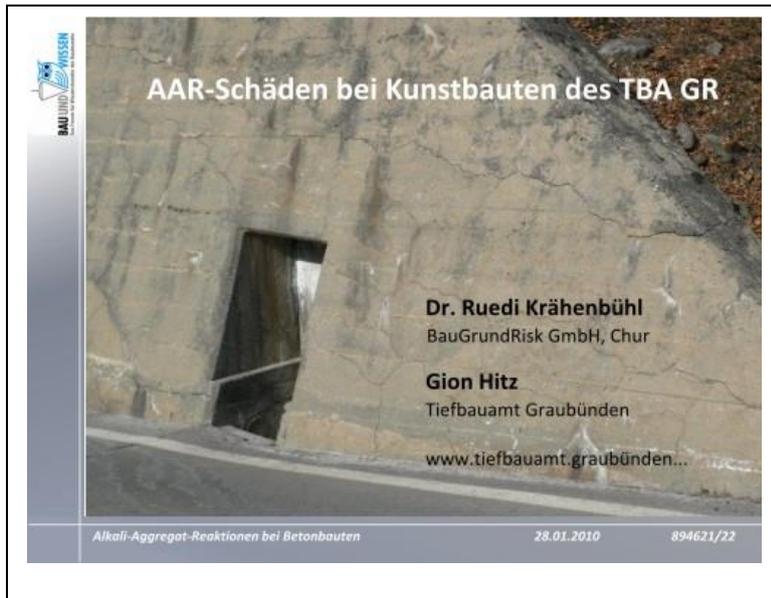


3. AAR-Schäden an Kunstbauten des Tiefbauamtes Graubünden

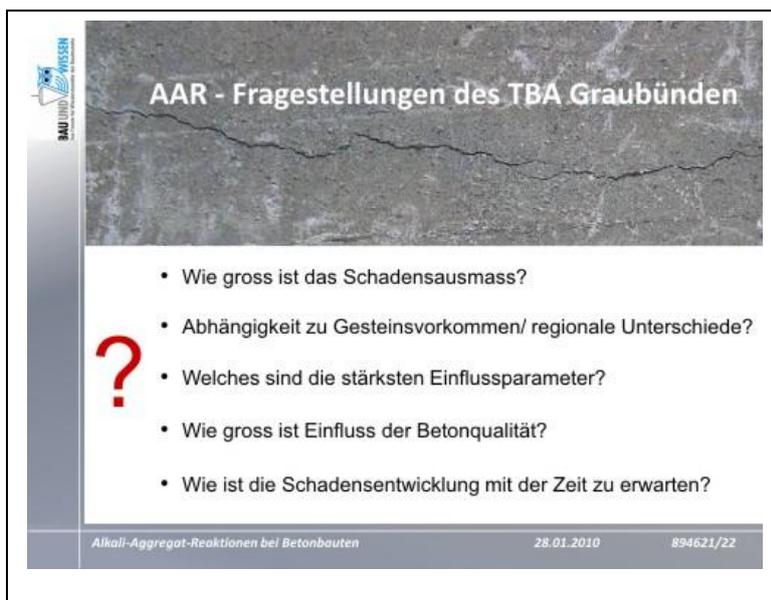
Dr. Ruedi Krähenbühl, BauGrundRisk GmbH, 7000 Chur, baugrundrisk@bluewin.ch



An 73 Kunstbauten und 83 Bauteilen mit Hinweisen auf AAR aus verschiedenen Regionen Graubündens wurden mittels Betongefügeuntersuchungen das Ausmass und die regionale Verteilung von Alkali-Aggregat-Reaktions-Schäden abgeklärt (AAR). Dies mit dem Ziel, bei einem allfälligen Handlungsbedarf zur Prävention von Bauwerksschäden gezielte Massnahmen treffen zu können.

Die hoch komplexe Materie mit teilweise widersprüchlichen Ergebnissen aus der Literatur verlangte eine sorgfältige Wahl des Untersuchungskonzepts und eine grosse Aufmerksamkeit gegenüber der Datenqualität [1].

3.1 Untersuchungen



Eine erste Fragestellung einer 2001 durchgeführten Studie war, ob im TBA GR seit Einführung eines einheitlichen Baustoffkonzepts mit moderaten Anforderungen und dem konsequenten Umsetzen des QM für Beton, noch AAR-Schäden anzutreffen sind. An den < 20 Jahre alten Kunstbauten wurden damals keine AAR-Schäden gefunden. Jüngere Erkenntnisse liessen jedoch vermuten, dass langsam sich entwickelnde Schäden bei den jungen, untersuchten Objekten möglicherweise noch nicht zu Tage getreten sind.

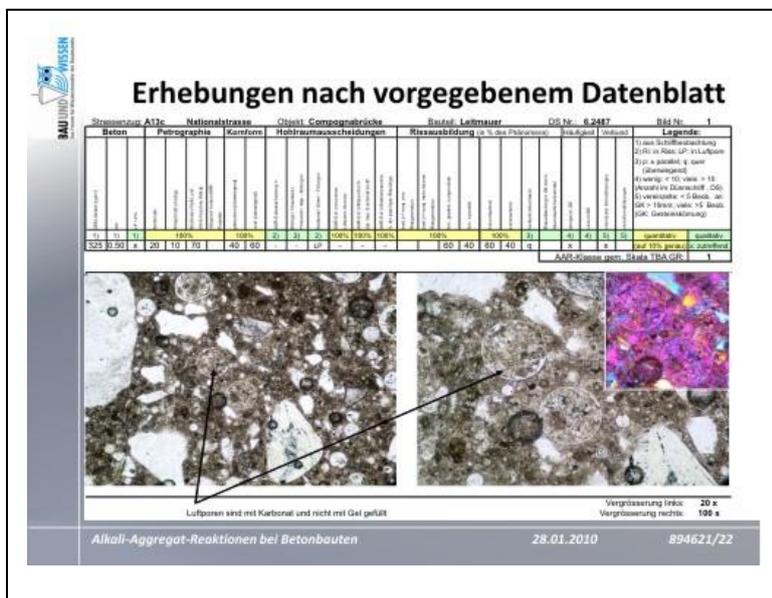
Der über die Jahre 2003 – 2007 ausgeführten Studie wurden nachfolgende Fragestellungen zu Grunde gelegt.



Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Aufnahme von Objekten mit Verdacht auf AAR-Schäden entlang ausgewählter Strassenzüge mit Berücksichtigung der petrographisch regional verschiedenen Gesteinskörnungen (GK).
- Auswahl von Objekten mit Verdacht auf AAR (Rissbilder, Kornsaum an GK, etc.), Bohrkernentnahme und Untersuchung von Dünnschliffen (DS) hinsichtlich AAR-Schäden. Je Bauteil und/oder Exposition wurden im Regelfall mehrere DS untersucht.

- Sammeln der Objekt- und Baustoffdaten.
- Petrographische Untersuchung der Gesteinskörnungen und Bestimmung des Anteils an gebrochenen Komponenten an Dünnschliffen.
- Datenauswertung, Berichterstattung.



Um einheitliche Dünnschliffuntersuchungen zu ermöglichen, wurde ein Datenblatt erstellt und für die durch verschiedene Labors ausgeführte Datenerfassung Erläuterungen abgegeben.

Folgende Parameter wurden erfasst:

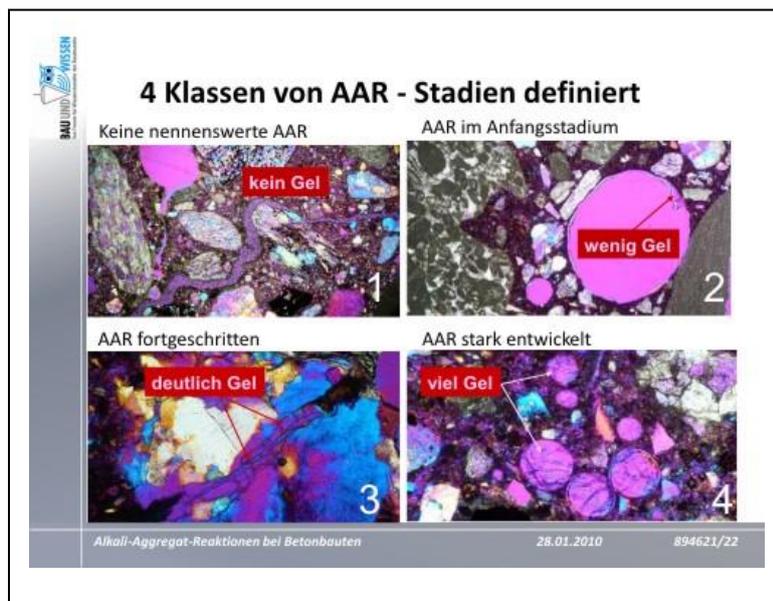
- Beton: CEM-Gehalt, W/Z, Luftporen
- Petrographische Zusammensetzung, Kornform
- Art der Hohlraumauscheidungen
- Rissausbildungsart, Gefügequalität
- AAR-Schadens-Klasse



Für das Erfassen der petrographischen Gesteinskörnungen wurde in Hinblick auf die Fragestellung eine starke Vereinfachung vorgenommen. Die in den Regionen zu erwartenden Gesteinskörnungen wurden in Karbonate (kaum Quarz; voraussichtlich nicht reaktiv), in Kristallingesteine (reich an Quarz; möglicherweise reaktiv), in Bündnerschiefer u.ä. (sandig-kalkige Gesteine, möglicherweise reaktiv) und stark reaktive Gesteine unterteilt (Quarz-Porphyre, Kieselkalke, etc.).

Diese Vereinfachung wurde deshalb vorgenommen, weil die Literatur einem grossen Spektrum von Gesteinen eine potentielle Reaktionsfähigkeit

zuschreibt, ohne dass mit Ausnahme der stark reaktiven Gesteine bisher eine nachvollziehbare Klassierung hinsichtlich der Reaktionsempfindlichkeit möglich war. Zudem sollte damit die Fehlerquelle von falschen Gesteinsklassenzuordnungen durch verschiedene Bearbeiter minimiert werden.



Die Bildung von AAR-Schadensklassen sollte eine quantitative Beurteilung der Schadensschwere ermöglichen.

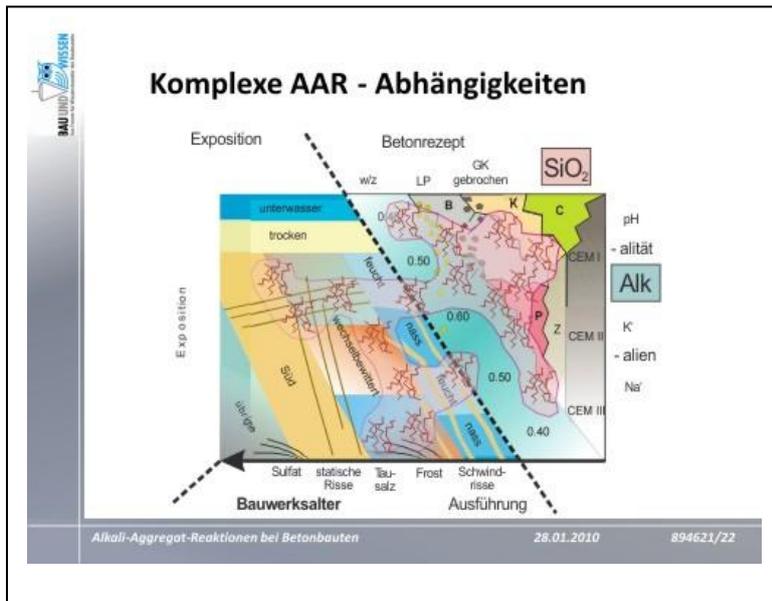
Bei der Kriterienwahl für die verschiedenen AAR-Klassen versuchte man zu berücksichtigen, dass der Silicagel als entscheidendes Indiz für die Existenz von AAR sehr mobil ist und je nach Geschichte des Betons zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht mehr oder nur teilweise vorhanden sein kann, oder aber durch die Präparation des Dünnschliffs reduziert wurde.

Die Einteilung der Klassen versuchte dieser Gegebenheit dahingehend Rechnung zu tragen, dass die

Eindeutigkeit von AAR nur über den Nachweis von Gel im Dünnschliff erfolgte, und dass aufgrund des Interpretationsspielraums von Rissbildern zu anderen Schädigungsprozessen ein „AAR-typisches Rissbild“ alleine hierfür nicht zu genügen vermochte. Letzteres wurde hingegen für die Einteilung in die höheren AAR-Klassen 3 und 4 mit verwendet.

