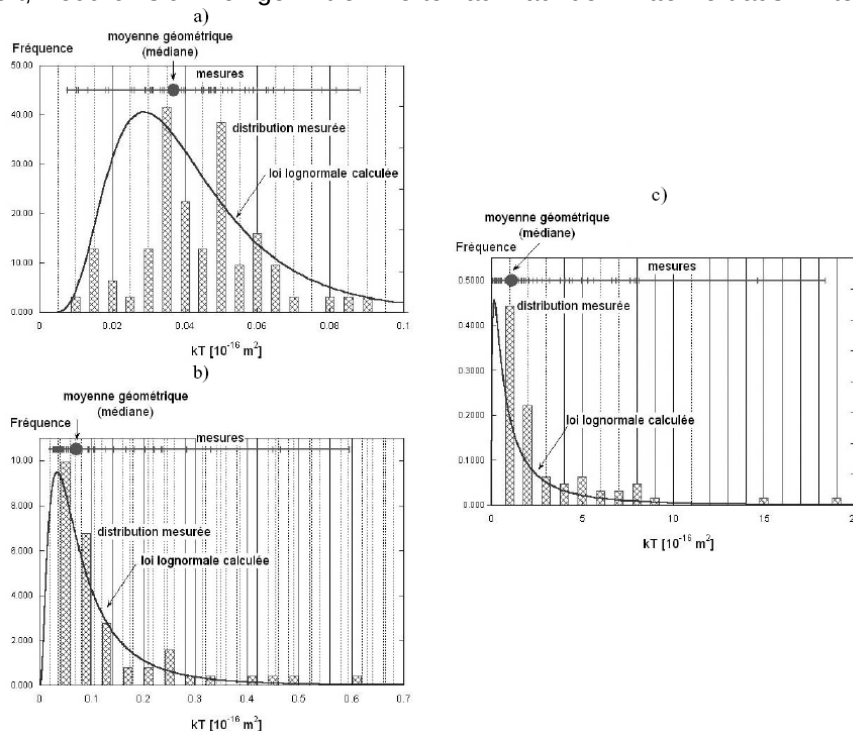


Abbildung D- 1: Verteilung von Luftpermeabilitätsmesswerten an drei Bauteilen mit  $w/z$ -Werten von a) 0.42, b) 0.52 und c) 0.73, Conciatori (2005)

Zwei Ansätze zum Konformitätsnachweis wurden näher betrachtet:

- Anforderung an den geometrischen Mittelwert (Torrent & Frenzer 1995)
  - Hier musste der geometrische Mittelwert einer Untersuchungsfläche gleich gross oder niedriger als die geforderte Luftpermeabilität  $kT_s$  sein.
- Anforderung an einen charakteristischen Wert (Brühwiler et al. 2005, Denarie et al. 2005, Jacobs 2006):

$$\log_{10}(kT_{gm}) + \lambda(p, N) \cdot sLOG \leq \log_{10}(kT_s)$$

mit:

$kT_{gm}$ : Geometrischer Mittelwert von  $N$  Luftpermeabilitätsmessungen  $kT_i [10^{-16} m^2]$

$\lambda(p, N)$ : Faktor zur Berücksichtigung einer Anzahl an "Fehlstellen"  $p$  ( $kT_i > kT_s$ ) und der Anzahl  $kT_i$ ; Jacobs (2006) schlug  $\lambda = 1$  vor.

$sLOG$ : Standardabweichung der logarithmierten  $kT_i$  [-]

$kT_s$ : Grenzwert  $kT_s [10^{-16} m^2]$

In Jacobs (2006) wurden bei 52 untersuchten Bauteilen (Alter zumeist  $< 1$  Jahr) Standardabweichungen  $sLOG$  zwischen 0.09 und 1.13 und im Mittel von 0.43 ermittelt (**Abbildung D- 2**).

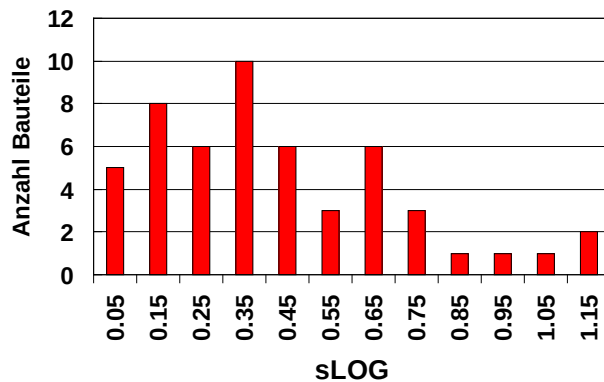


Abbildung D- 2: Standardabweichung sLOG von 52 Bauteilen, Daten aus Jacobs (2006)

Der Ansatz mit der Anforderung an den geometrischen Mittelwert hat den Nachteil, dass keine Anforderungen an die Streuung der Luftpermeabilitätsmesswerte gestellt werden. Dies führt dazu, dass akzeptiert wird, wenn etwa 50 % der Messwerte höher als der geforderte geometrische Mittelwert sind. Somit wird die Bauteilqualität nur ungenügend beurteilt.

Der Konformitätsnachweis auf Basis eines charakteristischen Wertes wird in der EN 206-1 für den Druckfestigkeitsnachweis und von Alexander et al. (2008) für verschiedene Dauerhaftigkeitseigenschaften verwendet. Die Anforderung an den charakteristischen Wert ist theoretisch ideal, da vorgängig klar definiert ist, wie viele Fehlstellen (zu hohe Luftpermeabilitätsmesswerte) akzeptiert werden. Als Nachteile sind zu sehen:

- Die Festlegung des Faktors  $\lambda$  ist nicht einfach
- Das Verständnis zu dem Vorgehen wird in der Praxis auf Schwierigkeiten stossen, da die Berechnung des geometrischen Mittelwertes und der Standardabweichung, beruhend auf den logarithmierten Messwerten, erfolgt.

## D-2. Überlegungen zum vorgeschlagenen Konformitätsnachweis

Bei dem vorgeschlagenen Konformitätsnachweis handelt es sich um eine Doppel-Stichprobenprüfung. Dabei werden der Stichprobenumfang der ersten und gegebenenfalls der zweiten Stichprobe, die Annahmezahl für die erste Stichprobe und die kumulative Annahmezahl definiert. In **Abbildung D- 3** ist eine Normalverteilung dargestellt und der geometrische Mittelwert  $kT_{gm}$  sowie der Grenzwert  $kT_s$  angegeben. Der Anteil an „Fehlstellen“, d.h. Messstellen mit  $kT_i > kT_s$ , ist durch  $p_D$  angegeben, die Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $kT_s$ .

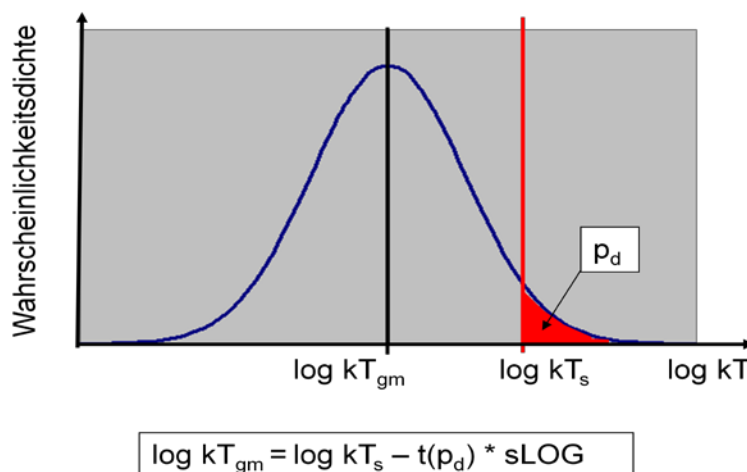


Abbildung D- 3: Normalverteilung von logarithmierten  $kT$  mit einem Anteil  $p_D$  an „Fehlstellen“ ( $kT_i > kT_s$ )

Um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der eine Untersuchungsfläche akzeptiert wird, wird eine binomiale Verteilung der Messwerte zugrunde gelegt. Bei einer binomialen Verteilung ist die Wahrscheinlichkeit  $P(k)$ , dass bei 6 Messwerten (Stichprobenumfang)  $k$  Messwerte von  $k_{Ti}$  grösser als  $k_{Ts}$  sind, mit  $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$  gegeben durch:

$$P(k) = \binom{6}{k} p_d^k (1 - p_d)^{6-k}$$

In **Abbildung D- 4** ist die binomiale Verteilung für verschiedene Anteile an „Fehlstellen“ ( $p_D = 5, 16, 50$  und  $80\%$ ) dargestellt. Erwartungsgemäss ist die Wahrscheinlichkeit zwei oder mehr Messwerte mit  $k_{Ti} > k_{Ts}$  zu erhalten, umso grösser desto höher  $p_D$  ist. Für den Konformitätsnachweis wurde vorgeschlagen, dass in der ersten Stichprobe maximal 1 Messwert (von 6 Messwerten) grösser als  $k_{Ts}$  sein darf. Die Wahrscheinlichkeit dafür beträgt  $P_1 = P(0) + P(1)$ . In **Abbildung D- 4** wird dieser Wert ( $P_1$ ) durch die schwarz umrandeten weissen Flächen dargestellt; zusätzlich sind die Werte angegeben. Danach nimmt die Wahrscheinlichkeit von  $96.7\%$  für  $p_D = 5\%$  auf  $0.2$  für  $p_D = 80\%$  ab, dass nicht mehr als 1 von 6 Messwerten höher als  $k_{Ts}$  ist.

