



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Evaluation des Frosttaumittelwi- derstands von Beton – Übertrag- barkeit und praktische Relevanz

**Evaluation de la résistance au gel en présence d'agents de
déverglaçage du béton – domaine de validité et importance
pratique**

**Evaluation of the freeze-thaw-resistance of concrete –
transferability and relevance in practice**

**LPM AG, Beinwil am See
Florian Stoller**

**Merz Ingenieurberatung GmbH, Möriken
Dr. Fritz Hunkeler**

**Forschungsprojekt VSS 2018/332 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Oktober 2020

1693

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Evaluation des Frosttaumittelwi- derstands von Beton – Übertrag- barkeit und praktische Relevanz

**Evaluation de la résistance au gel en présence d'agents de
déverglaçage du béton – domaine de validité et importance
pratique**

**Evaluation of the freeze-thaw-resistance of concrete –
transferability and relevance in practice**

**LPM AG, Beinwil am See
Florian Stoller**

**Merz Ingenieurberatung GmbH, Möriken
Dr. Fritz Hunkeler**

**Forschungsprojekt VSS 2018/332 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Oktober 2020

1693

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Florian Stoller

Mitglieder

Dr. Fritz Hunkeler

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Urs Schellenberg

Mitglieder

Guido Frenzer

Ursina Jenny

Gert Müller

Marco Schnyder

Pascal Kronenberg

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Einleitung	13
1.1	Ausgangslage	13
1.2	Begriffe	14
1.3	Projektziele	15
1.4	Projektablauf	15
2	Grundlagen	17
2.1	Einführung	17
2.2	Kenngrossen für die Frosttaumittelbelastung von Beton	18
2.3	Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf das Bauwerk	23
3	Analyse von Wetterdaten und Beurteilung der Härte eines Winters	27
3.1	Zielsetzung	27
3.2	Begriffe	27
3.3	Frost- und Eistage	27
3.4	Auswahl der Wetterstationen	28
3.5	Charakterisierung von Frostereignissen	29
3.6	Frostgradtage	30
3.7	Altenrhein (ARH)	31
3.8	San Bernardino (SBE)	33
3.9	Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse	35
4	Korrelation zwischen Frostereignissen (ARH) und Salzaustrag	39
5	Temperaturdifferenzen zwischen Luft- und Betontemperatur	43
5.1	Allgemeines	43
5.2	Prüfkörper im Stevenson-Screen in Wildegg	43
5.3	Pylon der Passarelle Itenhard	46
5.4	Stützmauer an der Simplonpassstrasse	48
5.5	Zusammenfassung	53
6	Kenngrossen verschiedener FTW-Prüfungen und Vergleich mit Wetterdaten	55
6.1	SIA-Prüfung gemäss SIA 262/1, Anhang C	55
6.2	Platten- und CDF-Prüfung gemäss CEN/TS 12390-9	57
6.3	Vergleich der Prüfverfahren	58
6.4	Kriterien für einen hohen Frosttaumittelwiderstand	61
6.5	Anmerkung zur BE II- und TFB-Prüfung	64
6.6	Zusammenfassung	64

7	Felduntersuchungen	67
7.1	Allgemeines zur Auslagerung.....	67
7.2	Ergebnisse	68
7.2.1	Visuelle Beurteilung der Musterplatten.....	68
7.2.2	Chloridgehalt der Betonplatten nach 7 Wintern.....	74
7.2.3	Mikroskopische Gefügeanalyse des Betons nach 7 Wintern	76
7.2.4	Vergleich der Ergebnisse	85
7.3	Zusammenfassung.....	92
8	Folgerungen und Empfehlungen aus den Untersuchungen	93
	Anhänge	95
	Glossar	101
	Literaturverzeichnis	103
	Projektabschluss.....	105
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....	109

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorgängerprojektes VSS 2011/501 "Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren", das 2016 abgeschlossen wurde (VSS Bericht Nr. 1554) wurden 2012 Versuchsplatten (50cm x 50cm x 15cm) aus 13 verschiedenen Betonen entlang der Autobahn bei St. Gallen ausgelagert, um daran die Ergebnisse der Frosttaumittelwiderstandsprüfungen (SIA, TFB, BE I, BE II) in der Praxis zu überprüfen.

Bei der Kontrolle im Winter 2013 wurden an den Platten fast keine Schäden festgestellt. Mit dem vorliegenden Fortsetzungsprojekt wurden die ausgelagerten Platten nach sieben Wintern erneut untersucht. Im Rahmen dieses Projektes wurde zudem versucht, die Intensität der Frostbelastung an den ausgelagerten Platten am Auslagerungsort zu beurteilen und mit anderen Standorten zu vergleichen. Dazu wurden Wetterdaten von verschiedenen Standorten analysiert.

Zur Beurteilung der Intensität der Frostbelastung an einem Standort wurde die neue Kennzahl „Frostgradtage“ eingeführt. Die Frostgradtage stellen das Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^{\circ}\text{C}$ pro Einzelereignis dar. Die Frostgradtage können als Intensität des Einzelereignisses und die Summe der Frostgradtage pro Jahr (Winterhalbjahr) als Intensität des Winters betrachtet werden.

Die neue Kennzahl Frostgradtage eignet sich für einen Vergleich von Wetterstationen bzw. von verschiedenen Gegenden der Schweiz und sie erlaubt, andere Standorte rasch und sehr einfach einzuordnen. Mit den Frostgradtagen und der Tiefsttemperatur kann die Strenge der Winter charakterisiert und verglichen werden. Diese Kennzahlen können auch für den Vergleich von Frosttaumittelwiderstandsprüfungen, bei denen die Abwitterung bestimmt wird, verwendet werden. Im Vergleich zu den europäischen Prüfverfahren (Platten- und CDF-Prüfung) ist die SIA-Prüfung die schwächste. Der dadurch bedingte Grenzwert für einen hohen Frosttaumittelwiderstand ist im Vergleich zu den europäischen Prüfverfahren tief und die Vergleichspräzision der Prüfung schlechter.

Die Analysen haben gezeigt, dass die Platten an ihrem aktuellen Standort in St. Margrethen einer typischen Frostbelastung fürs Schweizer Mittelland ausgesetzt sind und, wie allgemein bekannt ist, sind die Winter im Mittelland nicht sonderlich ausgeprägt. Somit ist es auch nicht verwunderlich, dass bei den aktuellen Untersuchungen am Dünnschliff nach sieben Winter im Frühjahr 2019 keine für Frosttaumittelangriff typischen oberflächenparallelen Risse festgestellt wurden. Jedoch wurden teils deutliche Zementsteinabwitterungen gemessen. Da die ursprüngliche Oberfläche am Dünnschliff nicht mehr besteht, konnte die Zementsteinabwitterung nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Als zusätzliches Kriterium wurde daher der effektive Durchmesser des grössten freiliegenden Korns an der Oberfläche gemessen. Dies ist ein weiteres Indiz, wie viel von der Oberfläche bereits abgetragen wurde. Ebenso wurde die Abwitterung auch visuell an den Versuchsplatten bestimmt. Die oben beschriebenen Kriterien wurden klassiert und mit den Resultaten der Laborprüfungen aus dem Vorgängerprojekt ("Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren") verglichen.

Allgemein stimmen die Resultate der Frosttaumittelwiderstandsprüfungen gut bis sehr gut mit den an den ausgelagerten Platten festgestellten Abwitterungen überein. Dabei kommt es in einigen Fällen zu Abweichungen von einer Klasse, welche aufgrund von Abgrenzungphänomenen nicht zu vermeiden sind. In einigen wenigen Fällen tritt eine Abweichung von 2 Klassen auf. Die SIA-Prüfung nach Norm SIA 262/1, Anhang C, hat bei zwei Betonen den Frosttaumittelwiderstand um zwei Klassen überschätzt, die restlichen drei Verfahren jeweils höchstens um eine Klasse über- und unterschätzt. Somit kann, als erster Anhaltspunkt auf der Suche nach einem Referenzverfahren angemerkt werden, dass die SIA-Prüfung allenfalls zu schwach ist. Ebenfalls hat die Analyse der Wetterdaten gezeigt, dass diese Prüfung die langzeitige Frost- und Frosttaumiteleinwirkung in höheren Lagen vielleicht nicht sicher abzudecken vermag. Hier können nur langzeitige Auslagerungsversuche und Beobachtungen an Bauwerken in höheren Lagen weiterhelfen. Dabei könnten evtl. auch die positive Wirkung der künstlich eingeführten Luftporen erkannt werden, was bisher nicht der Fall war.

In Anbetracht der Ergebnisse empfiehlt die Forschungsstelle, die vorhandenen Versuchsplatten im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes unter härteren Expositionsbedingungen weiter zu begutachten. So kann die Einmaligkeit dieses Langzeitversuches noch besser genutzt werden. Weiter erachtet die Forschungsstelle es als zweckmässig zu prüfen, ob das CDF-Verfahren als Ersatz für die SIA-Prüfung geeignet ist und als Referenzverfahren in der Schweiz eingeführt werden soll. Dies auch unter den Aspekten der Angleichung an die europäische Normenlandschaft und mit den Erkenntnissen aus diesen Untersuchungen welche aufzeigen, dass das CDF-Verfahren präziser ist als die SIA-Prüfung. Dadurch kann erreicht werden, dass aufgrund der höheren Präzision und Wiederholgenauigkeit sowohl für die Lieferanten als auch die Bauherren ein Mehrwert generiert werden kann. Weiterhin sollen auch die Anforderungen an einen mittleren Frosttaumittelwiderstand geklärt werden.

Dank

Die Autoren richten einen ganz besonderen Dank an Herrn Rudolf Frischknecht und seinem stets sehr freundlichen und hilfsbereiten Team des Werkhofs Thal (Nationalstrassen Gebiet VI). Es ermöglichte das Auslagern und Umlagern sowie die mehrfache Begutachtung der Platten.

Résumé

Dans le cadre du projet précédent VSS 2011/501 "Evaluation de la résistance au gel en présence d'agents de déverglaçage du béton - Comparaison de quatre méthodes d'essai", qui s'est achevé en 2016 (rapport VSS n° 1554), des dalles d'essai (50cm x 50cm x 15cm) composées de 13 bétons différents ont été entreposées en 2012 le long de l'autoroute près de Saint-Gall afin de vérifier dans la pratique les résultats des essais de résistance au gel-dégel en présence d'agents de déverglaçage (SIA, TFB, BE I, BE II).

Lors du contrôle en hiver 2013, presque aucun dommage n'a été constaté sur les dalles. Avec le présent projet de continuation, les dalles entreposées ont été examinées à nouveau après sept hivers. Dans le cadre de ce projet, on a également tenté d'évaluer l'intensité de l'exposition au gel des dalles au site d'entreposage et de la comparer avec d'autres sites. À cette fin, des données météorologiques provenant de différents endroits ont été analysées.

Pour évaluer l'intensité de l'exposition au gel sur un site, un nouveau paramètre "degrés-jours de gel" a été introduit. Les degrés-jours de gel représentent l'intégrale de la température dans le temps avec une température $\leq 0^{\circ}\text{C}$ par événement individuel. Les degrés-jours de gel peuvent être considérés comme l'intensité de l'événement individuel et la somme des degrés-jours de gel par an (semestre d'hiver) comme l'intensité de l'hiver.

Le nouvel indicateur de degrés-jours de gel convient pour comparer les stations météorologiques ou différentes régions de Suisse et permet de classer rapidement et facilement d'autres lieux. Les jours de gel et les basses températures peuvent être utilisés pour caractériser et comparer la sévérité de l'hiver. Ces indicateurs peuvent également être utilisés pour la comparaison des essais de résistance au gel-dégel en présence d'agents de déverglaçage qui servent à mesurer l'écaillage. Comparé aux méthodes d'essai européennes (slab-test et essai CDF), l'essai SIA est le moins sévère. La valeur limite résultante pour une résistance élevée au gel-dégel est réduite par rapport aux méthodes d'essai européennes et la reproductibilité de l'essai est moins bonne.

Les analyses ont montré que les dalles, à leur emplacement actuel à St. Margrethen, subissent une exposition au gel typique pour le plateau suisse et, comme on le sait, les hivers dans le plateau ne sont pas particulièrement rigoureux. Il n'est donc pas surprenant que les examens sur lames minces au printemps 2019, après sept hivers, n'aient pas révélé de fissures parallèles à la surface, typiques des attaques de gel-dégel en présence d'agents de déverglaçage. Cependant, dans certains cas, un écaillage significatif de la pâte de ciment a été déterminé. Comme la surface originale n'existe plus sur la lame mince, l'ampleur de l'écaillage de celle-ci n'a pas pu être déterminée avec certitude. Par conséquent, le diamètre effectif du plus gros grain exposé à la surface a été mesuré comme critère supplémentaire. C'est une indication supplémentaire de la quantité de surface qui a déjà été perdue. L'écaillage a également été déterminé visuellement sur les dalles d'essai. Les critères décrits ci-dessus ont été classés et comparés aux résultats des essais de laboratoire du projet précédent ("Évaluation de la résistance du béton au gel en présence d'agents de déverglaçage - Comparaison de quatre méthodes d'essai").

En général, les résultats des essais de résistance au gel-dégel en présence d'agents de déverglaçage sont en bon à très bon accord avec l'écaillage observé sur les dalles entreposées. Dans certains cas, il existe des écarts de l'ordre d'une classe, qui ne peuvent être évités en raison de phénomènes de délimitation. Dans quelques rares cas, un écart de deux classes se produit. L'essai SIA selon la norme SIA 262/1, annexe C, a surestimé la résistance au gel-dégel de deux bétons de deux classes, tandis que les trois autres méthodes ont chacune surestimé ou sous-estimé la résistance au gel-dégel d'une classe au maximum. Ainsi, à titre de première indication dans la recherche d'une méthode de référence, on peut noter que l'essai SIA n'est pas assez sévère. L'analyse des données météorologiques a également montré que cet essai pourrait ne pas être en mesure de couvrir de manière fiable l'exposition à long terme au gel sans et avec agents de déverglaçage à des altitudes plus élevées. Dans ce cas, seuls des essais d'exposition à

long terme et des observations sur des ouvrages situés à des altitudes plus élevées peuvent aider. Il pourrait également être possible de détecter l'effet positif de l'air entraîné artificiellement, ce qui n'a pas été le cas jusqu'à présent.

Au vu des résultats, l'organisme de recherche recommande que les dalles d'essai existantes continuent d'être examinées dans des conditions d'exposition plus sévères dans le cadre d'un projet de continuation. Ainsi, le caractère unique de cette expérience à long terme peut être exploité encore mieux. En outre, l'organisme de recherche estime qu'il convient d'examiner si la méthode CDF est appropriée pour remplacer l'essai SIA et devrait être introduite comme méthode de référence en Suisse. Cela devrait également être envisagé sous l'aspect d'une harmonisation avec le paysage normatif européen et en considérant les résultats de cette étude qui montrent que la méthode CDF est plus fiable que l'essai SIA. Ainsi, il est possible de générer une valeur ajoutée pour les producteurs et les maîtres d'ouvrages grâce à une précision et une répétabilité plus élevées. En outre, les exigences relatives à la résistance moyenne au gel-dégel doivent également être clarifiées.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Rudolf Frischknecht et son équipe toujours très sympathique et serviable du centre d'entretien des routes nationales Thal (route nationale zone VI). Ils nous ont permis d'entreposer et de déplacer les dalles d'essai et de les inspecter à plusieurs reprises.

Summary

Within the framework of the preceding project VSS 2011/501 "Evaluation of the freeze-thaw resistance of concrete - Comparison of four test methods", which has been completed in 2016 (VSS report no. 1554), test slabs (50cm x 50cm x 15cm) made of 13 different concretes were exposed in 2012 along the motorway near St. Gallen in order to verify the results of the freeze-thaw resistance tests (SIA, TFB, BE I, BE II) in practice.

During the inspection in winter 2013, almost no damage was found on the slabs. With the present continuation project, the exposed slabs were examined again after seven winters. Within the framework of this project, an attempt was also made to assess the intensity of the frost exposure on the slabs at the exposure site and to compare it with other sites. For this purpose, weather data from different locations were analysed.

To assess the intensity of frost exposure at one site, the new parameter "frost-degree days" was introduced. The frost degree days represent the temperature integral over time with a temperature $\leq 0^{\circ}\text{C}$ per individual event. The frost degree days can be considered as intensity of the individual event and the sum of the frost degree days per year (winter half-year) as intensity of the winter.

The new frost-degree days indicator is suitable for comparing weather stations or different areas of Switzerland and allows other locations to be classified quickly and easily. The frost-degree days and the minimum temperature can be used to characterize and compare the severity of the winter. These indicators can also be used for the comparison of freeze-thaw resistance tests, which determine the severity of the weathering. Compared to the European test methods (slab test and CDF test), the SIA test is the least severe. The resulting limit value for a high freeze-thaw resistance is low compared to the European test methods and the reproducibility of the test is worse.

The analyses have shown that the slabs at their current location in St. Margrethen are exposed to a typical frost exposure for the Swiss plateau and, as is generally known, the winters in the plateau are not particularly severe. It is therefore not surprising that the current thin section investigations did not reveal any surface parallel cracks typical of freeze-thaw attack after seven winters in spring 2019. However, in some cases significant weathering of the hardened cement paste was measured. As the original surface no longer exists on the thin section, the hardened cement paste weathering could not be determined beyond doubt. Therefore, the effective diameter of the largest exposed grain on the surface was measured as an additional criterion. This is a further indication of how much of the surface has already been lost. Weathering was also determined visually on the test slabs. The criteria described above were classified and compared with the results of the laboratory tests from the previous project ("Evaluation of the freeze-thaw resistance of concrete - comparison of four test methods").

In general, the results of the freeze-thaw resistance tests are in good to very good agreement with the weathering observed on the exposed slabs. In some cases, there are deviations of one class, which cannot be avoided due to demarcation phenomena. In a few cases a deviation of 2 classes occurs. The SIA test in accordance with standard SIA 262/1, Appendix C, overestimated the freeze-thaw resistance of two concretes by two classes, while the remaining three methods each overestimated and underestimated the freeze-thaw resistance by a maximum of one class. Thus, as a first indication in the search for a reference method, it can be noted that the SIA test is too weak. The analysis of the weather data has also shown that this test may not be able to reliably cover the long-term exposure to freeze-thaw and freeze-thaw with de-icing agents at higher altitudes. In this case, only long-term exposure tests and observations on structures at higher altitudes can help. It might also be possible to detect the positive effect of artificially introduced air voids, which has not been the case so far.

In view of the results, the research team recommends that the existing test slabs be further examined under harsher exposure conditions in the context of a continuation project. In this way, the uniqueness of this long-term experiment can be used even better. Furthermore, the research team considers it advisable to examine whether the CDF method is suitable as a replacement for the SIA test and should be introduced as a reference method in Switzerland. This should also be considered under the aspects of alignment with the European standards landscape and regarding the findings of these studies, which show that the CDF method is more precise than the SIA test. In this way, the better precision and reproducibility generates added value for the producer and the owner. Further, the requirements for a moderate freeze-thaw resistance should also be clarified.

Thanks

The authors express their sincere gratitude to Mr Rudolf Frischknecht and his team from the Werkhof Thal (swiss motorways, area VI). They kindly helped us with the storage and handling as well as the several inspections of the slabs.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Zurzeit werden in den Schweizer Normen SIA 262/1, SN 640 464 und SN EN 14487-1 unterschiedliche Verfahren zur Prüfung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton beschrieben. Auf europäischer Ebene gibt es darüber hinaus noch weitere Verfahren [CEN 2015]. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für Beton bei gleicher Expositionsklasse. Unklar ist, welches der Verfahren als Referenzverfahren gelten soll und ob und ggf. wie die unterschiedlichen Prüfungen untereinander korreliert werden können [Werner 2016].

An einer Sitzung von Vertretern der Normkommission SIA 262 und der damaligen VSS EK 5.02 (heute die NFK 3.6) wurde 2008 der Validierungsbedarf der verschiedenen in der Schweiz verwendeten Prüfungen des Frosttaumittelwiderstandes im Vergleich zum Betonverhalten am Bauwerk erkannt. Aufgrund dessen entstand 2011 das Forschungsprojekt VSS 2011/501 "Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton - Vergleich von vier Prüfverfahren", welches im Februar 2016 vorläufig abgeschlossen wurde [Werner 2016].

Im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2011/501 "Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren" wurden mit vier in der Schweiz verwendeten Prüfverfahren vergleichende Untersuchungen an 13 unterschiedlichen Betonen gemacht. Neben den Laborprüfungen wurden Feldversuche durchgeführt. Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass der Zeitraum des Forschungsprojekts für die Feldversuche zu kurz war, um abschliessende Aussagen zu machen. Im Rahmen dieses Fortsetzungsprojekts sollen weitere Erkenntnisse aus dem Feldversuch gewonnen werden, um die ursprüngliche Zielsetzung zu erreichen.

Bei den Feldversuchen wurden 2012 Probeplatten (50cm x 50cm x 15cm) aus den 13 verschiedenen Betonen entlang der Autobahn bei St. Gallen ausgelagert, um daran die Ergebnisse der Laborprüfungen (SIA, TFB, BE I, BE II) in der Praxis zu überprüfen. Die im ursprünglichen Forschungsprojekt dafür angedachte Zeitspanne hat sich als zu kurz erwiesen. So wurden bei der Kontrolle im Winter 2013 fast keine Schäden an den Platten festgestellt. Wobei hier anzumerken ist, dass es sich bei diesem Winter um einen eher milden Winter ohne starke Frostbeanspruchungen gehandelt hat. Es gilt nun nach einer längeren Frist und mehreren Wintern diese immer noch ausgelagerten Platten an der Autobahn nochmals zu untersuchen, um das Projekt abschliessen zu können.

Ebenso stellt sich die Frage, wie hoch die Intensität der Frostbelastung der ausgelagerten Platten am Auslagerungsort zu beurteilen ist. Diesbezüglich sind vergleichende Analysen von Wetterdaten von verschiedenen Standorten geplant. Damit soll es möglich sein, die an den Platten festgestellten Schäden in Relation zur Frostbelastung am Auslagerungsort zu stellen.

Auf europäischer Ebene stehen momentan mehrere Prüfverfahren zur Verfügung. In der 2016 publizierten CEN/TS 12390-9 "Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung" sind die wichtigsten, heute in mehreren europäischen Ländern benutzten Prüfverfahren beschrieben. Aktuell laufen auf europäischer Ebene Bestrebungen, die Präzision der europäischen Prüfungen [CEN 2015] zu verbessern und im Rahmen von Ringversuchen zu überprüfen. Den aktuellen Stand der Diskussion ist im Dokument CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 10 N 239 vom Juni 2020 dargestellt. Darin werden u.a. auch einige der in dieser Arbeit behandelten Aspekte angesprochen (z.B. die unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Verläufe bei Prüfungen, siehe **Kap 6.2**). Diese Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

1.2 Begriffe

Tab. 1 Definition von Begriffen

Begriffe	Definition
Frostwiderstand (FW)	Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Frost (ohne Taumittel oder Tausalze)
Frosttaumittelwiderstand Frosttausalzwiderstand (FTW)	Widerstand des Betons gegen die gleichzeitige Einwirkung von Frost und Taumitteln bzw. Tausalzen. SN 640 464: Frosttaumittelwiderstand bedeutet die Widerstandsfähigkeit von erhärtetem Beton in durchfeuchtetem Zustand, Frostbeanspruchung unter gleichzeitigem Einfluss von Taumitteln ohne Schäden auszuhalten. In diesem Bericht wird der Begriff "Frosttaumittelwiderstand" verwendet. Er ist allgemeiner als der Begriff Frosttausalzwiderstand und umfasst auch nicht salzartige Enteisungsmittel. Dementsprechend wird in der Regel von Frosttaumittelwiderstandsprüfung gesprochen.
Tausalz	Salze (z.B. NaCl und CaCl ₂) zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.
Taumittel	Organische (z.B. Glykole, Alkohole und Harnstoff) und anorganische Substanzen zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.
Eistag	Tag mit einer Maximaltemperatur von höchstens 0°C
Frosttag	Tag mit einer Minimaltemperatur unter 0°C
Frostgradtag	Das Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^\circ\text{C}$ pro Einzelereignis. Das Integral wird mit den Stundenwerten berechnet und in °C·Tage angegeben. Aus den Einzelwerten wird die Summe pro Jahr (Winterhalbjahr) berechnet. Die Frostgradtage können als Intensität des Einzelereignisses, die Summe der Frostgradtage als Intensität des Winters betrachtet werden.
Nulldurchgänge	Abfall der Temperatur unter 0°C und Wiederanstieg über 0°C
SIA 262/1, Anhang C (SIA)	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SIA 262/1, Anhang C
TFB-Prüfung	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand (Details siehe [Werner 2016])
BE I	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SN VSS 640 464
BE II	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SN VSS 640 464
CDF-Prüfung	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach CEN/TS 12390-9
Platten-Prüfung (PP)	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach CEN/TS 12390-9 Die (schwedische) Plattenprüfung ist gemäss CEN/TS 12390-9 das Referenzverfahren.
Abwitterung / DS	Die Tiefe der Zementsteinabwitterung am Dünnschliff bestimmt als Näherung über den Abstich zwischen der höchsten Erhebung und der tiefsten Senke an der Dünnschliffoberfläche.
Abwitterung / visuell	Visuell bestimmte relative Abwitterung an den Versuchsplatten.
D _{max} / DS	Effektiver Durchmesser des grössten an der Oberfläche freiliegenden Gesteinskorn.
Luftgehalt künstliche Luftporen (LP)	EN 206, Ziffer 3.1.3.5: mikroskopische kleine Luftporen, die während des Mischens – im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffes – absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise kugelförmig oder nahezu kugelförmig sowie mit einem Durchmesser von 10 bis 300 µm.

1.3 Projektziele

Das Ziel des Projektes ist die Festlegung eines schweizerischen Referenzverfahrens, das für alle Arten von Betonen und Bauwerkstypen – insbesondere auch im Betonstrassenbau – angewendet werden kann. Um das Ziel zu erreichen, sind folgende Fragestellungen zu behandeln:

- Analyse von Wetterdaten zur Beurteilung der "Härte" bzw. der Intensität eines einzelnen Frostereignisses oder eines Winters bzgl. der Schädigung des Betons.
- Vergleichende Validierung der Prüfungen am Bauwerk: Überprüfung der Grenzwerte und der Übertragbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Schweizer Verfahren.

Im Rahmen der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass die SIA-Prüfung mit den zwei wichtigsten europäischen Prüfverfahren (Platten- und CDF-Prüfung) verglichen werden kann und muss, um eine ganzheitliche Beurteilung zu kommen. Dazu wurden die in dieser Arbeit entwickelten Parameter verwendet.

1.4 Projektablauf

- Visuelle Beurteilung der ausgelagerten Probeplatten vor Ort
- Chloridanalysen und mikroskopische Dünnschliffanalysen an den ausgelagerten Probeplatten
- Beschaffen und Auswerten von Klimadaten
- Auswertung der Daten
- Berichterstattung

2 Grundlagen

2.1 Einführung

Beim Bau der ersten Nationalstrassen in den 1960er Jahren stellte sich die Frage, welche Anforderungen an den Frosttaumittelwiderstand zu stellen und wie diese zu prüfen sind. In der damals aktuellen Betonnorm SIA 162:1968 war lediglich eine Frostprüfung ohne Taumittelinfluss verankert. Die Prüfung mit einer Dauer von mehreren Monaten war für eine baubegleitende Produktionsüberwachung eher ungeeignet.

Dieser Umstand führte zur Entwicklung der ersten beiden in der Schweiz angewandten Prüfungen zum Nachweis des Frosttaumittelwiderstandes durch G. Dobrolubov, Betonstrassen AG in Wildegg und A. Romer, LPM AG in Beinwil am See. Einerseits handelt es sich dabei um ein diagnostisches Bestimmungsverfahren an Dünnschliffen (BE I), andererseits um ein physikalisches Verfahren mit zyklischer Belastung (BE II).

Diese Verfahren wurden 1976 zur Richtlinie der Norm SN VSS 640 461 "Zementbetonbeläge – Ausführung, Anforderungen" [SN 1976] erhoben und 1977 in der Zeitschrift "Strassen und Verkehr" unter dem Titel "Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frosttaussalzbeständigkeit von Zementbetonen" publiziert. Im Rahmen der Revision der SN VSS 640 461b [SN 2008] erhielten die beiden Verfahren im Jahre 2009 eine eigene Prüfnorm SN VSS 640 464 [SN 2009].

Eine weitere Prüfung wurde 1986 von der TFB AG im Cementbulletin [CB 1986] publiziert. Seit ca. 1998 verwendet die TFB AG ein modifiziertes Verfahren. Es wird hier als TFB-Prüfung bezeichnet. Es wurden einige Anpassungen beim Prüfablauf vorgenommen und insbesondere die Beurteilungsskala verfeinert. Das Verfahren findet vor allem in der französischen Schweiz als Alternative zur SIA-Prüfung Anwendung [Werner 2016].

Studer et al. haben sich an der Empa, Dübendorf, während vielen Jahren mit der Frosttaumittelwiderstandsprüfung beschäftigt [Studer 1993, 1998 und Kaufmann 1995, 2000]. Basierend auf ihren Arbeiten wurde die SIA-Prüfung Nr. 9 in die damalige Norm SIA 162/1 aufgenommen. In den neunziger Jahren wurde diese modifiziert und ist heute in der SIA 262/1, Anhang C, enthalten.

Im Fünfphasenmodell von Kaufmann und Studer [Kaufman 2000] zum Schadenmechanismus der Frosttaumittelbeanspruchung haben für den Bauwerksbeton lediglich die Phase 2 (Eindringen der Eisfront im Temperaturbereich zwischen 0 und -10°C) und die Phase 5 (Flüssigkeitsaufnahme nach der Frosteinwirkung bei Temperaturen über 0°C) eine schädigende Wirkung. Die übrigen Phasen sind lediglich bei den Prüfungen wichtig. Ein Frostereignis hat nur dann eine (zusätzliche) Schädigung zur Folge, wenn danach eine ausreichend lange Auftauphase mit einem ausreichend hohen Flüssigkeitsangebot folgt.

Für die Schädigung von Bauwerksbeton durch die Frosttaumittelinwirkung sind folgende Zusammenhänge zu beachten:

- a) Ein Beton hat unter bestimmten Gegebenheiten (Höhe über Meer, Taumittelbelastung, Feuchtegehalt etc.) ein gewisses Schädigungspotenzial für Frosttaumittelschäden.
- b) Frostwechsel, die keine ausreichend tiefen Temperaturen in der Betonrandzone zur Folge haben oder die nur sehr kurz sind oder bei denen das Flüssigkeitsangebot nach dem Auftauen fehlt, schädigen den Beton nicht. Von den Frostwechseln (Nulldurchgängen) wirkt daher nur ein gewisser Anteil betonschädigend.
- c) Die Schädigung des Betons schreitet mit jedem betonschädigenden Frostwechsel voran, bis das Schädigungspotenzial erschöpft ist. Die Abwitterung nimmt daher mit der Zeit ab, bis sie nach einer gewissen Zeit mehr oder weniger zum Stillstand kommt.

- d) Die Abwitterung nimmt mit der Tiefsttemperatur und der Dauer des Frostereignisses zu, da die gefrorene Betontiefe ansteigt und so potentielle Schadstellen in grösserer Betontiefe aktiviert werden können. Nach ein paar unterschiedlich strengen Wintern sind dann alle potenziellen Schadstellen aktiviert, sodass die Schädigung nur noch unwesentlich fortschreitet. Massgebend an einem bestimmten Standort sind daher die strengsten Winter.
- e) Wegen dieser Art der Schadensentwicklung wirkt sich die Höhenlage wahrscheinlich weniger auf das Ausmass des Frosttaumittel-Schadens als auf die Geschwindigkeit der Schadenentwicklung aus. Dabei ist zu beachten, dass dies wohl nur für gute bis sehr gute Betone gilt, bei denen keine sich beschleunigende Abwitterung auftritt.

Im Vorgängerprojekt [Werner 2016] wurde die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Prüfverfahren untersucht. Dabei konnten nachfolgende Punkte aufgezeigt werden:

- Die BE II FT-Prüfung ist die strengste der Prüfungen, danach folgen die TFB- und die BE I FT-Prüfung und am Ende die SIA-Prüfung. Die Unterschiede zwischen der SIA-, TFB- und BE I-Prüfung sind aber gering.
- Zwischen den Prüfungen sind Unterschiede bis zu einer Klasse relativ häufig. Unterschiede bis zwei Klassen sind Ausnahmen.
- Es gibt keine systematischen Korrelationen zwischen den Bewertungen gemäss den einzelnen Prüfverfahren und den verschiedenen Betonsorten.
- Anwendungsgrenzen für die einzelnen Prüfverfahren hinsichtlich Zementart, -gehalt, Grösstkorn, mit/ohne Luftporenbildner oder Betonart konnten nicht festgelegt werden.

Das eigentliche Ziel, ein Referenzverfahren für die Bestimmung des Frosttaumittelwiderstandes zu finden, wurde nicht erreicht.

Eine Umfrage bei mehreren Kantonen, einzelnen ASTRA-Filialen und diversen Einzelpersonen nach Frostschäden an neueren Kunstbauten, bei welchen im Zuge der Ausführung Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt wurden, ergab, dass in den letzten Jahren an neueren Kunstbauten keine Frost- oder Frosttaumittelschäden aufgetreten sind [Werner 2016]. Dieses Ergebnis ist erfreulich und zeigt, dass man mit der Vorgabe eines maximalen w/z-Werts und der Einführung von Frisch- und Festbetonprüfungen ein Schritt in die richtige Richtung gemacht hat. Nichtsdestotrotz ist es auch weiterhin notwendig, Forschung in dieser Richtung zu betreiben, um möglichst widerstandsfähige und wirtschaftliche Bauten erstellen zu können.

Neben dem Modell von [Kaufmann 2000] sind in [Müller 2019] diverse andere Modelle beschrieben und kritisch beurteilt worden. Danach vermag keines der heutigen Modelle die Wirklichkeit korrekt und vollständig abzubilden.

2.2 Kenngrössen für die Frosttaumittelbelastung von Beton

Frostwechsel (Nulldurchgänge) entstehen zu einem sehr grossen Teil durch den Tag-Nacht-Zyklus. Die Tag-Nacht-Temperaturzyklen betragen in der Schweiz selten mehr als 20°C. Dies entspricht z.B. einem Tagesmaximum +10°C und Tagesminimum in der Nacht von -10°C. Daraus kann der in diesem Bericht verwendete neue Kennwert, nämlich die Frostgradtage mit der Einheit °C·Tage, berechnet werden (Details siehe **Kap. 3.5 und 3.6**). Er entspricht in diesem Fall einem Wert von rund -2.5°C·Tage. Ist die Ausgangstemperatur nicht -10°C sondern 0°C, so ergibt sich ein Wert von rund -5°C Tage. Wir können daraus schliessen, dass Frostgradtage unter -2 bis -5°C Tage mit einer Dauer von mehr als einem Tag eher Ausnahmen sind.

Für die Frosttaumittelinwirkung können diverse Parameter wirksam sein. Einzelne Einflüsse können in Laborprüfungen gut untersucht werden. Dazu zählen z.B. die Anzahl

der Frosttauzyklen und Tiefsttemperatur. Dieselben Grössen sind in der Praxis nur schlecht zu fassen, da beide Grössen sehr variabel sind und nicht direkt auf die Gefriereschwindigkeit und die tiefenabhängige Tiefsttemperatur im Beton übertragen werden können. Wegen der Wärmekapazität folgt die Beton- der Lufttemperatur immer mit einer gewissen Verzögerung. Bei schnellen Änderungen ist die Verzögerung grösser, bei langsamen Änderungen kleiner.

In einem Bericht der Bast [Bast 2009] werden für die Schadensintensität einer Frosttaumittel-Beanspruchung von Beton in Bauwerken mehrere Faktoren genannt:

- Feuchtebelastung / Wassersättigung
- Minimaltemperatur und Temperaturhub beim Abkühlen und Erwärmen
- Anzahl der Frosttau-Wechsel
- Taumittelmenge / Taumittelbelastung

In [Richter 2010] werden folgende Einflüsse als massgebend für die Frost- und Frosttaumittelbelastung von Beton erwähnt:

- häufige Frosttau-Wechsel mit Minimaltemperaturen unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- gleichzeitig hohe Wassersättigung
- kritischste Bauteile: Wasserbauteile, Verkehrsflächen mit defekten Fugen
- die absolute Zahl von Frosttau-Wechseln ist von untergeordneter Bedeutung, wenn das Bauteil zwischen den Durchfrostungen austrocknen kann oder trocken ist

Um einen Frosttaumittelschaden zu erzeugen, muss Beton ausreichend nass sein. Eine ausreichende Wassersättigung ist damit ohne Zweifel eine Grundvoraussetzung. Der Wassersättigungsgrad ist bei liegenden Bauteilen, die mit Kontakt- und Spritzwasser beaufschlagt werden, höher als bei vertikalen Bauteilen. Mittels Widerstandsmessungen wurden bei vertikalen Betonoberflächen (XF2) nur wenige Male kritische Sättigungsgrade festgestellt (**Abb.1**).