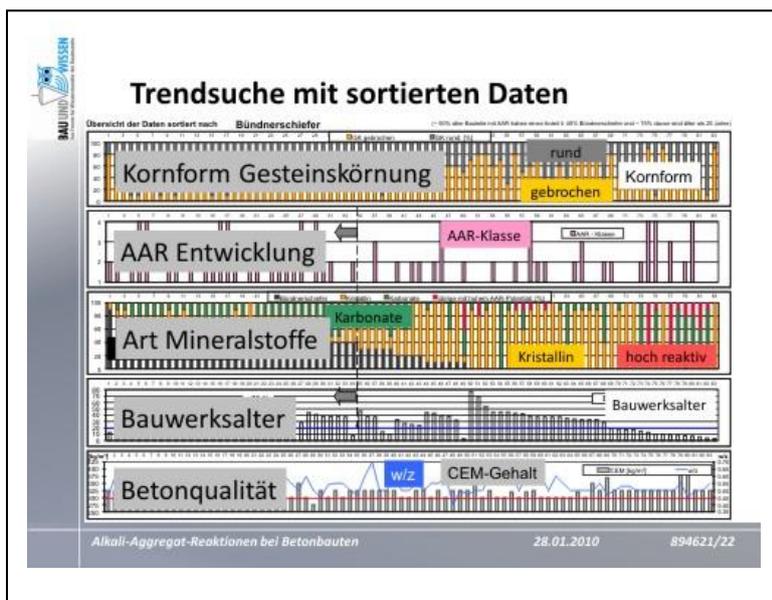
Es hat sich mehrfach gezeigt, dass in einem stark zerrissenen Bauteil lediglich in einem von mehreren Dünnschliffen Silicagel vorgefunden werden konnte. Ergebnisse von Untersuchungen verschiedener Expositionen desselben Bauteils/Bauwerks mit je nur einem Dünnschliff können leicht zu falschen Beurteilungen führen.

3.2 Ergebnisse



Der Verlauf der AA-Reaktion wird durch viele verschiedene Einflussparameter bestimmt, welche untereinander gegenläufig aber auch kumulierend sein können. Dies erschwert die Datenauswertung erheblich. Mitunter wird dies ein wesentlicher Grund dafür sein, dass zu diesem Thema in der Literatur teilweise kontroverse Ergebnisse zu finden sind.

Das neben stehende Schema soll diese Komplexität der verschiedenen AAR-Einflussparameter über die Lebensdauer eines Bauwerks hinweg verdeutlichen. In dem amöbenförmigen, rosafarbenen Feld mit Risssignaturen des Schemas ist AAR zu erwarten. Viel Spass beim Puzzle.



Vor diesem Hintergrund und angesichts der trotz aller Vorkehrungen noch erwarteten Datenunschärfe musste bei der Auswertung nicht die Suche nach strikten Korrelationen, sondern jene nach deutlichen Trends im Vordergrund stehen.

In einem ersten Bearbeitungsschritt wurde untersucht, ob einzelne Parameter von dominierendem Einfluss zu erkennen sind, die sich aus weniger stark beeinflussenden Faktoren herausheben. Im zweiten Arbeitsschritt wurde das Verhalten der gefundenen Trends in den Datensätzen der einzelnen Regionen detailliert untersucht.

Dabei wurden die grossen Datensets nach ausgewählten Kriterien in Tabellen sortiert und in Diagrammabfolgen nach Trends gesucht (siehe Figur oben).

3.2.1. Abhängigkeit von der Petrographie

Ergebnisse bezüglich Petrographie

Massgebende Gesteinskörnung (≥ 40% im Gemisch)	Bauteile mit AAR	Davon Bauteile ≥ 20 Jahre
Bündnerschiefer	50%	70%
Kristallin	40%	85%
Quarzporphyr, Kieselkalke (verkieselte Fossilien)	10 %	0%

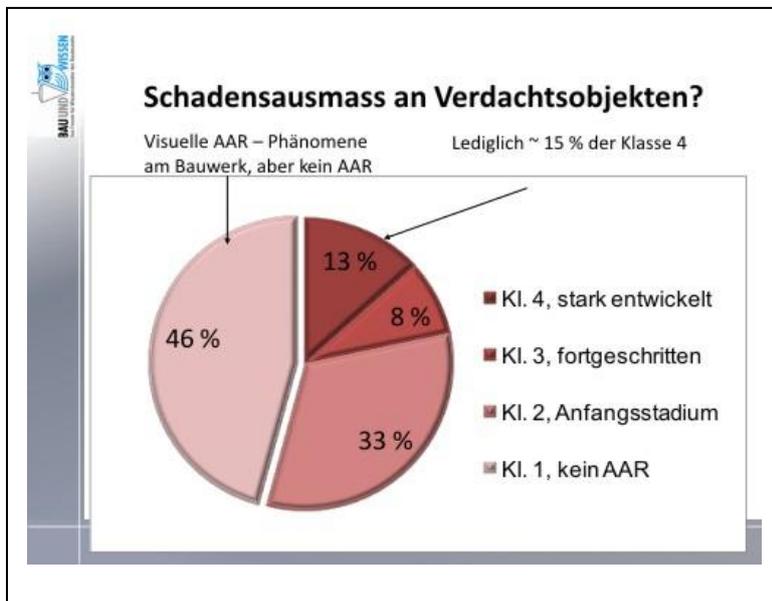
Alkali-Aggregat-Reaktionen bei Betonbauten 26.01.2010 894621/22

Folgende Abhängigkeiten wurden gefunden:

- Bei 50% aller Bauteile mit AAR bestehen die Gesteinskörnungsgemische zu ≥ 40% aus Bündnerschiefern. In den DS sind AA-Reaktionen ausgehend vom Quarz der Sandsteine und Sandkalke eindeutig erkennbar.
- Bei 40% aller Bauteile mit AAR bestehen die Gesteinskörnungsgemische zu ≥ 40% aus Kristallingesteinen.
- Bei 10% aller Bauteile mit AAR bestehen die Gesteinskörnungsgemische zu ≥ 40% aus hochreaktiven Quarzporphyren.