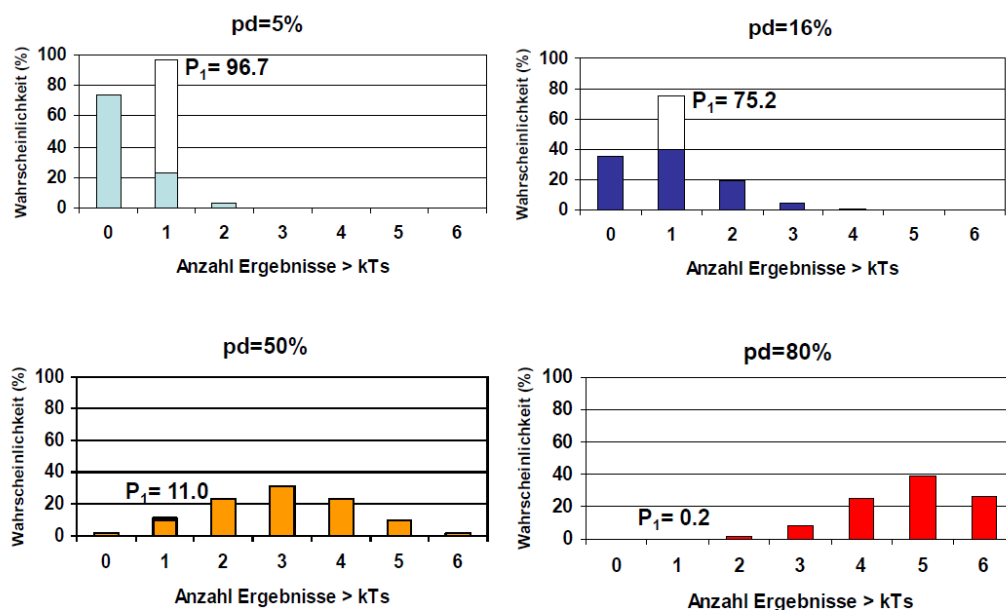


Abbildung D- 4: Binomiale Verteilung für 6 Messwerte mit unterschiedlichem Anteil „Fehlstellen“  $p_D$

Die 2. Bedingung für den Konformitätsnachweis lautet: Wenn mehr als einer und nicht mehr als 2 Messwerte  $k_{Ti}$  höher als  $k_{Ts}$  sind, dürfen 6 weitere Messungen vorgenommen werden und maximal 1 Messwert der 6 neuen darf höher als  $k_{Ts}$  sein. Wird die binomiale Verteilung wieder herangezogen, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass Bedingung 2 erfüllt wird zu

$$P_2 = P(2) \times [P(0) + P(1)]$$

Somit beträgt die Wahrscheinlichkeit eine Untersuchungsfläche als konform zu beurteilen:

$$P_a = P_1 + P_2 = [P(0) + P(1)] + P(2) \times [P(0) + P(1)]$$

In **Abbildung D- 5** sind  $P_1$  sowie  $P_a$  dargestellt. Die gestrichelte Linie zeigt die Wahrscheinlichkeit eine Untersuchungsfläche bei der ersten Stichprobe zu akzeptieren. Die rote, durchgezogene Linie zeigt die Annahmewahrscheinlichkeit bei einer zweiten Stichprobe. Wird eine Wahrscheinlichkeit von z.B.  $95\%$  für die Bedingung 2 gefordert, dürfen maximal etwa  $10\%$  „Fehlstellen“ vorhanden sein.

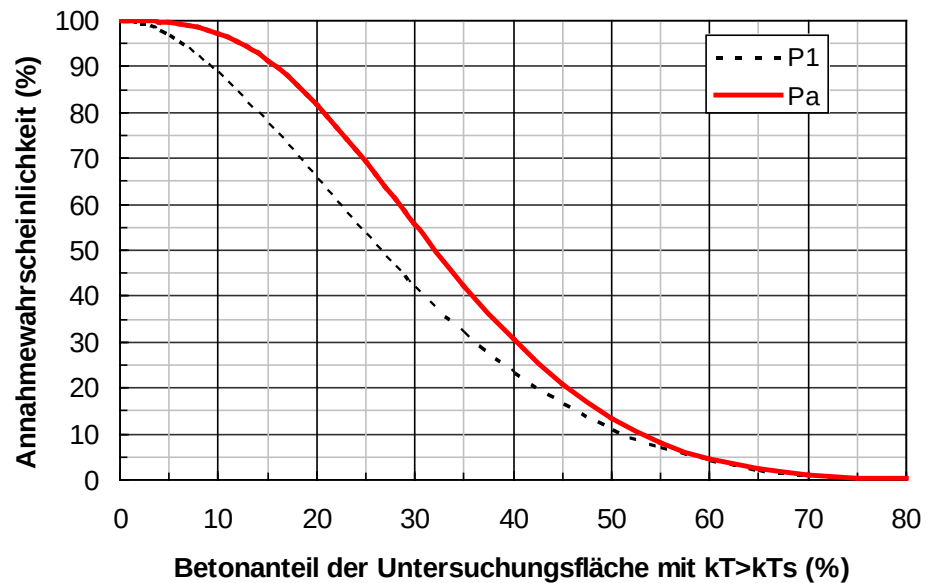


Abbildung D- 5: Wahrscheinlichkeitskurven der Annahmewahrscheinlichkeiten für das vorgeschlagene Konformitätskriterium

In **Abbildung D- 6** ist die Annahmewahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis  $kT_{gm}$  zu  $kT_s$  für verschiedene Standardabweichungen  $sLOG$  aufgetragen. Ist  $kT_{gm}$  halb so gross wie  $kT_s$ , beträgt die Annahmewahrscheinlichkeit bei einer Standardabweichung von 1.0 etwa 35 % und bei einer Standardabweichung von 0.4 etwa 75 %. In **Tabelle D- 1** sind die Quotienten aus  $kT_{gm}$  und  $kT_s$  für verschiedene Wahrscheinlichkeiten einer Akzeptanz (80 %, 90 %, 95 %, 99 %) aufgeführt. Der fettgedruckte Wert von 0.34 entspricht einer typischen Standardabweichung von etwa 0.4 (siehe **Abbildung D- 2**). Dies bedeutet, dass mit dieser Standardabweichung und einem Quotienten von 0.34 aus  $kT_{gm}$  und  $kT_s$  die Wahrscheinlichkeit bei 95 % liegt, dass eine Untersuchungsfläche als konform beurteilt wird. In anderen Worten bedeutet dies, dass in 1 von 20 Fällen die Untersuchungsfläche als nicht konform und in 19 Fällen als konform beurteilt wird.

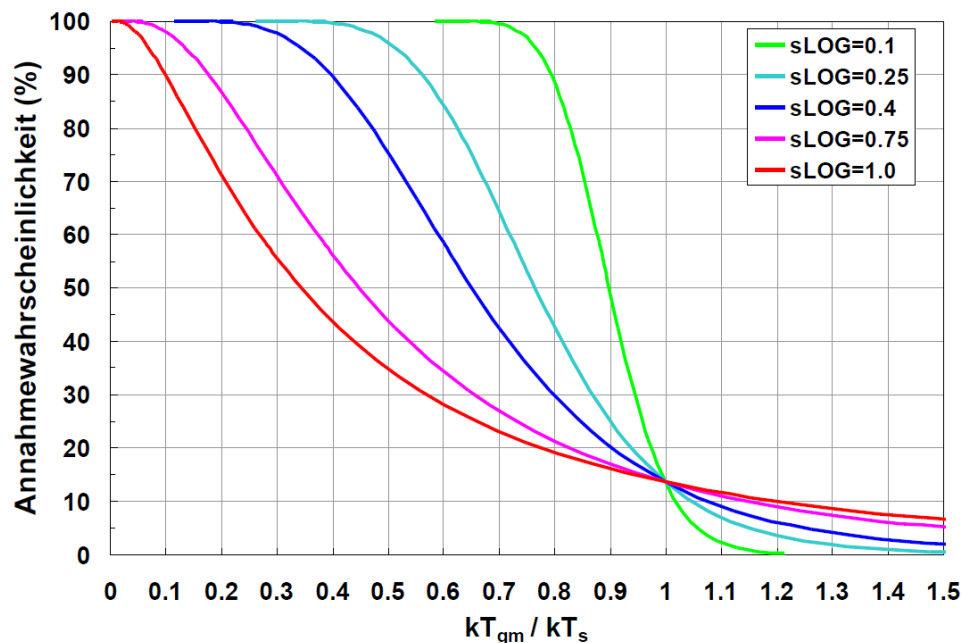


Abbildung D- 6: Annahmewahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Verhältnis  $kT_{gm}/kT_s$  und der Standardabweichung  $sLOG$

*Tabelle D- 1: Quotient aus  $kT_{gm}$  und  $kT_s$  für verschiedene Annahmewahrscheinlichkeiten einer Akzeptanz und unterschiedliche Standardabweichungen*

| Annahmewahrscheinlichkeit (%) | $kT_{gm}/kT_s$ für $sLOG=$ |      |             |       |       |
|-------------------------------|----------------------------|------|-------------|-------|-------|
|                               | 0.10                       | 0.25 | 0.40        | 0.75  | 1.00  |
| 99                            | 0.71                       | 0.43 | 0.26        | 0.081 | 0.035 |
| 95                            | 0.77                       | 0.51 | <b>0.34</b> | 0.13  | 0.069 |
| 90                            | 0.79                       | 0.56 | 0.40        | 0.18  | 0.10  |
| 80                            | 0.83                       | 0.62 | 0.47        | 0.24  | 0.15  |

Die entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung für  $kT_s = 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  ist in **Abbildung D- 7** dargestellt.

Die Anzahl von 6 Messwerten zur Beurteilung einer Untersuchungsfläche wurde gewählt, da sich dies als geeignet bei bisherigen Luftpermeabilitätsmessungen erwies, um verschiedene Betonqualitäten zu unterscheiden (siehe z.B. RILEM-Vergleichsversuch Torrent & Luco) und sich auch bei der Brücke (siehe Abbildung C- 7) eine nicht zu hohe Streuung ergab.