Bei diesen Untersuchungen wurden auch Temperaturänderungen gemessen. Die Mittelwerte der Abkühlgeschwindigkeit lagen um $-1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, die Maximalwerte bis $-5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Für die Aufwärmgeschwindigkeit waren die Werte ähnlich (Mittelwert: $1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, Maximalwert: $6\text{ }^{\circ}\text{C/h}$). Die beobachteten Tiefsttemperaturen lagen bei $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

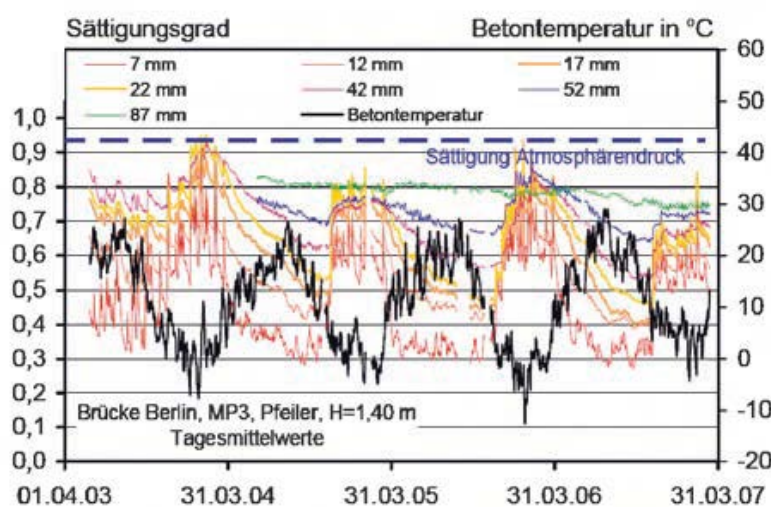


Abb.1 Verlauf des Sättigungsgrades und der Betontemperatur an einem Brückenpfeiler [Bast 2009].

Zum Einfluss der Tiefsttemperatur gibt es verschiedene Untersuchungen. **Abb.2** zeigt die Ergebnisse basierend auf den Untersuchungen von Studer [Studer 1993]. Die über alle Ergebnisse gemittelte Abwitterung nimmt ab einer Temperatur von -10 bis -15°C stark zu. Die Streuung der Einzelwerte ist allerdings erheblich.

Auch im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes wurden Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur durchgeführt. Innerhalb dieses Projektes fand auch ein Ringversuch statt [Siebel 1998a, b, c, Siebel 1999]. In **Abb.3** sind die Ergebnisse dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Abnahme erheblich variiert. Sie ist offenbar abhängig vom Prüfverfahren und der Betonzusammensetzung und liegt zwischen rund lediglich -5% bis rund -45%. In den Untersuchungen von [Studer 1993] war diese höher und betrug rund -60% ab.

In der **Tab. 2** sind die Ergebnisse dieser Analyse zusammengefasst.

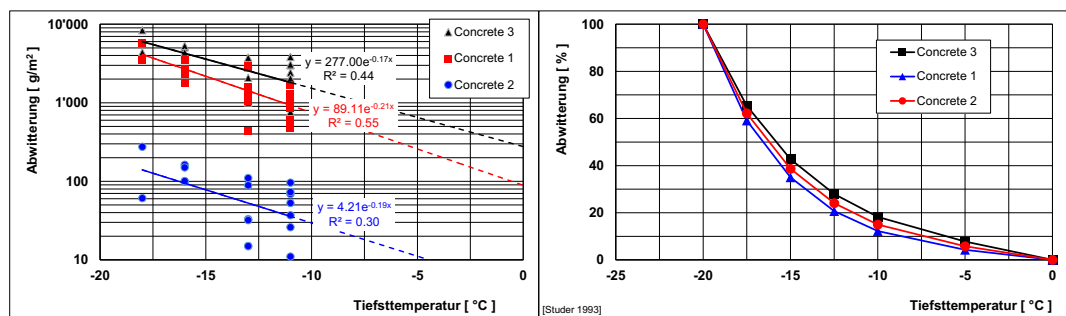


Abb.2 Einfluss der Tiefsttemperatur auf die Abwitterung (links) und mittlere Abwitterung bezogen auf die Werte bei -20°C. Daten aus Laboruntersuchungen von [Studer 1993]. Annahme: Keine Abwitterung bei Null °C.

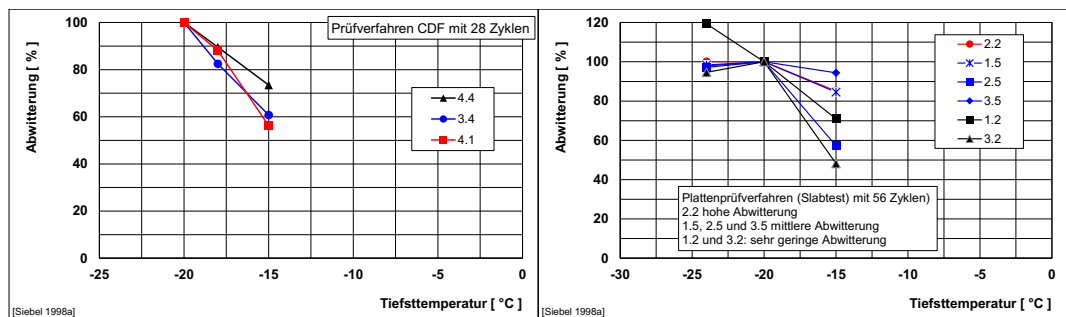


Abb.3 Einfluss der Tiefsttemperatur auf die Abwitterung (normiert auf die Werte bei -20°C). Daten aus Laboruntersuchungen von [Siebel 1998a]. Links: CDF-Verfahren, rechts: Plattenprüfverfahren.

Tab. 2 Relativer Einfluss der Temperatur auf die Abwitterung (Mittelwerte) bei den verschiedenen Prüfverfahren

Tiefsttemperatur	Relative Abwitterung, Prüfverfahren			Mittelwert
	SIA	CDF	Platten	
	Abb.2 [Studer 1993]	Abb.3 [Siebel 1998a]		
-15°C	39%	63%	-	51%
-18°C	68%	87%	73%	76%
-20°C	100%	100%	100%	100%

In [Bast 2007] wird darauf hingewiesen, dass für einen Frostangriff nicht so sehr die Anzahl an Frosttagen entscheidend ist. Für eine funktionierende Mikroeislinsepumpe und einer Aufsättigung des Porengefüges durch Frosttau-Wechsel muss ebenso auch genügend Feuchtigkeit zur Verfügung stehen. Die Anzahl Frosttage mit Niederschlag ist deutlich kleiner als die Gesamtzahl der Frosttage (**Abb.4**, oben links). Weiter wird auf den Temperaturgradienten im Beton hingewiesen, der sich durch den Temperaturhub, also dem Unterschied zwischen der Maximal- und der Minimaltemperatur ergibt, massgebend für die Feuchteaufnahme (**Abb.4**, oben rechts). Die Temperaturunterschiede, die an Tagen mit Niederschlag auftreten, sind deutlich gemässigt als die aller Frosttage. Gemäss [Bast 2007] ist dies auf die Bewölkung, die zwangsläufig mit Niederschlagsereignissen einhergeht, zurück zu führen. Während der Auslagerung wurde in unterschiedlichen Tiefenstufen auch die Temperatur im Beton selbst gemessen. In **Abb.4** (unten) ist der durchschnittliche Temperaturhub der Luft und des Betons in unterschiedlicher Tiefe dargestellt. Gut ersichtlich ist, dass die Temperaturunterschiede im Beton wegen seiner Wärmespeicherkapazität deutlich abgeschwächt sind.

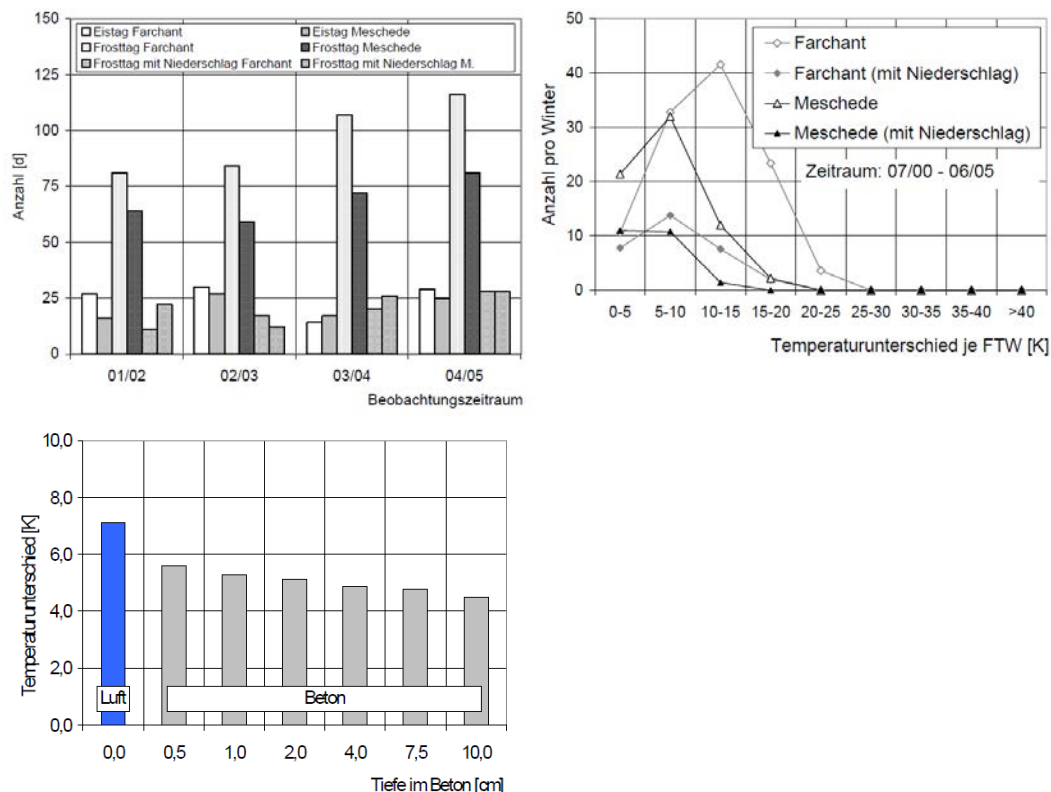


Abb.4 Anzahl Eistage, Frosttage und Frosttage mit Niederschlag der beiden Auslagerungsorte Farchant und Meschede [Bast 2007] (oben links). Häufigkeit der Temperaturunterschiede je Frosttag an den beiden Orten [Bast 2007] (oben links). Durchschnittlicher Temperaturhub der Luft und im Beton in unterschiedlicher Tiefe (Auslagerungsort Meschede) [Bast 2007] (unten).

Aus Laboruntersuchungen mit variablen Zeit-Temperatur-Verläufen und unterschiedlichen Haltezeiten bei der Minimaltemperatur von -18°C (**Abb.5**) haben Jacobsen et al. [Jacobsen 1997] daraus geschlossen, dass die Abwitterung mit abnehmender Abkühlgeschwindigkeit (-2.8 bis -12°C/h) zunimmt. Dies muss aber mit Vorsicht aufgenommen werden. Die detaillierte Auswertung der Resultate zeigt nämlich, dass dieser Befund nur für eine bestimmte Auswahl der Ergebnisse zutrifft (**Abb.6**). Dies trifft auch für die Haltedauer bei der Tiefsttemperatur zu.

Die Autoren haben die Wirkung der Zeit unter -3°C als wichtigen Parameter betrachtet. Wie die eigene Auswertung ergab, kann ebenso gut die Zeit unter 0°C verwendet werden (**Abb.7**, links). Anstelle dieser Grösse eignet sich der Wert für die Frostgradtage (Erläuterungen zu diesem neuen Kennwert sind im **Kap 3.6** zu finden) besser, da er auch

die Temperatur unter 0°C beinhaltet (**Abb.7**, rechts). Es ist erkennbar, dass unter ca. $-100^{\circ}\text{C}\cdot\text{Tage}$ die Abwitterung ein Plateau erreicht und kaum mehr ansteigt. Dies entspricht dem mit der Zeit abflachenden Verlauf der Abwitterung.

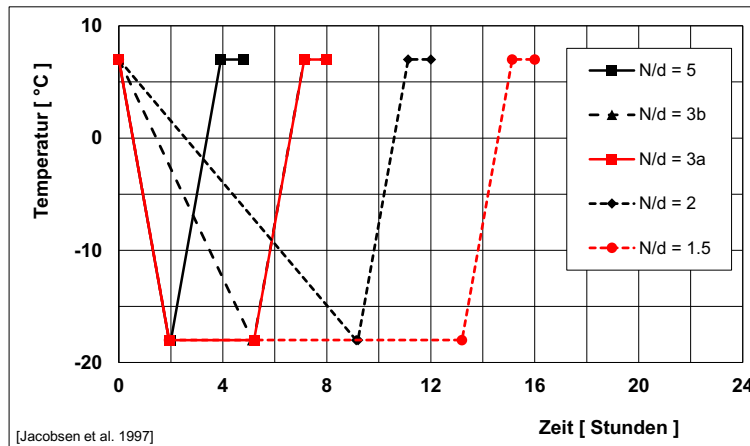


Abb.5 Zeit-Temperatur-Verläufe bei den Laboruntersuchungen von [Jacobsen 1997].

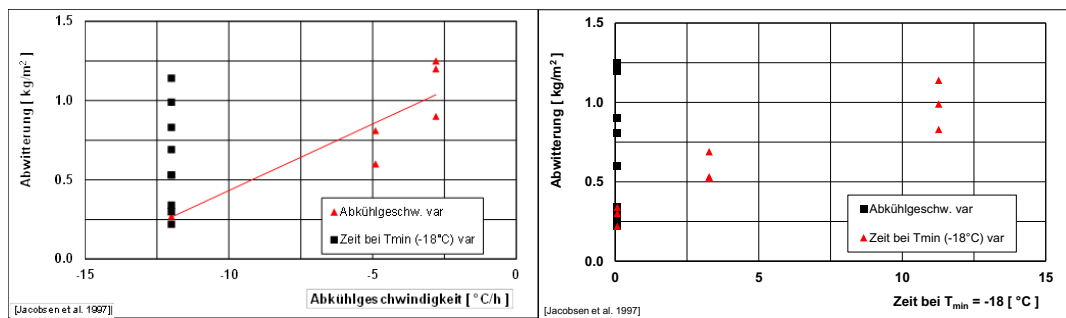


Abb.6 Abwitterung in Abhängigkeit von Abkühlgeschwindigkeit (links) und von der Zeit bei der Tiefsttemperatur $T_{\min}$ von -18°C . Daten von [Jacobsen 1997] (rechts).

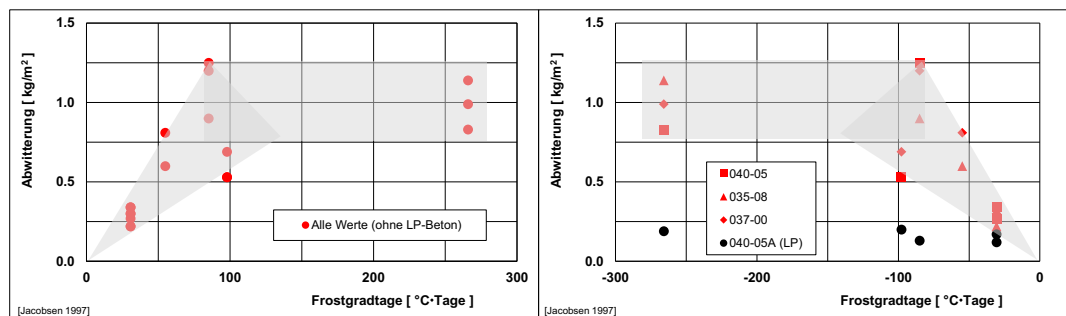


Abb.7 Abwitterung in Abhängigkeit von der Zeit unter 0°C (links) und von den Frostgradtagen (rechts). Daten von [Jacobsen 1997].

2.3 Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf das Bauwerk

In Schweden wurde die Übertragbarkeit der schwedischen Plattenprüfung auf das Verhalten der Betone in der Praxis in langjährigen Feldversuchen untersucht [Utgenannt 2010, Helsing 2014]. Die Ergebnisse in den **Abb.8** und **Abb.9** zeigen, dass die Betone mit der Prüfung mehrheitlich richtig bewertet werden (Quadrant II und III). Einige Betone hingegen wurden in der Prüfung zu schlecht (Quadrant I), einige wenige zu gut (Quadrant IV) bewertet. Die Ergebnisse im Quadrant I sind auf der sicheren, jene im Quadrant IV auf der unsicheren Seite. Anzumerken ist, dass die Abwitterung nach 14 Jahren bei den meisten Betonen im Vergleich zu den Werten nach 5 und 7 Jahren nicht mehr stark zugenommen hat.

Bei einem frosttaumittelbeständigen Beton darf bei der Laborprüfung [SS 2005] die Abwitterung max. $1'000 \text{ g/m}^2$ betragen [Utgenannt 2010]. Die in **Abb.8** bei 1.5 Vol.-% eingetragene Grenze für die Bauwerksbetone zwischen Quadrant III und IV entspricht einer Abwitterung von 600 g/m^2 . Die Laborgrenze von $1'000 \text{ g/m}^2$ ergäbe einen höheren Wert (ca. 2.5 Vol.-%), wie es vermutlich in **Abb.9** eingetragen ist.

In Deutschland wurden ähnliche Untersuchungen durchgeführt, wobei als Prüfung das CDF-Verfahren verwendet wurde [Siebel 2005, Stark 2005, Huss 2006, Müller 2009, Bast 2009, Müller 2010]. Allerdings stehen keine langjährigen Ergebnisse zur Verfügung. Viele Untersuchungen wurden zur Frage der Wassersättigung der Betone unter unterschiedlichen Expositionsbedingungen durchgeführt.

Auch in der Schweiz ist bisher nur eine längerfristig angelegte Untersuchung, nämlich jene die im Rahmen dieses Vorgängerprojektes durchgeführt worden [Werner 2016].

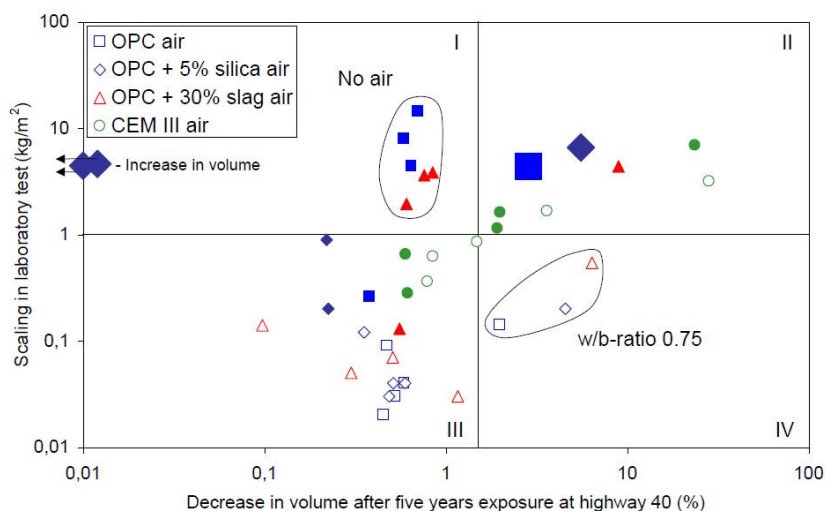


Abb.8 Abwitterung in der Plattenprüfung vs. Verhalten unter natürlicher Beanspruchung [Utgenannt 2010]. Die Ergebnisse nach 7-jähriger Auslagerung sind in [Siebel 2005] enthalten. Sie sind sehr ähnlich. Ausgefüllte Symbole: Betone ohne LP-Bildner, offene Symbole: Betone mit LP-Bildner, vergrößerte Symbole: Betone mit innerer Schädigung

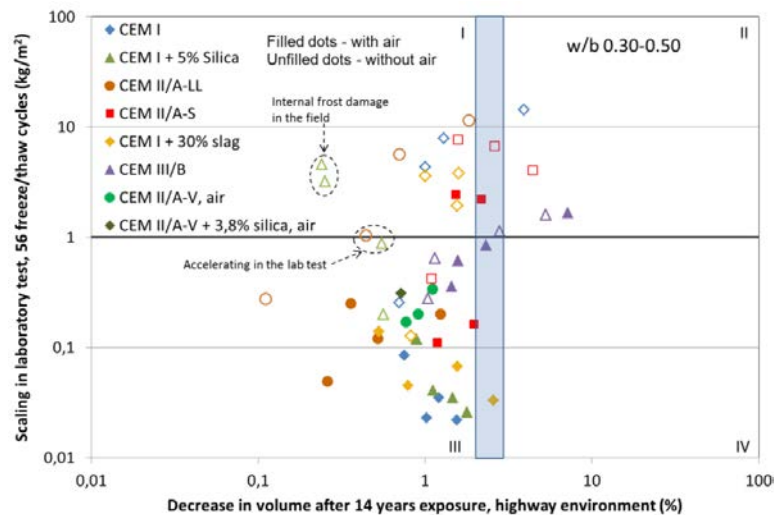


Abb.9 Abwitterung in der Plattenprüfung vs. Verhalten unter natürlicher Beanspruchung [Helsing 2014]. Ergebnisse nach 14 Jahren. Weitere Angaben siehe Legende zu **Abb.8**.

Aus den vielen vorhandenen Labor- und Felduntersuchungen kann keine gesicherte Bewertung aller möglichen Einflüsse vorgenommen und eine Rangliste deren Bedeutung für die Frosttaumittelschädigung des Bauwerksbetons erstellt werden. Mit der **Tab. 3** wird versucht, die heutigen Kenntnisse zusammenzufassen. Die Einflüsse, deren Bedeutung als gross erachtet wird, werden im **Kap. 3** mit besonderer Aufmerksamkeit betrachtet.

Tab. 3 Überblick über die wichtigsten Einflüsse auf die Frosttaumittelschädigung

Parameter	Bedeutung der Parameter am Bauwerk
Anzahl der Frostwechsel	Gross bis gering. Die Bedeutung ist zu Beginn gross, nimmt aber mit der Zeit ab, da die Anzahl der potenziellen Schwachstellen im Beton abnimmt. Nach einigen harten Wintern spielt dieser Einfluss kaum mehr eine Rolle.
Temperatur vor dem Frostwechsel	Gering.
Wasser/Taumittel auf / im Beton vor dem Abkühlen/Gefrieren (hoher Wassersättigungsgrad)	Voraussetzung für eine Schädigung bei einem Forstereignis
Abkühl- bzw. Gefriereschwindigkeit des Betons	Eher gering. Variiert in der Praxis nur in einem sehr beschränkten Rahmen.
Tiefsttemperatur	Sehr gross.
Dauer der Frostphase	Gross. Bei kurzer Dauer gefriert der Beton nicht. Bei längeren Frostphasen gefriert der Beton auch in tieferen Schichten.
Aufwärm- bzw. Auftaugeschwindigkeit des Betons	Eher gering. Variiert in der Praxis nur in einem sehr beschränkten Rahmen.
Temperatur nach dem Frostwechsel	Gering.
Dauer der Tauphase	Mittel. Bei kurzen Auftauphasen vor dem nächsten Frostwechsel taut der Beton nicht auf. Sie muss wohl ungefähr so lange sein wie die vorhergehende Frostphase.
Wasser/Taumittel auf Beton nach dem Auftauen	Voraussetzung für eine Schädigung bei einem Forstereignis

Über die zeitliche Entwicklung der Frosttaumittelschädigung liegen Ergebnisse von Laborprüfungen vor sowie, allerdings deutlich weniger, von Feldversuchen mit Prüfkörpern (siehe z.B. **Abb.8** und **Abb.9** und [Werner 2016]). Dokumentierte Ergebnisse von realen Bauteilen fehlen aber weitestgehend.

In aller Regel zeigt sich, dass das Schadensausmass sich mit der Zeit verlangsamt. Eine sich beschleunigende Abwitterung auf hohe Werte wird in der Praxis nur bei Betonen mit, aus heutiger Sicht, klar ungenügendem Frosttaumittelwiderstand beobachtet.

3 Analyse von Wetterdaten und Beurteilung der Härte eines Winters

3.1 Zielsetzung

Das Ziel der Analyse von Wetterdaten war es in erster Linie, die Frostbelastung bzw. die Härte der Winter im durchgeführten Feldversuch in Thal zwischen St. Gallen und St. Margrethen einzuordnen und mit anderen Standorten zu vergleichen. Wie im **Kap. 0** ausgeführt, konnte keine einzelne Kenngrösse identifiziert werden, um die Frosttaumittelbelastung von Beton zu charakterisieren. Die Analyse musste deshalb breiter gefasst werden.

3.2 Begriffe

In diesem Bericht werden vorab Wetter- und weniger Klimadaten für die Analyse verwendet.

Gemäss der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ist das Klima die Statistik des Wetters über einen Zeitraum, der lang genug ist, um diese statistischen Eigenschaften auch bestimmen zu können. Während das Wetter den physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort beschreibt, ist Klima erst dann richtig gekennzeichnet, wenn die Wahrscheinlichkeit für Abweichungen vom Mittelwert angegeben werden kann, also auch Extremwerte Teil der Statistik sind. Zur Beschreibung des Klimas wird in der Regel eine Zeitspanne von 30 Jahren als Bezugszeitraum herangezogen. Die übliche Einteilung in Klimazonen folgt überwiegend dem Jahresgang der Temperatur und des Niederschlags.

3.3 Frost- und Eistage

Erste Hinweise für die Frostbelastung können den Normwerten von MeteoSchweiz für die Jahre 1981 – 2010 entnommen werden. In **Abb.10** (oben links) sind die Jahresmittelwerte der Temperatur sowie jene der Wintermonate Dezember, Januar und Februar über die Höhe über Meer dargestellt. Die Jahresmittelwerte streuen deutlich weniger stark wie die Monatsmittelwerte. Die starke Abhängigkeit von der Höhe über Meer ist offensichtlich. Interessant ist, dass bei den Mittelwerten eine lineare Abhängigkeit vorhanden ist, bei den Monatswerten zwischen ca. 800 bis 1'500 m demgegenüber eine deutliche schwächere Abhängigkeit festzustellen ist.

Im Vergleich zu den Mittelwerten streuen die mittleren Minimum-Temperaturen **Abb.10** (oben, rechts) stärker und liegen erkennbar tiefer (Mittel -4°C, bis max. -8.6°C).

Umgekehrt zur Temperatur nimmt die Anzahl der Frosttage (Minimum tiefer als 0°C) und der Eistage (Maximum tiefer als 0°C) mit zunehmender Höhe über Meer zu (**Abb.10**, oben links). Diese zeigen eine deutliche Zunahme mit der Höhe über Meer. Die Streuung ist beträchtlich und bei den Frosttagen grösser als bei den Eistagen. Auffallend ist, dass die Anzahl Frosttage mehr oder weniger linear mit abnehmender Temperatur ansteigt. Die Anzahl der Eistage weist in einer Höhe um 1000 m über Meer eine geringere Abhängigkeit von der Höhe aus. Ab etwa 1500 m Höhe über Meer steigt sie dann wieder stärker an.

Die Anzahl der Frosttage ist abhängig von der Höhe über Meer und bis über zehnmal grösser als jene der Eistage (**Abb.10**, unten links). Im Mittel über alle Stationen treten 130 Frosttage, aber nur 42 Eistage auf (Verhältnis 3:1). Das Verhältnis nimmt mit zunehmender Höhe über Meer ab. Es liegt ohne die Extremwerte über 10, welche z.B. im Wallis und

Tessin auftreten können, im Mittel bei Verhältnis von rund 4:1 (**Abb.10**, unten rechts). In grosser Höhe bzw. dort, wo die Temperatur nie über 0°C ansteigt, sind die Werte dann identisch.

Daraus ist zu schliessen, dass die Frostbelastung von Betonbauten häufiger aus täglichen Schwankungen als aus längeren Frostperioden besteht.

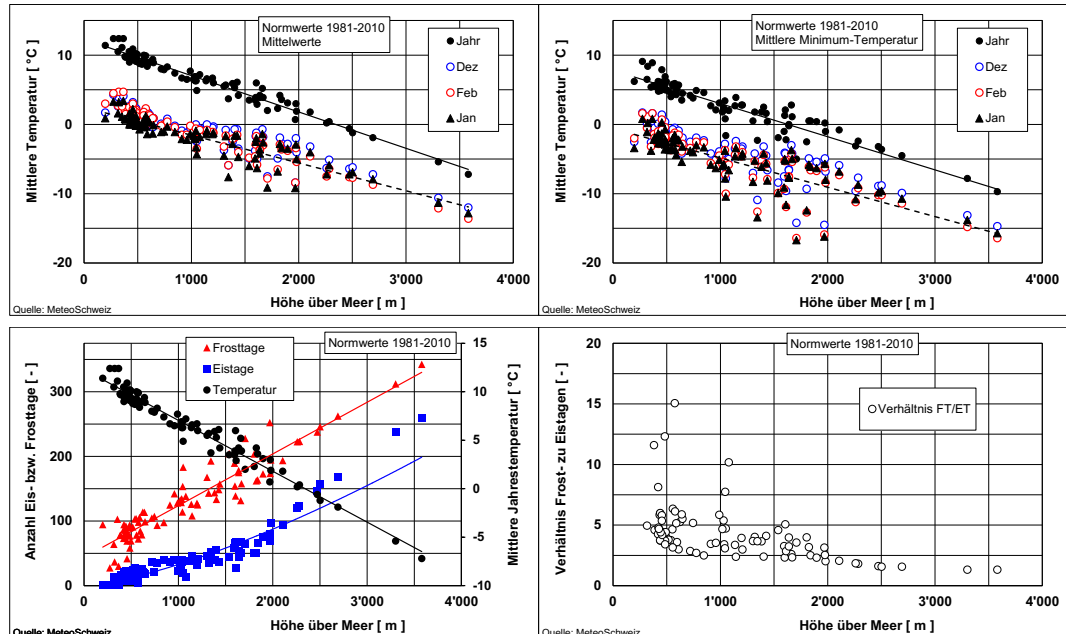


Abb.10 Abhängigkeit der Mittelwerte (oben links) und der mittleren Minimum-Werte (oben rechts) der Jahres- und einzelner Monatstemperaturen (Normalwerte 1981-2010) sowie der Eis- und Frosttage (unten links) und dem Verhältnis Frost- zu Eistagen (unten rechts) von der Höhe über Meer. Daten von MeteoSchweiz.

3.4 Auswahl der Wetterstationen

Um die Frostereignisse in der Schweiz genauer zu charakterisieren, wurden die Wetterdaten verschiedener Wetterstationen genauer untersucht. Als Beobachtungsperiode wurde die Zeit vom 01.07.2012 – 31.05.2019 gewählt. Diese Periode deckt die Zeit der Auslagerungsversuche ab, die im Herbst 2012 begannen und im Juni 2019 mit der letzten Begehung mit Probenahme (vorläufig) abgeschlossen wurden.

Für die Analyse wurden unter Berücksichtigung der Höhe über Meer verschiedene, über die Schweiz verteilte Wetterstationen von MeteoSchweiz ausgewählt. Eine erste Auswahl der Stationen erfolgte so, dass diese einen Überblick über die Schweiz erlauben sollten. Leider waren bei einigen der ursprünglich ausgewählten Wetterstationen die Daten in der Beobachtungsperiode unvollständig (z.B. keine 1h-Werte, kein vollständiger Datensatz). Es mussten deshalb zum Teil alternative Standorte gesucht werden. Schlussendlich wurden die Daten der in der **Tab. 4** aufgeführten Wetterstationen ausgewertet.

Tab. 4 Ausgewählte Wetterstationen für die Analyse der Wetterdaten.

Ort	Abk.	Höhe, m ü.M.	Datenquelle
Altenrhein	ARH	398	MeteoSchweiz
Niederlenz	NL	413	Private Station von R. Bucher
Sion	SIO	482	MeteoSchweiz
Meiringen	MER	588	MeteoSchweiz
St. Gallen	STG	775	MeteoSchweiz
Andeer	AND	987	MeteoSchweiz
San Bernardino	SBE	1638	MeteoSchweiz

3.5 Charakterisierung von Frostereignissen

In **Abb. 11** sind beispielhaft vier verschiedene Frostereignisse mit unterschiedlicher Dauer und Tiefsttemperaturen dargestellt. Es gibt sehr kurze (Frosttage) bis sehr lange Frostphasen mit einzelnen oder mehreren Eistagen hintereinander. Die Tageszyklen sind sehr gut erkennbar.

Bei kurzen Frostphasen kann der Beton wegen der verzögerten Temperaturänderung (Wärmekapazität) gar nicht oder nur bis in eine sehr geringe Tiefe gefrieren. Oft folgt auf die eine Frostphase innert weniger Stunden bereits die nächste, ohne dass der Beton auftauen kann oder es finden Temperaturzyklen unter dem Gefrierpunkt statt.

Frosttage, wie sie von der MeteoSchweiz gezählt werden, sind nicht gleichbedeutend mit Tagen mit einem Nulldurchgang, deren Anzahl als wichtige Kenngrösse für die Beurteilung der Frosteinwirkung auf Beton erachtet wird. In diesem Bericht wird einem Frostereignis ein Nulldurchgang zugeordnet (damit sind die Zahlenwerte direkt vergleichbar), obwohl ein einzelnes Frostereignis oder auch mehrtägige Frostperioden grundsätzlich zwei Nulldurchgänge aufweisen (Abfall der Temperatur unter 0°C und Wiederanstieg über 0°C).

Die gezeigte Variabilität der Frostereignisse illustriert die Schwierigkeit, auf einfache Art die Intensität der Frosteinwirkung zu quantifizieren bzw. den betonschädigenden Einfluss zu charakterisieren.

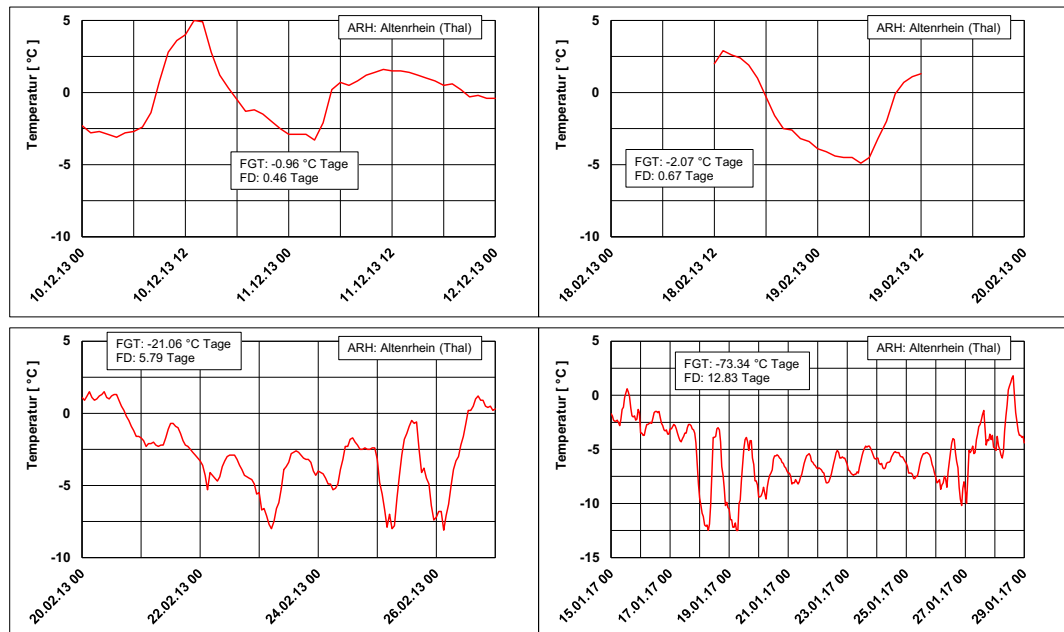


Abb.11 Verlauf einzelner Frostereignisse mit unterschiedlicher Dauer und Tiefsttemperaturen. Wetterstation Altenrhein (ARH).

Für die vertiefte Analyse der Wetterdaten wurde nicht das Kalenderjahr zu Grunde gelegt, sondern das Winterhalbjahr in der Überzeugung, dass ein einzelner Winter so besser charakterisiert werden kann. Im Bericht wird die genannte Zeit vereinfachend als Winterhalbjahr bezeichnet, obwohl damit die Zeit von Sommer zu Sommer, d.h. vom 1. Juli bis 30. Juni gemeint ist.

Bei der Auswertung wurden über die Auswertungsperiode (7 Jahre) die Einzelwerte und Mittelwerte (inkl. Standardabweichung, Minimal- und Maximalwerte) der folgenden Parameter ausgewertet:

- Lufttemperatur (LT), Luftfeuchtigkeit (RL) und Niederschlag (NS)
- Anzahl Nulldurchgänge
= Anzahl der Ereignisse mit Lufttemperaturen unter 0°C
= Anzahl Frostereignisse
- Frostdauer: Dauer der einzelnen Ereignisse mit Temperaturen $\leq 0^\circ\text{C}$ in Tagen und % pro Jahr (Winterhalbjahr)
- Frostgradtage (siehe **Kap. 3.6**): Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^\circ\text{C}$ für ein Einzelereignis oder als Summe pro Jahr (Winterhalbjahr).

3.6 Frostgradtage

In Anlehnung an die Heizgradtage wird in dieser Arbeit der neue Parameter „Frostgradtage“ eingeführt, um Frostereignisse oder die Härte von Wintern zu beschreiben.

Unter Frostgradtage wird das Integral über die Zeit mit Temperaturen $\leq 0^\circ\text{C}$ pro Einzelereignis verstanden (**Abb.12**). Das Integral wird aus den Stundenwerten den Wetterdaten berechnet und in $^\circ\text{C}\cdot\text{Tage}$ umgerechnet. Aus den Einzelwerten kann danach die Summe pro Jahr (Winterhalbjahr) berechnet.