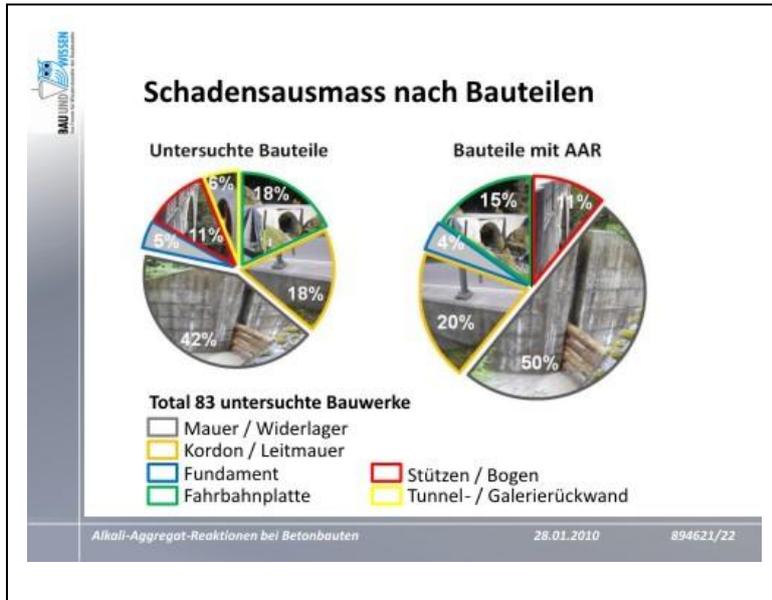
- Karbonatgesteine zeigen kein AAR.
- Mehr als 70% der AAR-geschädigten Bauteile mit Bündnerschiefern oder Kristallin haben ein Alter von ≥ 20 Jahre. Bauteile mit ≥ 20% hochreaktiven Gesteinskörnungen sind ≤ 20 Jahre alt sind.

3.2.2. Schadensausmass



Das Ausmass von AAR-Schäden an Verdachtsobjekten des Tiefbauamtes kann als relativ klein und fast nur halb so gross, wie aufgrund der Rissbilder und AAR-Phänomene an den Bauwerken zu vermuten war, bezeichnet werden.

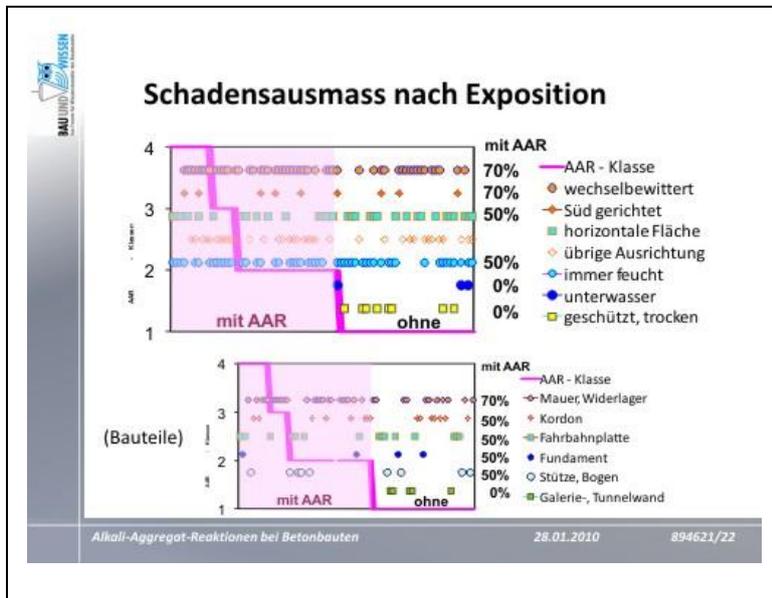
Die Verteilung der anhand von DS-Abklärungen an 83 Bauteilen bestimmten AAR-Klassen ergab lediglich bei etwas weniger als 1/4 der Untersuchungen AAR in fortgeschrittenem oder stark entwickeltem Stadium. Bei 1/3 ist AAR im Anfangsstadium bzw. nur wenig ausgebildet und verfügt über eine geringe Intensität.



Fast 50 % der untersuchten Bauteile sind Stützmauern, womit auch ein entsprechend hoher Anteil mit AAR vorgefunden wurde.

Lediglich bei Wänden von Galerien und Tunnels und bei abgedichteten Brückenplatten wurde kein AAR angetroffen.

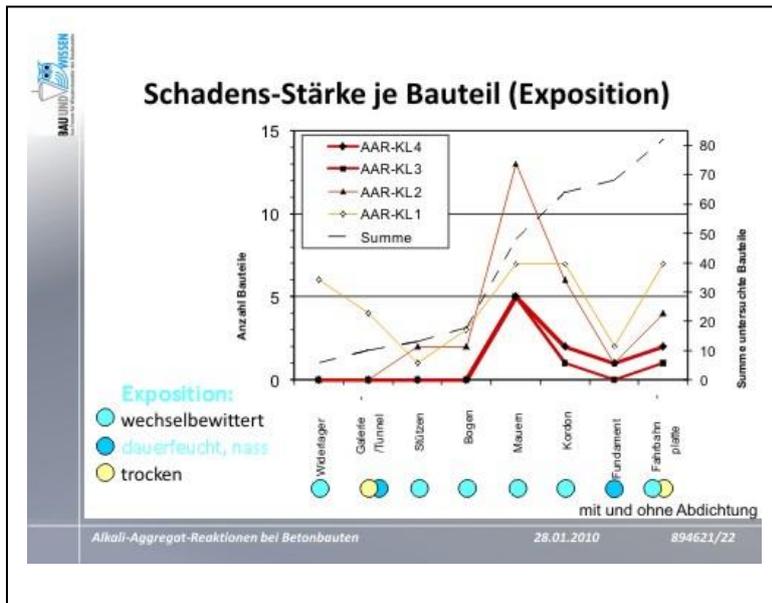
Bei 5 – 20 % der übrigen Bauteile wurde AAR gefunden.



Trockene, dauernd nasse oder unter Wasser sich befindende Bauteile, wie Galerierückwände, Tunnelwände, bzw. im Wasser stehende Fundamente sind Expositionen, in denen sich trotz eines vorhandenen AAR-Potentials kein AAR ausbilden konnte. Die Anzahl untersuchter Bauteile mit solchen Expositionen ist relativ gering (infolge fehlender Hinweise auf AAR am Bauwerk).

Bei allen übrigen Expositionen verfügen zwischen 50 % und 70 % der untersuchten Bauteile über AAR.