Da ein Messwert über dem Grenzwert  $kT_s$  liegen darf, stellt  $kT_s$  eine charakteristische (statistische) Kenngrösse (nicht Maximum) dar. Wie in **Abbildung D- 7** gezeigt wird, bedeutet eine Annahmewahrscheinlichkeit von 95 %, dass auf der Untersuchungsfläche mit einer Standardabweichung  $sLOG$  von 0.40 nicht mehr als 12 % Fehlstellen ( $kT_i > kT_s$ ) sein dürfen. Dies ist höher als die 5 %, die bei der Druckfestigkeit nach EN 206-1 zulässig sind. Da jedoch eine ungenügende Festigkeit schwerwiegendere Konsequenzen als eine ungenügende Dauerhaftigkeit nach sich zieht, erscheint dies als akzeptabel. Zudem ist anzumerken, dass Stellen mit  $kT_i > kT_s$  nicht zwangsläufig die Dauerhaftigkeit beeinträchtigen, da es sich um feinste Risse oder Entmischungen beim Beton handeln kann, die nicht notwendigerweise die Dauerhaftigkeit signifikant beeinflussen.

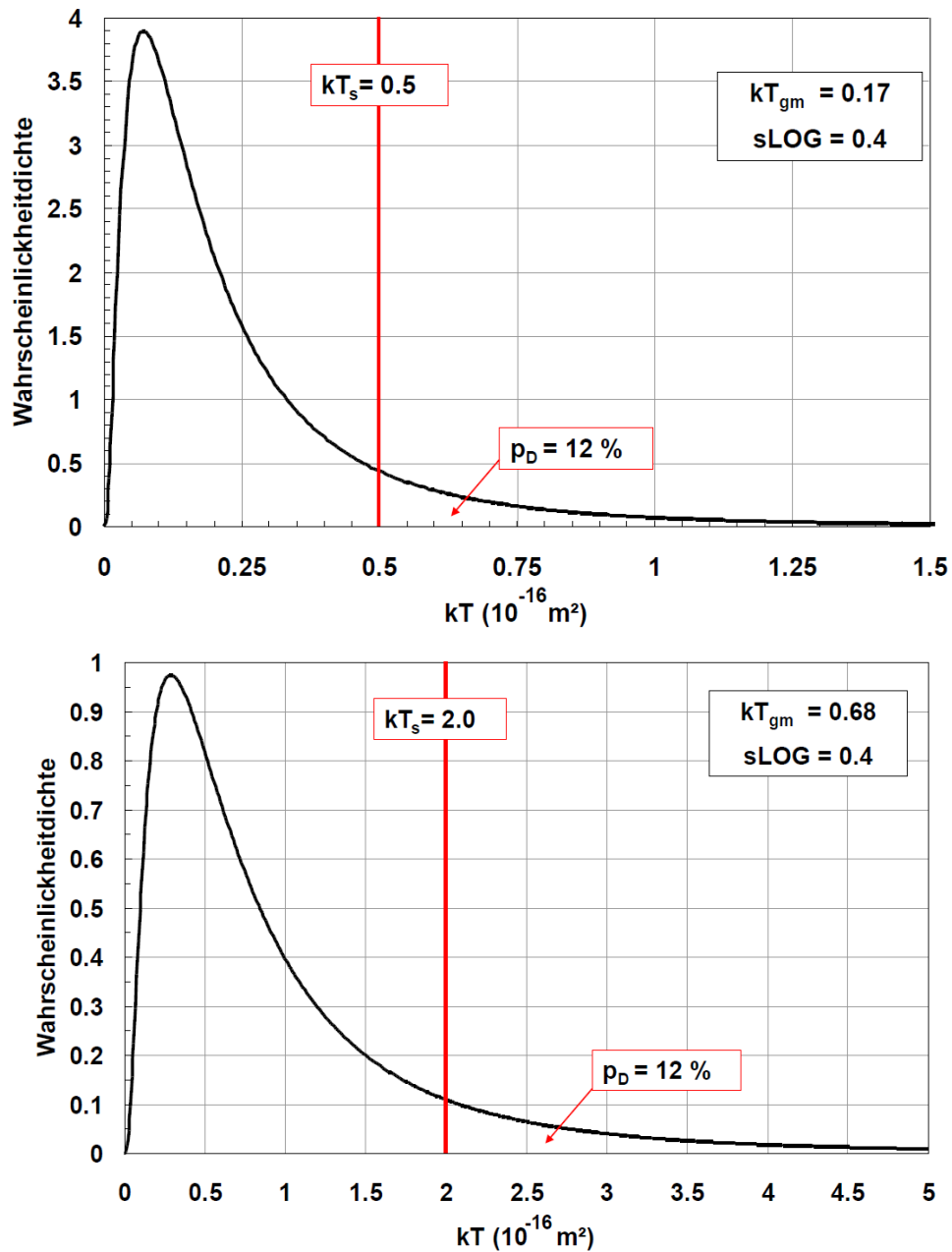


Abbildung D- 7: Wahrscheinlichkeitsdichten [ $10^{-16}$ ] von  $kT$  bei einer Annahmewahrscheinlichkeit von 95 % und oben einem  $kT_s = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und unten einem  $kT_s = 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

## D-3. Überlegungen zu den Grenzwerten

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen von Luftpermeabilitätsmessungen an im Labor hergestellten Beton und Bauteilen in der Praxis wurden Grenzwerte in Abhängigkeit von den Betonsorten nach Norm SIA 118/262 (Revision 2009) bzw. den Expositionsklassen vorgeschlagen. Wie beispielsweise in **Abbildung B- 11** gezeigt, wies Beton der Expositionsklasse XD3 mit einer Luftpermeabilität von  $0.1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (geometrischer Mittelwert nach Jahrzehnten gemessen) zumeist akzeptable Chlorideinträge auf. Brühwiler (2008) schlägt den gleichen Luftpermeabilitätswert vor. Gemäss **Abbildung B- 10** gewährleistet in der Regel eine Luftpermeabilität (geometrischer Mittelwert nach Jahrzehnten gemessen) von maximal  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  eine tolerierbare Karbonatisierungstiefe. Teruzzi (2009) kam zu einem ähnlichen Wert auf Grund von Untersuchungen der Karbonatisierungstiefen an einem Gebäude. Um aus diesen mittleren Luftpermeabilitätswerten einen Luftpermeabilitätsgrenzwert zu erhalten, müssen die Werte bei einer mittleren Standardabweichung von 0.40 (und einer Annahmewahrscheinlichkeit von 95 %) mit dem Faktor 3 multipliziert werden (**Abbildung D- 6**). Somit ergeben sich für die Expositionsklassen XC4 und XD1 – 2 ein Luftpermeabilitätsgrenzwert  $k_T$ s von  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und für XD3 einer von  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Bei einer grösseren Standardabweichung (Streuung der Bauteilqualität) muss der geometrische Mittelwert der Luftpermeabilität niedriger liegen.

**Abbildung D- 8** zeigt die vorgeschlagenen Grenzwerte  $k_T$ s und Luftpermeabilitätswerte (geometrischen Mittelwerte). Zum besseren Vergleich wurde aus den vorgeschlagenen Grenzwerten der geometrische Mittelwert bei einer mittleren Standardabweichung  $s_{\text{LOG}} = 0.4$  abgeschätzt ( $k_T = 3 \times k_{Tgm}$ ). Es zeigt sich, dass die meisten Ergebnisse die Anforderungen der Grenzwerte (gestrichelte Linie) einhalten. Bei Laborbetonen werden die Anforderungen fast immer eingehalten (bei 3 von 24 Betonen mit  $w/z \leq 0.50$  nicht erreicht). Bei Beton aus der Praxis zeigt sich demgegenüber eine etwas häufigere Überschreitung der Grenzwerte (16 von 52 Betonen mit  $w/z \leq 0.50$ ). Sofern die Ergebnisse weiterer Prüfungen vorlagen, wurde die im Vergleich zum  $w/z$ -Wert zu geringe Betonqualität bestätigt. Es zeigt sich auch, dass bei Betonen mit  $w/z$ -Werten über 0.50 der Luftpermeabilitätsgrenzwert für  $w/z$ -Werte von 0.50 häufig eingehalten wurde (bei 11 von 15 Laborbetonen und 3 von 5 Praxisbetonen).

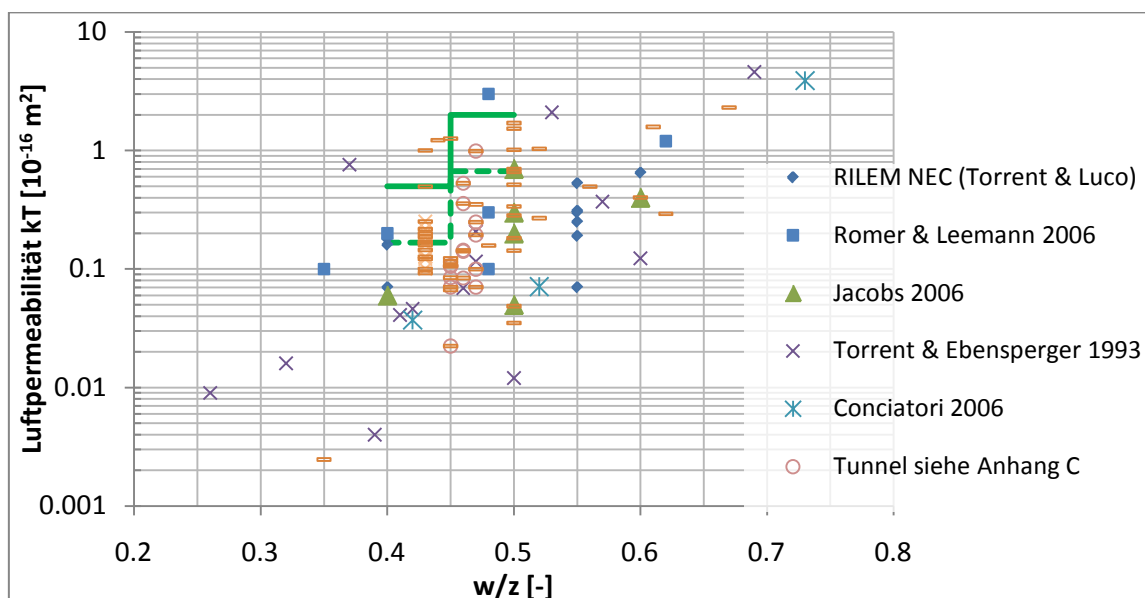


Abbildung D- 8: Vorgeschlagene Grenzwerte und geometrische Mittelwerte aus publizierten Untersuchungen; Messwerte von Praxisobjekten (nicht Laborbeton) sind orange dargestellt