Die Frostgradtage können als Intensität eines Einzelereignisses, die Summe der Frostgradtage als Härte eines Winters betrachtet werden. Man kann davon ausgehen, dass es einen Grenzwert für die Frostgradtage gibt, oberhalb dem keine Frost- bzw. Frostauszugschäden entstehen

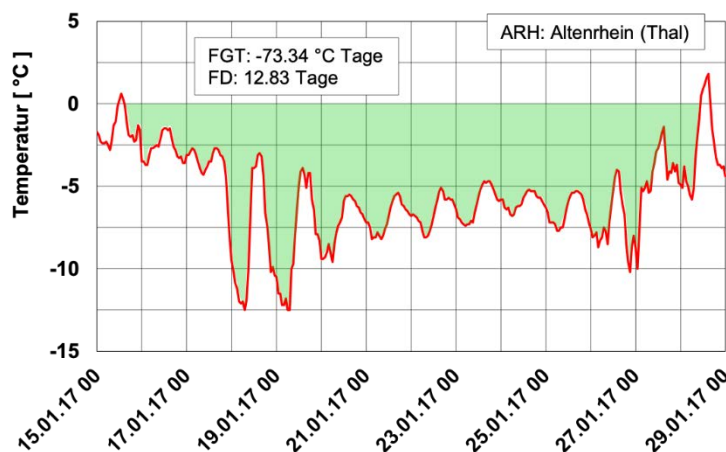


Abb.12 Ermittlung der Frostgradtage (grüne Fläche = Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^\circ\text{C}$) aus dem Temperatur-Zeit-Verlauf.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Stationen Altenrhein (nächste Wetterstation zum Auslagerungsort) und San Bernardino (kälteste der ausgewählten Wetterstationen) im Detail dargestellt. In den zusammenfassenden Betrachtungen werden auch die Ergebnisse der anderen Wetterstationen aufgeführt.

3.7 Altenrhein (ARH)

Für Altenrhein (398 m ü.M.) ist in **Abb.13** (oben) die Dauer der Einzelereignisse mit Temperaturen $\leq 0^\circ\text{C}$ gegen die Frostgradtage dargestellt (zwei verschiedene Skalen). Daraus kann entnommen werden, dass die überwiegende Anzahl der Ereignisse kürzer sind als einen Tag.

Aus **Abb.13** (Mitte) ist ersichtlich, dass 80% der Frostgradtage – abgesehen vom Winter 2012/2013 – kleiner sind $-1^\circ\text{C}\cdot\text{Tage}$, und über 90% kleiner als $-2^\circ\text{C}\cdot\text{Tage}$. Einzelne Ereignisse fallen auf, wie z.B. die Kälteperiode vom 15. – 21.01.2017.

In **Abb.13** (unten links) ist die jährliche Frostdauer gegen die jährlichen Frostgradtage dargestellt. Die Frostdauer liegt, je nach Winter zwischen etwa 10 und 50 Tagen/Jahr. Die Frostgradtage variieren zwischen -20 und $-140^\circ\text{C}\cdot\text{Tage/Jahr}$.

Zwischen der Anzahl der Nulldurchgängen und den Frostgradtagen besteht kein Zusammenhang (**Abb.13**, unten rechts).

Aus **Abb.14** (links) geht hervor, dass die meisten Frostereignisse über der Tiefsttemperatur von $\geq -10^\circ\text{C}$ und $\geq -20^\circ\text{C}\cdot\text{Tage}$ liegen. Betrachtet man die Jahreswerte (rechts) zeigt sich, dass in allen Wintern Frostereignisse mit Tiefsttemperaturen zwischen -10 und -15°C auftreten.

Die mittlere Temperatur der härtesten jährlichen Frostereignisse liegt zwischen -3.5 bis -5.9°C (Mittelwert: -4.4°C).

Zwischen Frostdauer und der Tiefst- bzw. der mittleren Temperatur zeigt sich ein gewisser Zusammenhang nur bei den wenig intensiven Einzelereignissen (Tiefsttemperatur über -5°C und mittlere Temperatur über -2.5°C , Frostdauer kürzer als 1 Tag) (**Abb.15** oben und Mitte). Die Anzahl der Ereignisse mit Tiefsttemperaturen unter -5°C und einer Frostdauer von >1 Tag ist klein.

Die mittlere Temperatur beträgt etwa die Hälfte der Tiefsttemperatur (**Abb.15**, unten).

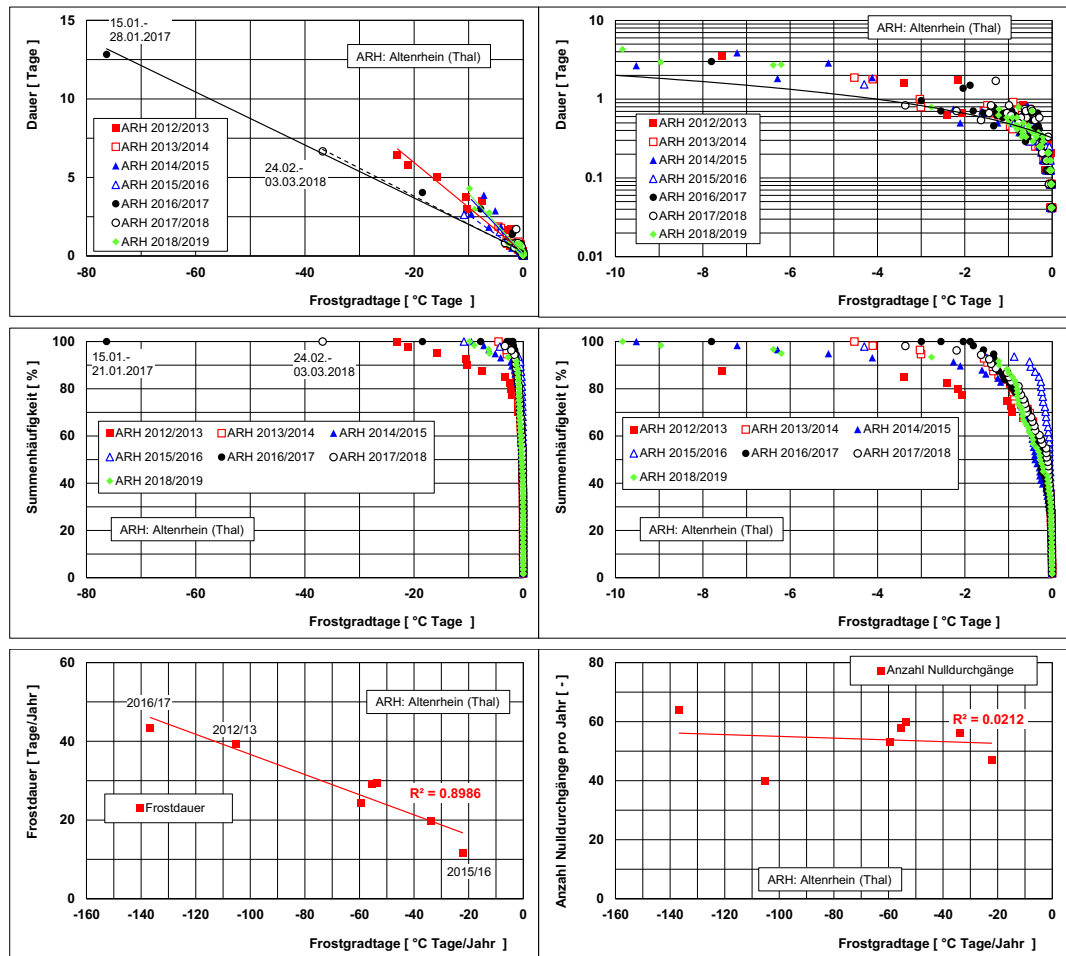


Abb.13 Frostdauer und Intensität von Einzelereignissen (oben), Summenhäufigkeit von Einzelereignissen (Mitte) und Zusammenhang zwischen Frostdauer und Jahresmittelwerten von Frostgradtagen (unten links) sowie Zusammenhang zwischen Anzahl der Nulldurchgänge und den Frostgradtagen.

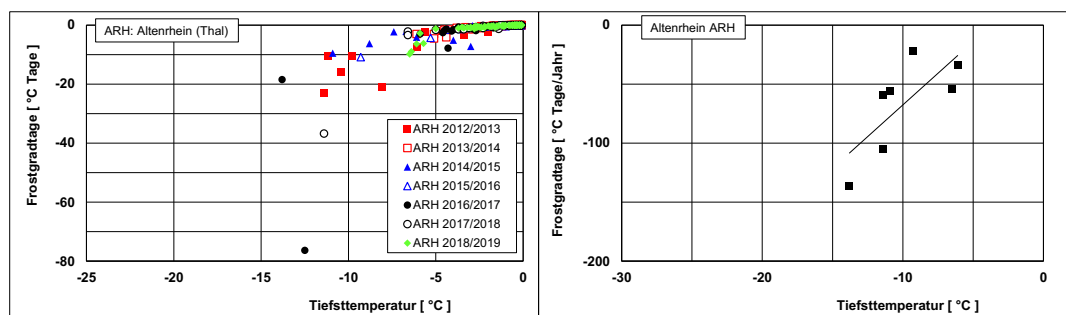


Abb.14 Frostgradtage vs. Tiefsttemperatur (Einzelereignisse pro Winter) (links) und Frostgradtage pro Jahr vs. Tiefsttemperatur im jeweiligen Jahr.

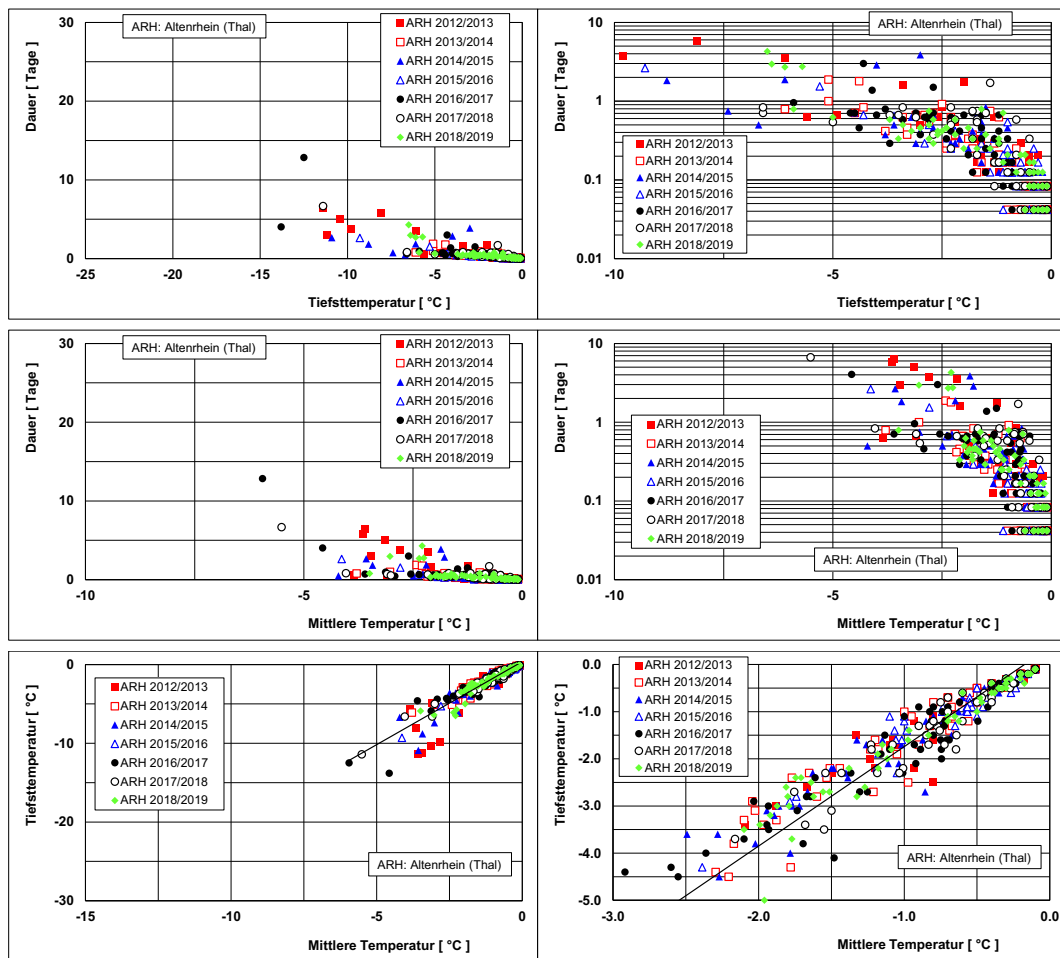


Abb.15 Zusammenhang zwischen Dauer der Frostgradtage und der Tiefst- bzw. der mittleren Lufttemperatur (oben und Mitte) und zwischen Tiefst- und mittlerer Temperatur von einzelnen Frostereignissen (unten).

3.8 San Bernardino (SBE)

Bei der Station San Bernardino können im Wesentlichen die gleichen Feststellungen gemacht werden wie bei der Station Altenrhein, allerdings mit dem Unterschied, dass die Winter viel strenger sind. Dies zeigen alle Parameter, die die Intensität eines Winters charakterisieren (**Abb.16 bis Abb.18**).

Die mittlere Temperatur der härtesten jährlichen Frostereignisse liegt zwischen -6.5 bis -11.8 °C (Mittelwert: -7.9 °C). Diese Werte sind deutlich tiefer als in Altenrhein.

Aus **Abb.17** (links) geht hervor, dass Frostereignisse mit Tiefsttemperaturen $\leq -10^{\circ}\text{C}$ und Frostgradtagen mit Werten $\leq -25^{\circ}\text{C}\cdot\text{Tage}$ in allen Jahren immer wieder auftreten. Betrachtet man die Jahreswerte (rechts) zeigt sich, dass in drei von sieben Wintern Frostereignisse mit Tiefsttemperaturen unter -15°C auftreten.

So beträgt die Anzahl der Nulldurchgänge ca. 100, d.h. 40 mehr als in Altenrhein. Die jährliche Frostdauer liegt in der Beobachtungsperiode mit mehr als 100 Tagen, d.h. bei fast 30% des Winterhalbjahres (Altenrhein 8%). Die meisten Frostereignisse weisen eine Tiefsttemperatur über -7.5°C , eine mittlere Temperatur über -5°C und eine Frostdauer von weniger als einem Tag auf (**Abb.18** oben und Mitte). Die Anzahl der Tage mit einer Frostdauer von mehr als 1 Tag ist erheblich grösser als in Altenrhein.

Die Anzahl der Frostgradtage mit Werten unter $-2\text{ °C}\cdot\text{Tage}$ sind in San Bernardino sehr häufig (ca. 20-35%). In Altenrhein ist sie in der Regel mit $<10\%$ deutlich kleiner (Ausnahme: Winter 2012/2013 mit über 20% der Werte).

Auch bei der Station San Bernardino beträgt die mittlere Temperatur etwa die Hälfte der Tiefsttemperatur (**Abb.18**, unten).

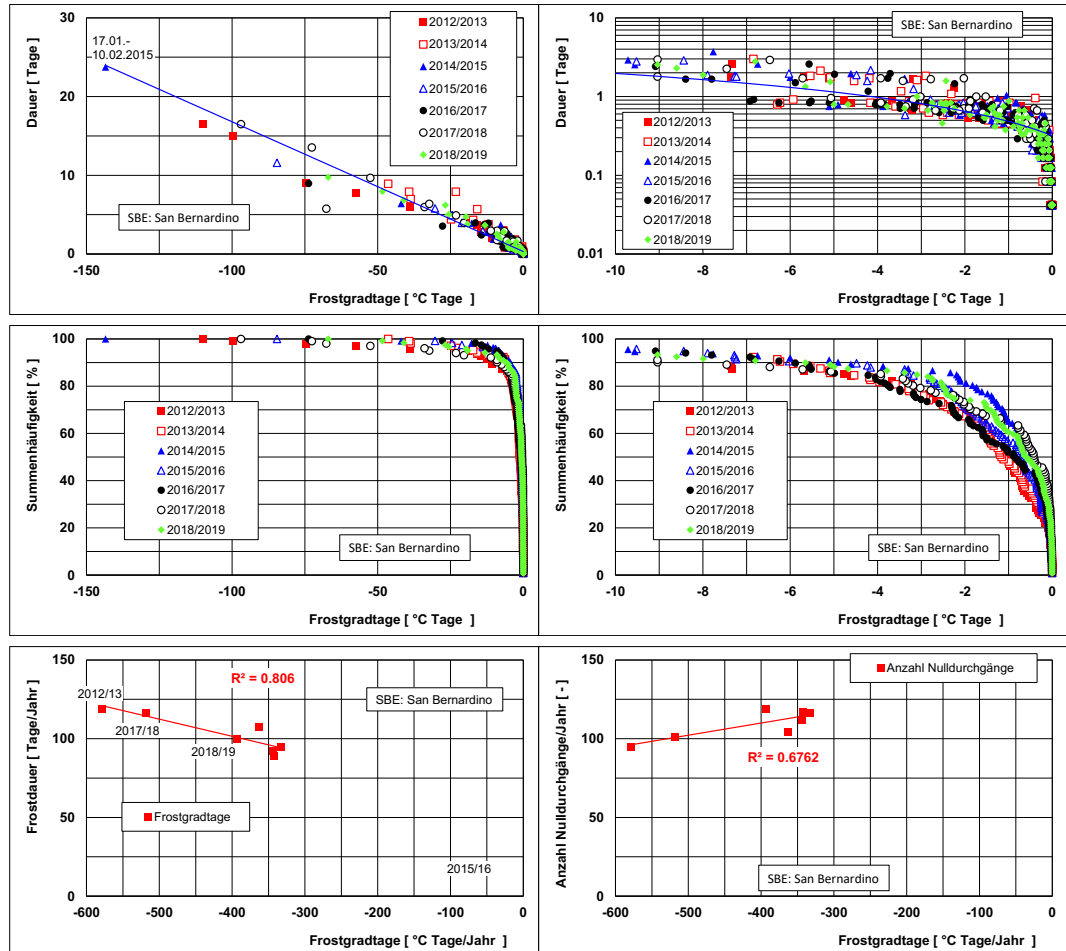


Abb.16 Frostdauer und Intensität von Einzelereignissen (oben), Summenhäufigkeit von Einzelereignissen (Mitte) und Zusammenhang zwischen Frostdauer und Jahresmittelwerten von Frostgradtagen (unten links) sowie Zusammenhang zwischen Anzahl der Nulldurchgänge und den Frostgradtagen.

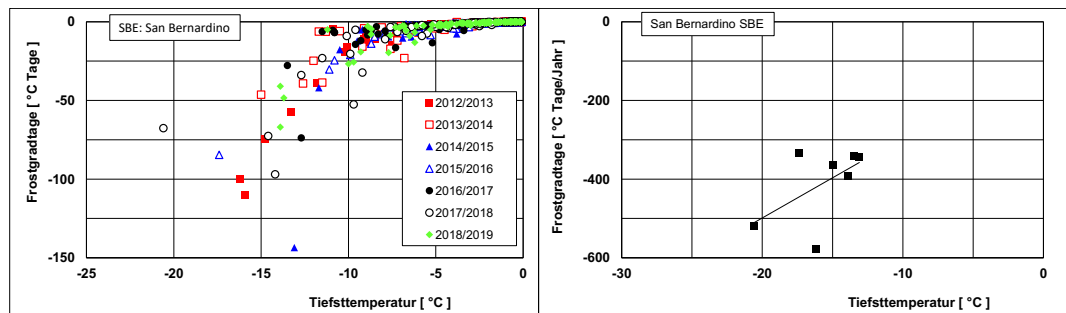


Abb.17 Frostgradtage vs. Tiefsttemperatur (Einzelereignisse pro Winter) (links) und Frostgradtage pro Jahr vs. Tiefsttemperatur im jeweiligen Jahr.

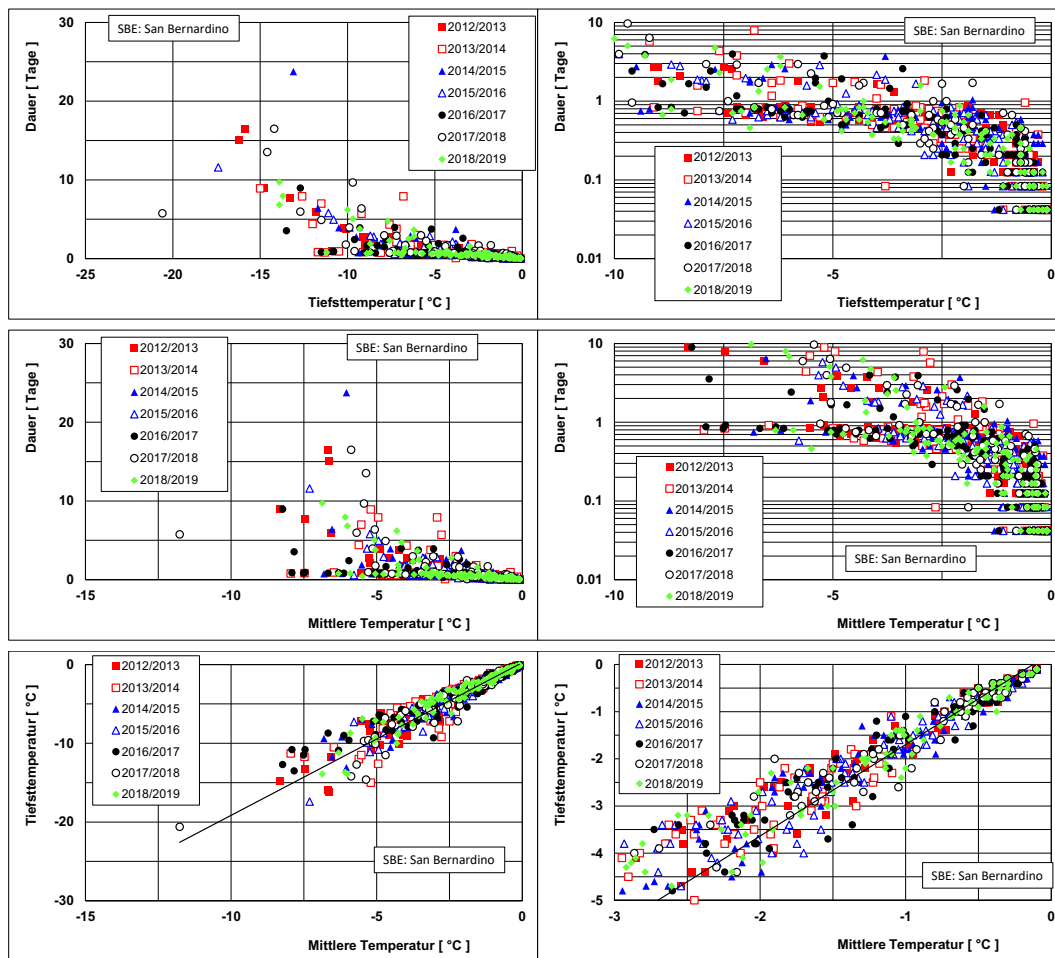


Abb.18 Zusammenhang zwischen Dauer der Frostgradtage und der Tiefst- bzw. der mittleren Lufttemperatur (oben) und zwischen Tiefst- und mittleren Temperatur von einzelnen Frostereignissen (unten).

3.9 Übersicht und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die folgenden Tabellen fassen die Ergebnisse der Auswertung der verschiedenen Wetterstationen zusammen. In der **Tab. 5** sind Werte für die Lufttemperatur (LT) und die relative Luftfeuchtigkeit (RL), in der **Tab. 6** die Parameter zur Charakterisierung der Intensität des Winters zusammengestellt. In den **Abb.19 bis Abb.22** sind einige Parameter in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchtigkeit dargestellt.

Neben den üblichen Größen wurden auch die Anzahl Nulldurchgänge (= ein Frostereignis), die Frostdauer (aufsummierte Frostdauer aller Kälteereignisse pro Winterhalbjahr) und die Frostgradtage berechnet.

Die Anzahl Nulldurchgänge liegt zwischen der Anzahl Eis- und Frosttagen.

Bei Frostperioden wird jeder einzelne Tag als Frosttag gezählt. Neben den mehrtägigen Frostperioden könnten theoretisch während eines Tages auch mehrere kleine bis sehr kleine Frostereignisse auftreten. Damit könnte (theoretisch) die Anzahl der Frosttage grösser oder kleiner sein als die Anzahl der Nulldurchgänge. In Wirklichkeit aber ist die Anzahl der Frosttage bei allen betrachteten Wetterstationen deutlich grösser als die mittlere Anzahl der Nulldurchgänge, ja sogar grösser als die Maximalwerte (siehe **Tab. 6**). In allen betrachteten Standorten ist die Anzahl der Eistage tiefer als die Anzahl der

Nulldurchgänge. Daraus ist zu schliessen, dass in jedem Winter einige mehrtägige Forstperioden auftreten.

Tendenziell folgen die Winterparameter der Höhe über Meer. Ausnahmen stellen Sion (höhere LT und tiefere RL sowie eine kürzere Frostdauer und weniger Frostgradtage) und St. Gallen (geringere Anzahl Nulldurchgänge) dar.

Die Tiefsttemperatur der Luft nimmt mit der Höhe über Meer ab. Sie liegt zwischen -15 und über -20°C und ist rund 22°C tiefer als der Jahresmittelwert der Luft. Der mittlere Minimalwert der Lufttemperatur liegt im Mittel rund +3°C höher als der Minimalwert.

Die in **Abb.20** erkennbare Abflachung der Anzahl der Nulldurchgänge bei grosser Höhe ist zu erwarten, da sie mit zunehmender Frostdauer bzw. mit zunehmender Anzahl an Eistagen einen maximalen Wert erreicht.

Zwischen Frostdauer und Frostgradtagen besteht ein erwartungsgemässer Zusammenhang (**Abb.21**).

Die neue Kennzahl Frostgradtage eignet sich gut für einen Vergleich von Wetterstationen bzw. von verschiedenen Gegenden der Schweiz (**Abb.21**) und sie erlaubt, andere Standorte rasch und sehr einfach einzuordnen. Die neben Altenrhein und San Berardino zusätzlich ausgewerteten Stationen lassen sich sehr gut einordnen.

Mit den Frostgradtagen und der Tiefsttemperatur (**Abb.22**) können die Strenge der Winter charakterisiert und verglichen werden.

Tab. 5 Lufttemperatur (LT) und relative Luftfeuchtigkeit (RL) in der Periode 01.07.2012 – 31.05.2019 (7 Jahre)

Station	Höhe, m ü.M.	Minimalwert	Mittlerer Minimalwert	Mittelwert	Streuung	Maximalwert
Lufttemperatur, °C						
ARH	398	-13.8	-9.9	10.5	7.8	36.3
NL	413	-13.2	-10.4	10.5	8.3	37.4
SIO	482	-11.4	-9.1	11.3	8.7	37.4
MER	589	-15.4	-12.8	9.0	8.2	33.2
STG	776	-14.8	-10.8	9.1	7.7	33.0
AND	987	-16.7	-14.6	7.7	8.1	32.5
SBE	1638	-20.6	-15.7	4.7	7.3	25.7
Rel. Luftfeuchtigkeit, %						
ARH	398	16.0		78.3	15.7	100
NL	413	20.0		76.1	17.2	100
SIO	482	11.6		67.7	19.2	100
MER	589	14.5		79.2	17.6	100
STG	776	14.5		75.2	17.2	100
AND	987	10.9		73.4	18.1	100
SBE	1638	7.2		72.0	19.5	100

Tab. 6 Anzahl Nulldurchgänge, Frostgradtage, Frostdauer in Tagen pro Jahr (FD/Tage) und in % pro Jahr (FD/%). ¹⁾ Die Werte von Niederlenz (NL) stammen von einer privaten Wetterstation.

Station	Höhe, m ü.M.	Minimal- werte	Mittelwerte	Streuung	Maximal- werte	Normwerte (Kalenderjahr)	
Nulldurchgänge, -						Eistage	Frosttage
ARH	398	40.0	54.0	8.2	64.0	k.A.	k.A.
NL	413	44.0	56.7	8.4	68.0	17.0 ¹⁾	78.1 ¹⁾
SIO	482	63.0	71.9	5.6	80.0	7.6	93.6
MER	589	74.0	83.7	6.9	95.0	20.5	105.5
STG	776	47.0	55.4	5.7	62.0	34.6	93.4
AND	987	82.0	98.3	11.9	114.0	k.A.	k.A.
SBE	1638	95.0	109.1	9.2	119.0	54.0	175.1
Frostgradtage, °C Tage/Jahr							
ARH	398	-136.6	-66.7	40.4	-22.2		
NL	413	-132.0	-76.3	39.1	-31.0		
SIO	482	-155.0	-79.8	38.6	-33.8		
MER	589	-244.7	-158.7	56.9	-100.1		
STG	776	-254.2	-137.4	73.7	-49.6		
AND	987	-348.4	-238.5	68.0	-149.9		
SBE	1638	-578.2	-410.4	97.8	-333.3		
Frostdauer, Tage/Jahr							
ARH	398	11.7	28.1	10.9	43.4		
NL	413	16.5	33.2	11.8	48.7		
SIO	482	21.5	33.1	8.1	45.8		
MER	589	42.2	52.5	10.1	70.1		
STG	776	25.1	47.6	16.3	75.5		
AND	987	56.3	69.0	9.7	86.0		
SBE	1638	89.0	102.7	11.9	118.7		
Frostdauer, %/Jahr							
ARH	398	3%	8%	3%	12%		
NL	413	5%	9%	3%	13%		
SIO	482	6%	9%	2%	13%		
MER	589	12%	14%	3%	19%		
STG	776	7%	13%	4%	21%		
AND	987	15%	19%	3%	24%		
SBE	1638	24%	28%	3%	33%		

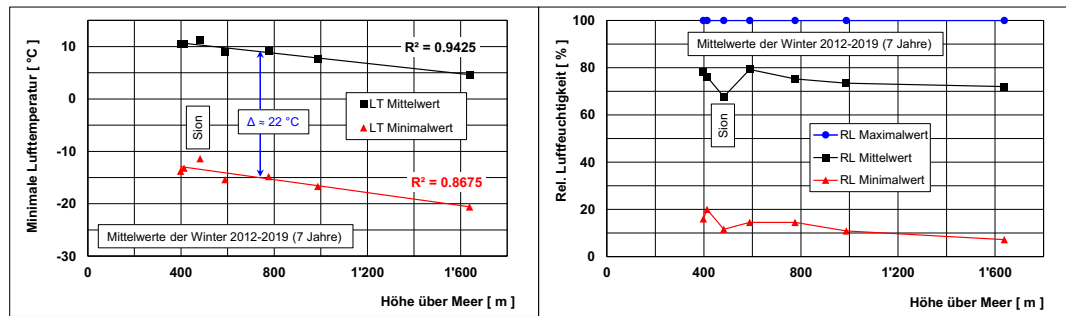


Abb.19 Lufttemperatur (LT) und relative Luftfeuchtigkeit (RL) in Abhängigkeit von der Höhe über Meer.

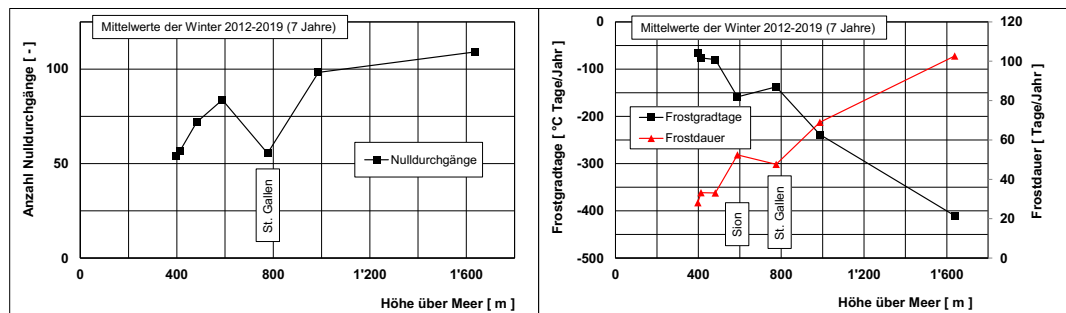


Abb.20 Anzahl Nulldurchgänge (links) und Frostgradtage und Frostdauer (rechts) in Abhängigkeit von der Höhe über Meer.

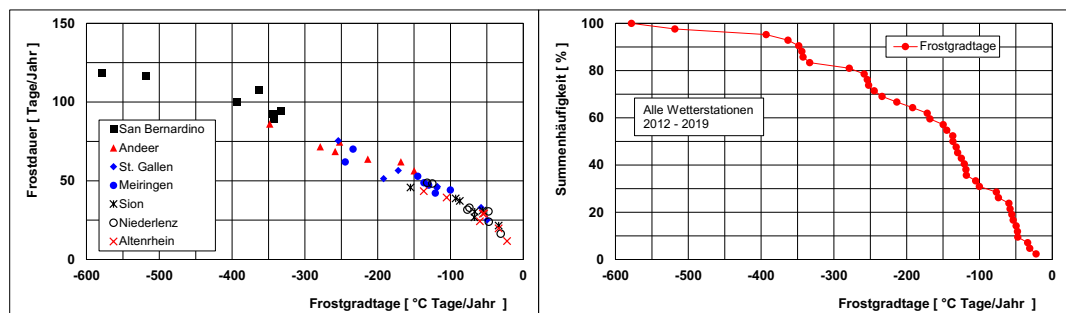


Abb.21 Zusammenhang zwischen der jährlichen Frostdauer und den jährlichen Frostgradtagen (links) und Summenhäufigkeit (rechts) der verschiedenen Wetterstationen (Jahresmittelwerte 2012-2019)

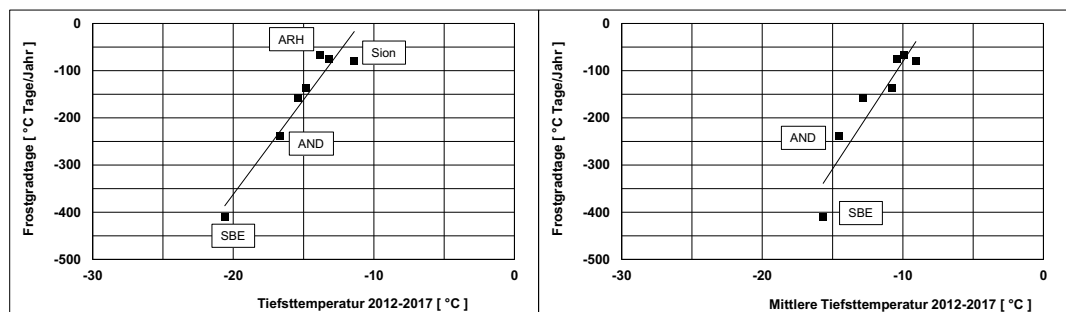


Abb.22 Mittelwerte der Frostgradtage pro Jahr vs. Tiefsttemperatur (Einzelereignisse über gesamte Messzeit) (links) und von der mittleren Tiefsttemperatur (rechts) für die verschiedenen Wetterstationen.

4 Korrelation zwischen Frostereignissen (ARH) und Salzaustrag

Die Angaben zum Schneeräumen und Salzaustrag (**Tab. 7**) wurden uns von Herrn Frischknecht, Werkhof Thal, zur Verfügung gestellt. Die mittlere Salzdosierung lag in der Beobachtungsperiode bei ca. 11 g/m². Die **Tab. 7** enthält weiter auch Angaben zur Frosteinwirkung.

In **Abb.23** sind verschiedene Grössen gegeneinander dargestellt. Erstaunlich ist, dass zwischen den Kenngrössen der Frosteinwirkung und den Räum- und Streusalzeinsätzen kein Zusammenhang besteht. Offenbar variieren die Gegebenheiten der Einzelereignisse oder der Frostperioden so stark, dass keine Tendenz ausgemacht werden kann. Ggf. könnte mit einer vertieften Analyse der Einzeleinsätze unter Einbezug der relativen Luftfeuchtigkeit (Glättegefahr) und der Niederschläge (Schnee und/oder Regen bei Temperaturen um 0°C) eine Verbesserung der Korrelation erzielt werden. In Anbetracht des Aufwandes und des geringen Nutzens wurde auf diese Analyse verzichtet.

Tab. 7 Angaben zum Streusalzeintrag für die Strecke St. Gallen – St. Margrethen und der Parameter zur Frosteinwirkung (Wetterstation Altenrhein)

Winter	Streu- einsätze	Räum- einsätze	Total Ein- sätze	Anteil Streuen / Total	Anzahl Nulldurch- gänge, -	Frostgrad- tage, °C Tage/Jahr	Frost- dauer, Tage/Jahr	Frost- dauer, %/Jahr
2012/2013	47	97	144	33%	40	-105.3	39.3	11%
2013/2014	51	29	80	64%	56	-33.8	19.8	5%
2014/2015	37	119	156	24%	58	-55.5	29.1	8%
2015/2016	52	77	129	40%	47	-22.2	11.7	3%
2016/2017	58	85	143	41%	64	-136.6	43.4	12%
2017/2018	86	71	157	55%	53	-59.5	24.3	7%
2018/2019	70	111	181	39%	60	-53.8	29.3	8%

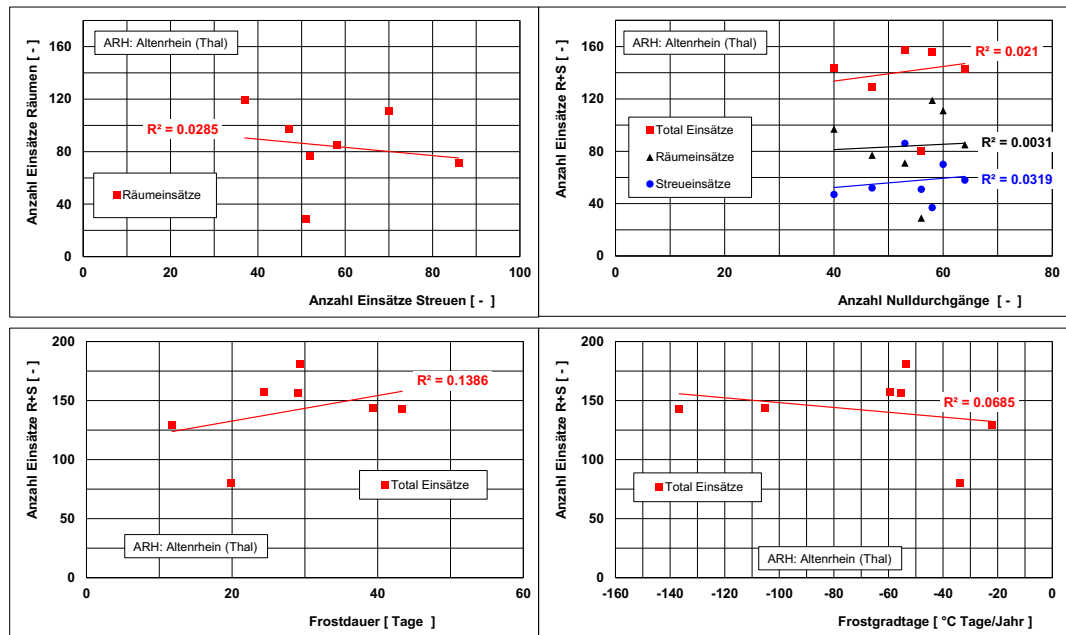


Abb.23 Anzahl Einsätze mit Räumen vs. Anzahl Einsätze mit nur Streuen (oben links) und Zusammenhang zwischen der Anzahl Einsätze mit Räumen oder Streuen und der Anzahl Nulldurchgänge (oben rechts) sowie der Frostdauer (unten links) und der jährlichen Frostgradtage (unten rechts).