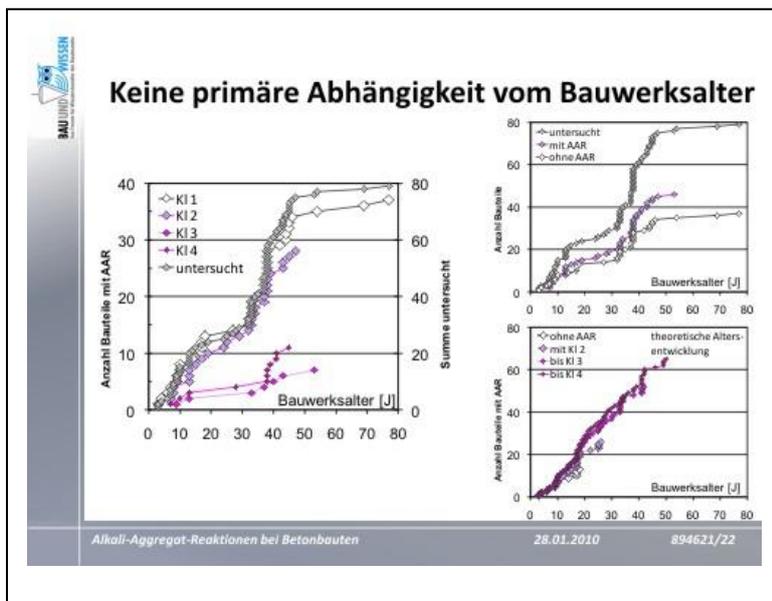
3.2.3. Schadensstärken



Hinsichtlich der AAR-Stärke ergibt sich ein analoges Bild.

Von den wenigen untersuchten Stützen und Bogen von Brücken muss deren hoher Anteil mit AAR nachdenklich stimmen. Aufgrund der hohen Bedeutung dieser Baueile muss dies Anlass zu weiteren Abklärungen geben. Die gefundene Intensität ist mit der AAR-Klasse 2 dagegen bescheiden.

3.2.4. Altersabhängigkeit von AAR



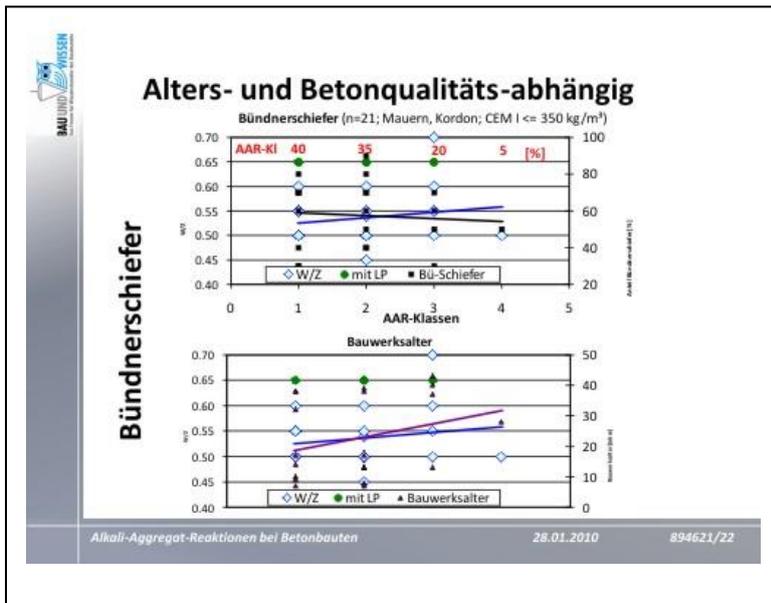
In der Alterskategorie der 20 – 50 Jahre alten Objekte tritt AAR mit fast 70% am häufigsten auf, was mit einer reduzierten Betonqualität in Verbindung steht. Dies bestätigt sich auch in den Dünnschliffuntersuchungen, wonach viele Objekte > 20 Jahre ein mangelndes Betongefüge mit ungenügendem Korn-/Matrixverbund, mit erhöhtem Weichkornanteil, Verbundstörungen, Frührschwindrissen, Karbonatisierung entlang von Rissen, etc., zeigen.

Eine Verteilung der AAR-Intensitäten, wie sie im Falle einer mutmasslich langsam fortschreitenden AA-Reaktion in Bauwerken erwartet werden müsste, wurde nicht vorgefunden. Eine

theoretische Modellierung der AAR-Klassenentwicklung in ~ 50 Jahren, ausgehend von jener, vorgefunden bei Bauwerken ohne AAR bis zu einem Alter von 20 Jahren und der Annahme, dass alle 20 Jahre die selbe Bauwerksverteilung neu hinzukommt, sowie dass eine altersbedingte AAR-Zunahme je 10 Jahre die Bauteile jeweils in eine höhere AAR-Klasse verschiebt, ist im Diagramm unten rechts aufgeführt. Diese theoretische Verteilung unterscheidet sich stark von der vorgefundenen. D.h. wenn AAR sich in Bauwerken nur langsam entwickeln würde und damit die Schadenszunahme von AAR primär altersabhängig wäre, hätte eine viel grössere Anzahl Bauwerke mit AAR im „fortgeschrittenen“ und „stark entwickelten“ Stadium gefunden werden müssen (Klassen 3 und 4).

Bezüglich des Ablaufs von AAR wird wie bei übrigen chemischen Reaktionen massgebend sein, ob die Reaktionsbedingungen günstig sind oder nicht. Bereits 3 - 5 Jahre alte Bauwerke mit hohem AAR-Potential zeigen, dass die Reaktion bei günstigen Bedingungen rasch, d.h. innert wenigen Jahren abläuft. Das AAR-Potential wird zudem mit dem Reaktionsablauf in Funktion der Zeit abgebaut.

3.2.5. Abhängigkeit von der Betonqualität

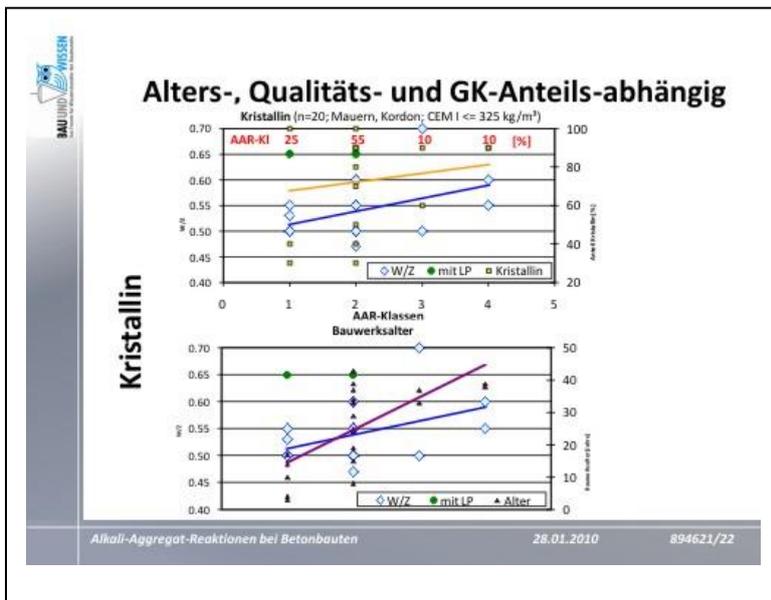


Bei allen Bauwerken mit $\geq 40\%$ Bündnerschieferanteil ist eine tendenzielle Zunahme der AAR-Intensität mit der Betonqualität und in ähnlichem Masse mit dem Bauwerksalter erkennbar.