## Abkürzungen

| Begriff                | Bedeutung                                                                                                                                                     |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| kT                     | Luftpermeabilität, bestimmt nach SIA 262/1, Anhang E; übliche Einheit: $[10^{-16} \text{ m}^2]$                                                               |
| kT'                    | Basierend auf dem spezifischen elektrischen Widerstand (Einfluss der Betonfeuchte) korrigierte Luftpermeabilität; übliche Einheit: $[10^{-16} \text{ m}^2]$   |
| kTgm                   | Geometrischer Mittelwert der Luftpermeabilität, bestimmt nach SIA 262/1, Anhang E; übliche Einheit: $[10^{-16} \text{ m}^2]$                                  |
| kTi                    | Einzelwert der Luftpermeabilität, bestimmt nach SIA 262/1, Anhang E; übliche Einheit: $[10^{-16} \text{ m}^2]$                                                |
| kTs                    | Grenzwert der Luftpermeabilität, bestimmt nach SIA 262/1, Anhang E; übliche Einheit: $[10^{-16} \text{ m}^2]$                                                 |
| PT                     | Permea-TORR (Fa. Materials Advanced Science) zur Bestimmung der Luftpermeabilität nach SIA 262/1, Anhang E                                                    |
| sLOG                   | Standardabweichung der logarithmierten Luftpermeabilitätsmesswerte; übliche Einheit [-]                                                                       |
| T                      | Temperatur; übliche Einheit: $[^{\circ}\text{C}]$ oder $[\text{K}]$                                                                                           |
| TPT                    | Torrent Permeability Tester (Fa. proceq) zur Bestimmung der Luftpermeabilität nach SIA 262/1, Anhang E                                                        |
| w/z, w/z <sub>eq</sub> | Massenverhältnis Wasser zu Zement und ggf. auf den Zementgehalt anrechenbare Zusatzstoffe; siehe unter Begriffe w/z-Wert, w/z <sub>eq</sub> -Wert.            |
| $\rho$                 | spezifischer elektrischer Widerstand; übliche Einheit $[\Omega\text{m}]$ oder $[\text{k}\Omega\text{cm}]$ ; $[10 \Omega\text{m} = 1 \text{k}\Omega\text{cm}]$ |
| $\sigma$               | Standardabweichung; übliche Einheit: je nach Messgrösse                                                                                                       |
| $\varnothing$          | Durchmesser; übliche Einheit: $[\text{mm}]$ oder $[\text{cm}]$ oder $[\text{m}]$                                                                              |



# Literaturverzeichnis

|                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alexander, M.G., Y. Ballim & K. Stanish (2008)                           | A framework for use of durability indexes in performance based design and specifications for reinforced concrete structures.- Mater. & Struct., 41: 921-936.                                                                             |
| Andrade, C., C. González Gasca & R. Torrent (2000)                       | The suitability of the 'TPT' to measure the air permeability of the covercrete.- 5th CAN-MET/ACI Intern. Conf. on Durability of Concr., Barcelona, June 4-9                                                                              |
| Brühwiler, E., E. Denarie, Th. Wälchli, M. Maitre & D. Conciatori (2005) | Dauerhafte Kunstbauten bei geringem Unterhalt Ausgewählte Kapitel.- VSS-Bericht Nr. 587, 122 S.                                                                                                                                          |
| Brühwiler, E. (2008)                                                     | Dauerhafter Stahlbeton. TEC21, Nr. 48, 21                                                                                                                                                                                                |
| Bungey, J.H. & S.G. Millard (1996)                                       | Testing of Concrete Structures. Blackie Academic & Professional, Glasgow                                                                                                                                                                 |
| Conciatori, D. & M. Maitre (2002)                                        | Perméabilité à l'air du béton d'enrobage (méthode Torrent).- Rapport d'essais No. MCS 02.09-01, MCS - IS - ENAC - EPFL.                                                                                                                  |
| Conciatori, D. (2005)                                                    | Effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé. Thèse No. 3408, EPFL Lausanne                                                                                               |
| Denarié E., M. Maitre, D. Conciatori & E. Brühwiler (2005)               | Air permeability measurements for the assessment of the in situ permeability of cover concrete. in Proceedings International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2005), 21.                           |
| Denarie, E. (2004)                                                       | Essais comparative de caractérisation de bétons d'enrobage - phase I: béton de laboratoire.- rapport d'essais MCS 02.12.7-1 EPFL                                                                                                         |
| Denarié, E., M. Maitre & Th. Wälchli (2004)                              | Application de la mesure de perméabilité à l'air selon Torrent pour le contrôle de la qualité du béton d'enrobage, in-situ.- EPFL Rapport Interne, Lausanne, Avril 2004, 53 p.                                                           |
| Di Pace G., D. Calo & R. Torrent (2008)                                  | SACoMaTIS 2008, Proc. of Intern. RILEM Confer. (Eds. L. Binda, M. di Prisco and R. Felicetti), Varenna, Italy, 1                                                                                                                         |
| Assessment of concrete permeability in tunnels.                          |                                                                                                                                                                                                                                          |
| Fernández Luco, L. & D. Revuelta Crespo (2005).                          | Ensayo de penetración de agua bajo presión y Ensayo de permeabilidad al aire, método de Torrent, sobre probetas de hormigón de 150x300mm Informe N° 18'728, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Julio 2005, 8 p.                          |
| FHWA (2000)                                                              | The Effects of Higher Strength and Associated Concrete Properties on Pavement Performance.- FHWA-RD-00-161 Report, Chapter 5 'Concrete Properties', Fed. Highway Admin., USDOT, pp. 143-182.                                             |
| Fornasier, G., C. Fava, L. Fernández Luco & L. Zitzer (o. J.)            | Diseño por Durabilidad de Hormigones Autocompactantes. Aspectos a Considerar desde el Punto de Vista Reglamentario.- <a href="http://www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/T-23.pdf">http://www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/T-23.pdf</a> . |
| Gouws, S. M., M. G. Alexander & G. Maritz (2001)                         | Use of durability index tests for the assessment and control of concrete quality on site.- Concr. Beton 98, pp 5 - 16                                                                                                                    |
| HeidelbergCement (2008)                                                  | Betontechnische Daten.- Ausgabe 2008                                                                                                                                                                                                     |
| Imamoto K., K. Shimozawa, M. Nagayama, J. Yamasaki & S. Nimura (2008)    | Threshold values of air permeability of concrete cover – a case study in Japan.- SACoMaTIS 2008, Proc. of Intern. RILEM Confer. (Eds. L. Binda, M. di Prisco and R. Felicetti), Varenna, Italy, Vol. 1, pp. 169-177.                     |
| ISO 5725 (1994)                                                          | Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen.- International Organization for Standardization                                                                                                           |
| Jacobs, F. & A. Lee-mann (2007)                                          | Betoneigenschaften nach SN EN 206-1.- VSS-Bericht Nr. 615, 27 S.                                                                                                                                                                         |
| Jacobs, F. & F. Hunkeler (2006)                                          | Non destructive testing of the concrete cover - evaluation of permeability test data.- in RILEM (2006) International RILEM Workshop on Performance based evaluation and indicators for concrete durability, Madrid.                      |
| Jacobs, F. (2006)                                                        | Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken.- VSS-Bericht Nr. 604, 85 S.                                                                                                                 |
| Jacobs, F. (2007)                                                        | Beton zerstörungsfrei untersuchen.- baublatt, Nr. 48, 30.11.2007, 20 - 22                                                                                                                                                                |

|                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jacobs, F. and Torrent, R. (2009)                                                       | Swiss Standard SIA 262: 2003, a step towards performance-based specifications for durability.- RILEM Conference Concrete in aggressive aqueous environments - Performance, Testing, and Modeling, Toulouse, France, 3-5 June 2009.  |
| Kattar, J., J. V. Abreu & C. E. X. Regattieri (1999)                                    | Inovações na metodologia para avaliação da permeabilidade por difusão ao ar.- 41º Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Salvador, Bahia, 1999.                                                                                 |
| Kattar, J.E., Abreu, J.V. de & Cruz, L.O. (1995)                                        | Concreto de alto desempenho modificado com polímero para pisos industriais.- 37ª Reunião Anual do IBRACON, Goiânia, 3-7 Julho, 1995.                                                                                                |
| Kollek, J. J. (1996)                                                                    | The determination of permeability of concrete by Cembureau Method.- Materials & Structures, 22, 225 - 230.                                                                                                                          |
| Kubens, S., Wassermann, R. & Bentur, A. (2003)                                          | Non destructive air permeability tests to assess the performance of the concrete cover.- 15th ibausil Intern. Baustofftagung, Bauhaus, Univ. Weimar, 24-27 September 2003.                                                          |
| Leemann, A., C. Hoffmann, V. Malioka & M. H. Faber (2006)                               | Assessment of destructive test methods to determine the covercrete quality of structures.- in RILEM (2006) International RILEM Workshop on Performance based evaluation and indicators for concrete durability, Madrid.             |
| Mackechnie, J. R. & M. G. Alexander (2002)                                              | Durability predictions using early-age durability index testing.- Proceedings 9th durability and building materials conference, Australian Corrosion Association, Brisbane, 11 pp.                                                  |
| Mathur VK., C. L. Verma, B. S. Gupta, S. K. Agarwal & A. Kumar (2005)                   | Use of High Volume Fly Ash in Concrete for Building Sector.- Report No. T(S)006, Central Build. Res. Inst., Roorkee, Jan. 2005, 35 p.                                                                                               |
| Merlini, M. (2008)                                                                      | Schätzung der Genauigkeit bei Luftpermeabilität.- Kurzbericht, Seminar für Statistik der ETH Zürich, 3 p.                                                                                                                           |
| Misák P., B. Kucharčzyová & T. Vyamazal (2008)                                          | Evaluation of permeability of concrete by using instrument Torrent.- JUNIORSTAV 2008, Brno, 23 Jan. 2008, 3p.                                                                                                                       |
| Quoc P.H.D. & T. Kishi (2006)                                                           | Measurement of air permeation property of cover concrete.- Proc. JSCE Annual Meeting, v. 61, Disk 2, 2006, 2 p.                                                                                                                     |
| RILI SIB (2001)                                                                         | Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen.- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton                                                                                                                                        |
| Rodríguez de Sensale, G., B.S. Sabalsagaray, J. Cabrera, L. Marziotte & C. Romay (2005) | Effect of the Constituents on the Properties of SCC in Fresh and Hardened State.- fib Symposium "Structural Concrete and Time", La Plata, Argentina, Sept. 2005.                                                                    |
| Roelfstra, G. (2001)                                                                    | Modèle d'évolution de l'état de ponts-routes en béton.- Dissertation 2310, EPFL.                                                                                                                                                    |
| Roelfstra, G., R. Hajdin & E. Brühwiler (2001)                                          | Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton armé.- VSS-Bericht Nr. 560, 160 S.                                                                                                                                           |
| Romer, M. & A. Leemann (2005)                                                           | Sensitivity of a non-destructive vacuum test method to characterize concrete permeability.- in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ed Alexander), South Africa, 177 - 179.                                            |
| Romer, M. & A. Leemann (2006)                                                           | Sensitivity of a non-destructive test permeability test method for concrete.- Empa Activities 2005, S. 36.                                                                                                                          |
| Romer, M. (2005a)                                                                       | Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement.- Materials and Structures, 38, 541 - 547.                                                                                                      |
| Romer M. (2005b)                                                                        | RILEM TC 189-NEC "Comparative test - Part I - Comparative test of penetrability methods.- Materials & Structures, v38, Dec 2005, pp. 895 - 906.                                                                                     |
| SIA 118/262 (2004)                                                                      | Allgemeine Bedingungen für Betonbau.- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein                                                                                                                                              |
| SIA 262 (2003)                                                                          | Betonbau.- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein                                                                                                                                                                         |
| SIA 262-1 (2003)                                                                        | Betonbau – Ergänzende Festlegungen.- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein                                                                                                                                               |
| Simon, N., J.-P. Jacoud & M. Badoux (2001)                                              | Anwendung von Hochleistungsbeton – Der Tagbautunnel von Champ Baly.- Bundesamt für Strassenbau, Forschungsauftrag Nr. 2001/483 auf Antrag der Arbeitsgruppe für Brückenunterhaltsforschung, Bundesamt für Strassenbau, Nr. 559.     |
| Teruzzi, T. (2009)                                                                      | Estimating the service-life of concrete structures subjected to carbonation on the basis of the air permeability of the concrete cover.- Proceedings of the Euroinfra 2009 International ECCE Conference, 15 – 16 October, Helsinki |