In [Breitenstein 1996] wurde festgestellt, dass der Streusalzverbrauch (t/km) mit der Anzahl der Schneefalltage zunimmt. In [Roos 2011] wurde gezeigt, dass sich die Länge des schwarz geräumten Strassennetzes mit der Schneefallgrenze stark verändert (**Abb.24**). Mit der Höhe über Meer nimmt die Anzahl Tage mit Schnee zu. **Abb.25** zeigt die Anzahl für strenge Winter. Obwohl die Länge des Strassennetzes in den letzten Jahren nicht mehr wesentlich zugenommen hat, stieg gemäss den Verkaufszahlen der Schweizer Salinen AG der Einsatz von Streusalz tendenziell an (mit starken Schwankungen) (**Abb.26**).

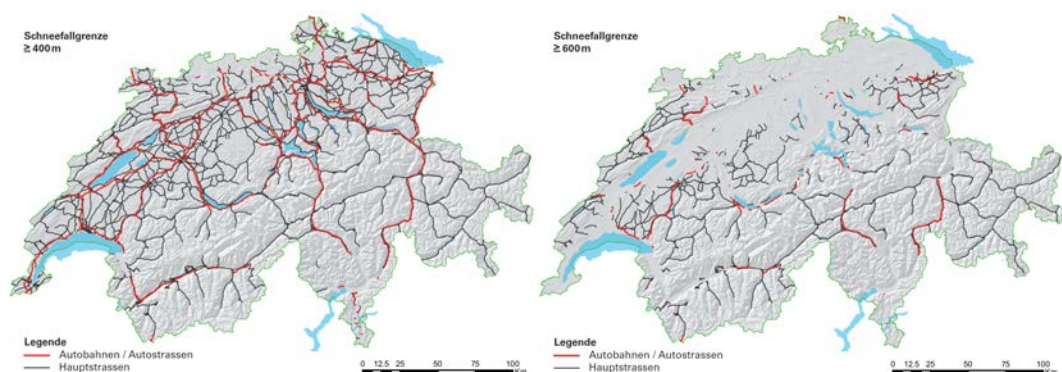


Abb.24 Beschneidung des Strassennetzes (Autobahnen und Hauptstrassen) bei unterschiedlicher Schneefallgrenze [Roos 2011].

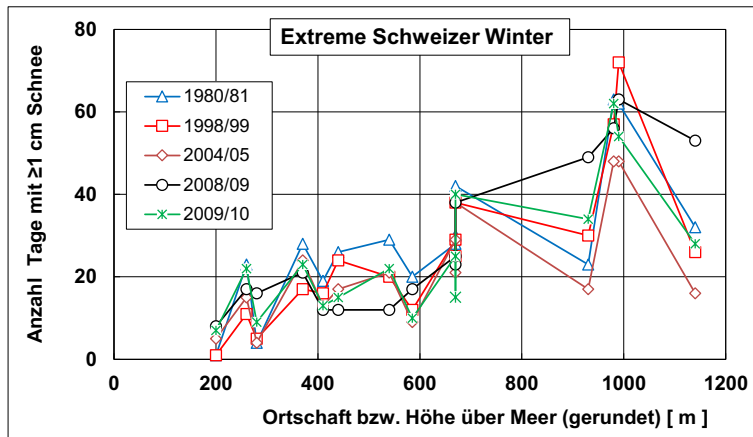


Abb.25 Extreme Schweizer Winter und Anzahl Tage mit Schnee ≥ 1 cm für einige ausgewählte Orte. Daten aus [Roos 2011].

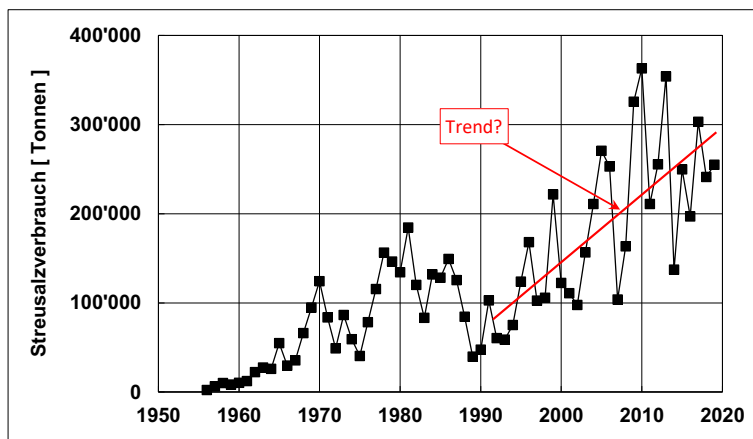


Abb.26 Streusalzverbrauch in der Schweiz von 1950 bis 2018 (ohne Waadt) [Roos 2011, Salinen 2019].

5 Temperaturdifferenzen zwischen Luft- und Betontemperatur

5.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes waren auf Grund der Kosten keine Messungen der Luft- und Betontemperatur am Auslagerungsort geplant. Es wurden deshalb auch keine Temperaturfühler in die Betonplatten für die Auslagerungsversuche eingebaut. Im Nachhinein ist dies zu bedauern, ergäben solche Messungen eine direkte Aussage über den Temperaturverlauf während der Frosttauvorgänge.

Als Ersatz solcher Messungen konnten die Daten von anderen Projekten analysiert werden, bei denen Luft- und Betontemperaturen gemessen wurden. Diese Messungen wurden im Hinblick auf Tiefsttemperaturen und Temperaturänderungen (Gefrieren und Aufwärmen) ausgewertet:

- Prüfkörper im Stevenson-Screen in Wildegg. Die Grösse der Prüfkörper entspricht grob der in diesem Projekt ausgelagerten Betonplatten. Messzeit: 6 Monate. Es wurden vier von acht Prüfkörpern ausgewertet.
- Pylon der Passarelle in Bremgarten. Messzeit: mehrere Jahre
- Stützmauer an der Simplonpassstrasse. Messzeit: mehrere Jahre

Die klimatischen Bedingungen sind in Wildegg und Bremgarten ähnlich. Demgegenüber sind die klimatischen Bedingungen bei der Stützmauer an der Simplonpassstrasse viel härter.

5.2 Prüfkörper im Stevenson-Screen in Wildegg

Im Rahmen eines Forschungsprojektes [Hunkeler 2019] wurden Prüfkörper (**Abb.27**) verwendet, bei denen in einer Tiefe von 20-30 mm Temperatursensoren eingebettet waren. Die nachfolgenden Bilder zeigen die Temperaturverläufe bei 4 Prüfkörpern und der Lufttemperatur im Stevenson-Screen (spezieller Behälter für die unbewitterte Auslagerung von Prüfkörpern). Details können [Hunkeler 2019] entnommen werden.

Folgendes kann der **Tab. 8** und den **Abb.28** und **Abb.29** entnommen werden:

- Die im Monitoringschrank gemessene Temperatur schwankt viel stärker als jene der Messungen im Stevenson-Screen. Die Werte im Stevenson-Screen stimmen gut mit den Werten der Wetterstation in Niederlenz überein.
- Tiefsttemperatur der Luft liegt um -15°C , jene des Betons bei rund -11°C . Die Höchsttemperaturen liegen um 20 bis 30°C .
- Die Differenzen zwischen der Luft- und der Betontemperatur sind meist sehr klein ($< 2^{\circ}\text{C}$). Bei schnellen Lufttemperaturänderungen können diese grösser sein.
- Die Temperaturänderungen variieren stark und liegen bei der Luft zwischen -6.6 und $+9.8^{\circ}\text{C/h}$ und beim Beton zwischen -2.9 und $+3.2^{\circ}\text{C/h}$, d.h. maximal 50% der Werte der Luft.
- 90% der Temperaturänderung der Luft (Stundenwerte) liegen zwischen -2.5 bis $+3.3^{\circ}\text{C/h}$, d.h. 5% der Werte liegen unter -2.5°C/h bzw. über $+3.3^{\circ}\text{C/h}$.
- Beim Beton liegen 90% der Werte zwischen -1.0 bis $+1.4^{\circ}\text{C/h}$.



Abb.27 Stevenson-Screens auf dem Garagendach der TFB AG in Wildegg für die unbewitterte Aussenlagerung von Prüfkörpern und dazwischen der Schrank für das Monitoring (links) und im Stevenson-Screen eingelagerte Prüfkörper (rechts).

Tab. 8 Kenngrößen der Messungen an Betonplatten im Stevenson-Screen in Wildegg. Messzeit 1.10.2017 bis 30.04. 2018 (1/2 Jahr).

Parameter			Mittelwert	Stand.abw.	Min.	Max.
Lufttemperatur		°C	+5.0	±0.09	-15.1	+22.2
Betontemperatur in 2.5 cm Tiefe		°C	+6.4	±0.07	-10.6	+28.6
Temperatur- änderung (Abkühlen, Aufwärmen)	Luft	°C/h	±0.00	±1.68	-6.6 (5%: ≤ -2.5)	+9.8 (5%: ≥ +3.3)
	Beton	°C/h	±0.00	±0.71	-2.9 (5%: ≤ -1.0)	+3.2 (5%: ≥ +1.4)

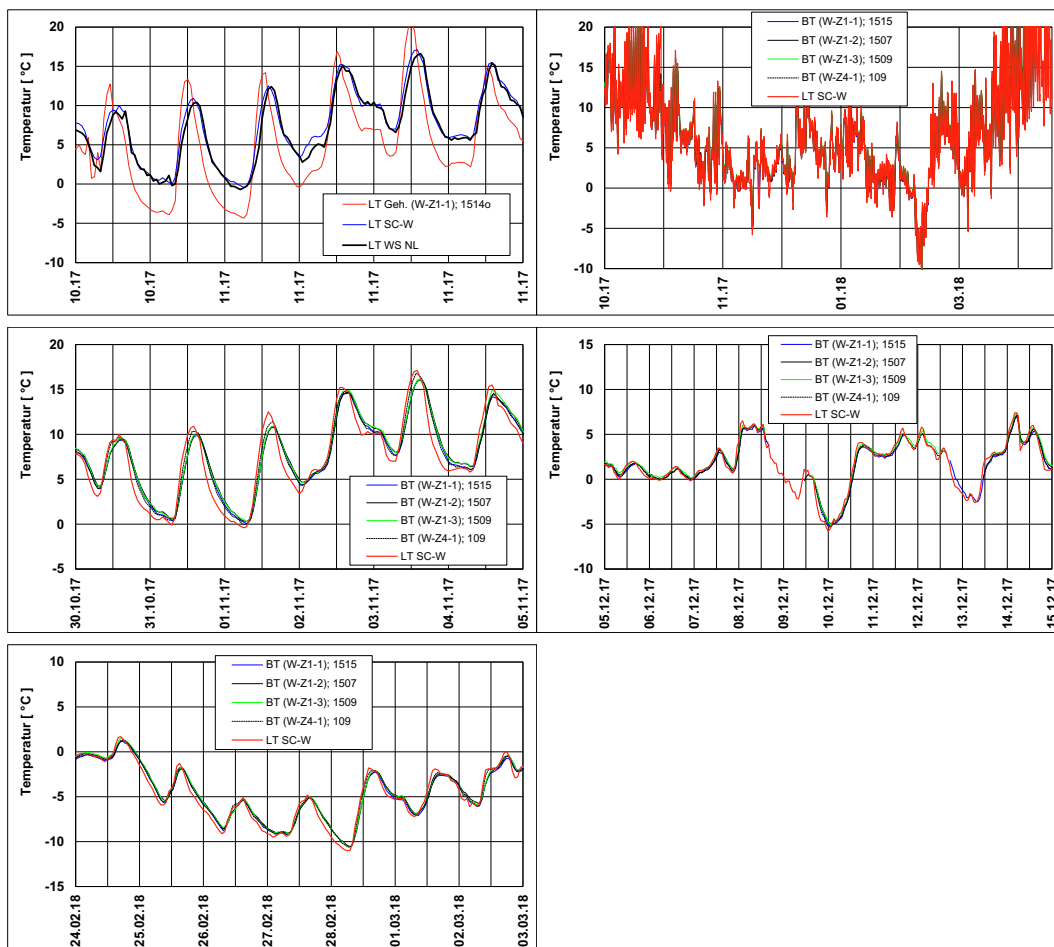


Abb.28 Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur im Stevenson Screen in Wildegg (SC-W) im Monitoring-Schrank (LT Gehäuse) und der Wetterstation Niederlenz (WS NL, Daten von R. Bucher) (oben links), Luft- und Betontemperatur über die gesamte Messzeit (oben links) sowie diverse Zeitausschnitte.

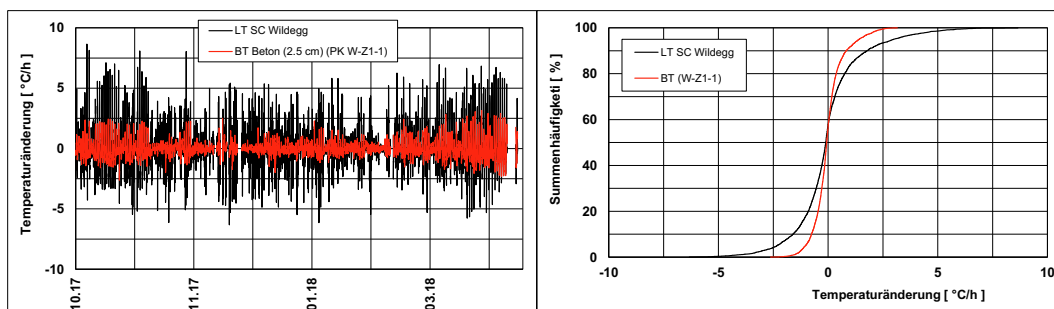


Abb.29 Temperaturänderung (Stundenwerte) für die Luft- und Betontemperatur in 2.5 cm Tiefe (links) und Summenhäufigkeit (rechts).

5.3 Pylon der Passarelle Itenhard

Im Rahmen des AAR-Monitorings beim Pylon der Passarelle Itenhard in Bremgarten (rund 390 m ü.M.) wurden die Luft- und in zwei Tiefen (5 und 30 cm) die Betontemperatur gemessen (**Abb.30**). Die Ergebnisse wurden in mehreren unveröffentlichten Zwischenberichten zu Händen des TBA des Kt. Aargau dargelegt. Weitere Details zum Monitoring können [Hunkeler 2017] entnommen werden.

Folgendes kann der **Tab. 9** und den **Abb.31** bis **Abb.34** entnommen werden:

- Die Tiefsttemperatur der Luft lag um -14°C , jene des Betons in 5 cm Tiefe bei -13 und in 30 cm Tiefe bei rund -10°C .
- Im Sommer können in der Tiefe von 5 cm Betontemperaturen bis fast 50°C auftreten. Die Differenzen zwischen den Luft- und Betontemperaturen sind ähnlich wie im Winter.
- Die zeitlichen Verschiebungen zwischen den Luft- und der Betontemperaturen sind gut erkennbar. Sie können mehr als einen halben Tag betragen.
- Die Differenzen zwischen den Luft- und der Betontemperaturen in 5 cm Tiefe können mehr als 2°C (bis ca. 5°C) betragen, in der Tiefe von 30 cm über das Doppelte (bis 8°C).
- Zwischen der West- und Ostseite sind kleine Unterschiede auszumachen.
- Die Temperaturänderungen (Abkühlen und Aufwärmen) variieren stark und liegen bei der Luft zwischen -9.3 bis $+9.5^{\circ}\text{C/h}$ und beim Beton zwischen -6.4 und $+13.2^{\circ}\text{C/h}$ in einer Tiefe von 5 cm und zwischen -3.5 und $+9.4^{\circ}\text{C}$ in der Tiefe von 30 cm.
- 90% der Temperaturänderung der Luft (Stundenwerte) liegen zwischen -1.2 bis $+1.3^{\circ}\text{C/h}$, d.h. 5% der Werte liegen unter -1.2°C/h bzw. über $+1.3^{\circ}\text{C/h}$.
- Beim Beton liegen 90% der Werte zwischen -0.8 bis $+1.0^{\circ}\text{C/h}$ in 5 cm Tiefe und -0.2 bis $+0.4^{\circ}\text{C/h}$ in 30 cm Tiefe.

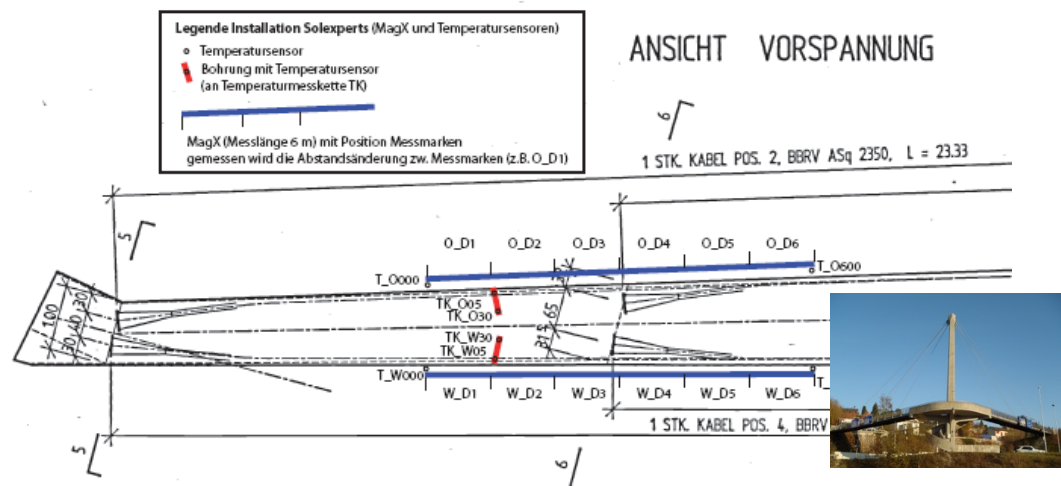
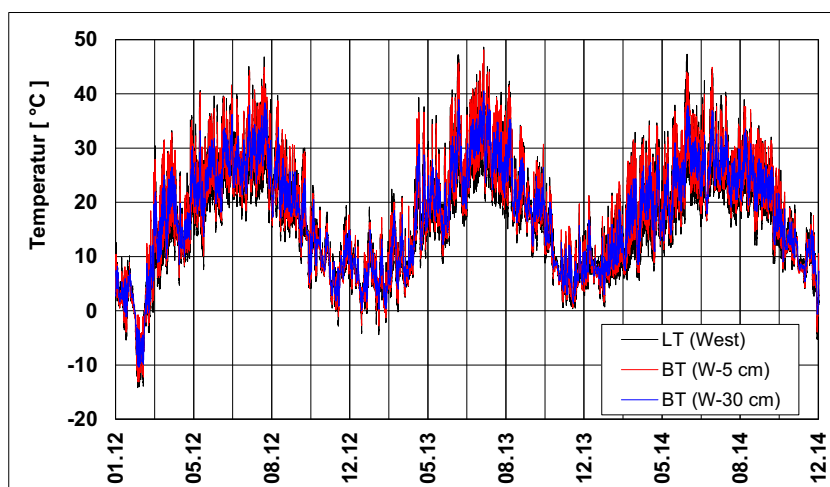
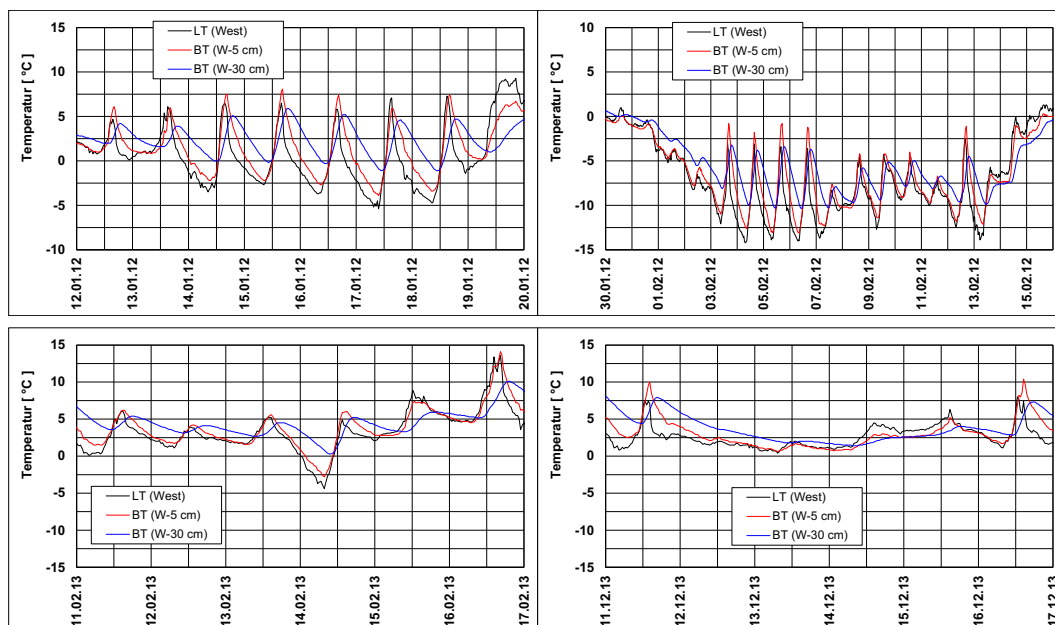


Abb.30 Foto und Längsschnitt des oberen Teils des Pylons mit den Angaben zur Lage der Messstellen.

Tab. 9 Kenngrößen der Messungen beim Pylon der Passarelle Itenhard in Bremgarten. Ergebnisse für Westseite. 01.01.2012 – 31.12.2014 (3 Jahre)

Parameter		Mittelwert	Stand.abw.	Min.	Max.
Lufttemperatur	°C	16.2	±9.2	-14.2	+48.6
Betontemperatur in 5 cm Tiefe	°C	16.9	±9.5	-13.1	+48.1
Betontemperatur in 30 cm Tiefe	°C	17.6	±9.3	-10.4	+40.5
Temperatur- änderung (Abkühlen, Aufwärmen)	Luft	°C/h	±0.00	-9.3 (5%: ≤ -1.2)	+9.5 (5%: ≥ +1.3)
	Beton in 5 cm Tiefe	°C/h	±0.00	-6.4 (5%: ≤ -0.8)	+13.2 (5%: ≥ +1.0)
	Beton in 30 cm Tiefe	°C/h	±0.00	-3.5 (5%: ≤ -0.2)	+9.4 (5%: ≥ +0.4)

**Abb.31** Verlauf der Luft- und Betontemperatur in 5 und 30 cm Tiefe von Januar 2012 bis Dezember 2014.**Abb.32** Verlauf der Luft- und Betontemperatur in 5 und 30 cm Tiefe im Januar und Februar 2012 (oben) und Februar 2013 (unten).

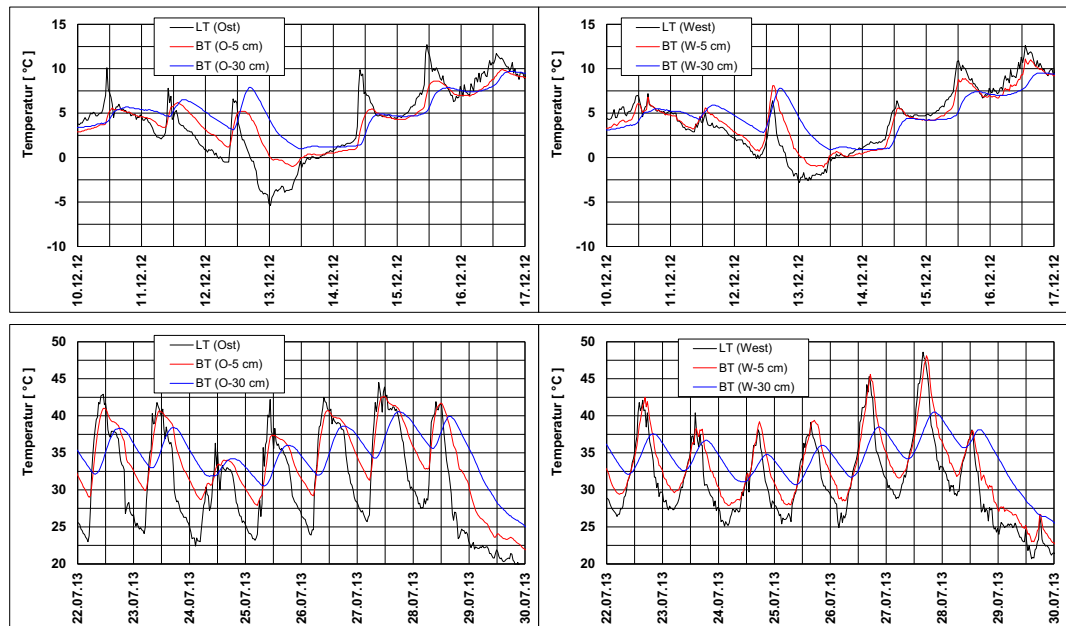


Abb.33 Verlauf der Luft- und Betontemperatur in 5 und 30 cm Tiefe im Dezember 2012 (Winter) und Juli 2013 (Sommer) auf der Ostseite (links) und Westseite (rechts).

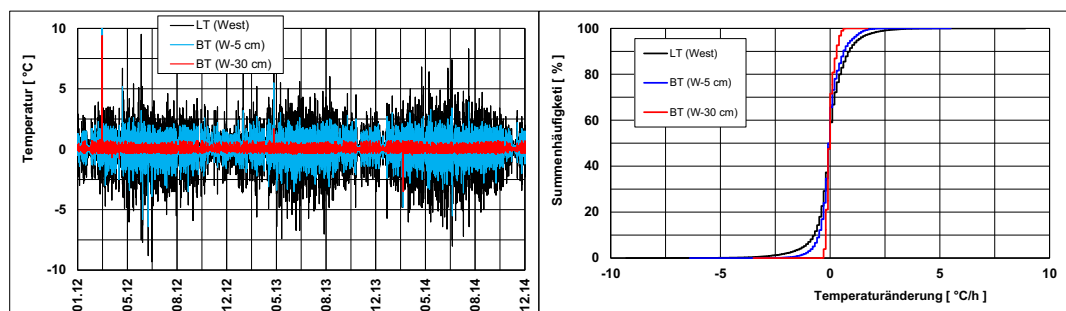


Abb.34 Temperaturänderung (Stundenwerte) für die Luft- und Betontemperatur in 5 und 30 cm Tiefe (links) und Summenhäufigkeit (rechts).

5.4 Stützmauer an der Simplonpassstrasse

Im Rahmen des AGB-Projektes „Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken“ [Hunkeler 2013] wurden an einer 1977 gebauten Schwergewichtsstützmauer an der Simplonpassstrasse (rund 1'400 m ü.M.) in den Jahren 2011 bis 2017 stündlich die Temperatur der Luft und des Betons in einer Tiefe von 3, 20 und 60 cm gemessen. Diese Ergebnisse wurden im Hinblick auf die Zielsetzungen dieses Projektes neu ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Bildern gezeigt. Es ist zu beachten, dass bei gewissen Bildern die Lufttemperatur der Oberflächentemperatur des Betons gleichgesetzt wurde. In der Tab.10 sind die Ergebnisse zusammengestellt.



Abb.35 Ansicht und Querschnitt der Stützmauer an der Simplonpassstrasse. Die Stützmauer ist nach Süden ausgerichtet.

Die Auswertungen führten zu folgenden Ergebnissen:

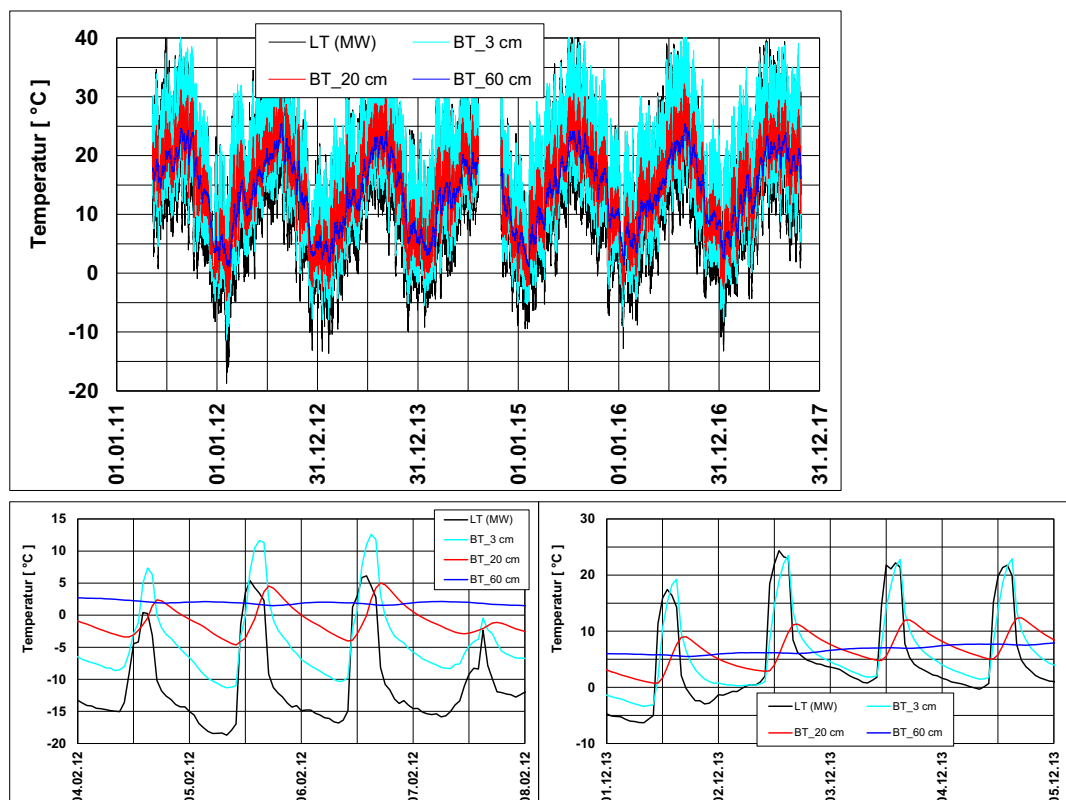
- Die Lufttemperatur schwankt im Jahreszyklus zwischen rund -20 und +45 °C. Im Mittel liegt sie bei +11 °C. Die Betontemperatur in 3 cm Tiefe schwankt etwas weniger (-11 bis 43 °C, Mittelwert: +13 °C). Die äusserste Betonschicht folgt der Lufttemperatur mit nur geringer Verzögerung.
- Die saisonalen Schwankungen der Betontemperatur sind in allen Tiefen erkennbar, nehmen aber mit der Tiefe ab. Die Temperatur in einer Tiefe von 60 cm steigt bis im Spätsommer auf etwa 25 °C an und fällt dann im Winter wieder ab. Während der ganzen Messzeit fiel die Betontemperatur in 60 cm Tiefe nie unter 0 °C ab.
- Die täglichen Schwankungen können sehr gross sein: Luft bis über 25°C, Beton in einer Tiefe von 3 cm immer noch bis über 20°C. Die täglichen Schwankungen wirken sich in einer Tiefe von 20 cm nur noch wenig aus, in 60 cm Tiefe gar nicht mehr.
- Die Analyse der Temperaturänderung hat unerwartet hohe Stundenwerte für die Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeit gezeigt. Sie liegen bei der Luft zwischen -16 und +21 °C/h, beim Beton zwischen -11 und +11 °C/h. 5% der Werte liegen unter -3.7 (Luft) bzw. -2.8 °C (Beton) und über +4.3 (Luft) und +3.6 °C/h (Beton, 3 cm). Diese hohen Werte sind wohl zu einem wesentlichen Teil auf die starke Sonneneinstrahlung auf die nach Süden ausgerichtete Stützmaueroberfläche zurückzuführen.
- Betrachtet man die Mittelwerte der Temperaturänderung über 3 bzw. 6 Stunden ergibt sich Folgendes:
 - Lufttemperatur: 3 h: < ±7 °C/h; 6 h: < ±4 °C/h
 - Beton in 3 cm Tiefe: 3 h: < ±6 °C/h; 6 h: < ±4 °C/h
- Die Temperaturgradienten in der Betonrandzone schwanken im Tagesrhythmus stark und liegen zwischen -4 bis +4 °C/cm.

Anmerkung: Trotz der starken Frosteinwirkung und einer allerdings eher schwachen Taumittelbelastung weist der Beton der Stützmauer auch nach über 40 Jahren keine Frostschäden auf.

Messungen der Temperaturgradienten und der Temperaturänderungen in einer Betondecke wurden von Müller et al. [Müller 2005] über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Die Temperaturgradienten im Betonquerschnitt von 26 cm (ohne obere und untere Oberflächentemperatur des Betons) waren meist sehr viel kleiner als die hier beobachteten Werte. Bei der schockartigen Beanspruchung fanden sie Temperaturgradienten im Betonquerschnitt bis rund -7 °C/cm und hohe Abkühlraten bis maximal rund -10 °C/h. Die maximalen Aufwärmgeschwindigkeiten lagen etwas tiefer.

Tab. 10 Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der Messung an einer Stützmauer an der Simplonpassstrasse. Daten von [Hunkeler 2013].

Parameter			Mittelwert	Stand.abw.	Min.	Max.
Lufttemperatur (Extensometer)	Horizontal	°C	+11.2	±10.5	-18.8	+45.5
	Vertikal	°C	+10.8	±10.0	-18.7	+41.6
	Mittelwert	°C	+11.0	±10.3	-18.7	+43.4
Betontemperatur in Tiefe von	3 cm	°C	+13.0	±9.3	-11.3	+43.2
	20 cm	°C	+13.9	±7.5	-4.7	+32.3
	60 cm	°C	+13.8	±6.1	0.9	+25.7
Differenz zwischen Lufttemperatur und Betontemperatur in 3 cm Tiefe		°C	-2.0	±2.5	-11.7	+11.0
Temperaturgradient in 0-3 cm Tiefe		°C	-0.7	±0.8	-3.9	+3.7
Temperatur- änderung (Abkühlen, Aufwärmen)	Luft	°C/h	±0.0	±2.6	-16.2 (5%: ≤-3.7)	+20.8 (5%: ≥+4.3)
	Beton in 3 cm Tiefe	°C/h	±0.0	±1.9	-10.8 (5%: ≤-2.8)	+11.1 (5%: ≥+3.6)
	Beton in 20 cm Tiefe	°C/h	±0.0	±0.5	-0.9 (5%: ≤-0.6)	+2.8 (5%: ≥+1.2)
	Beton in 60 cm Tiefe	°C/h	±0.0	±0.0	-0.2 (5%: ≤-0.1)	0.2 (5%: ≥+0.1)

**Abb.36** Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur und der Betontemperatur in der Tiefe von 3, 20 und 60 cm bei der Stützmauer an der Simplonpassstrasse. Oben: ganze Messperiode, unten: Februar 2012 und Dezember 2013. Daten von [Hunkeler 2013].

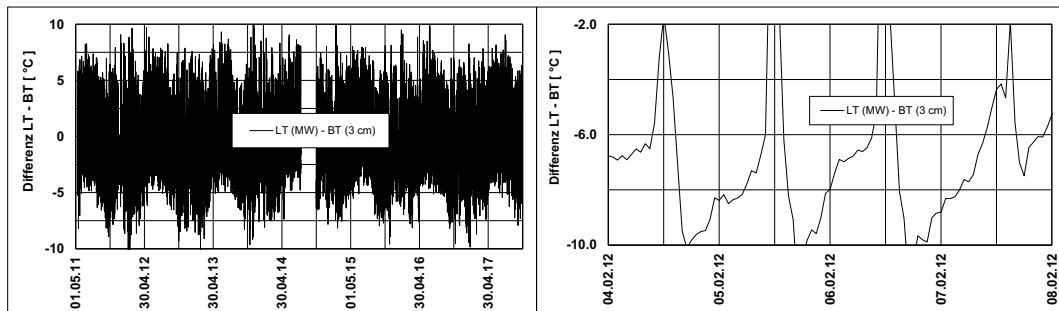


Abb.37 Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Luft- und Betontemperatur (Tiefe 3 cm) über die ganze Messzeit (links) und für einen einzelnen kurzen Zeitabschnitt (rechts).

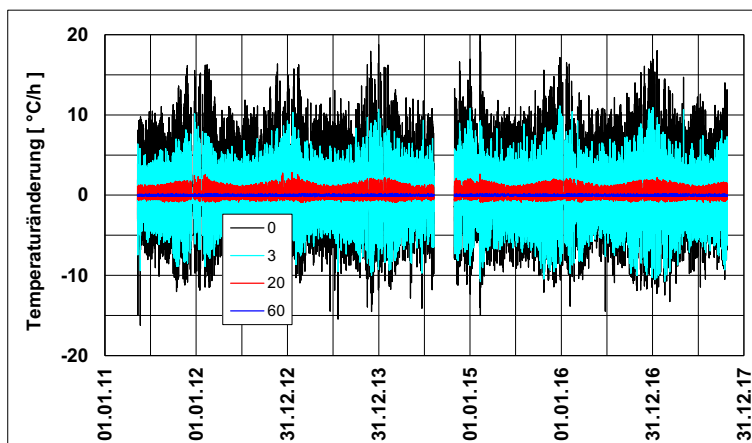


Abb.38 Temperaturänderungen der Luft (0 cm, Betonoberfläche) und Beton in 3, 20 und 60 cm Tiefe über die Messzeit.