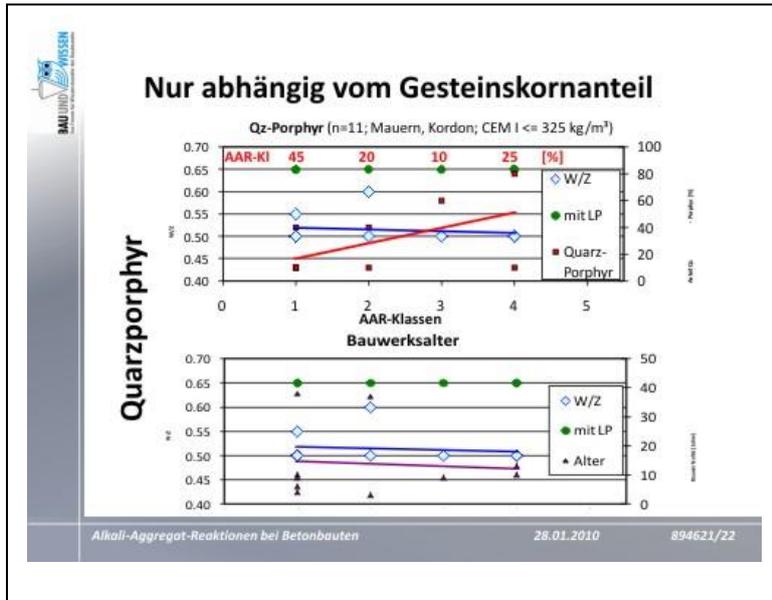
Schwachstellen im Betongefüge, wie häufig beobachtete Schwindrisse und Korn-/ Matrixverbundstörungen ermöglichen eine rasche Schadensentwicklung in die Tiefe des Bauteils, indem einerseits das quellfähige Gel entlang von bereits existierenden Schwachzonen eine rasche Verbreitung im Bauteil findet und andererseits dem für das Quellen notwendigen Reaktionspartner, Wasser, die Wegsamkeit von Aussen in den

Bauteil erleichtert wird.

Entlang von Rissen bildet sich im Betongefüge konzentriert ein hoher Quelldruck aus, was die Rissfortpflanzung in die Tiefe begünstigt. Fehlen initiale Risse und Schwachstellen im Korn/Matrixverbund und in den Gesteinskörnungen oder sind Expansionsgefässe in Form von künstlichen Luftporen vorhanden, so ist der im Porenraum und in Rissen der Komponenten auftretende Quelldruck reduziert und wird nur geringe Gefügeschäden verursachen können. Die Rissfortpflanzung ist weniger ausgeprägt (Aderrisse).



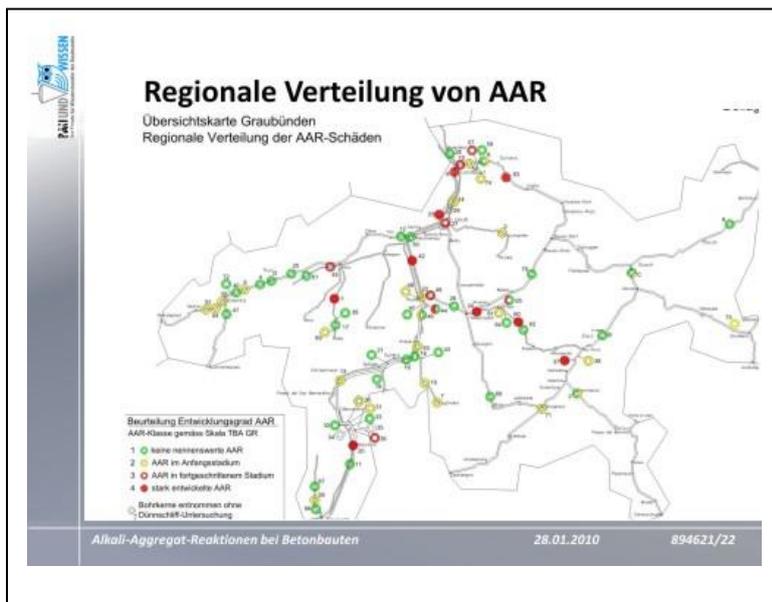
Bei allen Bauwerken mit $\geq 40\%$ Kristallinanteil ist zusätzlich zu der Qualitäts- und Altersabhängigkeit eine tendenzielle Zunahme der AAR-Intensität mit dem wachsenden Anteil an kristallinen Gesteinskörnungen erkennbar.



Bei allen Bauwerken mit $\geq 20\%$ Anteilen an hoch reaktiven Gesteinskörnungen ist ausschliesslich eine Zunahme der AAR-Intnsität mit dem wachsenden Gesteinskörnungsanteil erkennbar. Es handelt sich dabei durchwegs um junge Bauwerke von ausreichender Betonqualität.

Seit 20 Jahren wird im TBA zu 90 % ein Standardbeton verwendet: Lufporenbeton mit CEM I $\leq 325 \text{ kg/m}^3$, W/Z ≤ 0.50 und strikter Q-Kontrolle.