|                                     |                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Torrent, R. & G. Frenzer (1995)     | Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle.- VSS-Bericht Nr. Nr. 516                                                                  |
| Torrent, R. & L. Ebensperger (1993) | Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle.- VSS-Bericht Nr. Nr. 506                                                                  |
| Torrent, R. & L. F. Luco (2007)     | Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover.- RILEM Report 40, Springer Verlag                                                                             |
| Torrent, R. (2000)                  | On the tracks of the durability-meter.- L'industria Italiana del Cemento, Nr. 752, März, 262-269                                                                                                   |
| Torrent, R. (2001)                  | Diseño por Durabilidad - Técnicas de Ensayo y su Aplicación.- CENCO Seminar on Durability of Concrete and Evaluation of Corroded Structures, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 17-19 April, 2001. |
| Torrent, R. (2009a)                 | Non-destructive Site Air-Permeability Test – Relation with other transport test methods.- Materials Advanced Services Ltd., Buenos Aires, May 2009.                                                |
| Torrent, R. (2009b)                 | Comparison of the operation and air-permeability test results of the TPT and the Permea-TORR.- Materials Advanced Services Ltd., Buenos Aires, September 2009.                                     |



# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

ARAMIS SBT

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am:

20.1.2010

#### Grunddaten

Projekt-Nr.:

AGB 2007/007

Projekttitel:

Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen

Enddatum:

20.01.2010

#### Texte:

Zusammenfassung der  
Projektresultate:

In den letzten Jahrzehnten ist erkannt worden, dass bei Bauwerken die häufigsten Schäden durch eine ungenügende Dauerhaftigkeit und nicht durch eine ungenügende Festigkeit verursacht wurden. Die Qualität und Dicke des Überdeckungsbetons bestimmt in den meisten Fällen die Dauerhaftigkeit der Bauwerke. Da die Betonqualität sowohl durch die Betonzusammensetzung als auch den Einbau und die Nachbehandlung beeinflusst werden kann, ist es zweckmässig, die erzielte Betonqualität am Bauteil zu bestimmen.

Gemäss Norm SIA 262 ist die Dichtigkeit des Überdeckungsbetons zu überprüfen. Mit der Prüfung der Luftpermeabilität nach Norm SIA 262/1, Anhang E, steht eine zerstörungsfreie Prüfmethode zur Qualitätskontrolle des Betons zur Verfügung.

Diese Empfehlungen enthalten Vorschläge zur Ausschreibung, Durchführung und Auswertung von Luftpermeabilitätsmessungen. Bei der Durchführung der Luftpermeabilitätsmessungen sind die Anforderungen an die Bauteiltemperatur und Bauteilfeuchte zu beachten.

Auf jeder Untersuchungsfläche sind 6 Luftpermeabilitätsmessungen vorzunehmen. Ist maximal 1 Messwert höher als der vorgeschlagene Grenzwert ( $kTs = 2.0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  für Betonsorten C, D und E nach SIA 118/262;  $kTs = 0.5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  für Betonsorten F und G nach SIA 118/262), erfüllt die Untersuchungsfläche die Anforderungen. Sind genau 2 der 6 Messwerte höher als der vorgeschlagene Grenzwert, können 6 weitere Messungen durchgeführt werden. Liegt von den 6 weiteren Messwerten maximal 1 Messwert über den Anforderungen, erfüllt die Untersuchungsfläche die Anforderungen. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, sind weitere Untersuchungen durchzuführen bzw. das Bauteil instandzusetzen.

Zielerreichung:

Das Ziel wurde erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Empfehlungen werden zur Anwendung in der Praxis empfohlen.

Publikationen:

ASTRA-Bericht

Bei der Revision der Norm SIA 262/1 fliessen die Erkenntnisse des Projektes ein (Beschluss Normenkommission SIA 262 vom 1.10.2009).



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Beurteilung:                     | Die Ziele des Forschungsprojektes wurden erreicht. Zur Methode zur Bestimmung der Luftpermeabilität liegen ausreichende, praxistaugliche Informationen vor, sodass die Methode in der Praxis eingesetzt werden kann.<br>Die Erfahrungen mit der Methode sollten gesammelt und ausgewertet werden, um die in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erfahrungen erweitert werden. |
| Umsetzung:                       | Die wesentlichen Punkte des Forschungsprojektes werden bei der Überarbeitung der Norm SIA 262/1, Anhang E, einfließen.                                                                                                                                                                                                                                                        |
| weitergehender Forschungsbedarf: | Im Moment ist kein dringender, weiterer Forschungsbedarf gegeben.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Einfluss auf Normenwerk:         | Die Norm SIA 262/1 wird entsprechend den Erkenntnissen von diesem Projekt ergänzt.                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

#### Präsident Begleitkommission:

|                       |                                            |          |                        |
|-----------------------|--------------------------------------------|----------|------------------------|
| Name:                 | Dr. Käser                                  | Vorname: | Martin                 |
| Amt, Firma, Institut: | Baudirektion des Kanton Zürich, Tiefbauamt |          |                        |
| Strasse, Nr.:         | Walcheplatz 2, Postfach                    |          |                        |
| PLZ:                  | 8090                                       | Email:   | martin.kaeser@vd.zh.ch |
| Ort:                  | Zürich                                     | Telefon: | 043 259 3118           |
| Kanton, Land:         | Zürich                                     | Fax:     | 043 259 5156           |