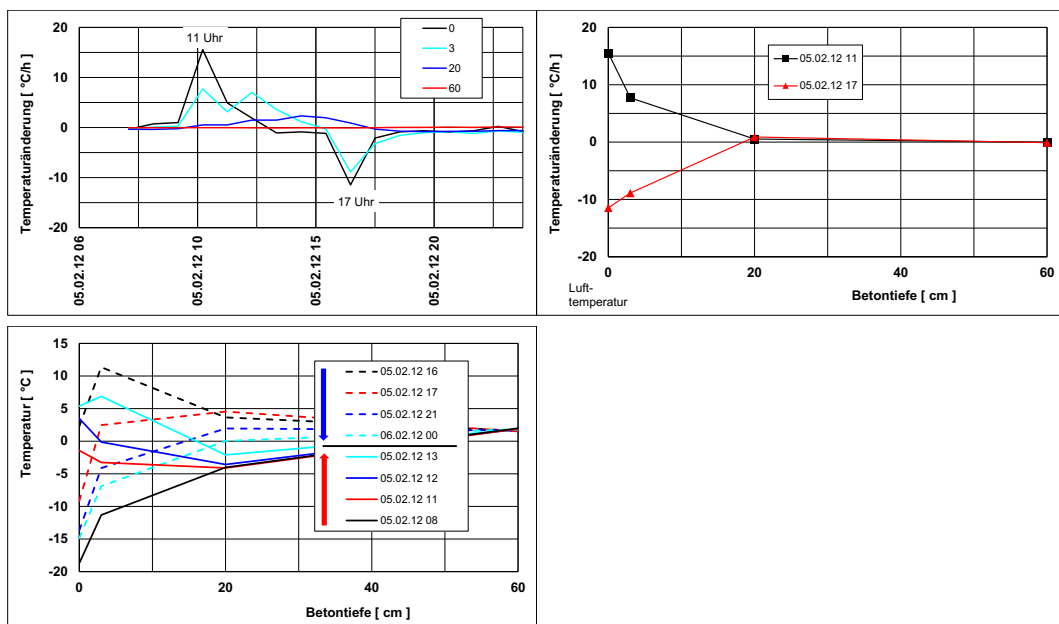


Abb.39 Verlauf der Temperaturänderung am 05.02.2012 über die Zeit (oben links) und über die Betontiefe und das Temperaturprofil im Beton (unten) während der Aufwärmphase am Vormittag (rot) und der Abkühlphase am Nachmittag (blau). Temperaturmaximum um 16.00 Uhr.

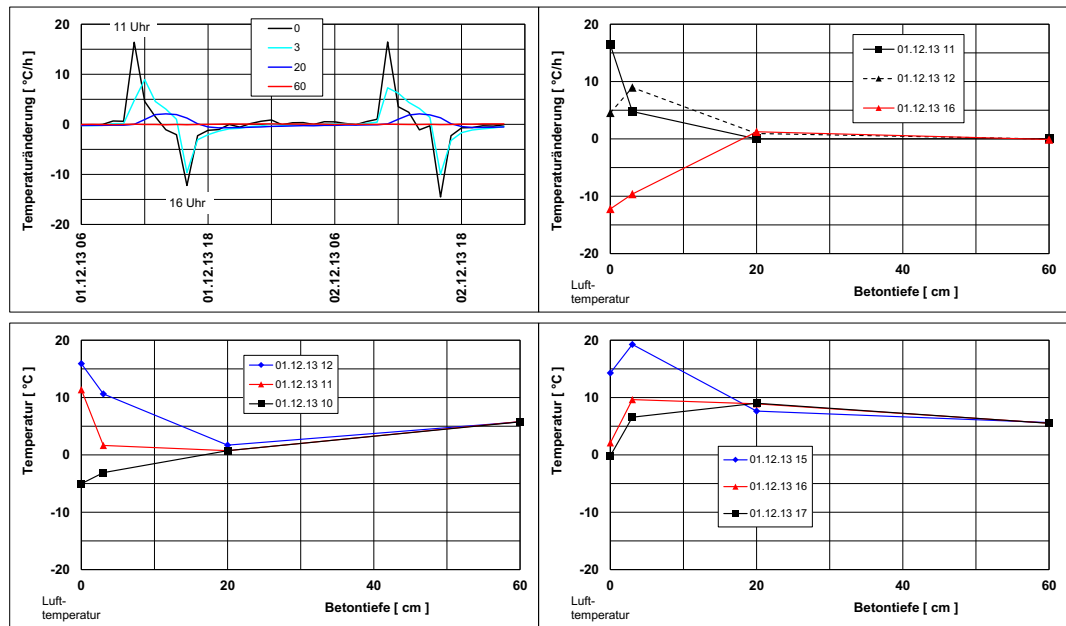


Abb.40 Temperaturänderung über einzelne kurze Zeitabschnitte (oben) und ausgewählte Profile für die Temperaturänderung und der Temperatur im Beton (unten).

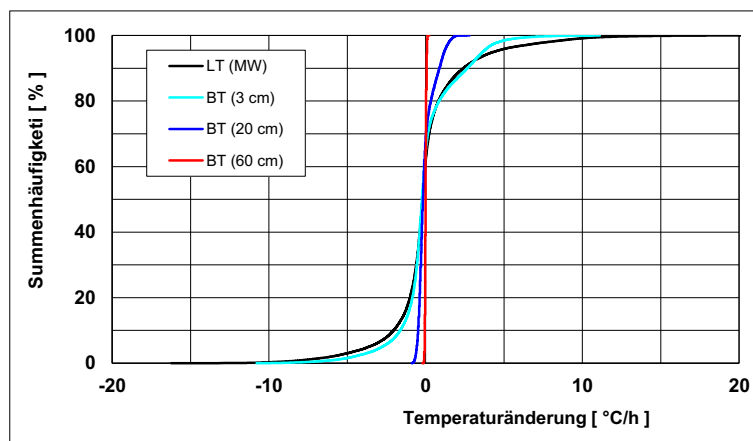


Abb.41 Summenhäufigkeit der Temperaturänderung der Luft und im Beton in einer Tiefe von 3, 20 und 60 cm über die ganze Messzeit.

5.5 Zusammenfassung

Die Analyse der Luft- und Betontemperaturen ergab Folgendes:

- Die Tiefsttemperatur der Luft liegt bei den drei untersuchten Standorten (Wildeggen und Bremgarten auf je rund 390 m ü.M. sowie an der Simplonpassstrasse auf rund 1'400 m ü.M.) zwischen -13 und -19°C. Sie passen gut in die **Abb. 19 (Kap 3.9)**.
- Die Tiefsttemperaturen des Betons in 2 bis 5 cm Tiefe sind wenig bis deutlich höher als jene der Luft. Die Differenz ist abhängig von der Dauer des Frostereignisses mit der tiefsten Lufttemperatur, der Art und den Abmessungen des Bauteils. Sie beträgt bei der Stützmauer im Mittel mehr als +6 °C (grosse Betonmasse und Erdrich/Fels auf der Rückseite).
- Die Betontemperatur weist im Tagesverlauf teilweise sehr steile Gradienten auf. Bei der Stützmauer wurden Werte zwischen -4 bis +4 °C/cm festgestellt.
- Die Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeit der Luft und des Betons sind in der **Tab. 11** zusammengestellt. Am höchsten sind die stündlichen Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeiten der Luft und des Betons bei der nach Süden ausgerichteten Stützmauer. Die dort gefundenen Maximalwerte sind wesentlich höher als jene, die in der Literatur häufig genannt werden. Die 5 bzw. 95% Fraktilwerte liegen deutlich tiefer und sind mit Literaturangaben vergleichbar.
- Die Geschwindigkeit der Temperaturänderungen nimmt mit zunehmender Betontiefe ab.
- Bei der Stützmauer sind selbst die Mittelwerte über 3 bzw. 6 Stunden in 3 cm Tiefe mit ± 6 bis ± 7 bzw. mit ± 4 °C/h noch recht hoch.
- Die von [Kaufman 2000] vom Dezember 1996 – März 1997 gemessenen Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeiten an der Brüstung der Hundwilertobelbrücke auf 900 m ü.M. sind tiefer im Vergleich zu den anderen Ergebnissen.

Tab. 11 Zusammenstellung der gemessenen Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeiten der Luft und des Betons in 2.5 bis 5 cm Tiefe. Bei der Hundwilertobelbrücke handelt es sich um die Oberflächentemperatur des Betons.

Parameter		Prüfkörper im Stevenson- Screen, Wildeggen	Passarelle Ittenhard, Bremgarten	Stützmauer an der Simplon- passstrasse	Hundwiler- tobelbrücke [Kaufman 2000]
Messzeit, Jahre		1/2	3	7	1/3
Abkühlgeschwindigkeit, °C/h					
Maximalwerte	Luft	-6.6	-9.3	-16.2	-2.0
	Beton	-2.9	-6.4	-10.8	-0.5
5 bzw. 95% Fraktilwerte	Luft	-2.5	-1.2	-3.7	k.A.
	Beton	-1.0	-0.8	-2.8	k.A.
Aufwärmgeschwindigkeit, °C/h					
Maximalwerte	Luft	+9.8	+9.5	+20.8	+4.6
	Beton	+3.2	+13.2	+11.1	+3.4
5 bzw. 95% Fraktilwerte	Luft	+3.3	+1.3	+4.3	k.A.
	Beton	+1.4	+1.0	+3.6	k.A.

6 Kenngrössen verschiedener FTW-Prüfungen und Vergleich mit Wetterdaten

Um einen Bezug zu den Ergebnissen der Analyse der Wetterdaten bzw. zur Praxis herzustellen, wurde die SIA-Prüfung genauer betrachtet. Ergänzend dazu wurden auch die zwei gängigsten europäischen Prüfverfahren für den Frostaumittelwiderstand genauer untersucht, um diese zu vergleichen.

Die nachfolgenden Überlegungen sind nur bei physikalischen Prüfverfahren anwendbar, die die Prozesse der Frostaumittelschädigung in der Praxis mit Temperaturzyklen nachzustellen versuchen und bei denen die Abwitterung als Kenngrösse ermittelt wird. Prüfungen wie z.B. die BE I-, BE II- oder TFB-Prüfung basieren auf einem anderen Prinzip und können hier nicht einbezogen werden.

6.1 SIA-Prüfung gemäss SIA 262/1, Anhang C

In **Abb.42** sind die täglichen Frostzyklen bei der SIA-Frostaumittelwiderstandsprüfung (SIA 262/1, Anhang C) dargestellt. Insgesamt werden 28 Zyklen abgefahren, was – bei zwei Zyklen/Tag – eine Prüfdauer von 14 Tagen ergibt. Aus den Prüfvorgaben wurden die Frostdauer und die Frostgradtage berechnet. In der **Tab. 12** sind die aus den Prüfbedingungen abgeleiteten Parameter zusammengestellt. Für die weiteren Vergleiche in den nachfolgenden Kapiteln sind einzelne Kennwerte auch für 30 Zyklen angegeben.

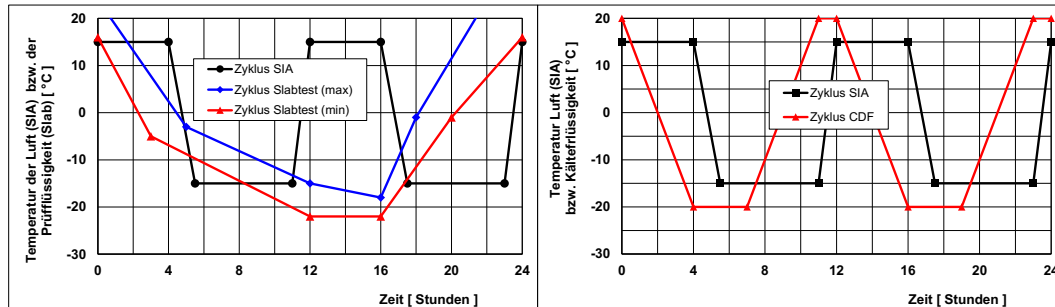


Abb.42 Frostzyklen pro Tag bei der SIA-Frostaumittelwiderstandsprüfung gemäss SIA 262/1, Anhang C und dem schwedischen Slabtest bzw. der Plattenprüfung (links) sowie mit der CDF-Prüfung (rechts) gemäss CEN/TS 12390-9 [CEN 2015].

In der **Abb.42** sind zum Vergleich auch die Frostzyklen der zwei wichtigsten europäischen Prüfverfahren dargestellt. Zu beachten ist hier, dass bei der SIA-Prüfung die Vorgaben für den Temperatur-Zeit-Verlauf für die Lufttemperatur in der Frosttruhe gelten. Bei den europäischen Verfahren erfolgt die Steuerung des Temperaturverlaufs auf andere Arten. Bei der Plattenprüfung wird die Temperatur der Prüfflüssigkeit über dem Prüfkörper von mindestens einem Probekörper, bei der CDF-Prüfung im Kältebad unter dem Boden des Prüfbehälters in der Mitte der Frosttruhe zur Steuerung verwendet. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Zeitverläufe der Betontemperatur wie bereits Studer im Rahmen seiner Forschungsarbeiten festgestellt hat [Studer 1993] (siehe dazu **Anhang I**). Die aus den Temperatur-Zeitverläufen berechneten Frostgradtage bilden daher die Wirklichkeit nicht korrekt ab und sind nur beschränkt vergleichbar. Trotz dieser Einschränkung sind erste Vergleiche möglich und zulässig.

Tab. 12 Kenngrössen der SIA-Prüfung (28 Zyklen) gemäss SIA 262/1:2019

Parameter		Zyklus	Prüfung	Vergleich zu Wetterstationen und Bauwerken
Tiefsttemperatur	°C		-15.0	Bei mehreren Stationen (Tab. 5) sowie bei der Stützmauer (Tab. 10) treten tiefere Werte auf.
Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeit Zyklus	°C/h		-20 / +30	Höher als die bei Bauwerken gemessenen Werte (Tab. 11).
Mittlere Temperatur	°C		-13.6	Tritt bei keiner Station auf. Tiefster gefundener Wert: -11.9 °C (SBE, Kap. 3.8)
Frostdauer	Tage	0.28	7.88	Tiefer als jährliche Minimalwerte (Tab. 6)
Frostgradtage (30 Zyklen)	°C Tage	-3.8	-107 (-115)	Gleiche Grössenordnung wie die Jahresmittelwerte im Mittelland (<500 m ü.M.) (Tab. 6). Tiefer als Jahresmittelwerte bei Stationen über 500-600 m ü.M.
Vergleich zu den Frostgradtagen der Einzelereignisse der Wetterstationen (Abb.43 , links)			ca. 5-fach härter	Basis für Beurteilung: Je tiefer der Wert für die FGT und je kürzer die Frostdauer ist, desto härter ist die Frostbelastung.
Vergleich zu den jährlichen Frostgradtagen der Wetterstationen (Abb.43 , rechts)			ca. 5-fach härter	

In einem ersten Vergleich können die Frostgradtage der Prüfung mit jenen von Wetterstationen verglichen werden. Gemäss **Abb.43** ist die SIA-Prüfung deutlich härter als die Mehrheit (ca. 70%) der bei den Wetterstationen San Bernardino gemessenen Einzelereignissen und Jahreswerte der Frostgradtage.

Im Vergleich dazu deckt die Prüfung bei der Station Altenrhein ca. 90% der Einzelereignisse ab.

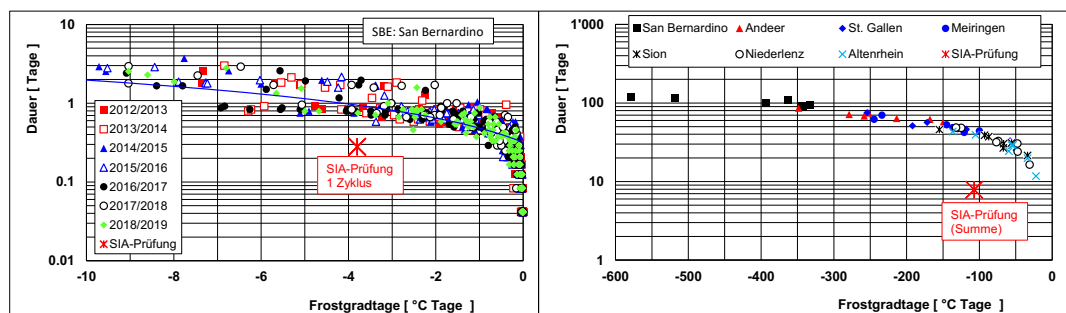


Abb.43 Dauer vs. Frostgradtage von Einzelereignissen (links) und der Jahresmittelwerte (rechts) der Wetterstation San Bernardino mit den Werten der SIA-Prüfung.

Vergleicht man die Jahresmittelwerte der Frostgradtage werden mit der Prüfung in Altenrhein einige Winter abgedeckt (**Abb.15**). In San Bernardino hingegen sind alle Werte deutlich tiefer als die Prüfung. Über alle Stationen gesehen, liegt die Prüfung mit -107 °C·Tage bei rund 20 bis 30% der Jahresmittelwerte der Frostgradtage aller Stationen.

Die Prüfung liegt mit 28 Nulldurchgängen deutlich unter den Werten von Altenrhein (**Abb.13**, unten rechts).

Weiter ist zu beachten, dass die bei verschiedenen Wetterstationen gemessenen Tiefsttemperaturen deutlich tiefer liegen als jene der Prüfung. Dies ist von Bedeutung, da die Tiefsttemperatur einen grossen Einfluss auf die Abwitterung hat (**Abb.14** und **Abb.17**, **Tab. 5**).

6.2 Platten- und CDF-Prüfung gemäss CEN/TS 12390-9

Im Normentwurf für die europäischen Prüfungen des Frost- und Frosttaumittelwiderstandes CEN/TS 12390-9 sind die (schwedische) Plattenprüfung und das (deutsche) CDF-Verfahren aufgeführt. Die Plattenprüfung ist das Referenzverfahren. Das dritte Verfahren, d.h. das Würfelprüfverfahren, hat auf europäischer Ebene keine Bedeutung.

Die Plattenprüfung weist nicht sehr scharfe Vorgaben für die Temperaturzyklen auf (**Abb. 42**, links). Die Anzahl der Zyklen ist mit 56 doppelt so hoch wie jene der SIA-Prüfung. Die Kenngrössen sind in der **Tab. 13** aufgeführt. Die Bandbreite für die Temperatur hat zur Folge, dass die (theoretischen) Minimal- und Maximalwerte der Kenngrössen weit auseinander liegen. Bei der Plattenprüfung sind die Tiefsttemperaturen etwas tiefer und die Frostgradtage pro Zyklus und der Prüfung wesentlich höher als bei der SIA-Prüfung. Das Verhältnis der Frostgradtage der Platten- zur SIA-Prüfung liegt bei den üblichen 56 Zyklen zwischen rund 3 und 5.

Das CDF-Verfahren hat wohl die strengsten Vorgaben an die Prüfung. Im Vergleich zur SIA-Prüfung ist die Tiefsttemperatur -20 °C deutlich niedriger. Die übrigen Kennwerte der Prüfung (mittlere Temperatur, Frostdauer, Frostgradtage) sind bei den üblichen 28 Zyklen gut mit jenen der SIA-Prüfung vergleichbar. Die tiefere Tiefsttemperatur von -20 °C kann mit einem Verstärkungsfaktor berücksichtigt werden. Gemäss **Abb. 2** (rechts) erhöht sich die Abwitterung maximal um rund +60% im Vergleich zu den Werten bei -15 °C .

Tab. 13 Kenngrössen der Plattenprüfung (56 Zyklen) gemäss FprCEN/TS 12390-9:2015

Parameter		Zyklus max / min	Prüfung (28 Zyklen)	Vergleich zur SIA-Prüfung / Kommentar
Tiefsttemperatur	°C	-18.0 / -22.0		Tiefer
Abkühl- und Aufwärm- geschwindigkeit Zyklus	°C/h	-5.4 / max. +8.5		Geringer. Im Bereich der bei Bauwerken gemessenen Werte.
Mittlere Temperatur	°C	-10.7 / -14.1		Höher / ähnlich
Frostdauer	Tage	0.57 / 0.75	32.0 / 41.9	Länger
Frostgradtage (28 Zyklen)	°C Tage	-6.1 / -10.6	-343 / -591 (-171 / -296)	Härter, intensiver
Verhältnis zur SIA-Prüfung (28 Zyklen)		1.6 / 2.8	3.2 / 5.5 (1.6 / 2.8)	
Verhältnis zur SIA-Prüfung unter Berücksichtigung der tieferen Tiefsttemperatur (max. +35%) (28 Zyklen)			4.3 / 7.4 (2.2 / 3.7)	Siehe Tab. 2

Tab. 14 Kenngrössen der CDF-Prüfung gemäss (28 Zyklen) gemäss FprCEN/TS 12390-9:2015

Parameter		Zyklus	Prüfung (56 Zyklen)	Vergleich zur SIA-Prüfung / Kommentar
Tiefsttemperatur	°C		-20.0	Tiefer
Abkühl- und Aufwärm- geschwindigkeit Zyklus	°C/h		-10 / +10	Geringer. Im Bereich der höchsten bei Bauwerken gemessenen Werten.
Mittlere Temperatur	°C		-14.3	Ähnlich
Frostdauer	Tage	0.29	8.2	Ähnlich
Frostgradtage (56 Zyklen)	°C Tage	-4.2	-117 (-233)	Ähnlich
Verhältnis zur SIA-Prüfung		1.1	1.1 (2.0)	Ähnlich (härter, intensiver)
Verhältnis zur SIA-Prüfung unter Berücksich- tigung der tieferen Tiefsttemp. (max. +60%)			1.8 (3.2)	Siehe Tab. 2

6.3 Vergleich der Prüfverfahren

In der **Tab. 15** sind die Kenngrössen der drei betrachteten Prüfverfahren zusammengefasst. Bemerkenswert sind die unterschiedlichen Tiefsttemperaturen und Frostgradtage. Die Unterschiede bei den Frostgradtagen sind auf die Unterschiede bei der Art und Anzahl der Temperaturzyklen zurückzuführen.

In einer ersten Näherung kann man annehmen, dass eine Verdoppelung der Frostgradtage zu einer Verdoppelung der Abwitterung führt. Dies ist dann nicht mehr der Fall, wenn die Abwitterung sich mit der Zeit verlangsamt. Diese ist vor allem bei Betonen mit einem hohen Frosttaumittelwiderstand bzw. bei Betonen mit einer geringen Abwitterung der Fall.

Die Absenkung der Tiefsttemperatur von -15 (SIA-Prüfung) auf -18°C als konservative Annahme bei der Plattenprüfung bzw. auf -20 °C bei der CDF-Prüfung erhöht die Abwitterung im Vergleich zur SIA-Prüfung.

Basierend auf den Angaben in der **Tab. 2 (Kap 2.1)** kann der Einfluss der unterschiedlichen Tiefsttemperaturen bei den Prüfungen auf die Abwitterung grob abgeschätzt werden. Für den nachfolgenden Vergleich von Prüfergebnissen wurde die Abschätzung teilweise auch für eine nicht normkonforme Anzahl Zyklen gemacht (**Tab. 16** und **Tab. 17**).

Tab. 15 Kenngrössen der FTW-Prüfung (Normvorgaben)

Parameter		SIA	Platten	CDF
Tiefsttemperatur	°C	-15	-15 / -18	-20
	Wirkung auf Abwitterung	Siehe Kap. 2.1 sowie Tab. 16 und Tab. 17		
Frostgradtage (FGT)	°C Tage	-107	-343 / -591 (463 / 798)	-117 (-187 ¹⁾)
	Wirkung auf Abwitterung: Verhältnis zur SIA-Prüfung	1.0	3.2 / 5.5 (4.3 / 7.4)	1.1 (1.8 ¹⁾)
Abkühl- und Aufwärm- geschwindigkeit	°C/h	-20 / + 20	-5.4 / max. +8.5	-10 / +10
	Wirkung auf Abwitterung	Im Beton verzögertes Abkühlen und Aufwärmen reduziert die Geschwindigkeit. Wirkung ist schwierig zu quantifizieren. Eher klein gemäss Kap. 2.1 (Abb.6)		
Frostdauer	Tage	7.9	32.0 / 41.9	8.2
	Wirkung auf Abwitterung	Ist in den Frostgradtagen enthalten		
Mittlere Temperatur	°C	-13.6	-10.7 / -14.1	-14.3
	Wirkung auf Abwitterung	Keine relevanten Unterschiede		
Anzahl Zyklen		28	56	28
	Wirkung auf Abwitterung	Ist in den Frostgradtagen enthalten		
Dauer der Prüfung	Tage	14	56	14
Kriterium für hohen FTW, Abwitterung in g/m ²		200 (bzw. 600 ²⁾)	1'000 ²⁾	1'500

¹⁾ Unter Berücksichtigung der tieferen Tiefsttemperatur (max. +60%).

²⁾ Es sind besondere Vorgaben bei sich beschleunigender Abwitterung zu beachten.

Tab. 16 Abschätzung des Einflusses der Reduktion der Tiefsttemperatur von -15 °C bei der SIA-Prüfung (SIA) auf -18°C bei der Plattenprüfung (PP) und auf -20°C bei der CDF-Prüfung (CDF).

Prüfung	SIA		PP		PP		CDF	
Zyklen	28	30	28		56		28	56
Korrekturfaktor für Änderung der Tiefsttemperatur			min	max	min	max		
Ausgangswerte	-107	-115	-171	-296	-343	-591	-117	-233
-15 / -18	1.2		-206	-355	-411	-710	-140	-280
-15 / -20	1.5		-257	-443	-514	-887	-175	-350
-18 / -20	1.2		-206	-355	-411	-710	-140	-280

Tab. 17 Abschätzung des Verhältnisses der Abwitterungen bei den verschiedenen Prüfungen mit und ohne Temperaturkorrektur. Basis: Werte aus der **Tab. 16**. Leseart, z.B.: PP_28: Plattenprüfung mit 28 Zyklen.

Korrekturfaktor für Änderung der Tiefsttemperatur	PP_56 / SIA_28		PP_28 / SIA_30 (PP_56 / SIA_30)	
	min	max	min	max
Ausgangswerte	1.6	2.8	1.5 (3.0)	2.6 (5.2)
-15 / -18	1.2	1.9	1.8 (3.6)	3.1 (6.2)

Korrekturfaktor für Änderung der Tiefsttemperatur	PP_28 / CDF_28		PP_56 / CDF_28	
	min	max	min	max
Ausgangswerte	1.5	2.5	2.9	5.1
-18 / -20	1.2	1.8	3.5	6.1

Korrekturfaktor für Änderung der Tiefsttemperatur	CDF_28 / SIA_28		CDF_28 / SIA_30		CDF_56 / SIA_28		CDF_56 / SIA_30	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Ausgangswerte	1.1	1.0	2.2	2.0				
-15 / -20	1.5	1.6	1.5	3.3				

In mehreren Arbeiten hat Studer die SIA- mit den europäischen Prüfungen verglichen [Studer 1993, 1995]. Die Ergebnisse sind in den **Tab. 18** und **Tab. 19** zusammengestellt. Die Abwitterung ist bei der Plattenprüfung bei vier von fünf verschiedenen Betonen rund dreimal höher als bei der SIA-Prüfung. Dieser Wert ist damit in der gleichen Grössenordnung wie das Verhältnis der Frostgradtage bei der Prüfung. Das Verhältnis der Abwitterung der CDF- zur SIA-Prüfung von rund 2 entspricht den Erwartungen. Mix 1 mit der sehr geringen Abwitterung bei der SIA-Prüfung wurde hier nicht berücksichtigt.

Die Auswertung eines europäischen Ringversuchs [Siebel 1998a] zeigt auch hier, dass die Abwitterung bei der Plattenprüfung grösser ist als bei der CDF-Prüfung. Das Verhältnis der Abwitterung und das Verhältnis der Frostgradtage sind gut vergleichbar (**Tab. 20**).

Weitere Ergebnisse konnten von den Untersuchungen von Köppel et al. [Köppel 2014] ausgewertet werden (**Tab. 21**). Der Nullbeton entspricht den Erwartungen. Der LP-Beton weist bei der Plattenprüfung sehr tiefe Werte auf. Die beiden Spezialbetone fallen aus dem Rahmen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei üblichen Betonen die Abschätzung der Abwitterung über die Frostgradtage (ohne und mit Temperaturkorrektur) recht zuverlässig ist. In keinem Fall wurde die Wirkung unterschätzt, in mehreren Fällen erheblich überschätzt. Dies war vorab bei LP-Betonen der Fall.

Tab. 18 Vergleich der Abwitterung in der SIA- und Plattenprüfung (PP) aus Untersuchungen der EMPA [Studer 1993]. TK: Temperaturkorrektur.

Beton	PP	PP	Verhältnis Abwitterung PP / SIA	Verhältnis FGT (mit TK)
Anzahl Zyklen	30	28		
Concrete 1	1'712	4'672	2.7	
Concrete 2	49	168	3.4	1.5 bis 2.6 (1.8 bis 3.1)
Concrete 3	2'366	6'388	2.7	

Tab. 19 Vergleich der Abwitterung in der SIA- und Platten- sowie CDF-Prüfung aus Untersuchungen der EMPA [Studer 1995]. PP: Plattenprüfung. TK: Temperaturkorrektur.

Beton	SIA	PP	CDF	Verhältnis Abwitterung		Verhältnis FGT (mit TK)	
Anzahl Zyklen	30	56	56	PP/SIA	CDF/SIA	PP/SIA	CDF/SIA
Mix 1	17	193	308	11.4	18.1	3.0 bis 5.2 (3.6 bis 6.2)	2.0 (3.0)
Mix 2A	2'897	9'236	6615	3.2	2.3		

Tab. 20 Vergleich der Abwitterung in einem europäischen Ringversuch [Siebel 1998a]. PP: Plattenprüfung. TK: Temperaturkorrektur.

Beton	PP	PP	CDF	Verhältnis Abwitterung		Verhältnis FGT (mit TK)	
Anzahl Zyklen	28	56	28	PP(28)/CDF	PP(56)/CDF	PP(28)/CDF	PP(56)/CDF
Mix 2.2	4'030	8'098	2'532	1.6	3.2	1.5 bis 2.5 (1.8 bis 3.0)	2.9 bis 5.1 (3.5 bis 6.1)
Mix 3.2	102	103	400	0.3	0.3		

Tab. 21 Vergleich der Abwitterung aus der Arbeit von Köppel et al. [Köppel 2014]. PP: Plattenprüfung. TK: Temperaturkorrektur.

Beton	PP	CDF	Verhältnis Abwitterung PP/CDF	Verhältnis FGT (mit TK)
Anzahl Zyklen	56	28		
Nullbeton	7'409	2'372	3.1	
LP-Beton	62	708	0.1	2.9 bis 5.1 (3.5 bis 6.1)
Beton mit Mikrohohlkugeln	594	539	1.1	
Beton mit Faserpartikeln	3'212	3'455	0.9	

6.4 Kriterien für einen hohen Frosttaumittelwiderstand

Die Kriterien für einen hohen Frosttaumittelwiderstand (FTW) sind bei den drei Prüfungen sehr unterschiedlich (**Tab. 22**, **Abb.44**). Nachfolgend wird versucht, die Unterschiede im Hinblick auf die wesentlichen Unterschiede bei der Prüfung (Tiefsttemperatur, Frostgradtage) zu beurteilen.

Tab. 22 Annahmekriterien für Betone mit einem hohen Frosttaumittelwiderstand.

Prüfung	Referenz	Abwitterung, g/m ²	Hinweis
SIA-Prüfung	[SN EN 206]	200 oder 600	Beim Grenzwert von 600 g/m ² gilt eine Zusatzbedingung.
Plattenprüfung	[SS 2005, Utgenannt 2010]	1'000	
	[Helsing 2019]	5'00	Schwedischer Vorschlag für einen europäischen Grenzwert.
CDF-Prüfung	[BAW 2012]	1'500	

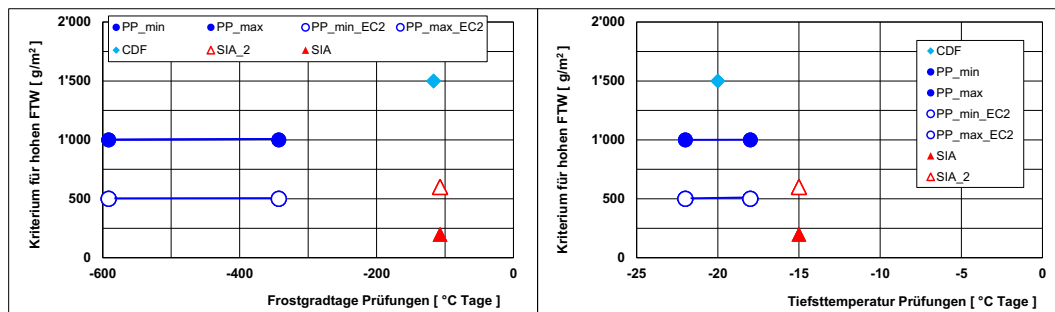


Abb.44 Zulässige Abwitterung für einen hohen Frosttaumittelwiderstand vs. Frostgradtage (links) und Tiefsttemperatur der Prüfungen.

Zunächst ist im **Abb.45** gezeigt, dass die wesentlichen Parameter der Prüfungen die in der Praxis auftretenden Bedingungen der untersuchten Wetterstationen nur zum Teil abdecken. Bei der SIA-Prüfung sind sowohl die Frostgradtage wie auch die Tiefsttemperatur über den Werten der Wetterstationen. Die Minimalwerte der Plattenprüfung liegen demgegenüber darunter, die Maximalwerte allerdings teilweise höher. Die Tiefsttemperatur der CDF-Prüfung wiederum ist am unteren Rand der im Feld gemessenen Werte. Die Frostgradtage sind dagegen deutlich höher als jene der Wetterstationen.

Aus diesem Vergleich der Zahlenwerte müsste geschlossen werden, dass die Prüfungen die über Jahrzehnte anhaltende Frost- und Frosttaumittelbeanspruchung, zumindest nicht in höheren Lagen, ausreichend abzubilden vermag. Dies steht in einem scheinbaren Widerspruch zur positiven, d.h. schadenmindernden Wirkung der Prüfung des Frosttaumittelwiderstandes von Beton, die sich seit der Einführung bei den Bauwerken gezeigt hat. Dies gilt nicht nur für die Schweiz, sondern auch für andere europäische Länder.

Die Erklärung dieses Widerspruchs liegt mit einiger Sicherheit in der Tatsache, dass die Schadensentwicklung sich bei den heute üblichen (Tiefbau-) Betonen mit der Zeit deutlich verlangsamt. Das heisst dann, dass eine Prüfung so streng sein muss, dass sie bei Bauwerken diese Phase abzubilden vermag. Dies wurde offenbar mit allen drei Prüfungen erreicht.

Diese Beurteilung wird gestützt durch die folgende Analyse. Dazu wurde der Grenzwert der zulässigen Abwitterung bei der CDF-Prüfung von $1'500 \text{ g/m}^2$ (höchster Wert aller Prüfungen) bei einer Tiefsttemperatur von -20°C als Referenzwert verwendet, um die beiden anderen Prüfungen einzuordnen. Das Ergebnis ist in **Abb.46** gezeigt. Folgende Schlüsse können daraus gezogen werden:

- Die SIA-Prüfung weist mit dem Grenzwert von 200 g/m^2 das schärfste Kriterium auf. Der Wert von 600 g/m^2 liegt unter den Kurven der Betone.
- Der obere Wert der Plattenprüfung PP_max liegt bei den Kurven der Betone, der untere dagegen deutlich tiefer.
- Der neue, für den Eurocode 2 (EC2) vorgeschlagene Grenzwert von 500 g/m^2 ist wohl zu scharf, da sowohl PP_min_EC2 und PP_max_EC2 erheblich unter den Kurven der Betone liegen.

Aus dieser Analyse kann der Schluss gezogen werden, dass die drei Prüfungen wohl zu einer ähnlichen Beurteilung von Betonen mit hohem Frosttaumittelwiderstand führen. In Anbetracht der Prüf- und Materialstreuung hat die SIA-Prüfung mit dem tiefen Grenzwert ein höheres Risiko für Fehlbeurteilungen als die beiden anderen Prüfungen. Wie aus der **Abb.47** hervorgeht, ist die Wiederholpräzision der SIA-Prüfung in einem ähnlichen Rahmen wie die Platten- und die CDF-Prüfung.

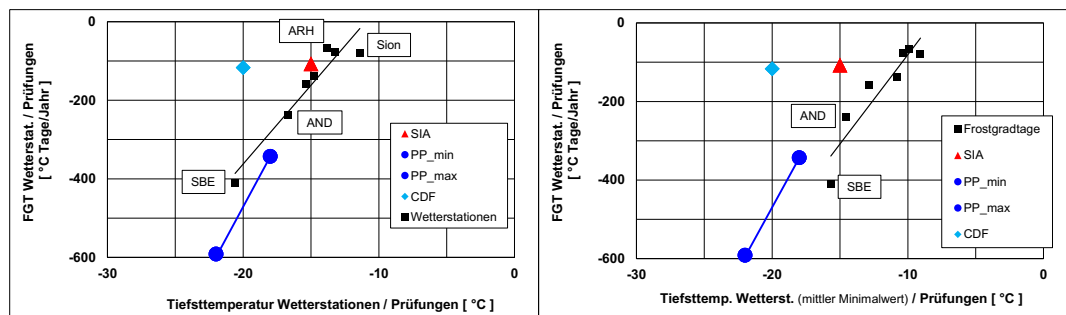


Abb.45 Frostgradtage (Mittelwerte über gesamte Messzeit) vs. Tiefsttemperatur (links) bzw. der mittlerer Tiefsttemperatur der Wetterstationen und der Tiefsttemperatur der Prüfungen.