3.2.6. Regionale AAR-Verteilung

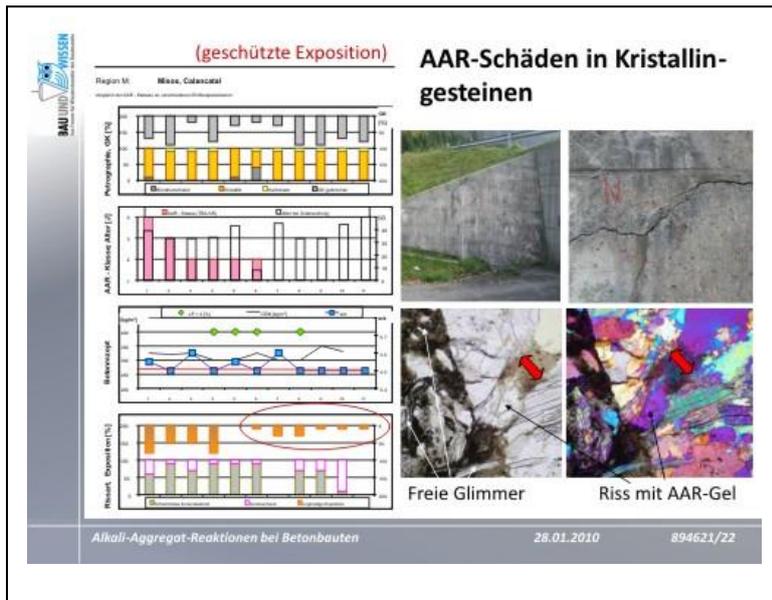


Die regionale Schadensverteilung in Graubünden präsentiert sich wie folgt:

- Generell kann gefolgert werden, dass in Gebieten die überwiegend im „grünen“ Bereich liegen kein AAR auftritt, jene im „gelbgrünen“ über ein bescheidenes, und jene im „roten“ Bereich, über ein erhebliches bis hohes AAR-Potential verfügen.
- Demnach weisen die Bündnerschiefer-Regionen Prättigau (P), Domleschg (D) und Ilanz (I) ein erhebliches AAR-Risiko auf. Die Kristallin-Regionen Bündner Oberland (O) zeigen ein bescheidenes, jene des Misox (M) und Engadin (E) ein gewisses AAR-Risiko. Die petrographisch

gemischte Region Rofla (R) verfügt über ein bescheidenes AAR-Risiko. Im Albulatal ist das AAR-Potential erheblich bis hoch.

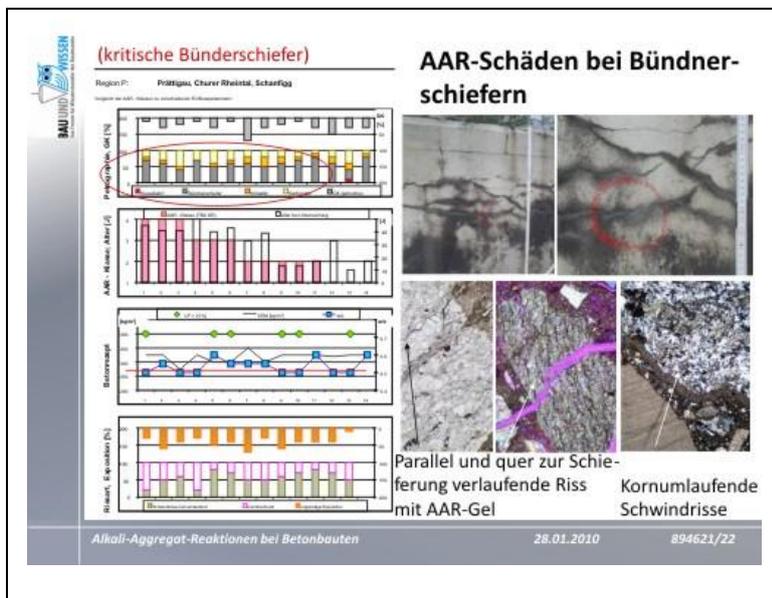
- In der Region Engadin sind die Daten noch dünn. Voraussichtlich wird sich das Risiko für AAR-Schäden auf Objekte mit Porphyren und in reduziertem Masse auf ältere, mit stark retrograd überprägten Kristallingesteinen und Bündnerschiefern des Unterengadins und Samnauns beschränken. Erwartungsgemäss können das Oberengadin, der Berninapass und allenfalls das obere Puschlav von Porphyren betroffen sein. Der Einfluss des Kristallins wird im Albula-, Landwassertal, oberen Prättigau, am Flüela, im Puschlav und Unterengadin spürbar sein. Jener der Amphibolite ist noch unklar.
- Bisher kaum untersucht sind mit Ausnahme des Misoxes die Südtäler. Im von Karbonaten dominierten Münstertal wurden an Kunstbauten keine klaren Anzeichen für AAR festgestellt. Im Bergell gibt es wenig und im Puschlav mehrere Hinweise für AAR, entsprechende Objekte wurden aber noch nicht untersucht.



In den von kristallinen Gesteinskörnungen dominierten Gebieten sind überwiegend alte Bauwerke von ungenügender Betonqualität von AAR betroffen. Geschützte Expositionen blieben dabei unversehrt.

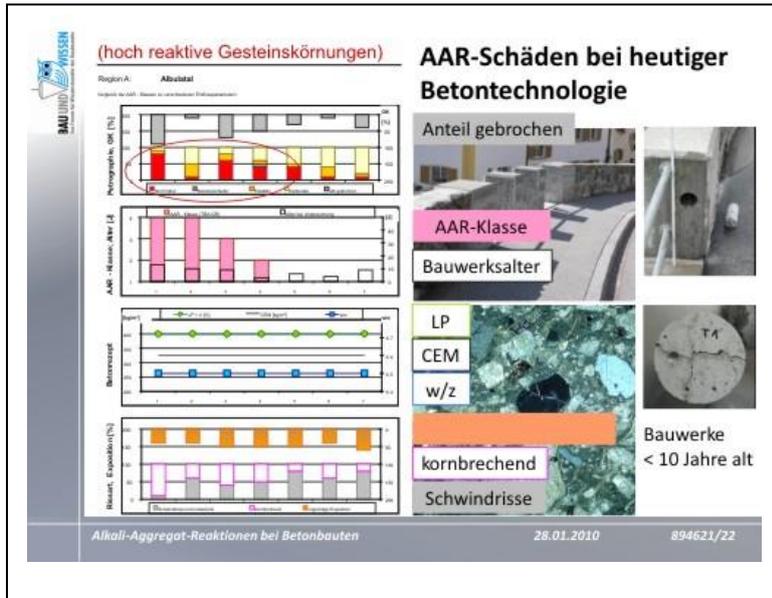
Die AAR-Intensitäten haben überwiegend nur das Anfangsstadium erreicht (Klasse 2).

Einzelne Bauwerke von < 20 Jahren, ausgeführt aus Standardbeton und ausreichender Qualität weisen AAR auf.



In den Bündnerschieferregionen zeigen vorwiegend alte Bauwerke von ungenügender Betonqualität hohe AAR-Intensitäten. Jüngere Bauwerke weisen da AAR auf, wo ein hoher Anteil an gebrochenen Gesteinskörnungen, wie Tunnelausbruchmaterial o.ä., verwendet wurde.