#### Unterschrift Präsident Begleitkommission:







# Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

## Brückenforschung, Forschungsberichte ab Nr. 501

| Bericht-Nr. | Projekt Nr. | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Datum |
|-------------|-------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 501         | AGB         | 82/89    | Mise au point d'une méthode pour localiser les défauts d'étanchéité et rechercher divers défauts dans le béton des tabliers des ponts par voie non-destructive<br><i>Ausarbeitung einer zerstörungsfreien Methode, um Abdichtungs- und verschiedene Betonschäden der Brückenfahrbahnplatte zu lokalisieren</i> | 1991  |
| 502         | AGB         | 81/90    | Integritäts- und Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln in Brückenbauwerken; die reflektometrische Impulsmessung<br><i>Analyse d'intégrité et de corrosion des câbles de précontrainte; la méthode RIMT</i>                                                                                                     | 1992  |
| 503         | AGB         | 88/90    | Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen; Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln<br><i>Protection cathodique des armatures du béton; durée de vie des anodes et des mortiers</i>                                                                                                   | 1992  |
| 504         | AGB         | 89/88    | Verbesserung von Reparaturmörteln<br><i>Amélioration des mortiers de réparation</i>                                                                                                                                                                                                                            | 1992  |
| 505         | AGB         | 82/90    | Zustandsermittlung, Zustandsbeurteilung und Verstärkung bei Stahlbetonbrücken; Teil 1: Verbindung von altem und neuem Beton<br><i>Auscultation, évaluation et renforcement des ponts en béton armé; partie 1: adhérence de bétons d'âges différents</i>                                                        | 1993  |
| 506         | AGB         | 89/89    | Studie über «Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle»<br><i>Etude des méthodes de mesure et d'évaluation des caractéristiques du béton de recouvrement sur site</i>                                                                                        | 1993  |
| 507         | AGB         | 97/92    | Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken<br><i>Extraction électrochimique des chlorures dans les structures en béton armé</i>                                                                                                                                                                 | 1993  |
| 508         | AGB         | 84/93    | Untersuchungen zum kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton im Tunnel San Bernardino<br><i>Etudes de la protection cathodique du béton armé dans le tunnel San Bernardino</i>                                                                                                                              | 1992  |
| 509         | AGB         | 86/93    | Stand der Technik von Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen<br><i>Etat de la technique des joints bitume-élastomère</i>                                                                                                                                                                                        | 1994  |
| 510         | AGB         | 86/90    | Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten<br><i>Bases de la corrosion et de la mesure de potentiel des structures en béton armé</i>                                                                                                                                               | 1994  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr. | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Datum |
|-------------|-------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 511         | AGB         | 87/88    | Schutz von Beton durch Beschichtungen; Auswirkungen auf den Feuchtigkeits- und Chloridtransport<br><i>Protection du béton armé par des couches de protection; l'influence sur le transport d'humidité et des ions de chlorure</i>                                                             | 1994  |
| 512         | AGB         | 90/88    | Grundlagen einer nahtlosen bituminösen Brückenabdichtung<br><i>Bases d'une étanchéité de ponts sans recouvrements</i>                                                                                                                                                                         | 1994  |
| 513         | AGB         | 82/90    | Zustandserfassung, Zustandsbeurteilung und Verstärkungsmassnahmen bei Betonbrücken; Teil 3: Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung bei Betonbrücken<br><i>Auscultation, évaluation et renforcement des ponts en béton armé; partie 3: auscultation et évaluation des ponts en béton</i>    | 1994  |
| 514         | AGB         | 83/90    | Enseignements tirés d'essais de charge et d'observations à long terme pour l'évaluation de ponts en béton et le choix de la précontrainte<br><i>Beurteilung des Gebrauchszustandes von Brücken aufgrund von Belastungsversuchen und Langzeitbeobachtungen; Empfehlung für die Vorspannung</i> | 1995  |
| 515         | AGB         | 90/90    | Modèles de charge actualisés pour l'évaluation de la sécurité structurale de ponts-routes existants<br><i>Aktualisierte Lastmodelle zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken</i>                                                                                        | 1995  |
| 516         | AGB         | 90/94    | Studie über «Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle»<br><i>Etude des méthodes de mesure et d'évaluation des caractéristiques du béton d'enrobage sur site</i>                                                                            | 1995  |
| 517         | AGB         | 87/90    | Schadens- und Sicherheitsanalyse an betriebsgeschädigten Stahlrollen von Brückenlagern<br><i>Analyse des dommages et de la sécurité de rouleaux en acier d'appuis de ponts endommagés en service</i>                                                                                          | 1995  |
| 518         | AGB         | 85/94    | The Strategic Highway Research Program (SHRP)<br><i>Das strategische Strassenforschungsprogramm (SHRP)</i>                                                                                                                                                                                    | 1995  |
| 519         | AGB         | 84/88    | Die kontinuierliche elektrische Überwachung von Korrosionsvorgängen am Armierungsstahl im Beton<br><i>La surveillance électrique des processus de corrosion relatives à l'acier d'armature</i>                                                                                                | 1995  |
| 520         | AGB         | 82/88    | Chloride im Beton: Transport und Erfassung<br><i>Chlorures dans le béton: transport et détermination</i>                                                                                                                                                                                      | 1996  |
| 521         | AGB         | 85/88    | Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton<br><i>Méthodes d'évaluation de la corrosion dans le béton armé</i>                                                                                                                                                                    | 1996  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr. | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                | Datum |
|-------------|-------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 522         | AGB         | 91/95    | Beurteilung von Massivbrücken aufgrund von Belastungsversuchen und Langzeitbeobachtungen; Empfehlung für die Vorspannung<br><i>Enseignements tirés d'essais de charge et d'observations à long terme pour l'évaluation des ponts en béton et le choix de la précontrainte</i>        | 1996  |
| 523         | AGB         | 85/92    | Beständigkeit einer Hydrophobierung; Ergebnisse einer Bestandsaufnahme<br><i>Durabilité d'un traitement par un produit hydrofuge; résultats d'une analyse de l'état des bétons d'ouvrages</i>                                                                                        | 1996  |
| 524         | AGB         | 92/95    | Etude expérimentale de la chute de blocs impactant une dalle en béton armé recouverte par des matériaux amortissants<br><i>Experimentelle Studie von Steinschlägen auf eine mit Dämpfungsmaterialien überdeckte armierte Betondecke</i>                                              | 1996  |
| 525         | AGB         | 82/90    | Zustandsermittlung, Zustandsbeurteilung und Verstärkung bei Stahlbetonbrücken; Teil 2: Vorspannung ohne Verbund<br><i>Auscultation, évaluation et renforcement des ponts en béton armé; partie 2: précontrainte sans adhérence</i>                                                   | 1996  |
| 526         | AGB         | 83/97    | Schubtragverhalten; Nachrechnung und Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Stahlbeton- und Spannbetonbrücken<br><i>Comportement sous l'effet des efforts tranchants; vérification et évaluation de la sécurité structurale de ponts existants en béton armé et précontraint</i> | 1997  |
| 527         | AGB         | 56/86    | Le comportement dans le temps des ponts mixtes continus<br><i>Langzeitverhalten durchlaufender Verbundbrücken</i>                                                                                                                                                                    | 1997  |
| 528         | AGB         | 81/93    | Zerstörungsfreie Spannkabelprüfung mit reflektometrischer Impulsmessung<br><i>Contrôle non-destructif des câbles de précontrainte par mesures réflectométriques d'impulsions</i>                                                                                                     | 1997  |
| 529         | AGB         | 82/95    | Mindestbewehrung von Betonbauten<br><i>Armature minimale des structures en béton</i>                                                                                                                                                                                                 | 1997  |
| 530         | AGB         | 86/94    | Lastfaktoren für Eigenlast und Auflast zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken<br><i>Facteurs de charge à appliquer aux poids propres pour l'évaluation de la sécurité structurale des ponts-routes existants</i>                                             | 1998  |
| 531         | AGB         | 98/98    | Valorisation des résultats des essais et des analyses liés au pont haubané courbe sur le Rhin à Schaffhouse<br><i>Bewertung der Ergebnisse aus den Untersuchungen für die gekrümmte Schrägseilbrücke über den Rhein bei Schaffhausen</i>                                             | 1998  |
| 532         | AGB         | 86/96    | Erhebung von Daten an Strassenbrücken zur Festlegung von aktualisierten Lastfaktoren<br><i>Relevé de données sur des ponts routes pour la détermination des facteurs de charge actualisés</i>                                                                                        | 1998  |
| 533         | AGB         | 87/94    | Etude de l'effet de la normalisation européenne sur le dimensionnement des ponts-routes en Suisse<br><i>Studie zu den Auswirkungen der Europäischen Normung auf die Dimensionierung von Strassenbrücken in der Schweiz</i>                                                           | 1998  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.  | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Datum |
|-------------|--------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 534         | AGB          | 86/95    | Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern<br><i>Dégradation des aciers de précontrainte due à la corrosion dans des câbles de précontrainte et des tirants précontraints en sol et en rocher</i>                                     | 1999  |
| 535         | AGB          | 88/88    | Amélioration des mortiers de réfection<br><i>Verbesserung von Reparaturmörteln</i>                                                                                                                                                                                                    | 1999  |
| 536         | AGB          | 82/93    | Einfluss des Eindringens von Chloriden auf die wartungsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetontragwerken<br><i>Influence de la pénétration des chlorures sur la durée de service de constructions en béton armé</i>                                                                        | 1999  |
| 537         | AGB          | 88/94    | Influence des actions variables sur l'état permanent des ponts en béton précontraint<br><i>Einfluss der variablen Einwirkungen auf den Dauerzustand von vorgespannten Betonbrücken</i>                                                                                                | 1999  |
| 538         | AGB          | 85/90    | Feuchtigkeits- und Ionentransport in gerissenen Stahlbetonteilen<br><i>Transport d'humidité et des ions dans le béton fissuré</i>                                                                                                                                                     | 1999  |
| 539         | AGB          | 87/89    | Télésurveillance sur les ouvrages d'art, application à la protection cathodique<br><i>Fernüberwachung auf Kunstbauwerken, Durchführung für kathodischen Korrosionsschutz</i>                                                                                                          | 1999  |
| 540         | AGB          | 87/95    | Zustandsbeurteilung von Stahlbetontragwerken; Erkennen von potentiell spröden und plötzlichen Versagen bei Stahlbeton-Strassenbrücken<br><i>Evaluation de l'état des structures en béton; Détection de potentielles défaillances soudaines et fragiles de ponts routiers en béton</i> | 1999  |
| 541         | AGB          | 93/97    | Auswirkungen der CEN-Normen auf Projektierung und Ausführung von Kunstbauten in der Schweiz<br><i>Conséquences des normes CEN sur l'élaboration du projet et l'exécution d'ouvrages d'art</i>                                                                                         | 1999  |
| 542         | AGB          | 83/89    | Localisation des chlorures dans le béton; détermination de leur répartition<br><i>Lokalisierung der Chloride im Beton; Bestimmung ihrer Verteilung</i>                                                                                                                                | 1999  |
| 543         | AGB          | 89/00    | Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen im Betonbau<br><i>Utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton</i>                                                                                                                                             | 2000  |
| 544         | AGB          | 87/00    | Zustandsüberprüfung von Foundationen bestehender Kunstbauten<br><i>Contrôle de l'état des fondations d'ouvrages d'art existants</i>                                                                                                                                                   | 2000  |
| 545         | AGB 1998/107 | (94/98)  | Précontrainte extérieure des ponts<br><i>Externe Vorspannung von Brücken</i>                                                                                                                                                                                                          | 2000  |
| 546         | AGB 1997/067 | (88/97)  | Untersuchungen zur Chloridbestimmung im Beton und Durchführung eines 2-stufigen Ringversuchs<br><i>Détermination des chlorures dans le béton et organisation d'un essai interlaboratoire en deux étapes</i>                                                                           | 2000  |
| 547         | AGB          | 83/93    | Anforderungen an zementgebundene Beschichtungen<br><i>Exigences aux recouvrements à base de ciment</i>                                                                                                                                                                                | 2000  |