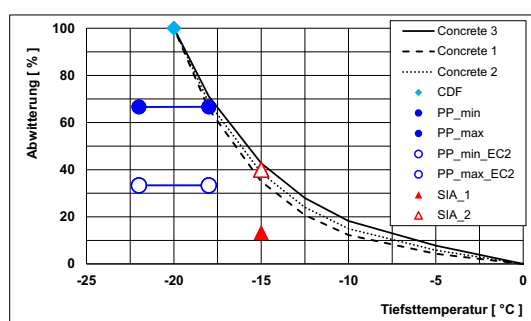


Abb.46 Abhängigkeit der Abwitterung von der Tiefsttemperatur (siehe **Abb.2, Kap. 0**). Eingetragen sind die auf den Grenzwert der CDF-Prüfung normierten Werte der SIA- und der Plattenprüfung.

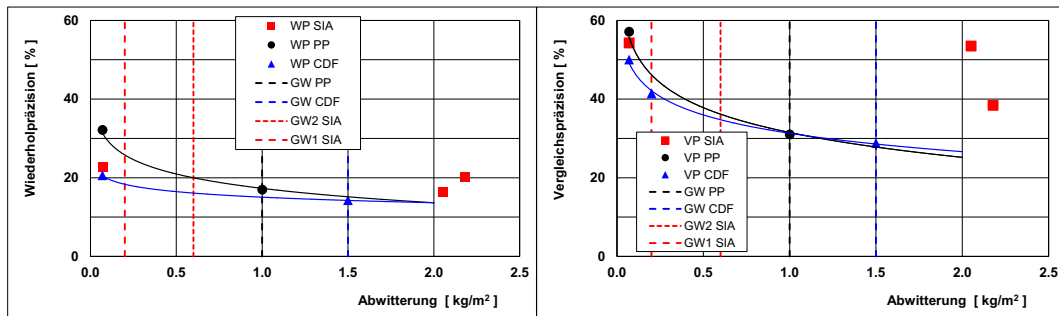


Abb.47 Wiederhol- und Vergleichspräzision der SIA-, der Platten- und der CDF-Prüfung in Abhängigkeit von der Abwitterung. Die Daten wurden der SIA 262/1, Anhang C und für die europäischen Prüfungen der FprCEN/TS 12390-9 [CEN 2015] entnommen.

Es ist hier zu betonen, dass bei vorhergehenden Vergleichen der Prüfverfahren diverse kleinere und grössere Unterschiede beim Prüfablauf ausgeblendet wurden. Diese hier zu berücksichtigen war nicht möglich und sie hätten das Ergebnis wohl auch nicht entscheidend verändert.

Abschliessend soll darauf hingewiesen werden, dass ein Teil der Prüfstreuung bei den Frosttaumittelprüfungen u.a. auch von der Position der Prüfkörper in der Frosttruhe beeinflusst wird [Studer 1998]. Dabei spielen neben der Beladung der Truhen auch konstruktive Details, die Art der Steuerung der Truhen etc. eine Rolle. Auf diese Problematik wurde auch in [CEN 2020] hingewiesen. Wie daraus hervorgeht, können Differenzen bis zu 12 °C auftreten.

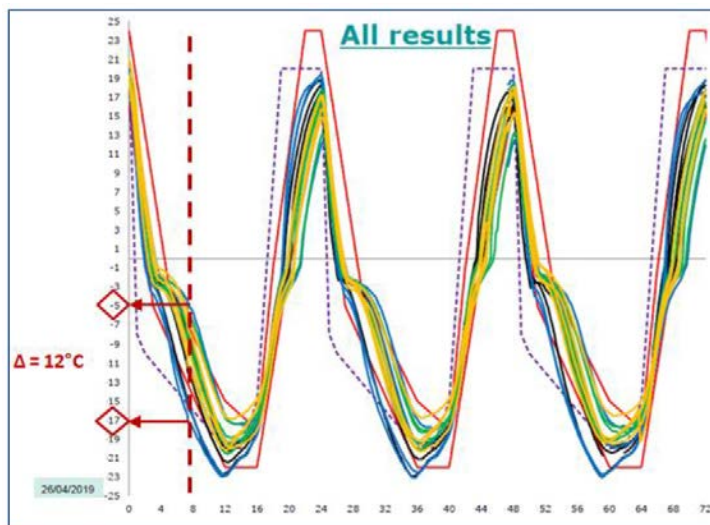


Abb.48 Unterschiedlicher Temperatur-Zeit-Verläufe bei Frostzyklen [CEN 2020].

In vielen Untersuchungen, insbesondere auch bei Ringversuchen hat es sich gezeigt, dass die verschiedenen Prüfverfahren die LP-Betone in aller Regel gleich beurteilen. Bei anderen Betonen können grössere Differenzen auftreten [Kaufman 2000, Siebel 2005, Huss 2006, Müller 2009, Müller 2010, Utgenannt 2010, Helsing 2014, Köppel 2014].

6.5 Anmerkung zur BE II- und TFB-Prüfung

Bei der BE II-Prüfung sind Art der Frostzyklen (**Abb. 45**) und deren Anzahl ($N = 400$) sowie der Wert für die Frostgradtage ($FGT = -4.4 \text{ °C Tage}$) der Prüfung nicht vergleichbar mit den drei oben beschriebenen Verfahren. Der Vergleich mit den anderen Prüfverfahren ist daher nicht möglich. Zudem werden andere Kenngrößen für die Beurteilung verwendet. Gleiches gilt auch für die TFB-Prüfung. Details siehe [VSS 2009, Hunkeler 2016].

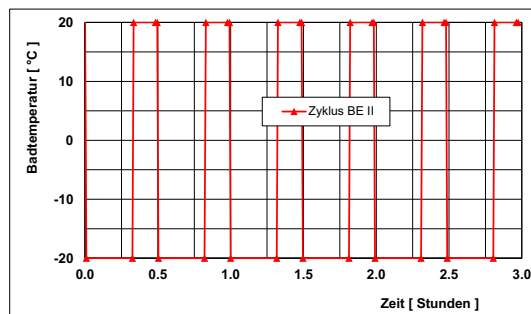


Abb. 49 Frostzyklen der BE II-Prüfung.

Tab. 23 Kenngrößen der BE II-Prüfung (400 Zyklen)

Parameter		Zyklus	Prüfung
Tiefsttemperatur	°C		-20.0
Mittlere Temperatur	°C		-20.0
Frostdauer	Tage	0.013	0.013
Frostgradtage	°C Tage	-0.26	-0.26

6.6 Zusammenfassung

Zur Bestimmung des Frostaumittelwiderstandes stehen heute mehrere Prüfverfahren zur Verfügung. Untersucht wurden hier die SIA-Prüfung gemäss SIA 262/1 sowie die Platten- und die CDF-Prüfung gemäss FprCEN/TS 12390-9. Die Frostaumittelbelastung bzw. die Abwitterung am Ende der Prüfung ist bei den drei Verfahren sehr unterschiedlich. Demzufolge gelten auch unterschiedliche Kriterien für einen hohen Frostaumittelwiderstand.

Im Vergleich zu den beiden europäischen Prüfverfahren (Platten- und CDF-Prüfung) weist die SIA-Prüfung eine ähnliche Wiederholpräzision, aber eine deutlich schlechtere Vergleichspräzision auf.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Prüfungen mit der Tiefsttemperatur und den Frostgradtagen als summarische Größen gut charakterisiert und miteinander verglichen werden können. Mit den genannten Kenngrößen können die unterschiedlichen Abwitterungen erklärt werden.

Aus dem Vergleich der Abwitterung und der Grenzwerte der drei Prüfungen konnte gefolgert werden, dass die Prüfungen gleichwertig sind. Der schwedische Vorschlag für einen neuen Grenzwert für die Plattenprüfung für die neuen europäischen Regelungen im Eurocode 2 muss als zu scharf beurteilt werden.

Die Analyse der Wetterdaten hat aber auch gezeigt, dass die Prüfungen die langzeitige Frost- und Frosttaumiteleinwirkung in höheren Lagen vielleicht nicht sicher abzudecken vermögen. Hier können nur langzeitige Auslagerungsversuche und Beobachtungen an Bauwerken in höheren Lagen weiterhelfen.

7 Felduntersuchungen

7.1 Allgemeines zur Auslagerung

Im Zuge des Vorgängerprojektes [Werner 2016] wurden Versuchsplatten aus verschiedenen Betonen hergestellt und entlang der Autobahn A1 bei der Autobahneinfahrt 85 Rheineck in Fahrtrichtung St. Margrethen ausgelagert. Bei den Betonen 1 - 12 wurden jeweils zwei Versuchsplatten ausgelagert, bei den Platten 13 und 14 nur jeweils eine. Weitere Details zu den verwendeten Mischungen sind **Tab. 24** und dem Vorgängerbericht [Werner 2016] zu entnehmen.

Tab. 24 Übersicht über die zur Verfügung stehenden Betone

Beton Nr.	Betonsorte	Zement	Zementgehalt, kg/m ³	Konsistenz (Zielwert)	w/z-Wert	LP
1	D (T1)	CEM I	300	C3	0.5	Nein
2	E (T2)	CEM I	300	C3	0.5	Ja
3	D (T1)	CEM II/A-LL	300	C3	0.5	Nein
4	E (T2)	CEM II/A-LL	300	C3	0.5	Ja
5	F (T3)	CEM I	320	C2	0.45	Nein
6	G (T4)	CEM I	320	C2	0.45	Ja
7	F (T3)	CEM II/A-LL	320	C2	0.45	Nein
8	F (T3)	CEM II/A-LL	320	C2	0.45	Nein
9	F (T3)	CEM III/B	320	C2	0.45	Nein
10	G (T4)	CEM III/B	320	C2	0.45	Ja
11	weggelassen					
12	G(T4)	CEM II/A-LL	320	F5	0.45	Ja
13	SC 7 (Spritzbeton)	CEM II/A-LL	450	F4	0.39	Ja ¹⁾
14	SC 7 FTW (Spritzbeton)	CEM II/A-LL	425	F4	0.39	Ja

¹⁾ Gemäss Angaben des Herstellers wurde dem Beton 13 kein LP-Mittel zugegeben. Gemäss der mikroskopischen Gefügeanalyse und der Prüfung der Porenkennwerte weist dieser Beton einen LP-Gehalt von über 4 Vol.-% auf.

Die Versuchsplatten waren seit dem 06.11.2012 auf der Fläche zwischen der Leitplanke und der Lärmschutzwand bei der Autobahneinfahrt 85 Rheineck in Fahrtrichtung St. Margrethen ausgelagert. Aufgrund von Bauarbeiten beim Auslagerungsstandort mussten der Standort der Versuchsplatten am 07.02.2018 gewechselt werden. Hier ist insbesondere dem Werkhof-Personal des Werkhof Thal (Nationalstrassen Gebiet VI) unter der Leitung von Herrn Rudolf Frischknecht zu danken. Sie ermöglichten das Auslagern, die Umlagerung und die jeweilige Begutachtung der Platten.

Aus diesem Grund liegen die Versuchsplatten seit dem 07.02.2018 auf der gegenüberliegenden Seite. Die Platten liegen aktuell auf der Fläche zwischen der Leitplanke und der Lärmschutzwand bei der Autobahnausfahrt 85 Rheineck in Fahrtrichtung St. Gallen. Vergleiche dazu **Abb.50**.

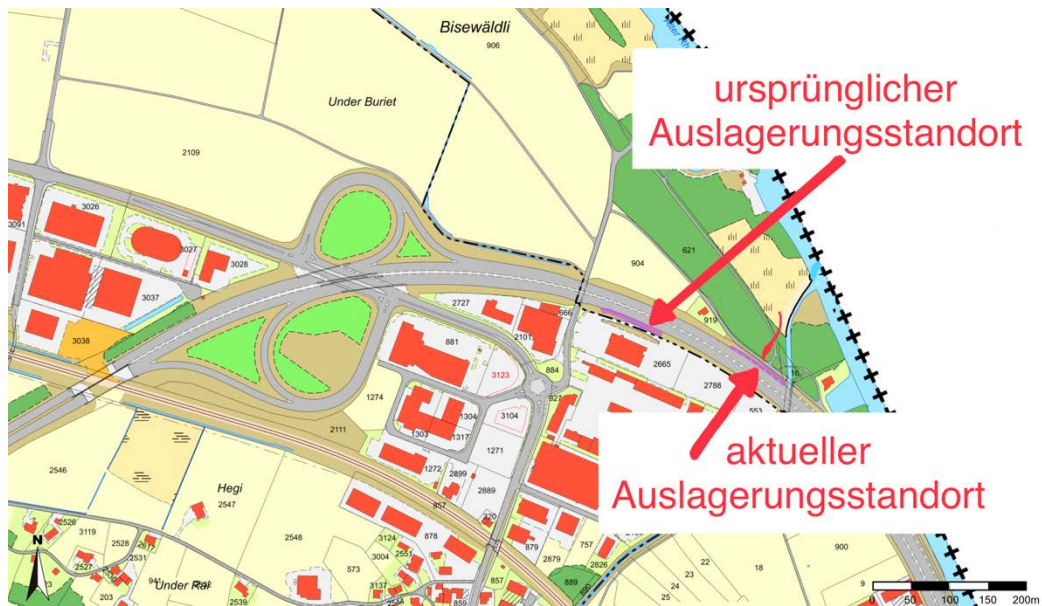


Abb.50 Auslagerungsstandort entlang der A1 bei der Autobahnein- / Ausfahrt 85 [GIS Kanton St. Gallen]

Die Anordnung der Platten wurde durch den Umzug nicht geändert (vgl. **Abb.51**). Auch sind die Versuchsplatten weiterhin auf Kanthölzer ausgelegt. Auf die klimatischen Auslagerungsbedingungen und den Streusalzeinsatz vor Ort wird in **Kap. 3** und **Kap. 4** eingegangen.

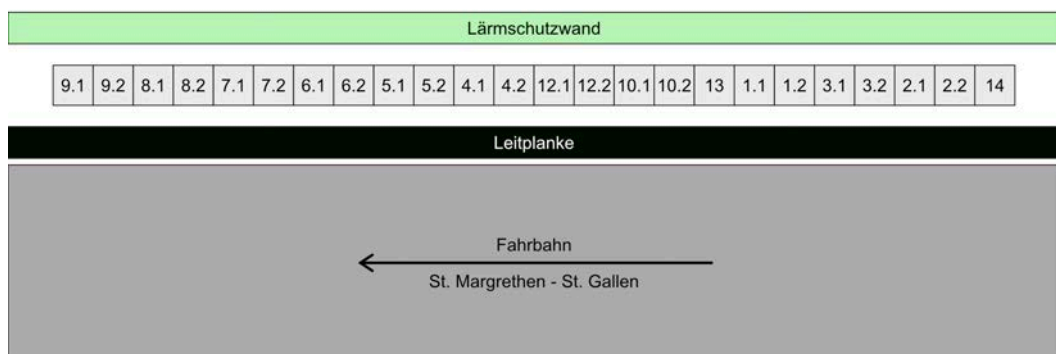


Abb.51 Plattenanordnung am Auslagerungsstandort

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Visuelle Beurteilung der Musterplatten

Am 11.06.2019 wurden die seit Anfang November 2012 im Freien gelagerten Versuchsplatten nach 7 Wintern visuell begutachtet und der Zustand fotografisch dokumentiert. Visuell wurde beurteilt, wie stark die Oberfläche der einzelnen Platten aufgeraut ist. Die Ergebnisse sind in **Tab. 25** dargestellt. Die Fotos der Versuchsplatten sind in den **Abb.53** bis **Abb.64** zu finden. Die Kriterien der Klassierung der aufgerauten Oberfläche ist in **Tab. 33** beschrieben.

Allgemein ist festzuhalten, dass das Schadensausmass an den ausgelagerten Platten generell sehr klein war und keine groben Schäden oder Kornausbrüche zu erkennen waren. Die im Folgenden beschriebene visuell festgestellte relative Abwitterung bewegt sich in einem sehr begrenzten Rahmen. Dabei ist wichtig zu beachten, dass die Beurteilung nicht auf absoluten Werten basiert, sondern ein relativer Vergleich der Platten darstellt.

Tab. 25 Visuelle Beurteilung der Abwitterung der Musterplatten

Beton Nr.	Platten Nr.	aufgeraute Oberfläche	Klassierung
1	1.1 / 1.2	sehr wenig, mehr wie 13	2
2	2.1 / 2.2	sehr wenig, wie 1.1	2
3	3.1 / 3.2	stark	0
4	4.1 / 4.2	sehr stark, weniger wie 5.1	0
5	5.1 / 5.2	sehr stark	0
6	6.1 / 6.2	stark	0
7	7.1 / 7.2	mittel bis stark, weniger wie 9.1	1
8	8.1 / 8.2	mittel bis stark, weniger wie 9.1	1
9	9.1 / 9.2	stark ¹⁾	0
10	10.1 / 10.2	mittel bis stark ²⁾	1
12	12.1 / 12.2	praktisch nicht, wie 13 und 14; 12.2: wenig	2
13	13	praktisch nicht, wie 14	2
14	14	praktisch nicht	2

¹⁾ teilweise grosser Überstand der Einzelkörner zum Zementstein,
3 Abplatzungen ø 2 - 3 cm

²⁾ 10.1: 1 Abplatzung ø 3 - 4 cm; 10.2: 1 Abplatzung über grossem Korn

Zur gleichen Zeit wurden auch die Bohrkern für die weiteren Untersuchungen entnommen.

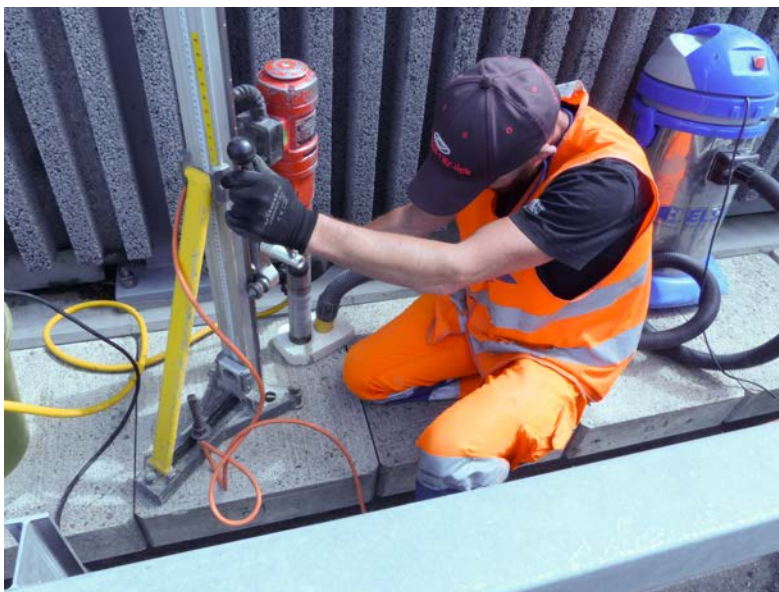


Abb.52 Entnahme der Bohrkern am 11.06.2019



Abb.53 Zustand der Versuchsplatten 1.1 und 1.2 im Frühjahr 2019



Abb.54 Zustand der Versuchsplatten 2.1 und 2.2 im Frühjahr 2019



Abb.55 Zustand der Versuchsplatten 3.1 und 3.2 im Frühjahr 2019



Abb.56 Zustand der Versuchsplatten 4.1 und 4.2 im Frühjahr 2019



Abb.57 Zustand der Versuchsplatten 5.1 und 5.2 im Frühjahr 2019



Abb.58 Zustand der Versuchsplatten 6.1 und 6.2 im Frühjahr 2019



Abb.59 Zustand der Versuchsplatten 7.1 und 7.2 im Frühjahr 2019



Abb.60 Zustand der Versuchsplatten 8.1 und 8.2 im Frühjahr 2019



Abb.61 Zustand der Versuchsplatten 9.1 und 9.2 im Frühjahr 2019



Abb.62 Zustand der Versuchsplatten 10.1 und 10.2 im Frühjahr 2019



Abb.63 Zustand der Versuchsplatten 12.1 und 12.2 im Frühjahr 2019



Abb.64 Zustand der Versuchsplatten 13 und 14 im Frühjahr 2019

7.2.2 Chloridgehalt der Betonplatten nach 7 Wintern

Um die Intensität der Streusalzbeaufschlagung der Platten zu beurteilen und um sicher zu sein, dass in der Tat Streusalz in den Beton eingedrungen ist, wurden nach 7 Wintern erneut die Chloridprofile an je einem Bohrkern pro Beton ermittelt.

Die Bohrkern ($\varnothing$ 50 mm, Länge $\approx$ 120 mm) für die Chloridanalysen wurden am 11.06.2019 gemäss **Abb.65** entnommen. Die Bohrlöcher wurden anschliessend mit einem schnellabbindenden Reparaturmörtel verschlossen. An diesen Bohrkernen wurde neben der Chloridanalyse auch die mikroskopische Gefügeanalyse durchgeführt.

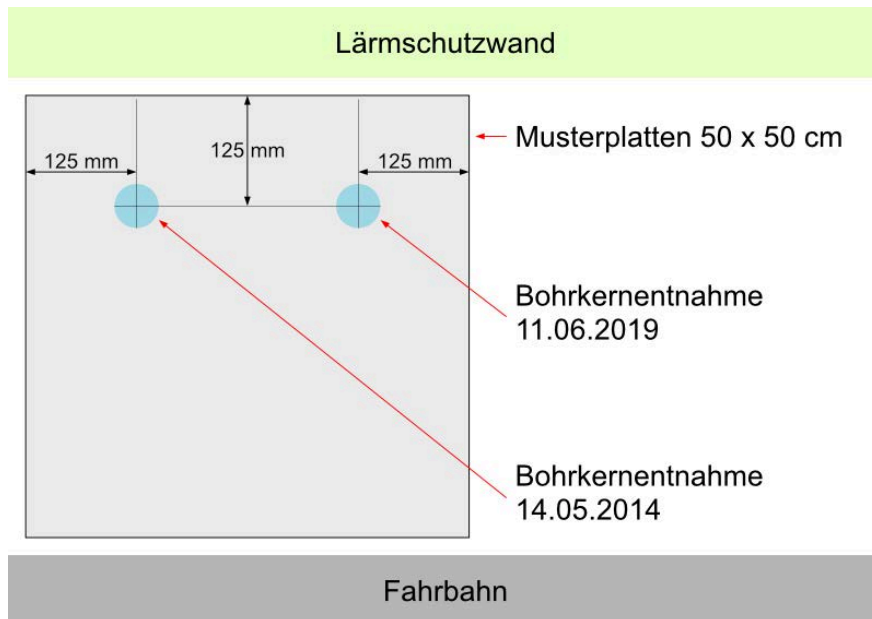


Abb.65 Position der Bohrkernentnahme auf den Platten

Die Chloridanalyse wurde 2019 gemäss SN EN 14629 durchgeführt. Im Jahr 2014 wurde der Chloridgehalt mit einem geänderten Verfahren, d.h. mit einem Heisswasser- anstatt einem Säureaufschluss bestimmt. Die mit Heisswasser bestimmten Chloridgehalte von 2014 liegen in der Regel bei ca. 80 - 90% der Werte aus dem Säureaufschluss. Die Resultate sind in **Tab. 26** und **Tab. 27** enthalten und in **Abb.66** und **Abb.67** dargestellt.

Tab. 26 Chloridgehalt nach zwei und sieben Wintern

Beton Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Zementgehalt, kg/m ³		300	300	300	300	320	320	320
Trockenrohdichte, kg/m ³		2'402	2'340	2'384	2'324	2'366	2'329	2'289
Umrechnungsfaktor		8.0	7.8	7.9	7.7	7.4	7.3	7.2
2014	0 - 10 mm	0.42	0.38	0.37	0.41	0.40	0.48	0.39
	10 - 20 mm	0.04	0.11	0.17	0.22	0.16	0.13	0.14
	20 - 30 mm	0.01	0.01	0.08	0.05	0.03	0.03	0.04
2019	0 - 10 mm	0.95	0.75	0.42	0.50	0.48	0.68	0.31
	10 - 20 mm	0.28	0.38	0.25	0.23	0.28	0.35	0.16
	20 - 30 mm	0.08	0.14	0.17	0.24	0.12	0.16	0.11
	30 - 40 mm	0.04	0.07	0.11	0.15	0.08	0.10	0.06
	40 - 50 mm	0.03	0.04	0.10	0.11	0.07	0.04	0.04

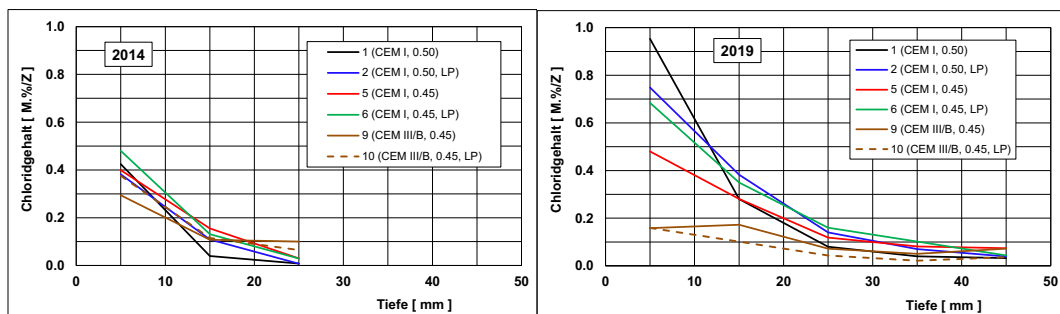
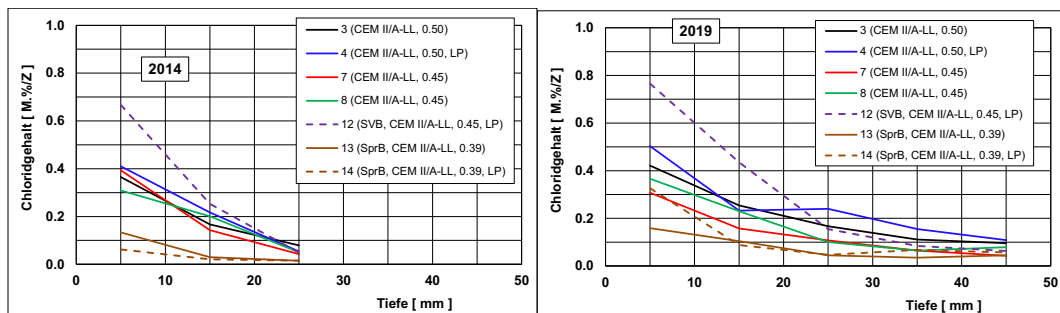
Tab. 27 Chloridgehalt nach zwei und sieben Wintern (Fortsetzung)

Beton Nr.		8	9	10	12	13	14
Zementgehalt, kg/m ³		320	320	320	320	450	425
Trockenrohdichte, kg/m ³		2'298	2'297	2'321	2'248	2'230	2'201
Umrechnungsfaktor		7.2	7.2	7.2	7.0	5.0	5.2
2014	0 - 10 mm	0.31	0.29	0.38	0.67	0.13	0.06
	10 - 20 mm	0.20	0.11	0.12	0.25	0.03	0.02
	20 - 30 mm	0.05	0.10	0.07	0.05	0.01	0.02
2019	0 - 10 mm	0.37	0.16	0.16	0.77	0.16	0.33
	10 - 20 mm	0.23	0.17	0.10	0.44	0.10	0.09
	20 - 30 mm	0.10	0.07	0.04	0.15	0.04	0.05
	30 - 40 mm	0.06	0.05	0.02	0.08	0.03	0.07
	40 - 50 mm	0.08	0.07	0.04	0.06	0.04	0.06

Es zeigt sich, dass die Chloride nach sieben Wintern bis in eine Tiefe von über 50 mm eingedrungen sind. Bei sämtlichen Betonen ist eine deutliche Zunahme des Chloridgehalts zwischen 2014 und 2019 feststellbar. Augenfällig ist dabei, dass bei den CEM III/B- und den Spritzbetonen der Chloridgehalt im Vergleich zu den anderen Betonarten wesentlich tiefer ausfällt.

Nach sieben Wintern ist ein Einfluss der Zementart auf den Chloridgehalt im Beton erkennbar. So weisen die Betone mit CEM I als Bindemittel allgemein einen höheren Chloridgehalt auf. Bereits im Frühjahr 2014 zeigte der Beton 12 (SVB, CEM II/A-LL, 0.45, LP) einen höheren Chloridgehalt, was 2019 wiederum der Fall ist.

Einen Rückschluss auf die Wirkung von künstlich eingeführter Luft auf den Chlorideintrag kann weiterhin nicht erkannt werden.

**Abb.66** Chloridgehalt der Platten im Frühjahr 2014 und im Frühjahr 2019**Abb.67** Chloridgehalt der Platten im Frühjahr 2014 und im Frühjahr 2019 (Fortsetzung)

7.2.3 Mikroskopische Gefügeanalyse des Betons nach 7 Wintern

Die Entnahme der Bohrkern wurde bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben. Die Präparation der Dünnschliffe erfolgte liegend (Breite 50 mm).

In der **Tab. 28** bis **Tab. 31** sind die Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalyse für jeden Beton beschrieben. Die Tiefe der Zementsteinabwitterung wurde gemäss **Abb.68** gemessen. Da die ursprüngliche Oberfläche am Dünnschliff nicht mehr besteht, konnte die Zementsteinabwitterung nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Als Näherung wurde der Abstich zwischen der höchsten Erhebung und der tiefsten Senke an der Dünnschliffoberfläche bestimmt. Somit kann am ehestens die ursprüngliche Oberfläche repräsentiert und die gesamt Abwitterung bestimmt werden.

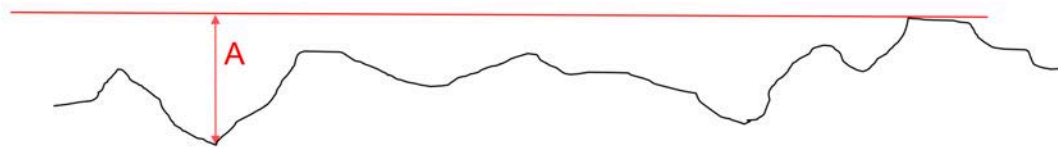


Abb.68 Messmethode Zementsteinabwitterung

Tab. 28 Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen

Beton Nr.	Gefügebeurteilung bis in ca. 30 mm Profiltiefe	
	2014	2019
1	Gesamthaft gute Gefügequalität. Lokale Karbonatisierung bis maximal 0.3 mm. Drei vertikal zur Oberfläche verlaufende Haarrisse bis 5 mm Profiltiefe. Keine Rissverfüllungen. An Oberfläche leicht vorstehende Korntextur (Zementsteinabwitterung). Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Karbonatisierungstiefe bis 1.4 mm. Zementsteinabwitterung bis 1.4 mm. D_{max} freigelegte Körner 1.5 mm 1 Vertikalriss mit Breite <0.025 mm von der Oberfläche aus bis in 7 mm Profiltiefe verlaufend. Keine Kornausbrüche aber eine vorstehende Korntextur erkennbar. Schäden in Form von leichten Zementsteinabwitterungen zu erkennen.
2	Gesamthaft gute Gefügequalität des LP- Betons. Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm. Zwei vertikal zur Oberfläche verlaufende Haarrisse bis 4 mm Profiltiefe. Keine Rissverfüllungen. Keine Schädigung erkennbar.	Gesamthaft gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe lokal bis 1.2 mm. Zementsteinabwitterung bis 2.1 mm. D_{max} freigelegte Körner 2.5 mm 2 Vertikalrisse mit Breite <0.025 mm von der Oberfläche aus bis in 3 - 5 mm Profiltiefe verlaufend. Keine Kornausbrüche aber leicht vorstehende Korntextur erkennbar. Leichte Zementsteinabwitterungen. Gute homogene Verteilung der Luftporen von der Oberfläche bis in den Kernbereich.
3	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe um 0.5 mm. Oberfläche mit einem Vertikalriss, Breite < 0.05 mm, bis in eine Profiltiefe von 5 mm reichend. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Karbonatisierungstiefe lokal bis 1.0 mm. Zementsteinabwitterung bis 1.2 mm. D_{max} freigelegte Körner 9 mm 2 Vertikalrisse mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 7 mm Profiltiefe reichend. Keine Kornausbrüche aber vorstehende Korntextur erkennbar. Vereinzelte oberflächenparallele Risse. Leichte Zementsteinabwitterungen.

Tab. 29 Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen (Fortsetzung)

Beton Nr.	Gefügebeurteilung bis in ca. 30 mm Profiltiefe	
	2014	2019
4	Gesamthaft gute Gefügequalität. Die künstlich eingeführten Luftporen sind in wenigen Fällen feinkernförmig ausgebildet, speziell im Oberflächenbereich. Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm. Wenige Haarrisse vorhanden. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Leicht gestörte Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe lokal bis 0.5 mm. Zementsteinabwitterung lokal bis 4.2 mm. D_{max} freigelegte Körner 7 mm 4 Vertikalrisse mit Breite <0.020 mm und bis in 3 - 8 mm Profiltiefe verlaufend. Stark vorstehende Korntextur, vereinzelte Körner sind nur noch zu ca. ¼ in die Bindemittelmatrix eingebunden. Mittlere Zementsteinabwitterungen. Das Luftporenkonzept ist eher grob sowie teilweise durch Porenagglomerationen und feinkernförmigen Verdichtungsstellen geprägt.
5	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.3 - 0.5 mm. Keine Risse vorhanden. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar. Oberfläche mit vergleichsweise höherer Bindemittelkapillarität und Feinkern.	Grundsätzlich gute mit lokal leicht gestörter Gefügequalität. Karbonatisierungstiefe lokal bis 2.5 mm. Zementsteinabwitterung bis 2.4 mm. D_{max} freigelegte Körner > 8 mm 2 Vertikalrisse mit Breite <0.025 mm von der Oberfläche aus bis in 2 - 4 mm Profiltiefe verlaufend. Keine Kornausbrüche aber leicht vorstehende Korntextur erkennbar. Gesamthaft leichte bis lokal mittlere Zementsteinabwitterung.
6	Gutes Betongefüge mit künstlicher Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.5 - 1.0 mm. Keine Risse feststellbar. Mit Ausnahme einer sehr geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Gesamthaft gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe von 0.0 bis lokal bis 2.5 mm. Zementsteinabwitterung bis 2.0 mm. D_{max} freigelegte Körner 8 mm 2 Vertikalrisse mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 4 mm Profiltiefe verlaufend. Leicht Zementsteinabwitterungen. An der Oberfläche ist der Luftporenanteil geringer als im Kernbereich.
7	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.2 - 1.2 mm. Von Oberfläche zwei Vertikalrisse, Breiten < 0.05 mm, bis in eine Profiltiefe von 5 mm strahlend. Keine Rissverfüllungen. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Leicht bis lokal stärker gestörte Gefügequalität. Karbonatisierungstiefe bis 1.0 mm. Zementsteinabwitterung lokal bis 1.8 mm. D_{max} freigelegte Körner 4 mm 1 Vertikalriss mit Breite < 0.15 mm und seitlichen Verzweigungen bis in 15 mm Profiltiefe reichend. Vorstehende Korntextur erkennbar. Möglicherweise sind bereits Kornausbrüche erfolgt. Mittlere Zementsteinabwitterungen. Dieser Beton zeigt deutliche Schädigungen an der Oberfläche auf.

Tab. 30 Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen (Fortsetzung)

Beton Nr.	Gefügebeurteilung bis in ca. 30 mm Profiltiefe	
	2014	2019
8	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Keine Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.2 - 1.0 mm. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar. Oberfläche mit Tendenz zur feinklunkernförmig Verdichtungsporenbildung.	Grundsätzlich gute mit lokal leicht gestörter Gefügequalität. Karbonatisierungstiefe von 0.0 bis lokal 1.3 mm. Zementsteinabwitterung bis 1.6 mm. D_{max} freigelegte Körner 8 mm 1 Vertikalriss mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 3 mm Profiltiefe verlaufend. Deutlich vorstehende Kornstruktur sichtbar jedoch ohne eindeutig feststellbare Kornausbrüche. Mittlere Zementsteinabwitterungen.
9	Grundsätzlich gute Gefügequalität. Mit künstlicher Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.5 - 4.0 mm. Spinnwebartige Haarrisse. Keine Rissverfüllungen. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar. Oberfläche mit Tendenz zur feinklunkernförmigen Verdichtungsporenbildung.	Leicht gestörte Gefügequalität. Karbonatisierung 4.0 - 5.0 mm, lokal bis 7.0 mm. Zementsteinabwitterung bis 2.7 mm. D_{max} freigelegte Körner 10 mm Netzartige Risse mit Breite <0.020 mm über das gesamte Profil verteilt. Stark vorstehende Kornstruktur, vereinzelte Körner sind nur noch zu ca. ¼ in die Bindemittelmatrix eingebunden. Gesamthaft leichte mit lokal mittleren Zementsteinabwitterungen.
10	Gute Gefügequalität des Luftporenbetons. Karbonatisierungstiefe 2.0 – 5.0 mm. Von Oberfläche zwei Vertikalrisse mit Breiten < 0.05 mm bis in 10 mm Profiltiefe strahlend. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Gesamthaft gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe bis 5.0 mm. Zementsteinabwitterung bis 1.3 mm, lokal bis 1.1 mm. D_{max} freigelegte Körner 7 mm 1 Vertikalriss mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 2 mm Profiltiefe verlaufend. Grundsätzlich idealer LP-Beton mit einem geringen Anteil an Mikroluftporen im Bereich der Oberfläche.
12	Gesamthaft leicht gestörte Gefügequalität. Hohes Luftporenvolumen mit Tendenz zur Agglomeratbildung. Maximale Karbonatisierungstiefe 0.5 mm. Mit Ausnahme einer sehr geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Gesamthaft gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe bis 2.0 mm. Zementsteinabwitterung bis 0.8 mm. D_{max} freigelegte Körner 4 mm 1 Vertikalriss mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 6 mm Profiltiefe verlaufend. Leicht Zementsteinabwitterungen erkennbar.