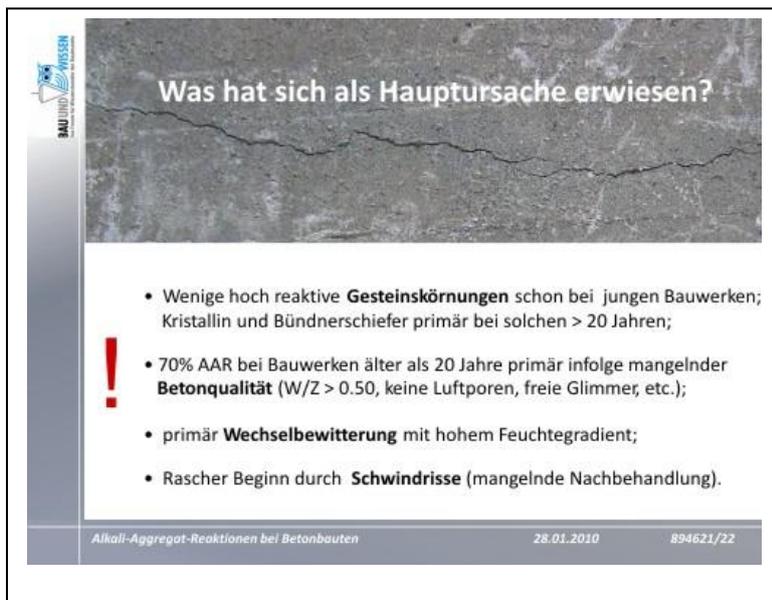
Verglichen zu den Kristallinen Regionen ist in jenen der Bündnerschiefer die AAR-Intensität höher.



Bei den hoch reaktiven Gesteinskörnungen reichten Anteile von > 20 % aus, um bei jungen Bauwerken < 10 Jahren AAR im bereits fortgeschrittenen Stadium zu erzeugen und deutlich erkennbare Bauwerksschäden zu verursachen. Dies erfolgte bei heutigem Standardbeton von ausreichender Qualität.

Die jüngsten gefundenen Bauwerke mit eindeutig nachgewiesenen AAR-Schäden der Klasse 2 sind nur 3 Jahre alt.

3.3. Folgerungen



Die umfassenden Untersuchungen haben trotz petrographisch oft stark gemischten Gesteinskörnungen und des generell komplexen AAR-Sachverhalts die neben stehenden Hauptursachen mit grosser Deutlichkeit zum Vorschein gebracht.

Ca. 2/3 aller untersuchten Bauwerke zeigen kornumlaufende Schwindrisse. Diese Risse werden durch das Quellen von AAR reaktiviert und das vorhandene Rissbild wird meist übernommen.

Bei den hoch reaktiven Qz-Porphyrn reagieren nicht nur die feinen Quarze der Matix sondern auch die leicht mobilen Alkalien der darin enthaltenen,

hochgradig zersetzten Feldspäte der teilweise alkalireichen Gesteine. Voraussichtlich wird bereits eine schwach alkalische Lösung genügen, um AAR aus den beiden im Gesein vorhandenen Reaktionspartnern auszulösen. Eine solche ist in jeder Betonmischung vorhanden [1].

Das genaue Erfassen der Exposition, welcher ein altes Bauwerk über die Nutzungsdauer ausgesetzt war, ist meist schwierig. Scharfe Abgrenzungen ergeben sich nur bei sändig trockenen oder unter Wasser stehenden, sowie stark wechselbewitterten Bauwerken. Erstere sind frei von AAR und letztere immer von AAR betroffen, sofern ein ausreichendes AAR-Potential im Baustoff vorhanden ist.

Einfache Grundsätze als Schutz vor AAR

Konstruktiv

- Geringe Wechselbewitterung
- Wasser fern oder unter Wasser halten

Betontechnologie

- Keine hoch reaktiven Gesteinskörnungen
- Keine hochgezüchteten Rezepte (CEM I ≤ 350 kg, w/z ≤ 0.5 , LP)

Ausführung

- Ausreichend mischen
- 10 Tage Nachbehandlung

Alkali-Aggregat-Reaktionen bei Betonbauten 28.01.2010 894621/22

Das AAR-Potential eines über lange Zeiträume gelieferten Massenbetons ist heute nach wie vor schwierig zu beurteilen bzw. messtechnisch unter Kontrolle zu halten.

Es hat sich deutlich gezeigt, dass den Unsicherheiten bezüglich AAR mit einfachen konstruktiven, betontechnologischen und ausführungstechnischen Präventionsmassnahmen wirkungsvoll begegnet werden kann.

Da viele dieser Massnahmen im Betonbau „Ohnehinmassnahmen“ sind, ist deren Durchsetzung eine äusserst effiziente AAR-Prävention.

Kernaussagen

Das Ausmass von AAR-verursachten Schäden wurde aufgrund von AAR-Phänomenen am Bauwerk fast zur Hälfte überschätzt.

- Hohe Schadensintensitäten sind selten und beruhen auf Spezialfällen (hoch reaktive GK, viele überlagernde AAR-Einflussgrössen).
- AAR läuft rasch ab. Befürchtungen einer langsamen, progressiven AAR-Schadenszunahme junger Objekte scheint unbegründet.
- Initiale Schwindrisse, ungenügende Betonqualität, extreme Wechselbewitterung sind die Hauptursachen für Bauwerkschäden aus Beton mit einem vorhandenen AAR-Potential.
- Im Vergleich zur Chlorid-induzierten Bewehrungskorrosion ist AAR ein weit weniger bedeutender Schädigungsprozess von Bauwerken.
- Bei Instandsetzungen alter Bauwerke ist Vorsicht geboten!

Alkali-Aggregat-Reaktionen bei Betonbauten 28.01.2010 894621/22

Die Gültigkeit der nebenan stehenden Kernaussagen können für Regionen mit einem ähnlichen Gesteinskörnungsinhalt wie in Graubünden herangezogen werden. Wo hingegen von der vorliegenden Studie stark abweichende Betonrezepte verwendet wurden, wie beispielsweise andere CEM-Sorten, hohe Dosierungen, etc., können sich einzelne der vorliegenden Aussagen modifizieren.

Referenz

- [1] Krähenbühl, R., Hitz, G.: AAR-Schäden an Kunstbauten des Tiefbauamtes Graubünden. Untersuchungsbericht A13c/1996, 070101-2, 22.10.2007.