| Bericht-Nr. | Projekt Nr.   | Alte Nr.     | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                  | Datum |
|-------------|---------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 548         | AGB           | 81/95        | Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton<br><i>Mécanismes d'endommagement du béton sous l'action de cycles de gel-dégel en présence de sels</i>                                                                                               | 2000  |
| 549         | AGB 1999/158  | (86/99)      | Anwendung von Faserverbundmaterialien im Brückenbau<br>Sachstand mit Anwendungs- und Forschungsempfehlungen<br><i>Utilisation de matériaux composites dans la construction des ponts Rapport de synthèse avec recommandations pour l'application et la recherche</i>   | 2001  |
| 550         | AGB 1997/065  | (85/97)      | Applicabilité de la méthode Impact-Echo<br><i>Anwendbarkeit der zerstörungsfreien Prüfmethode Impact-Echo</i>                                                                                                                                                          | 2001  |
| 551         | AGB 1999/157  | (85/99)      | Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau<br><i>Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil</i>                                                                                                                                                       | 2000  |
| 552         | AGB 1999/157  | (85/99)      | Techniques d'auscultation des ouvrages de génie civil<br><i>Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau</i>                                                                                                                                                       | 2000  |
| 553         | AGB 1998/100  | (85/98)      | Erfassung massgebender Einflussfaktoren bei Brückenabdichtungssystemen mit Polymerbitumen-Dichtungsbahnen (PBD)<br><i>Recensement des facteurs d'influence sur les étanchéités des ponts avec les bitume-polymères (LBP)</i>                                           | 2000  |
| 554         | Objektbezogen |              | Eignung zweier Inhibitoren (MFP und Sika FerroGard-903) zur Instandsetzung von chloridbelasteten Stahlbetonbauten<br><i>Qualification de deux inhibiteurs (MFP et Sika FerroGard-903) pour la remise en état d'ouvrages en béton armé contaminés par des chlorures</i> | 2001  |
| 555         | AGB 1999/158  | (86/99)      | Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction<br><i>State-of-the-Art Report with Application and Research Recommendations</i>                                                                                                                                | 2001  |
| 556         | AGB 1999/154  | (81/99)      | Modèle de charge (trafic 40 t) pour l'évaluation des ponts-routes à deux voies avec trafic bidirectionnel<br><i>Lastmodell (40-t-Verkehr) zur Beurteilung zweispuriger Strassenbrücken mit Gegenverkehr</i>                                                            | 2001  |
| 557         | AGB 1999/159  | (87/99)      | Einsatz von epoxidharzbeschichteten Bewehrungsstählen im Betonbau<br><i>Utilisation des aciers d'armature revêtus de résine époxyde dans la construction en béton</i>                                                                                                  | 2001  |
| 558         | AGB 2000/556  | (95/00)      | Utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton<br><i>Einsatz von nichtrostenden Bewehrungsstählen im Betonbau</i>                                                                                                                              | 2001  |
| 559         | AGB           | 2001/48<br>3 | Utilisation des bétons à hautes performances – La tranchée couverte de Champ Baly<br><i>Anwendung von Hochleistungsbeton – Der Tagbautunnel von Champ Baly</i>                                                                                                         | 2001  |
| 560         | AGB 1996/043  | (84/96)      | Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton armé<br><i>Modell für die Zustandsentwicklung von Strassenbrücken aus Stahlbeton</i>                                                                                                                            | 2001  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.  | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                         | Datum |
|-------------|--------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 561         | AGB 1999/160 | (89/99)  | Auswertung der Umsetzung der Forschungsarbeiten im Bereich der Brückenforschung<br><i>Evaluation de la mise en pratique des travaux de recherche dans le domaine de la recherche en matière de ponts</i>                                      | 2001  |
| 562         | AGB 1998/102 | (87/98)  | Brücken aus wetterfestem Stahl<br><i>Ponts en acier patinable</i>                                                                                                                                                                             | 2001  |
| 563         | AGB 1997/064 | (82/97)  | Comportement au jeune âge du béton et limitation de la fissuration traversante des structures hybrides<br><i>Betonverhalten in jungem Alter und Begrenzung der Trennrissbildung in Verbundbauteilen</i>                                       | 2001  |
| 564         | AGB 1998/105 | (90/98)  | Überprüfen des Korrosionsschutzes von Spanngliedern mit Kunststoffhüllrohren<br><i>Contrôle non-destructif de la protection contre la corrosion des câbles de précontrainte avec gaine en matière plastique</i>                               | 2002  |
| 565         | AGB 1999/161 | (91/99)  | Konstruktive Ausführung von Brückenrändern; Stand und Entwicklung<br><i>Dispositions constructives des bordures de ponts; Etat des connaissances et des développements</i>                                                                    | 2002  |
| 566         | AGB 1999/156 | (84/99)  | Niveau de sécurité requis pour l'évaluation de ponts-routes existants<br><i>Erforderliches Sicherheitsniveau für die Überprüfung bestehender Brücken</i>                                                                                      | 2002  |
| 567         | AGB 2000/554 | (91/00)  | Ponts mixtes à construction rapide<br><i>Verbundbrücken mit kurzer Bauzeit</i>                                                                                                                                                                | 2002  |
| 568         | AGB 1998/097 | (82/98)  | Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen<br><i>Etudes comparatives de la résistance aux chlorures des bétons</i>                                                                                                        | 2002  |
| 569         | AGB 1999/163 | (93/99)  | Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken Vorfabrizierte Spannbetonträger als einfache Balken<br><i>Evaluation de la sécurité structurale des ponts-routes existants Poutres simples préfabriquées en béton précontraint</i> | 2003  |
| 570         | AGB 2000/405 | (81/01)  | Fahrbahnübergänge aus Stahl und Brückenlager Stand der Technik<br><i>Joints de chaussée en acier et appuis de ponts Etat des connaissances</i>                                                                                                | 2004  |
| 571         | AGB 1998/104 | (89/98)  | Vergrößerungsfaktoren für die Wirkung von Strassenverkehr auf bestehende Brücken<br><i>Coefficients d'amplification pour l'effet du trafic routier sur les ponts existants</i>                                                                | 2004  |
| 572         | AGB 2000/481 | (84/00)  | Selbstverdichtender Beton (Teil 1) Herstellung, Anwendung und Dauerhaftigkeit von selbstverdichtendem Beton<br><i>Béton autocompactant (partie 1) Fabrication, utilisation et durabilité du béton autocompactant</i>                          | 2004  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.                      | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Datum |
|-------------|----------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 573         | AGB 1998/106<br><br>AGB 1998/202 |          | Langzeitverhalten von Abdichtungssystemen für Tagbautunnel (LABSY–TBT) Zur Frage der Dichtheit von Tagbautunneln Eine Untersuchung an 63 Objekten eingeteilt nach der Materialkategorie des Abdichtungssystems<br><i>Le comportement à long terme des systèmes d'étanchéité de tranchées couvertes (LABSY–TBT) La question de l'étanchéité des tranchées couvertes Une étude portant sur 63 objets classifiés selon les matériaux employés pour le système d'étanchéité</i> | 2004  |
| 574         | AGB 2000/428                     | (93/00)  | Zerstörungsfreie Untersuchung grosser Stahlseile bei Schrägseilbrücken<br><i>Inspection non destructive de câbles d'acier de grand diamètre pour ponts haubanés</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2004  |
| 575         | AGB 1998/098                     | (83/98)  | Hydrophobierung von Stahlbetonbauwerken<br><i>Traitement de structures en béton armé avec des produits hydrofuges</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2004  |
| 576         | AGB 2000/398                     | (81/00)  | Selbstverdichtender Beton (Teil 2) Optimieren der Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons<br><i>Béton autocompactant (partie 2) Optimisation des propriétés du béton autocompactant</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                | 2004  |
| 577         | AGB 2001/477                     |          | Schädigungsmechanismen beim Auflämmen von Polymer–Dichtungsbahnen<br><i>Mécanisme d'endommagement lors de la pose des lés d'étanchéité de bitume Polymère par soudage à la flamme</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 2004  |
| 578         | AGB 1998/103                     | (88/98)  | Ermüdungsbemessung von Brücken mit geschweissten kreisförmigen Hohlprofilverbindungen<br><i>Etude de la fatigue des ponts avec noeuds tubulaires soudés</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2004  |
| 579         | AGB 1995/001                     |          | Fahrbahnübergänge aus Polymerbitumen Einbau und Langzeiterfassung am Objekt<br><i>Joints de chaussée en bitume–polymère Installation et suivi du comportement à long terme</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2005  |
| 580         | AGB 2001/475                     |          | Effets de la température dans le dimensionnement des ponts<br><i>Einflüsse der Temperatur auf die Bemessung von Brücken</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2005  |
| 581         | AGB 1996/042                     | (82/96)  | Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten Exposition, Transportzone und Korrosionsgeschwindigkeit<br><i>Surveillance automatique de la corrosion des armatures dans les structure en béton armé</i>                                                                                                                                                                                                                                  | 2004  |
| 582         | AGB 2000/553                     | (90/00)  | Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Georadar-Ergebnissen auf Betonbrücken<br><i>Détermination de la précision et de la fiabilité des mesures par radar sur les ponts</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2005  |
| 583         | AGB 2001/488                     |          | Teilhafter Verbund Eine neue Technik im Verbundbrückenbau<br><i>Adhérence partielle Une nouvelle technique pour la construction de ponts mixtes</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 2005  |