Tab. 31 Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen (Fortsetzung)

Beton Nr.	Gefügebeurteilung bis in ca. 30 mm Profiltiefe	
	2014	2019
13	Gutes Betongefüge, mit künstlicher Luftporeneinführung. Karbonatisierungstiefe 0.5 - 2.5 mm. Mit Ausnahme einer geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Grundsätzlich gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe 0.5 mm bis lokal 3.0 mm. Zementsteinabwitterung bis 0.5 mm. D _{max} freigelegte Körner 4 mm 2 Vertikalrisse mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 4 mm Profiltiefe verlaufend. Vereinzelte Körner sind nur noch zu ca. ½ in die Bindemittelmatrix eingebunden. Oberflächensituation gut mit leichten Zementsteinabwitterungen. Der Beton zeigt einen erhöhten Anteil an Grobporen auf.
14	Gutes Betongefüge, mit künstlich eingeführten Luftporen. Keine Karbonatisierungsfront feststellbar. Mit Ausnahme einer sehr geringen Zementsteinabwitterung keine Schädigung erkennbar.	Gesamthaft gute Gefügequalität mit künstlich eingeführten Luftporen. Karbonatisierungstiefe von 0.0 bis 0.5 mm. Zementsteinabwitterung bis 0.6 mm. D _{max} freigelegte Körner 2 mm 1 Vertikalriss mit Breite <0.020 mm von der Oberfläche aus bis in 2.5 mm Profiltiefe verlaufend. Vereinzelte Rissverfüllungen. Leicht hervorstehende Korntextur ohne Kornausbrüche. Wenige Oberflächenparallele Mikrorisse (versintert) <0.020 mm erkennbar. Leichte Zementsteinabwitterungen. Grundsätzlich guter LP-Beton mit einem geringen Anteil an Mikroluftporen im Bereich der Oberfläche.

Neben der Zementsteinabwitterung am Dünnschliff wurde für die Beurteilung des Frosttaumittel induzierten Materialabtrags das grösste an der Oberfläche freiliegende Gesteinskorn erfasst und mit "D_{max} freiliegend" bezeichnet. "D_{max} freiliegend" wurde aus dem Grund bestimmt, da mit fortschreitendem Materialabtrag immer grössere Körner freigelegt werden.

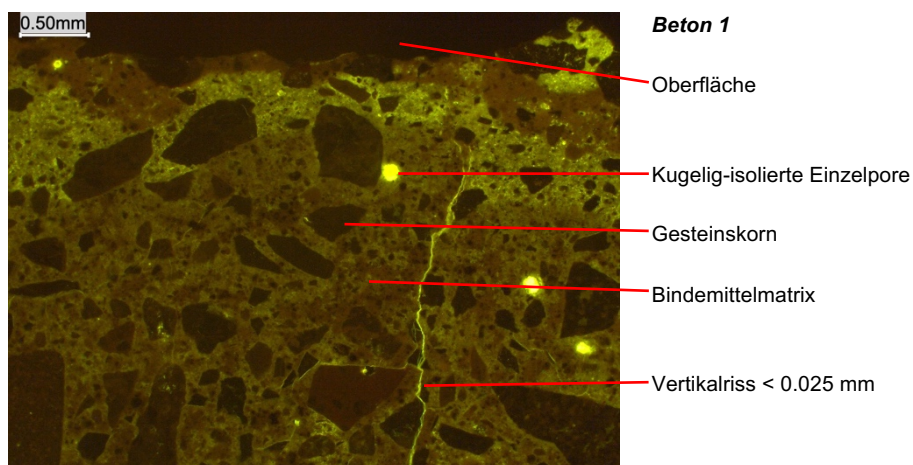
Die für Frosttaumittel-Schäden typischen oberflächenparallelen Risse wurden an dem untersuchten Probenmaterial nicht beobachtet. Es besteht die Möglichkeit, dass dies an den am Auslagerungsstandort vorherrschenden klimatischen Bedingungen liegt.

Für die in den Dünnschliffen sehr häufig festgestellten vorwiegend vertikalen Mikrorisse gibt es verschiedene mögliche Ursachen. Es kann jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, dass sie im Zusammenhang mit der Frostbelastung stehen. Auffällig ist dabei, dass die Mikrorisse im poröseren karbonatisierten Bereich der Betone mit CEM III/B (Beton 9 und 10) nicht auftreten. Möglicherweise sind die Mikrorisse dünnschliffpräparationsbedingt bei der Vakuum-Imprägnierung entstanden.

Tab. 32 Zusammenfassung der Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeanalysen

Beton Nr.	Abwitterung	D _{max} freiliegend
1	1.4 mm	1.5 mm
2	2.1 mm	2.5 mm
3	1.2 mm	9 mm
4	4.2 mm	7 mm
5	2.4 mm	> 8 mm
6	2.0 mm	8 mm
7	1.8 mm	4 mm
8	1.6 mm	8 mm
9	2.7 mm	10 mm
10	1.3 mm	7 mm
12	0.8 mm	4 mm
13	0.5 mm	4 mm
14	0.6 mm	2 mm

Abgesehen von den in den Gefügebeschreibungen aufgeführten Details zu den Poren, den Rissen und der Oberflächensituation weisen die untersuchten Dünnschliffe keine wesentlichen Sonderheiten auf, welche detailliert zu behandeln wären. Vergleiche dazu **Abb.69** bis **Abb.81**.

**Abb.69** Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 1

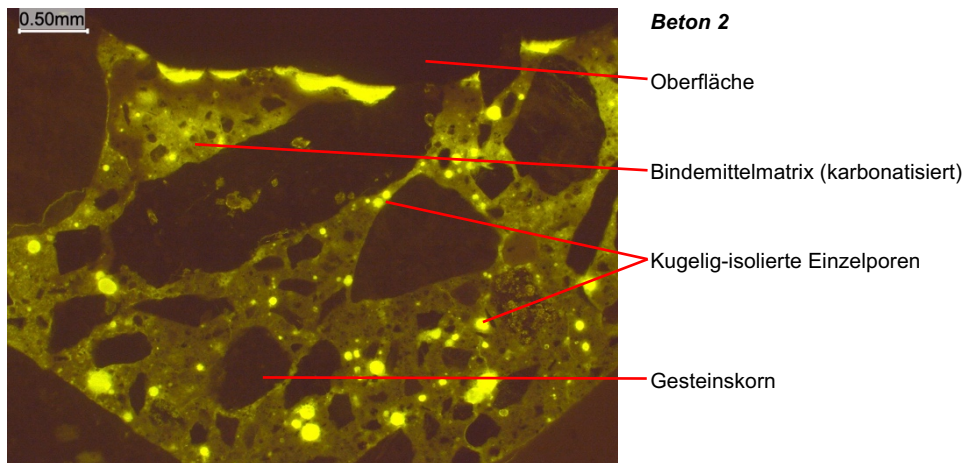


Abb.70 Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 2

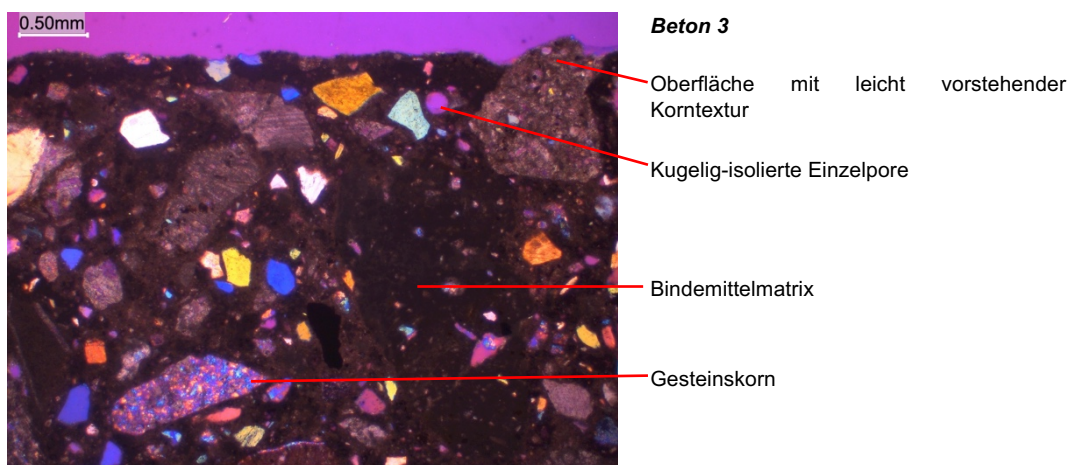


Abb.71 Mikroskopische Gefügaufnahme im Polarisationslicht. Beton 3

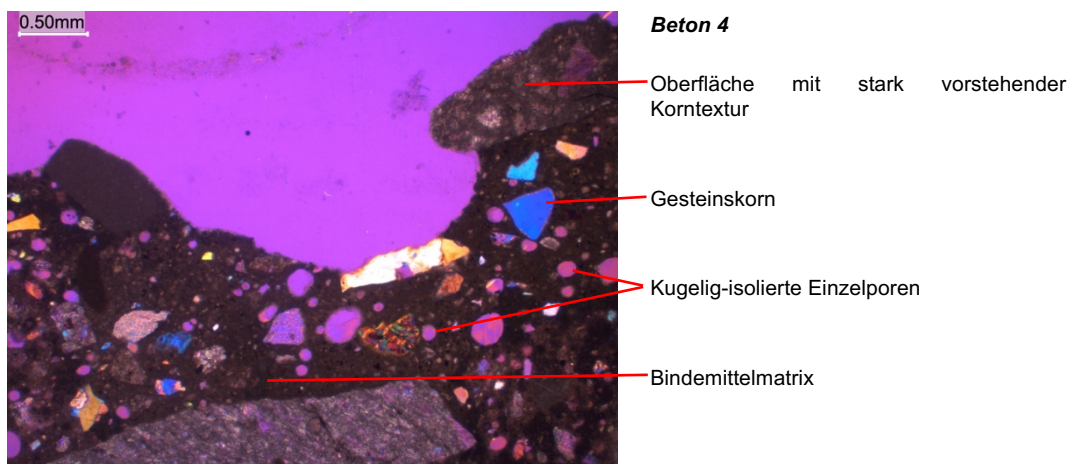


Abb.72 Mikroskopische Gefügaufnahme im Polarisationslicht. Beton 4

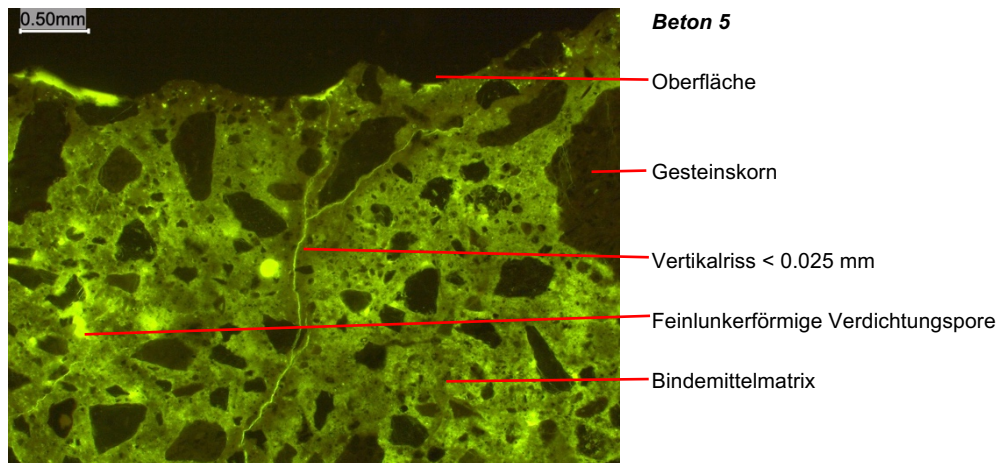


Abb.73 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 5

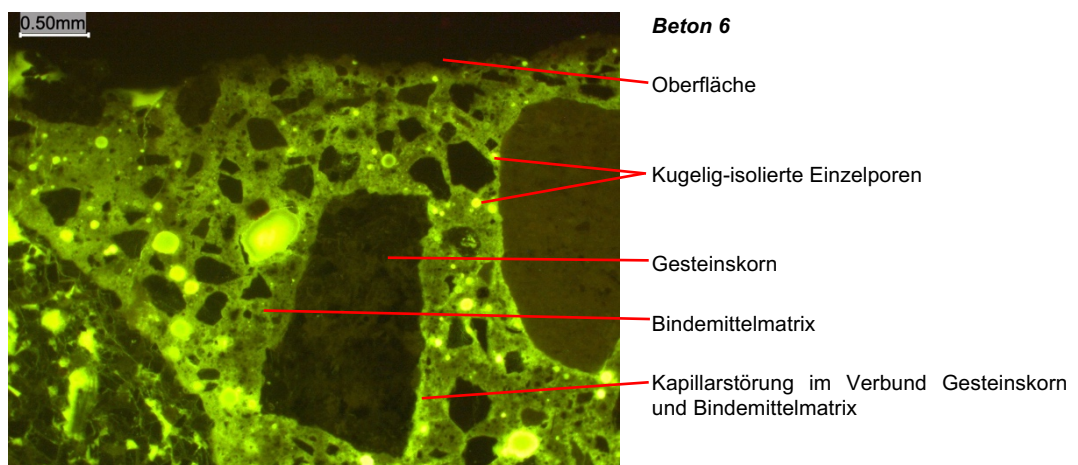


Abb.74 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 6

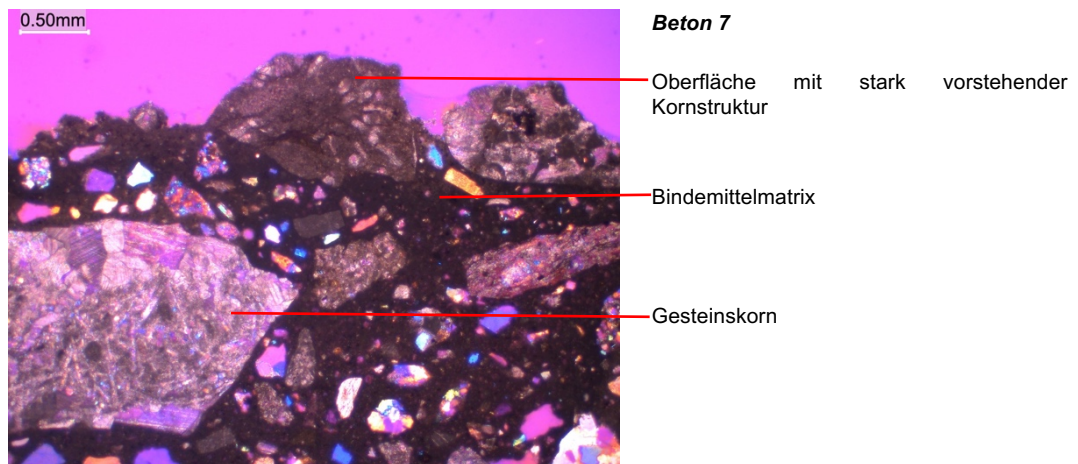


Abb.75 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Polarisationslicht. Beton 7

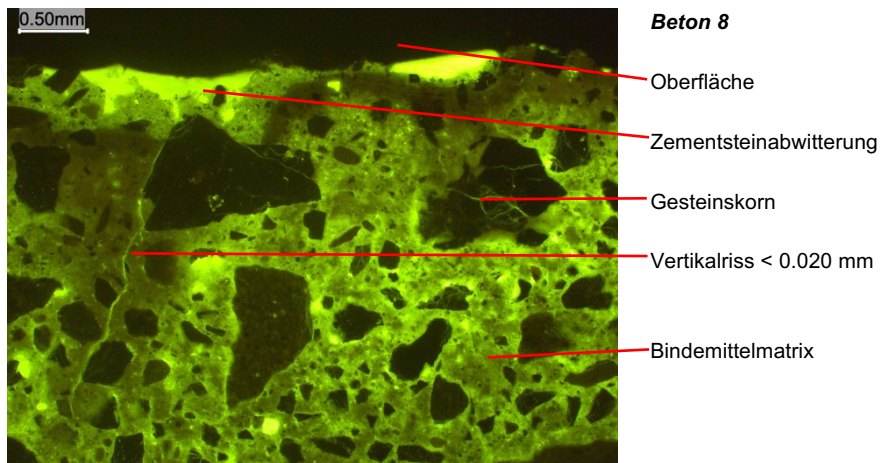


Abb.76 Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 8

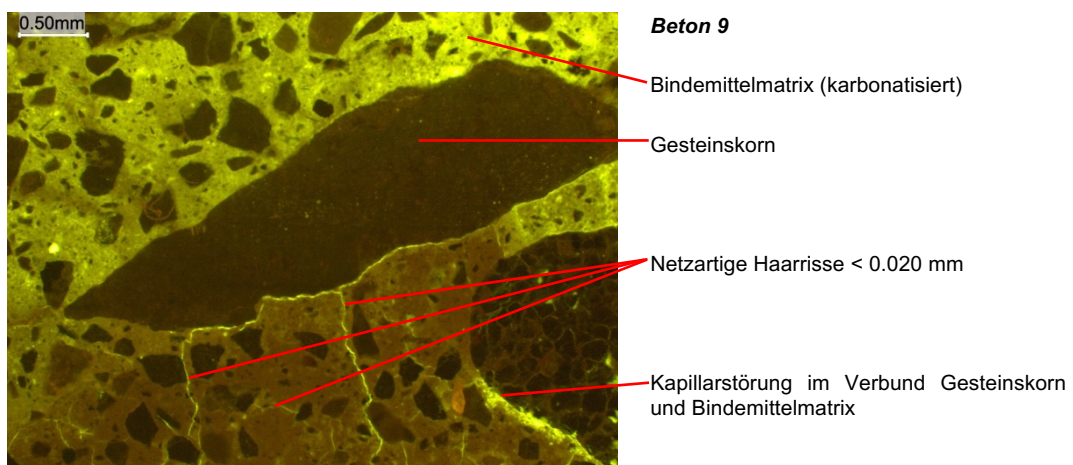


Abb.77 Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 9

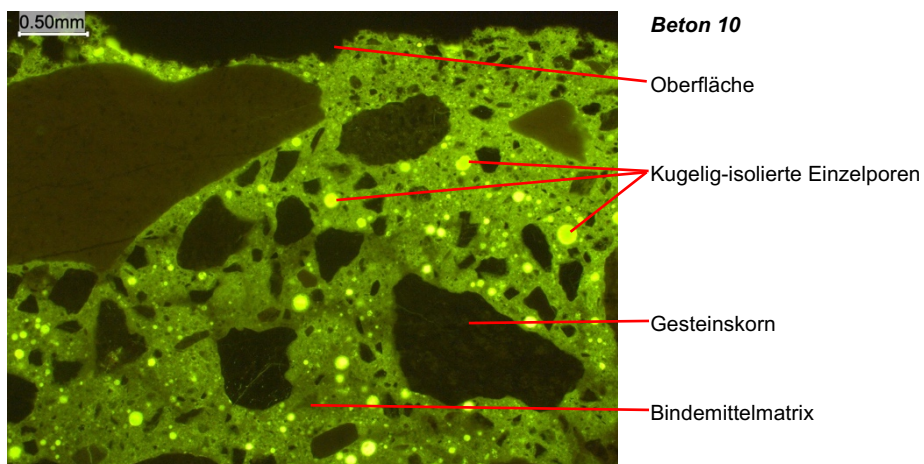


Abb.78 Mikroskopische Gefügaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 10

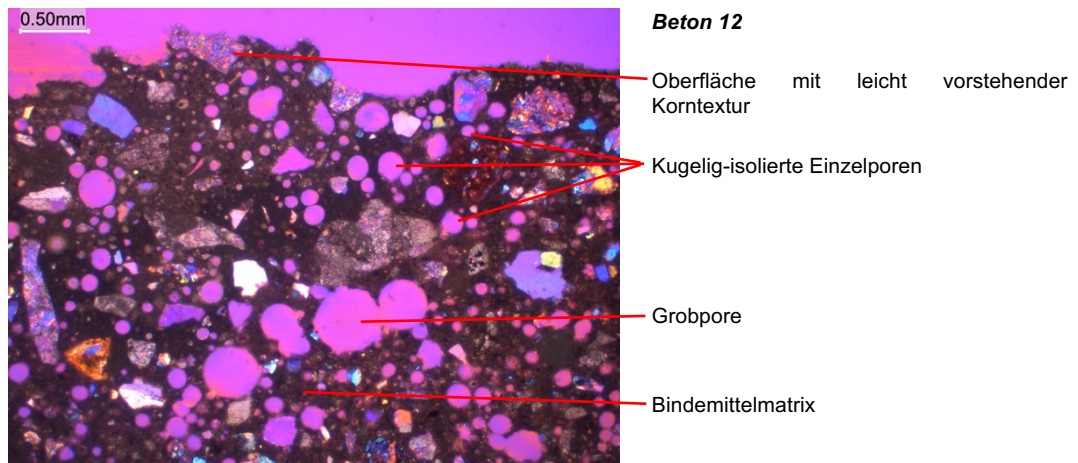


Abb.79 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Polarisationslicht. Beton 12

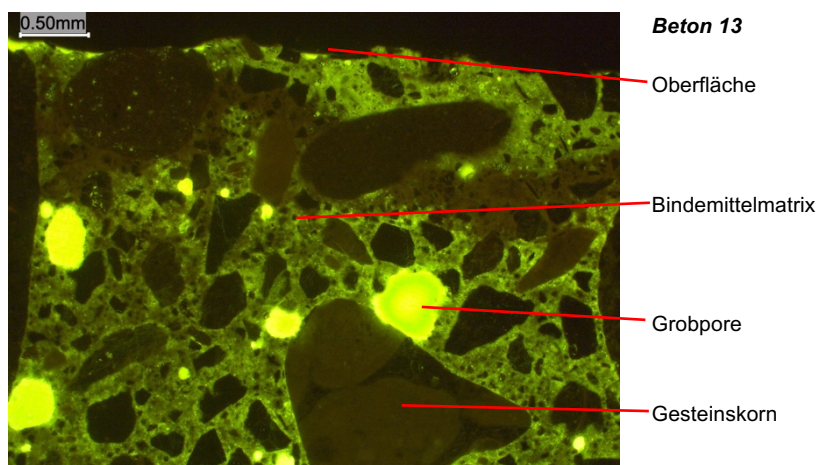


Abb.80 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Fluoreszenzlicht. Beton 13

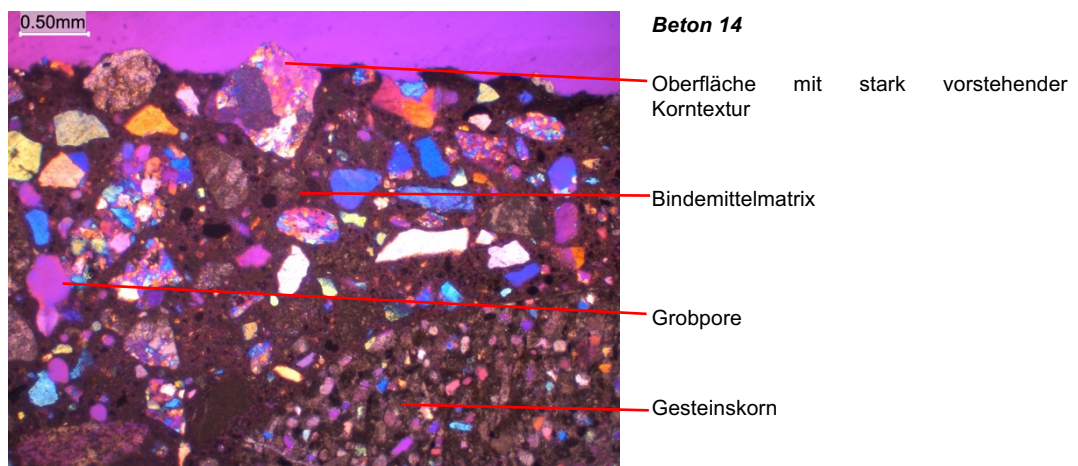


Abb.81 Mikroskopische Gefügeaufnahme im Polarisationslicht. Beton 14

7.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Um die Resultate der FTW-Prüfungen mit den Beurteilungen der Versuchsplatten von 2019 zu vergleichen, ist eine Klassierung der Resultate notwendig. Im Vorgängerbericht [Werner 2016] wurde dies bereits für die Resultate der FTW-Prüfungen vorgenommen. Im aktuellen Bericht stützen wir uns auf die dort gewählte Klassierung mit drei Stufen: ungenügend / 0, mittel / 1 und hoch / 2. Dabei wurden den Beurteilungskriterien (visuell an der Versuchplatte, Abwitterung am Dünnschliff und $D_{\max}$ freiliegend am Dünnschliff) ebenfalls die Klassierung ungenügend / 0, mittel / 1 und hoch / 2 zugeordnet. Die Kriterien der Klassierung gehen aus **Tab. 33** hervor. Aus **Tab. 34** können die bewerteten Ergebnisse des FT-Widerstands und der Beurteilung von 2019 für die einzelnen Betone entnommen werden.

Tab. 33 Klassierung der Kriterien

Prüfungen		Bewertung	
SIA	nicht erfüllt	mittel	hoch
TFB	schlecht / ungenügend	genügend	gut / hoch
BE I	tief	mittel	hoch
BE II	tief	mittel	hoch
Beurteilung 2019			
Abwitterung / visuell	stark / sehr stark	mittel bis stark	praktisch nicht / sehr wenig
Abwitterung / DS	> 2 mm	$\geq 1 - \leq 2$ mm	< 1 mm
$D_{\max}$ freiliegend / DS	≥ 8 mm	> 4 – < 8 mm	≤ 4 mm
Klassierung (Ranking)	ungenügend	mittel	hoch
	0	1	2

Tab. 34 FT-Widerstand und Beurteilung der Betone

Beton Nr.	FTW-Prüfungen [Werner 2016]				Beurteilung 2019		
	SIA	TFB	BE I	BE II	Abwitterung / visuell	Abwitterung / DS	$D_{\max}$ / DS
1	1	1	0	0	2	1	2
2	2	2	2	2	2	0	2
3	0	0	1	0	0	1	0
4	1	1	1	0	0	0	1
5	2	2	0	0	0	0	0
6	2	1	2	2	0	1	0
7	0	0	0	0	1	1	2
8	0	0	0	0	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	2	1	0	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	2
13	2	1	1	1	2	2	2
14	2	2	2	2	2	2	2

In einer ersten Phase wurde verglichen, inwieweit die einzelnen Kriterien der Beurteilung 2019 miteinander übereinstimmen (vgl. **Tab. 35** und **Tab. 36**). Dies ist notwendig, um im Weiteren einen Vergleich der FT-Widerstände mit den Beurteilungen 2019 vorzunehmen. Bestehen bereits zwischen den Beurteilungskriterien 2019 grosse Abweichungen ist es nicht zielführend, diese mit den FT-Widerständen der einzelnen Prüfungen zu vergleichen. Im vorliegenden Fall stimmen die Bewertungen der einzelnen Kriterien im Allgemeinen jedoch sehr gut überein. Einzig bei Beton Nr. 2 kommt es zwischen der Abwitterung visuell an der Versuchsplatte beurteilt und der Abwitterung am Dünnschliff zu einer Abweichung von zwei Klassen. Die Bewertung der Abwitterung am Dünnschliff ist strenger. Aufgrund der Tatsache, dass mit einem Dünnschliff nur ein minimaler Bereich einer Musterplatte abgebildet werden kann und das zweite Kriterium $D_{\max}$ mit dem visuellen Eindruck korreliert, darf diese grobe Abweichung als zufällig beurteilt werden.

Tab. 35 Abweichung Abwitterung visuell 2019 zu Abwitterung am Dünnschliff

Beton Nr.	Kriterien		Abweichungen	
	Abwitterung / visuell	Abwitterung / DS	strenger	schwächer
1	2	1	1	0
2	2	0	2 ¹	0
3	0	1	0	-1
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	1	0	-1
7	1	1	0	0
8	1	1	0	0
9	0	0	0	0
10	1	1	0	0
12	2	2	0	0
13	2	2	0	0
14	2	2	0	0
Anzahl			2	2
Summe			3	-2

¹ Ist vermutlich als Ausreisser zu betrachten. Siehe Text oben.

Beim Vergleich der Ergebnisse der FTW-Prüfungen mit den Beurteilungskriterien 2019 wurden die Abweichungen in die Kategorie "strenger" und "schwächer" eingeteilt. Erreicht ein Beton in der FTW-Prüfungen einen hohen Widerstand (2), aber bei der Dünnschliffanalyse werden massive Abwitterungen (0) festgestellt, überschätzt die Prüfung den Frosttaumittelwiderstand um 2 Klassen. Somit steht in der Spalte "schwächer" eine "2". Analog steht in der Spalte "strenger" eine "2", wenn der Beton bei der FTW-Prüfung einen ungenügenden FT-Widerstand erreicht, an den Versuchsplatten aber keine Schäden erkennbar sind. Das Prüfverfahren ist somit für den Beton zu "streng".

Das beschriebene Vorgehen erlaubt, die Unterschiede zwischen verschiedenen Verfahren leicht erkennbar zu machen, d.h. zu beurteilen, ob ein Verfahren strenger oder schwächer ist als ein anderes.

Tab. 36 Abweichung Abwitterung visuell 2019 zu D_{max} freiliegend am Dünnschliff

Beton Nr.	Kriterien		Abweichungen	
	Abwitterung / visuell	D_{max} / DS	strenger	schwächer
1	2	2	0	0
2	2	2	0	0
3	0	0	0	0
4	0	1	0	-1
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	1	2	0	-1
8	1	0	1	0
9	0	0	0	0
10	1	1	0	0
12	2	2	0	0
13	2	2	0	0
14	2	2	0	0
Anzahl			1	2
Summe			1	-2

Korrelationen zwischen Abweichungen und dem Betonrezept (Zementart usw.) konnten keine eindeutigen gefunden werden. Es ist eine Tendenz erkennbar, dass Prüfverfahren, welche den Frosttaumittelwiderstand anhand des Luftporengehaltes beurteilen (BE I und TFB) den Frosttaumittelwiderstand von Betonen ohne LP unterschätzen und somit für derartige Betone tendenziell zu streng sind.

Tab. 37 Abwitterung visuell 2019 im Vergleich mit Luftporen

Beton Nr.	Abwitterung / visuell	LP-Beton
1	2	Nein
2	2	Ja
3	0	Nein
4	0	Ja
5	0	Nein
6	0	Ja
7	1	Nein
8	1	Nein
9	0	Nein
10	1	Ja
12	2	Ja
13	2	Ja
14	2	Ja

Der positive Effekt des Luftporenbildner in der Betonrezeptur auf den Frosttaumittelwiderstand ist durch die visuelle Beurteilung der Abwitterung an den Versuchsplatten nicht direkt erkennbar (vgl. **Tab. 37**). Es ist davon auszugehen, dass dies mit den Auslagerungsbedingungen am gewählten Standort in einem Zusammenhang steht.

Tab. 38 Abweichung Abwitterung visuell 2019 zu FTW-Prüfung SIA und TFB

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	Abwitterung / visuell	SIA	TFB	strenger		schwächer	
				SIA	TFB	SIA	TFB
1	2	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	0	-1	-1
5	0	2	2	0	0	-2	-2
6	0	2	1	0	0	-2	-1
7	1	0	0	1	1	0	0
8	1	0	0	1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	2	0	0	0	-1
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	2	1	0	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				3	4	3	4
Summe				3	4	-5	-5
Abweichung von 2 Klassen				0	0	2	1

Tab. 39 Abweichung Abwitterung visuell 2019 zu FTW-Prüfung BE I und BE II

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	Abwitterung / visuell	BE I	BE II	strenger		schwächer	
				BE I	BE II	BE I	BE II
1	2	0	0	2	2	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	-1	0
4	0	1	0	0	0	-1	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	2	2	0	0	-2	-2
7	1	0	0	1	1	0	0
8	1	0	0	1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	1	0	0
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	1	1	1	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				4	5	3	1
Summe				5	6	-4	-2
Abweichung von 2 Klassen				1	1	1	1

Tab. 40 Abweichung Abwitterung am Dünnschliff zu FTW-Prüfung SIA und TFB

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	Abwitterung / DS	SIA	TFB	strenger		schwächer	
				SIA	TFB	SIA	TFB
1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	2	2	0	0	-2	-2
3	1	0	0	1	1	0	0
4	0	1	1	0	0	-1	-1
5	0	2	2	0	0	-2	-2
6	1	2	1	0	0	-1	0
7	1	0	0	1	1	0	0
8	1	0	0	1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	2	0	0	0	-1
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	2	1	0	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				3	4	4	4
Summe				3	4	-6	-6
Abweichung von 2 Klassen				0	0	2	2

Tab. 41 Abweichung Abwitterung am Dünnschliff zu FTW-Prüfung BE I und BE II

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	Abwitterung / DS	BE I	BE II	strenger		schwächer	
				BE I	BE II	BE I	BE II
1	1	0	0	1	1	0	0
2	0	2	2	0	0	-2	-2
3	1	1	0	0	1	0	0
4	0	1	0	0	0	-1	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	1	2	2	0	0	-1	-1
7	1	0	0	1	1	0	0
8	1	0	0	1	1	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	1	0	0
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	1	1	1	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				4	6	3	2
Summe				4	6	-4	-3
Abweichung von 2 Klassen				0	0	1	1

Tab. 42 Abweichung D_{max} freiliegend am Dünnschliff zu FTW-Prüfung SIA und TFB

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	D_{max} / DS	SIA	TFB	strenger		schwächer	
				SIA	TFB	SIA	TFB
1	2	1	1	1	1	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	0	0	0	0
5	0	2	2	0	0	-2	-2
6	0	2	1	0	0	-2	-1
7	2	0	0	2	2	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	2	0	0	0	-1
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	2	1	0	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				2	3	2	3
Summe				3	4	-4	-4
Abweichung von 2 Klassen				1	1	2	1

Tab. 43 Abweichung D_{max} freiliegend am Dünnschliff zu FTW-Prüfung BE I und BE II

Beton Nr.	Kriterien			Abweichungen			
	D_{max} / DS	BE I	BE II	strenger		schwächer	
				BE I	BE II	BE I	BE II
1	2	0	0	2	2	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	-1	0
4	1	1	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	2	2	0	0	-2	-2
7	2	0	0	2	2	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	1	1	0	0	1	0	0
12	2	2	2	0	0	0	0
13	2	1	1	1	1	0	0
14	2	2	2	0	0	0	0
Anzahl				3	5	2	1
Summe				5	7	-3	-2
Abweichung von 2 Klassen				2	2	1	1

In **Tab. 38** bis **Tab. 43** ist ersichtlich, wie gut die Korrelation der einzelnen Prüfverfahren mit den Erkenntnissen aus der Beurteilung von 2019 an den Platten und an den Dünnschliffen ist. Es fällt dabei auf, dass die Prüfverfahren SIA, TFB und BE I den Frosttaumittelwiderstand in etwa gleich vielen Fällen überschätzen (Beton ist in der Tat aber "schwächer") und unterschätzen ("strenger", der Beton ist in der Tat aber besser). Das Prüfverfahren BE II unterschätzt ("strenger") den Frosttaumittelwiderstand vorwiegend.

Aufgrund der guten Korrelation der visuell bestimmten Abwitterung an der Platte, der Abwitterung am Dünnschliff und dem „Kriterium D_{max} “ freiliegend am Dünnschliff und dem Umstand, dass bei der visuellen Beurteilung der Abwitterung an den Platten der Gesamteindruck berücksichtigt wird und bei der Beurteilung des Dünnschliffs nur eine sehr lokale Information, welche zudem stark abhängig von der Position der Bohrkernentnahmestellen abhängt, kann die visuell an den Platten bestimmte Abwitterung als Referenz betrachtet werden. In **Tab. 44** sind somit nur noch die Resultate aus dem Vergleich mit der visuellen Abwitterung an den Platten und den Prüfverfahren aufgeführt.

Tab. 44 Zusammenfassung der Resultate der Prüfverfahren im Vergleich zur visuellen Beurteilung der Abwitterung 2019

Prüfverfahren	Prüfung ist strenger bzw. Beton wird unterschätzt			Prüfung ist schwächer bzw. Beton wird überschätzt		
	Anzahl	Summe	2 Klassen	Anzahl	Summe	2 Klassen
SIA	3	3	0	3	-5	2
TFB	4	4	0	4	-5	1
BE I	4	5	1	3	-4	1
BE II	5	6	1	1	-2	1

Sind Schäden an Bauwerken ohne Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten zu vermeiden, ist ein Prüfverfahren zu wählen, welches den Frosttaumittelwiderstand nach Möglichkeit nur unterschätzt, nicht aber überschätzt. So können Schäden vermieden werden. Unter wirtschaftlichen Aspekten kann dieses Vorgehen jedoch unter Umständen nicht tragbar sein, da dadurch höhere Kosten für den Beton anfallen, welche die durch allfällige Schäden verursachten Kosten übersteigen. Somit gilt es in der Praxis ein möglichst in allen Fällen zutreffendes Prüfverfahren zu finden, welches den Frosttaumittelwiderstand weder regelmässig über- noch regelmässig unterschätzt.