| Bericht-Nr. | Projekt Nr.                  | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Datum |
|-------------|------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 584         | AGB 2002/030                 |          | Tragverhalten von Kunstbauten mit Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) Sachstandbericht<br><i>Comportement structural des ouvrages d'art en béton armé soumis à la réaction alcali-granulat (RAG) Rapport sur l'état des connaissances</i>                                                                     | 2005  |
| 585         | AGB 2001/481                 |          | Elektrisch isolierte Spannglieder: Einsatz in Gegenden mit Streuströmen und Lokalisierung von Kurzschlüssen und Fehlstellen<br><i>Câbles de précontrainte isolés électriquement: Utilisation dans des zones de courants vagabonds et localisation des courts-circuits et défauts</i>                     | 2005  |
| 586         | AGB 2001/479 u. AGB 2002/025 |          | Adhesive Bond between Fiber Reinforced Polymer Bridge Decks and Steel Girders<br><i>Klebeverbund zwischen FRP-Fahrbahnplatten und Stahlträgern</i><br><i>Adhérence par collage entre tabliers de ponts en matériaux composites et poutres en acier</i>                                                   | 2005  |
| 587         | AGB 2000/173                 | (88/00)  | Dauerhafte Kunstbauten bei geringem Unterhalt- Ausgewählte Kapitel<br><i>Ouvrage d'art durables à faible entretien - Chapitres choisis</i>                                                                                                                                                               | 2005  |
| 588         | AGB 2000/470                 |          | Spannglieder, Schrägseile und Anker - Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden<br><i>Câbles de précontrainte, haubans et tirants d'ancrage - Description des systèmes et leçons tirées des dégâts dus à la corrosion</i>                                                          | 2005  |
| 589         | AGB 1994/018                 | 81/94    | Chlorinduzierte Korrosion von Stahl in Beton- Einfluss von Temperaturen und elektrischem Betonwiderstand<br><i>Corrosion des aciers dans le béton due aux chlorures - Effet de la température et de la résistance électrique du béton</i>                                                                | 2005  |
| 590         | AGB 2001/090                 | 90/01    | Renforcement de piles de ponts contre l'impact de véhicules lourds<br>Essais sur des colonnes en béton renforcées par des tissus en aramide.<br><i>Verstärkung von Brückenpfeilern gegen den Aufprall von Lastfahrzeugen</i><br><i>Versuche an Stahlbeton-Stützen verstärkt durch Gelege aus Aramid.</i> | 2005  |
| 591         | AGB 2002/029                 |          | Hydrophobieren von Betonoberflächen - Empfehlungen für Planung und Applikation<br><i>Traitement de la surface des structures en béton - Recommandations pour la planification et l'exécution</i>                                                                                                         | 2005  |
| 592         | AGB 2002/011                 |          | A Probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures<br><i>Une étude probabiliste de la fatigue des ponts tubulaires</i>                                                                                                                                                      | 2006  |
| 593         | AGB 1999/155                 |          | Spannsystem für CFK-Lamellen<br><i>Système de précontrainte pour bandes en PRFC</i>                                                                                                                                                                                                                      | 2006  |
| 594         | AGB 2002/005                 |          | Evaluation de ponts routiers existants avec un modèle de charge de trafic actualisé<br><i>Überprüfung bestehender Strassenbrücken mit aktualisierten Strassenlasten</i>                                                                                                                                  | 2006  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.  | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                               | Datum |
|-------------|--------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 595         | AGB 2003/013 |          | Suizidprävention bei Brücken: Grundlagen<br><i>Prévention des suicides sur les ponts: données de base</i>                                                                                                                                                           | 2006  |
| 596         | AGB 2002/033 |          | Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher<br>Oberflächenschutzkonzepte<br><i>Etude de l'effet de différents systèmes de protection de surface</i>                                                                                                                  | 2006  |
| 597         | AGB 1998/201 |          | Erfassung massgebender Einflussfaktoren bei<br>Brückenabdichtungssystemen mit Bitumenbahnen<br>Laboruntersuchungen<br><i>Détermination des facteurs d'influence décisifs sur les systèmes d'étanchéité de ponts en lés de bitume-polymère, Essai de Laboratoire</i> | 2006  |
| 598         | AGB 2002/022 |          | Brückenabdichtungen mit Flüssigkunststoff<br>Sachstandbericht<br><i>Systèmes d'étanchéité de ponts en polymères liquides Rapport sur l'état des connaissances</i>                                                                                                   | 2006  |
| 599         | AGB 2001/471 |          | Schaden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an<br>Betonbauten in der Schweiz<br><i>Dégâts dus à la réaction alcali-granulats dans les ouvrages en béton en Suisse</i>                                                                                                    | 2006  |
| 600         | AGB 2002/031 |          | Massnahmen zur Durchsetzung der Qualitätsanforderungen bei Kunstbauten (Bau, Erhaltung)<br><i>Mesures destinées à mettre en oeuvre les exigences de qualité pour les ouvrages d'art (nouvelles constructions, conservation).</i>                                    | 2006  |
| 601         | AGB 2001/472 |          | Remplacement de ponts sous trafic<br><i>Brücknersatz unter Verkehr</i>                                                                                                                                                                                              | 2006  |
| 602         | AGB 2001/485 |          | Laboruntersuchungen an fünf ausgebauten<br>Trägern der Autobahnbrücke<br>"Viadotto delle Cantine a Capolago"<br><i>Etude expérimentale de cinq poutres prélevées sur le pont autoroutier "Viadotto delle Cantine a Capolago"</i>                                    | 2006  |
| 603         | AGB 2002/015 |          | Risiko von Betonabplatzungen infolge<br>Bewehrungskorrosion<br><i>Risque d'éclatements du béton dû à la corrosion de l'armature</i>                                                                                                                                 | 2006  |
| 604         | AGB 2002/003 |          | Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des<br>Überdeckungsbetons von Betonwerken<br><i>Perméabilité à l'air en tant que paramètre caractéristique de la qualité du béton d'enrobage des ouvrages en béton</i>                                            | 2006  |
| 605         | AGB 2000/401 |          | Comportement, Calcul et dimensionnement des<br>tranchées couvertes<br><i>Verhalten, Berechnung und Bemessung von Tagbautunneln</i>                                                                                                                                  | 2006  |
| 606         | AGB 2001/486 |          | Résistance à l'effort tranchant des poutres<br>précontraintes à âme mince<br><i>Querkraftwiderstand von vorgespannten Trägern mit dünnen Stegen</i>                                                                                                                 | 2006  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.                    | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Datum |
|-------------|--------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 607         | AGB 2003/017                   |          | Evaluation des systèmes existants pour le suivi à long terme des déformations des ponts<br><i>Beurteilung bestehender Messsysteme für die Langzeiterfassung der Verformungen von Brücken</i>                                                                                                        | 2006  |
| 608         | AGB 1998/101                   |          | Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch (ZEBRA)<br><i>Evaluation de l'état de ponts pendant leur démolition (ZEBRA)</i>                                                                                                                                                                     | 2006  |
| 609         | AGB 2002/009                   |          | Feldversuche mit dem akustischen Überwachungssystem<br><i>Essai in situ avec le système de surveillance acoustique SoundPrint</i>                                                                                                                                                                   | 2007  |
| 610         | AGB 2005/025                   |          | Instandsetzung von Galerien - Wirkung und Wirksamkeit der ergriffenen Massnahmen<br><i>Remise en état de galeries - effet et efficacité des mesures réalisées</i>                                                                                                                                   | 2007  |
| 611         | AGB 2002/027                   |          | Streuung der Betoneigenschaften in Bauwerken<br><i>Variabilité des caractéristiques du béton dans les ouvrages</i>                                                                                                                                                                                  | 2006  |
| 612         | AGB 2001/489                   |          | Permanente, vorgespannte Boden- und Felsanker: Fluktuationen des elektrischen Widerstands<br><i>Tirants d'ancrage précontraints en sol et en rocher: Fluctuations de la résistance électrique</i>                                                                                                   | 2007  |
| 613         | AGB 1997/068 +<br>AGB 2001/480 |          | Experimentelle Untersuchung der Lawinenkräfte auf Galeriedächer<br><i>Recherche expérimentale sur les forces d'avalanches agissant sur les galeries de protection</i>                                                                                                                               | 2007  |
| 614         | AGB 2002/026                   |          | Temporärer Korrosionsschutz von Spanngliedern (TEKplus) - Wissenschaftlich, technische Begleitung der Umsetzung in die Praxis<br><i>Protection temporaire des câbles de précontrainte contre la corrosion (TEKplus) - documentation scientifique et technique de la transposition à la pratique</i> | 2007  |
| 615         | AGB 2002/004                   |          | Betoneigenschaften nach SN EN 206-1<br><i>Propriétés de Béton selon SN EN 206-1</i>                                                                                                                                                                                                                 | 2007  |
| 616         | AGB 2002/020                   |          | Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten<br><i>Appréciation et critères d'acceptation des risques dus aux actions extraordinaires pour les ouvrages d'art</i>                                             | 2009  |
| 627         | AGB 2002/002                   |          | Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung<br><i>Caractéristiques des joints de chaussée en bitume-polymère de largeur normale et de grande largeur après forte sollicitation par le trafic</i>                           | 2008  |
| 628         | AGB 2005/026                   |          | Massnahmen gegen chloridinduzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit<br><i>Mesures contre la corrosion induite par les chlorures pour augmenter la durabilité</i>                                                                                                                      | 2008  |
| 629         | AGB 2003/001 &<br>AGB 2005/019 |          | Integrale Brücken- Sachstandsbericht<br><i>Ponts à culée intégrée</i>                                                                                                                                                                                                                               | 2008  |

| Bericht-Nr. | Projekt Nr.  | Alte Nr. | Titel                                                                                                                                                                                                 | Datum |
|-------------|--------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 631         | AGB 2000/555 |          | Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances aux ponts<br><i>Anwendungen von Ultra-Hochleistung Faserbeton im Brückenbau</i>                                                  | 2008  |
| 633         | AGB 2002/014 |          | Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke<br><i>Systèmes de protection de surface pour les structures en béton</i>                                                                                  | 2008  |
| 634         | AGB 2002/007 |          | Untersuchungen zur Potentialfeldmessung an Stahlbetonbauten<br><i>Recherches relatives à la mesure de potentiel sur des structures en béton armé</i>                                                  | 2008  |
| 635         | AGB 2004/002 |          | Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales<br><i>Anwendbarkeit von offenporigen Asphaltdeckschichten auf Kunstbauten des nationalen Strassennetzes</i> | 2008  |
| 636         | AGB 2002/028 |          | Dimensionnement et vérification des dalles de roulement des ponts routiers<br><i>Bemessung und Nachweis der Fahrbahnplatten von Strassenbrücken</i>                                                   | 2009  |
| 637         | AGB 2005/009 |          | Détermination de la présence de chlorures à l'aide du géoradar<br><i>Géoradar zur Auffindung von Chloriden</i>                                                                                        | 2009  |