Allgemein muss erwähnt werden, dass die FTW-Prüfresultate sehr gut mit den Feststellungen an den Versuchsplatten übereinstimmen. Betrachtet man die zusammengefassten Resultate (vgl. **Tab. 44**) erkennt man, dass die Prüfverfahren den Frosttaumittelwiderstand vorwiegend um eine Klasse überschätzen bzw. unterschätzen. Eine Abweichung von einer Klasse sollte toleriert werden können und ist aufgrund von Abgrenzungsphänomenen nicht zu vermeiden. In seltenen Fällen liegt das Prüfverfahren um 2 Klassen im Vergleich zu den Versuchsplatten falsch. Dies bedeutet, dass das Prüfverfahren in diesem Fall komplett versagt hat. Solche Fälle sollten grundsätzlich bei einem Prüfverfahren nur bei einzelnen unsystematischen Ausreissern auftreten. Bei den vorliegenden Untersuchungen hat die SIA-Prüfung den Frosttaumittelwiderstand zweimal überschätzt. Die restlichen untersuchten Prüfverfahren haben den Frosttaumittelwiderstand lediglich in null bis einen Fall unterschätzt und in einem Fall überschätzt. Diese Anzahl kann toleriert werden.

7.3 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorgängerprojekts [Werner 2016] wurden aus 13 Betonen Versuchsplatten (50 x 50 x 15 cm³) hergestellt und im Herbst 2012 entlang der Autobahn A1 St. Gallen – St. Margrethen hinter der Leitplanke zur Bewitterung ausgelegt. Es wurden fortlaufend Untersuchungen an den Platten vorgenommen, um den Frosttaumittelangriff zu beobachten. Im Juni 2019 wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts die vorläufig letzten Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden Chloridprofile ermittelt, um festzustellen, ob das Taumittel in den Beton eingedrungen ist. Die Bohrkerns wurden auch visuell begutachtet und darauf Dünnschliffe hergestellt, um die Gefügequalität zu analysieren.

An den Dünnschliffen konnten keine für Frosttaumittelangriff typischen oberflächenparallelen Risse festgestellt werden. Jedoch wurden teils deutliche Zementsteinabwitterungen gemessen. Da die ursprüngliche Oberfläche am Dünnschliff nicht mehr besteht, konnte die Zementsteinabwitterung nicht zweifelsfrei ermittelt werden. Als zusätzliches Kriterium wurde daher der Durchmesser des grössten freiliegenden Korns an der Oberfläche gemessen und mit "D_{max} freiliegend" bezeichnet. Dies ist ein weiteres Indiz, wie viel von der Oberfläche bereits abgetragen wurde.

Die oben beschriebenen Kriterien wurden klassiert und mit den Resultaten der Laborprüfungen aus dem Vorgängerprojekt [Werner 2016] verglichen. Dazu wurde die visuelle Beurteilung der Abwitterung an den Platten als Referenz gewählt, da damit der Gesamteindruck der Platten beurteilt wird und nicht, wie bei den Dünnschliffen, eine sehr beschränkte Teilfläche.

Allgemein stimmen die Resultate der FTW-Prüfungen gut bis sehr gut mit den an den ausgelagerten Platten festgestellten Abwitterungen überein. Dabei kommt es in einigen Fällen zu Abweichungen von einer Klasse, welche aufgrund von Abgrenzungsphänomenen nicht zu vermeiden sind. In einigen wenigen Fällen tritt eine Abweichung von 2 Klassen auf.

Dabei zeigte sich, dass die Prüfverfahren SIA, TFB und BE I in ungefähr je einem Viertel der zur Verfügung stehenden Betonversuchsplatten den FT-Widerstand über- bzw. unterschätzen. Das heisst, der effektive Frosttaumittelwiderstand an der ausgelagerten Versuchsplatte ist tiefer bzw. höher als der im Prüfverfahren gemessene Widerstand.

Das Verfahren BE II unterschätzt in ungefähr einem Drittel der Fälle den Frosttaumittelwiderstand der Versuchsplatten. Lediglich in einzelnen Fällen überschätzt das BE II Verfahren den Frosttaumittelwiderstand. Die weit verbreitete Auffassung, dass das BE II Verfahren strenger ist, kann somit bestätigt werden.

Bei der SIA-Prüfung ist anzumerken, dass diese den Frosttaumittelwiderstand in zwei Fällen mit 2 Klassen überschätzt, also den Frosttaumittelwiderstand zu hoch einstuft. Dies muss im vorliegenden Fall negativ gewertet werden.

In der obigen Betrachtung wurde der Einfluss des Klimas am Auslagerungsstandort noch nicht mitberücksichtigt. Dies wird in **Kapitel 8** vorgenommen.

Es wird angestrebt, im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes die Platten unter härteren Expositionsbedingungen weiter zu begutachten.

8 Folgerungen und Empfehlungen aus den Untersuchungen

Das Ziel, ein einziges Referenzverfahren für die FTW-Prüfung in der Schweiz vorzuschlagen, konnte auch mit diesem Forschungsprojekt nicht abschliessend erreicht werden. Jedoch ist man einen erheblichen Schritt weitergekommen, da ein neues Mass für die Beurteilung eines Standortes bezüglich der Frostbeanspruchung gefunden wurde. Dies ist ein wichtiger Schritt und ermöglicht es, Frostschädigungen besser vorhersagen und verstehen zu können. Ebenso ist es dadurch möglich, zukünftige Feldversuche und Forschungsarbeiten besser zu konzeptionieren.

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Resultate der verschiedenen FTW-Prüfungen in den meisten Fällen gut mit den Beobachtungen an den in St. Margrethen ausgelagerten Platten korrelieren. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Analyse der Wetterdaten der verschiedenen Standorte in der Schweiz gezeigt hat, dass die Platten in St. Margrethen nicht unter sonderlich "harten" Bedingungen ausgelagert sind.

Die Frostbeanspruchung in St. Margrethen entspricht einer typischen Beanspruchung fürs Schweizer Mittelland und, wie allgemein bekannt ist, sind die Winter im Mittelland weit weniger hart als in den voralpinen und alpinen Regionen.

Die SIA-Prüfung nach Norm SIA 262/1 Anhang C hat bei zwei Betonen den Frosttaumittelwiderstand um zwei Klassen überschätzt, die restlichen drei Verfahren jeweils höchstens um eine Klasse über- und unterschätzt. Somit kann, als erster Anhaltspunkt auf der Suche nach einem Referenzverfahren, angemerkt werden, dass die SIA-Prüfung vermutlich zu schwach ist. Diese Einschätzung ist mit Versuchen an einem Standort mit härteren Wintern zu überprüfen.

Ebenso zeigt sich mit den vorliegenden Untersuchungen, wie bereits im Vorgängerbericht [Werner 2016], dass das BE II-Verfahren als strengstes Verfahren eingestuft werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass dieses Ranking auf den Beobachtungen der Platten am Auslagerungsstandort St. Margrethen beruht und, wie nun quantitativ nachgewiesen, ist dieser Standort für Frostbeanspruchung nicht repräsentativ für die härteren Winter in höheren Lagen.

Ebenso erscheint es wahrscheinlich, dass die schwache Frostbeanspruchung am Auslagerungsstandort der Platten in St. Margrethen ein wichtiger Grund ist, dass keine Korrelation zwischen den künstlich zugeführten Luftporen und der Abwitterung gefunden wurde.

Wir empfehlen, die Platten zeitnah an einen Standort mit härteren Bedingungen umzulagern (über 1'000 m ü. M.) und die Platten über die nächsten 5 bis 10 Jahre weiter zu untersuchen. Zusätzlich wäre es sehr hilfreich, weitere Platten, ausgerüstet mit Temperaturmesssensoren, herzustellen und ebenfalls am neuen Standort auszulagern. So kann die tatsächliche Beanspruchung der Platten noch präziser beurteilt werden. Aufgrund der Einmaligkeit dieses Langzeitversuches in der Schweiz wäre es sehr zu bedauern, die Untersuchungen zum jetzigen Zeitpunkt abzubrechen.

Weiter empfiehlt die Forschungsstelle zu prüfen, ob das CDF-Verfahren als Ersatz für die SIA-Prüfung als schweizerisches Referenzverfahren geeignet ist. Das CDF-Verfahren ist, wie die Untersuchungen gezeigt haben, präziser und zuverlässiger als die SIA-Prüfung.

Dass die CDF-Prüfung "härter" ist als die SIA-Prüfung führt nicht zwingend zu höheren Anforderungen an die Betone. Entscheidend sind hier die Grenzwerte. Die höhere Präzision und Wiederholgenauigkeit der CDF-Prüfung bedeutet eine höhere Beurteilungssicherheit der Betone und kann dadurch als Mehrwert für Lieferanten und Bauherren betrachtet werden. Infolgedessen ist auch eine verlässlichere Anforderung an einen mittleren Frosttaumittelwiderstand möglich. Die Festlegung einer solchen Anforderung an einen mittleren Frosttaumittelwiderstand sollte in den Folgeuntersuchungen miteinbezogen werden.

Nicht zuletzt ist die Angleichung an die europäische Normenlandschaft vorteilhaft, da so von den praktischen Erfahrungen der Anwender dieses Verfahrens wie auch von den Ergebnissen und Erkenntnissen aus europäischen Forschungsarbeiten direkt profitiert werden kann. Mit der SIA-Prüfung, die sonst in keinem anderen Land verwendet wurde, war dies nicht bzw. nur sehr beschränkt möglich.

Anhänge

I	Zeitlicher Verlauf der Luft- und Betontemperatur bei verschiedenen Prüfungen....	97
I.1	SIA-Prüfung	97
I.2	Platten-Prüfung.....	98
I.3	CDF-Prüfung	99

I Zeitlicher Verlauf der Luft- und Beton-temperatur bei verschiedenen Prüfungen

I.1 SIA-Prüfung

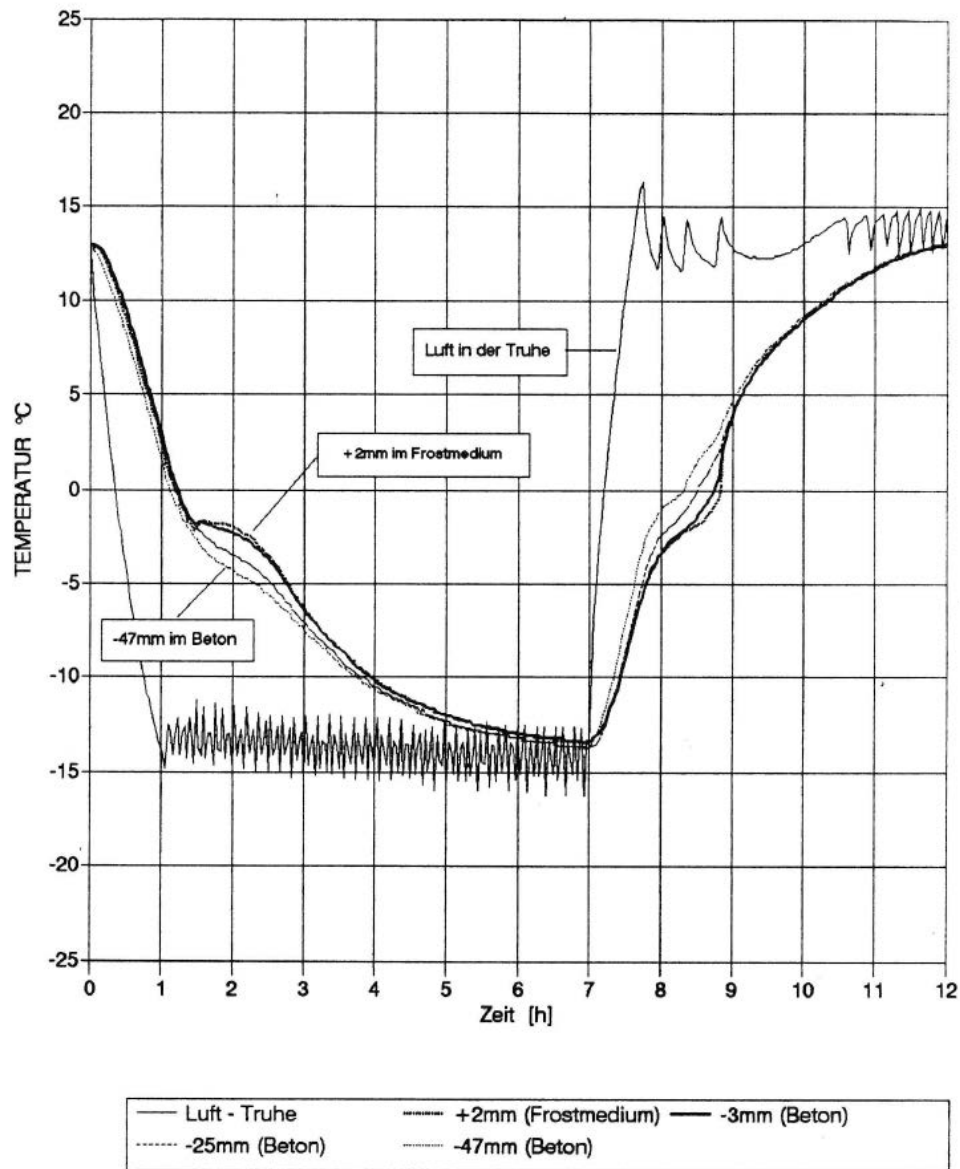


Abb.82 Zeitlicher Verlauf der Luft- und der Betontemperatur in verschiedenen Tiefen bei der SIA-Prüfung [Studer 1996].

I.2 Platten-Prüfung

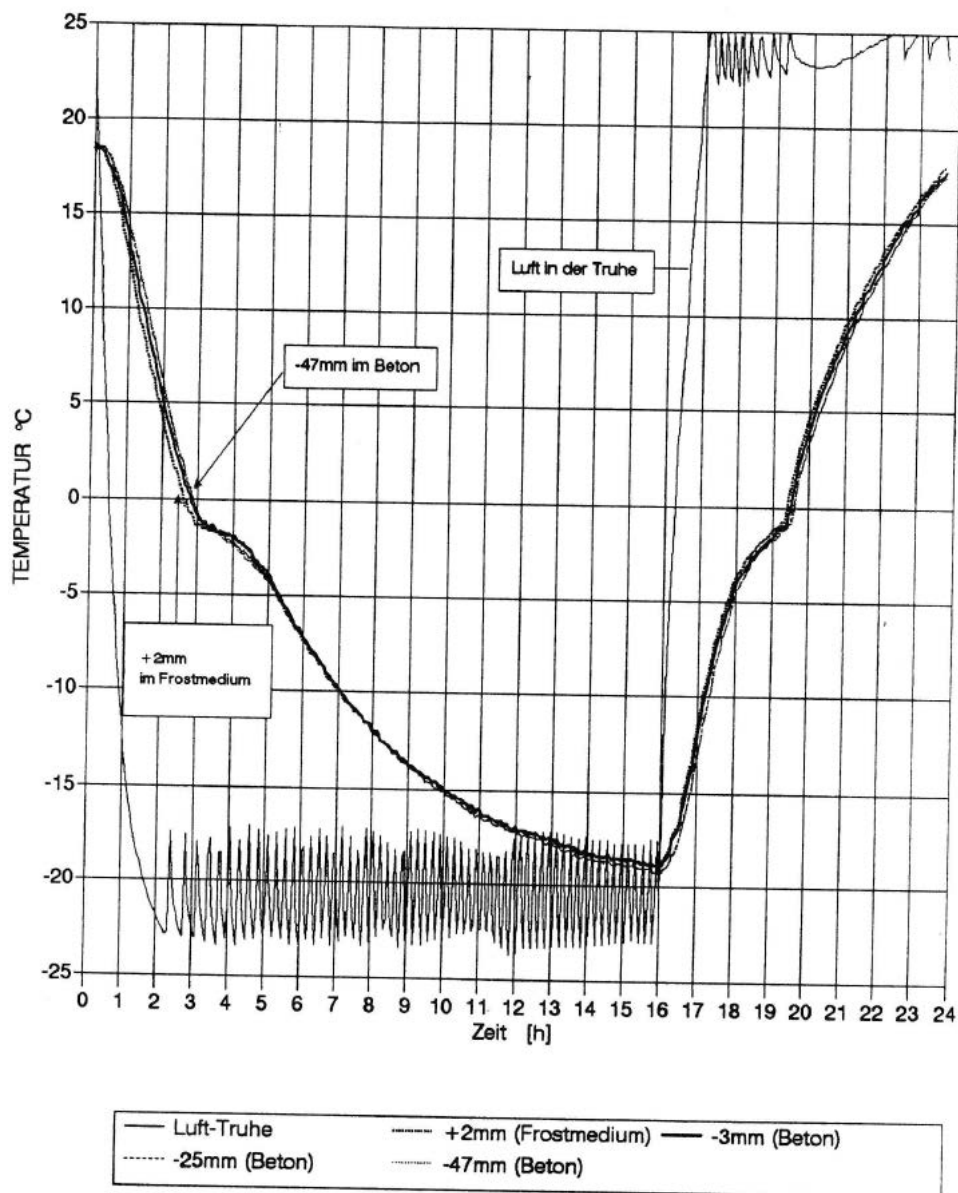


Abb.83 Zeitlicher Verlauf der Luft- und der Betontemperatur in verschiedenen Tiefen bei der Plattenprüfung [Studer 1996].

I.3 CDF-Prüfung

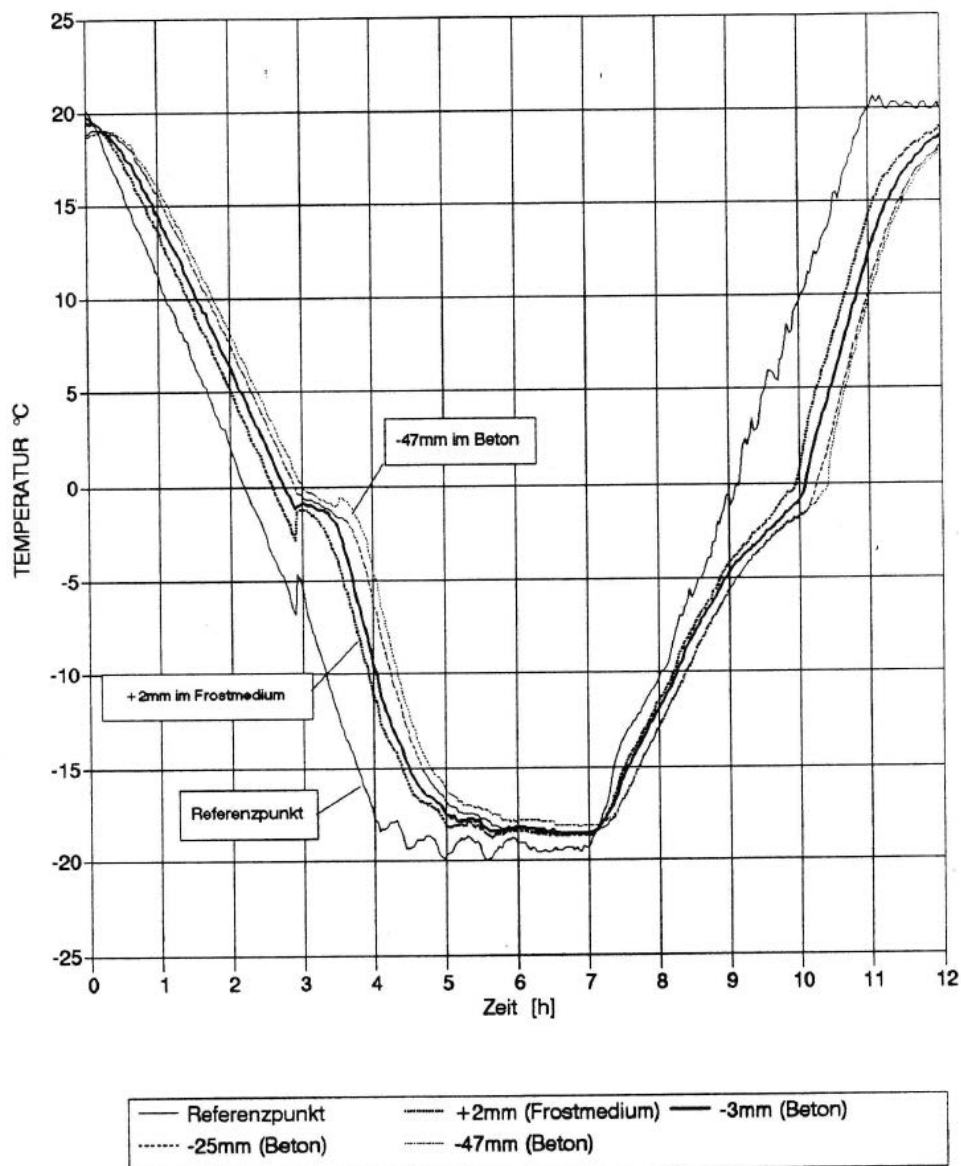


Abb.84 Zeitlicher Verlauf der Betontemperatur in verschiedenen Tiefen bei der CDF-Prüfung [Studer 1996]. Referenzpunkt: Messung in der Prüfliquidität direkt unter dem Prüfkörper.

Glossar

Begriff	Bedeutung
Abwitterung / DS	Die Tiefe der Zementsteinabwitterung am Dünnschliff bestimmt als Näherung über den Abstich zwischen der höchsten Erhebung und der tiefsten Senke an der Dünnschliffoberfläche.
Abwitterung / visuell	Visuell bestimmte relative Abwitterung an den Versuchsplatten.
BE I	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SN VSS 640 464
BE II	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SN VSS 640 464
CDF-Prüfung	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach CEN/TS 12390-9
D_{max} / DS	Effektiver Durchmesser des grössten an der Oberfläche freiliegenden Gesteinskorn.
Eistag	Tag mit einer Maximaltemperatur von höchstens 0°C
Frostgradtag	Das Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^\circ\text{C}$ pro Einzelereignis. Das Integral wird mit den Stundenwerten berechnet und in $^\circ\text{C}\cdot\text{Tage}$ angegeben. Aus den Einzelwerten wird die Summe pro Jahr (Winterhalbjahr) berechnet. Die Frostgradtage können als Intensität des Einzelereignisses, die Summe der Frostgradtage als Intensität des Winters betrachtet werden.
Frosttag	Tag mit einer Minimaltemperatur unter 0°C
Frosttaumittelwiderstand Frosttausalzwiderstand (FTW)	Widerstand des Betons gegen die gleichzeitige Einwirkung von Frost und Taumitteln bzw. Tausalzen. SN 640 464: Frosttaumittelwiderstand bedeutet die Widerstandsfähigkeit von erhärtetem Beton in durchfeuchtetem Zustand, Frostbeanspruchung unter gleichzeitigem Einfluss von Taumitteln ohne Schäden auszuhalten. In diesem Bericht wird der Begriff "Frosttaumittelwiderstand" verwendet. Er ist allgemeiner als der Begriff Frosttausalzwiderstand und umfasst auch nicht salzartige Enteisungsmittel. Dementsprechend wird in der Regel von Frosttaumittelwiderstandsprüfung gesprochen.
Frostwiderstand (FW)	Widerstand des Betons gegen die Einwirkung von Frost (ohne Taumittel oder Tausalze)
Luftgehalt künstliche Luftporen (LP)	EN 206, Ziffer 3.1.3.5: mikroskopische kleine Luftporen, die während des Mischens – im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffes – absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise kugelförmig oder nahezu kugelförmig sowie mit einem Durchmesser von 10 bis 300 μm .
Nulldurchgänge	Abfall der Temperatur unter 0°C und Wiederanstieg über 0°C
Platten-Prüfung (PP)	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach CEN/TS 12390-9 Die (schwedische) Plattenprüfung ist gemäss CEN/TS 12390-9 das Referenzverfahren.
SIA	schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SIA 262/1, Anhang C (SIA-Prüfung)	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand nach SIA 262/1, Anhang C
Taumittel	Organische (z.B. Glykole, Alkohole und Harnstoff) und anorganische Substanzen zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.
Tausalz	Salze (z.B. NaCl und CaCl_2) zur Verhinderung der Eisbildung bzw. für das Auftauen von Eis.
TFB-Prüfung	Prüfverfahren zur Ermittlung des Frosttaumittelwiderstand (Details siehe [Werner 2016])
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

Bast 2007	M.J. Setzer, H.-J. Keck und S. Palecki, Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-klasse XF2, Brücken- und Ingenieurbau, Heft Nr. B 56, 2007.
Bast 2009	F. Tauscher, Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen – Beanspruchung, Beurteilung und Betonqualität, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 70, 2009.
BAW 2004	Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Merkblatt Frostprüfung von Beton, BAW, Dezember 2012.
SS 2005	Swedish Standard SS 13 72 44, Concrete testing- Hardened concrete- Frost resistance', Swedish Standards Institution (SIS, Stockholm), 2005 Norm wird/wurde durch die europäische Norm EN 12390-9 abgelöst.
Breitenstein 1996	J. Breitenstein, Bewertung des Streusalzverbrauchs, Strasse + Autobahn, 2/96, S. 68-73.
CB 1986	Prüfung von Festbeton auf Frost und Frost-Tausalz-Beständigkeit, Cementbulletin, Nr. 10, 1986
CEN 2015	FprCEN/TS 12390-9:2015 "Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling".
CEN 2020	CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 10 N 239, Laurent Izoret, Convenor of CEN/TC51/WG12/TG4 FT test methods, Position from CEN/TC51/WG12/TG4 on freeze-thaw exposure resistance classes.
Hunkeler 2013	F. Hunkeler, P. Kronenberg und U. Püschner, Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken, Forschungsauftrag AGB 2006/006_OBF, VSS-Bericht Nr. 651., August 2013.
Helsing 2014	E. Helsing, The applicability of the "torture method" as a performance test for salt-frost resistance, JWG CEN/TC104/SC1 & SC2 and CEN/TC 250/SC2 Durability in Eurocode 2 and EN 206, Workshop in Brussels, 2014-10-22/23.
Helsing 2019	E. Helsing, Proposal for a definition of freeze-thaw exposure resistance classes, in line with the definitions of exposure resistance classes for carbonation and chloride ingress, CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 10 N 170, 2019-11-18.
Hunkeler 2017	F. Hunkeler, Bericht TFB AG U 123007: Bremgarten IO, K127/262, B-8304 Passarelle Itenhard – Pylon – Überwachung Hydrophobierung und AAR. Diverse nicht publizierte Berichte für den Kanton Aargau.
Hunkeler 2019	F. Hunkeler und S. von Greve-Dierfeld, Karbonatisierung von Beton und Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung im karbonatisierten Beton, Forschungsprojekt AGB 2013/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bericht VSS Nr. 696, April 2019.
Huss 2006	A. Huss und H.-W. Reinhardt, Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich zur Praxis, Universität Stuttgart, AiF-Vorhaben Nr.: 13928 N, DBV-Nr.: 247, 07.12.2006
Jacobsen 1997	S. Jacobsen et al., Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates, Materials and Structures, Vol. 30, Jan.-Febr. 1997, p. 33-42.
Kaufmann 2000	Kaufmann J. und Studer W., Schadensmechanismen bei der Frost-Tausalzbeanspruchung von Beton, Forschungsauftrag AGB.81/95, Bericht VSS Nr. 548, Nov. 2000.
Köppel 2014	F. Köppel und W. Klatt, Gegenüberstellung von Prüfverfahren zur Bestimmung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von Normalbetonen unterschiedlicher Zusammensetzung, Bachelorarbeit, Ostbayrische Technische Hochschule Regensburg, März 2014.
Müller 2005	H.S. Müller und U. Guse, Untersuchungen zur Beanspruchung und Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, TU Karlsruhe, FE-Vorhaben 08.156/1999/LRB, Schlussbericht 26.09.2005.
Müller 2009	H.S. Müller und U. Guse, Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse, beton 12/2009, S. 564-577.
Müller 2010	Ch. Müller Results of the Laboratory Freeze-Thaw Tests and their Transferability to Practical Conditions, Workshop Proceeding from a Nordic miniseminar: Freeze-Thaw Testing of Concrete – Input to revision of CEN test methods, Vedbæk, Denmark March 4 -5, 2010.
Müller 2018	M. Müller und H.-M. Ludwig, Neue Modelle für den Frost-Tausalz-Angriff auf Beton, ibausil 2018, 20. Internationale Baustofftagung, 12. - 14. September 2018, Weimar

Müller 2019	M. Müller, H.-M. Ludwig, D. Ehrhardt, Frost-Tausalz-Angriff auf Beton – Mechanismen und Schadensmodelle, Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 6.
Richter 2010	Th. Richter, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, BetonMarketing Ost, Beton-Seminare 2010.
Roos 2011	A. Roos, Salz, kein Stoff für Wintermärchen, strasse und verkehr, 9/2011, S. 10-15.
Salinen 2019	Schweizer Salinen, Statistiken Salzverkäufe, Dez. 2019.
Siebel 1998a	E. Siebel and W. Breit, Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing – Final Report, European Research Project MAT1-CT94-0055, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Report No. Be-TB 1489-4, Düsseldorf, 27.10.1998.
Siebel 1998b	E. Siebel and W. Breit, Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing – Synthesis Report, European Research Project MAT1-CT94-0055, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Report No. Be-TB-1489-5, Düsseldorf, 27.10.1998.
Siebel 1998c	E. Siebel and W. Breit, Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing – Round robin test. Milestone Report Work Package 3, European Research Project MAT1-CT94-0055, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Report No. Be-TB-1489-4, Düsseldorf, 24.07.1998.
Siebel 1999	E. Siebel, W. Breit: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren, Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44-51.
Siebel 2005	E. Siebel et al., Sachstandbericht Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse, Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 560, 2005.
SN 1976	SN 640 461, Zementbetonbeläge – Ausführung, Anforderung, VSS, 1976
SN 2008	SN VSS 640 461b, Betondecken – Konzeption, Ausführung, Anforderungen an die eingebauten Beläge, VSS, 2008
SN 2009	SN VSS 640 464, Betondecken – Prüfmethode zur Bestimmung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands, VSS, 2009.
Stark 2005	J. Stark J. et al., Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Forschungsbericht zum Auftrag DBV 234, F.A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus - Universität Weimar, 2005.
Studer 1993	W. Studer, Internal comparative tests on frost-deicing-salt resistance, International workshop on the resistance of concrete to scaling due to freezing in the presence of deicing salts, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB), Université de Sherbrooke et Université Laval, Québec, Canada, 30-31 august 1993.
Kaufmann 1995	W. Kaufmann und W. Studer, Untersuchungen im Rahmen des zweiten Round-Robin Tests der TG 4 „Frostbeständigkeit“ des CEN/TC 51/WG 12, EMPA Untersuchungsbericht 146'506, Mai 1995.
Studer 1996	W. Studer, Comparative Temperature Measurements for Different Freeze-Thaw and Deicing-Salt-Tests, EMPA-Bericht 4117/3E, Dübendorf, 9. August 1996. Bericht nicht mehr verfügbar. Bilder von Werner Studer und von Josef Kaufmann erhalten.
Studer 1998	W. Studer, Validierung der Prüfung Nr. 9 (SIA 162/1), Frost-Tausalzverhalten – Interne Vergleichsversuche mit geändertem Verfahren, EMPA Untersuchungsbericht 165'667, Juli 1998.
Utgenannt 2010	P. Utgenannt and P.-E. Petersson, Frost Resistance of Concrete Containing Secondary Cementitious Materials - Experience from Three Field Exposure Sites, Workshop Proceeding from a Nordic miniseminar: Freeze-Thaw Testing of Concrete – Input to revision of CEN test methods, Vedbæk, Denmark March 4 -5, 2010.
Werner 2016	R. Werner, F. Hunkeler, U. Mühlethaler und C. Ly, Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren, Forschungsprojekt VSS 2011/501, VSS-Bericht Nr. 1554, Februar 2016.

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

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 07.07.2020

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2018/332

Projekttitel: Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Übertragbarkeit und praktische Relevanz

Enddatum: Juni 2020

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Zur Beurteilung der Intensität der Frostbelastung an einem einzelnen Standort wurde in diesem Projekt die neue Kennzahl „Frostgradtage“ eingeführt. Die Frostgradtage stellen das Integral über die Zeit mit einer Temperatur $\leq 0^\circ\text{C}$ pro Einzelereignis dar. Mit der Summe der Frostgradtage pro Winter und der Tiefsttemperatur kann die Strenge oder Härte der Winter verschiedener Standorte charakterisiert und verglichen werden. Diese Kennzahlen können zudem auch für den Vergleich von Frosttaumittelwiderstandsprüfungen, bei denen die Abwitterung bestimmt wird, verwendet werden. Die Untersuchungen ergaben dass im Vergleich zu den europäischen Prüfverfahren (Platten- und CDF-Prüfung) die SIA-Prüfung die schwächste aller Prüfungen ist. Die seit 2012 laufenden Felduntersuchungen haben gezeigt, dass die Frostbelastung der Versuchsplatten an ihrem aktuellen Standort in St. Margrethen typisch für das schweizerische Mittelland ist. Bei den aktuellen Untersuchungen an Dünnschliffen wurden nach sieben Wintern im Frühjahr 2019 keine für einen harten Frosttaumittelangriff typischen oberflächenparallelen Risse, jedoch teils deutliche Zementsteinabwitterungen gefunden. Die Abwitterungen wurden klassiert und mit den Resultaten der Laborprüfungen aus dem Vorgängerprojekt ("Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren") [VSS 2011/501] verglichen.

Allgemein stimmen die Resultate der Frosttaumittelwiderstandsprüfungen gut bis sehr gut mit den an den ausgelagerten Platten festgestellten Abwitterungen überein. Dabei kommt es in einigen Fällen zu Abweichungen von einer Klasse, welche aufgrund der Streuungen und Abgrenzungsprobleme nicht zu vermeiden sind. In einigen wenigen Fällen tritt eine Abweichung von 2 Klassen auf. Die SIA-Prüfung nach SIA 262/1, Anhang C, hat bei zwei Betonen den Frosttaumittelwiderstand um zwei Klassen überschätzt, die restlichen drei Verfahren jeweils höchstens um eine Klasse über- oder unterschätzt. Somit kann als erster Anhaltspunkt auf der Suche nach einem Referenzverfahren angemerkt werden, dass die SIA-Prüfung allenfalls zu schwach ist. Die Analyse der Wetterdaten hat zudem gezeigt, dass diese Prüfung die langzeitige Frost- und Frosttausalzeinwirkung in höheren Lagen vielleicht nicht sicher abzudecken vermag.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die durchgeführten Analyse von Wetterdaten und der Felduntersuchungen haben erlaubt, den 2012 gewählten Auslagerungsstandort bezüglich der Härte der Winter zu beurteilen und mit anderen Standorten zu vergleichen. Ebenso ist man dem primären Ziel, nämlich die Beantwortung der Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse bzw. der Frage nach einem Referenzverfahren für die Frosttaumittelprüfung, einen wichtigen Schritt näher gekommen. Es konnte aufgezeigt werden, dass die SIA-Prüfung ein schwaches Prüfverfahren ist und als Referenzverfahren eher nicht in Frage kommt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Forschungsstelle empfiehlt, die Versuchsplatten im Rahmen eines Fortsetzungsprojektes unter härteren Expositionsbedingungen weiter zu begutachten. Ebenso ist zu eruieren, ob allenfalls alternative Verfahren als Referenzprüfung herangezogen werden können, da aufgrund der Resultate davon ausgegangen werden muss, dass die SIA-Prüfung nach SIA 262/1, Anhang C, zu schwach ist und eine schlechte Vergleichspräzision aufweist. Die Forschungsstelle empfiehlt hier eine Vergleichsuntersuchung mit den Verfahren SIA, CDF (als strengstes europäisches Prüfverfahren) und BE II durchzuführen; dies auch unter den Aspekten einer Angleichung an die europäische Normenlandschaft und mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen, die zeigten, dass das CDF-Verfahren härter und präziser ist als die SIA-Prüfung. Dadurch kann erreicht werden, dass aufgrund der höheren Präzision und Wiederholgenauigkeit sowohl für die Lieferanten als auch die Bauherren ein Mehrwert generiert werden kann. Weiterhin sollten auch die Anforderungen an einen mittleren Frosttaumittelwiderstand geklärt werden.

Publikationen:

Bericht über das Forschungsprojekt mit dem Titel „Evaluation des Frosttaumittelwiderstandes von Beton - Übertragbarkeit und praktische Relevanz“

Publikationen in Fachzeitschriften sind nach der Genehmigung des Berichtes durch die Begleitkommission geplant.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stoller

Vorname: Florian

Amt, Firma, Institut: LPM AG, Tannenweg 10, 5712 Beinwil am See

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



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

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Im Forschungsprojekt wurden die Wetterdaten unterschiedlicher Standorte auf eine neue Art analysiert, miteinander verglichen und ein neues Kriterium für die Beurteilung der "Härte" eines Winters gefunden. Mit Hilfe der Versuchsplatten wurde aufgezeigt, dass die Prüfverfahren im Allgemeinen für schwach beanspruchte Standorte gute Resultate liefern, jedoch das SIA-Verfahren dazu neigt, die Beständigkeit zu überschätzen. Die Systematik, um an aussagekräftige und vergleichbare Resultate zu gelangen, stimmt.

Umsetzung:

Da aus der Forschung die Erkenntnis gewonnen werden konnte, dass die SIA-Prüfung eher schwach und zudem nicht sehr robust ist, ist anzustreben, dass ein alternatives Referenzverfahren für die Schweiz, beispielsweise das CDF-Verfahren, in Betracht gezogen wird. Damit könnte zudem eine sinnvolle Angleichung an die europäische Normenlandschaft erreicht werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Da es sich gezeigt hat, dass ein alternatives Verfahren für die Schweiz evaluiert werden sollte, ist es lohnenswert die Forschung in Kombination mit langfristigen Auslagerungsversuchen in höheren Lagen (mind. 1'000 m über Meer) in diese Richtung zu forcieren.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Einigung auf ein einziges Referenzverfahren (z.B. CDF-Prüfung) ist anzustreben. Dieses muss zwingend ausreichend streng und wiederholgenau sein.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: *Schellenberg*

Vorname: *Urs*

Amt, Firma, Institut: *Tiefbauamt des Kantons Zürich, Wolkeplatz 2, 8090 Zürich*

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

FK3: *M. Huguenin*

Dubendorf 30.9.20

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

Seite 3 / 3

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Arbeitshilfen, Formulare, Merkblätter --> Formulare*) heruntergeladen werden.