

Mikroskopie in der Bauwerkserhaltung – Geschichte, Gegenwart und Zukunft aus schweizer Perspektive

EINFÜHRUNG

2005 publizierte Dipayan Jana am 10. Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials in Schottland eine historische Zeittafel über die Entwicklung der Beton-Petrographie. Angefangen mit Henry-Louis Le Châtelier, der 1882 erstmals die Polarisationsmikroskopie auf Portlandzement anwandte und dabei Alit als Hauptkomponente nachwies, bis hin zu Bert Romer und George Dobrolubov, die 1968 erstmals die Fluoreszenzmikroskopie zur Gefügeanalyse von Beton einsetzten und dies 1972 publizierten – also vor genau 50 Jahren!

In diesem Beitrag erzählt Alberto Romer (früher publizierte er unter dem Namen Bert Romer) im ersten Teil wie es zu dieser Innovation in den 1960er und 1970er-Jahren kam. Im zweiten Teil dokumentiert Stefan Stiehl, wie die daraus hervorgegangene Schweizer Norm VSS 40 464 konzipiert ist. Als drittes schildert Ruedi Herren den Übergang zur gefügebasierten Zustandsuntersuchung von Beton. Im vierten Teil beschreibt Roger Zurbruggen, wie sich die mikroskopische Gefügeanalyse auf die modernen Polymer-Zement-Mörtel adaptieren liess. Und zuletzt machen die Autoren einen Ausblick auf die Gefügeanalyse von Baustoffen in der Zukunft mit Bezug zu einem Zitat von Katharine Mather.

1. VON DER SCHWEIZ NACH AMERIKA UND ZURÜCK

1930 machte Paul Niggli, ETH-Professor für Mineralogie und Petrographie in den ersten Mitteilungen des Internationalen Verbandes für Materialprüfungen zwei visionäre Äusserungen.

Erstes Zitat von Niggli (Wilk, 1980) zur Anwendung der Polarisationsmikroskopie:

« Sowohl für keramische Produkte als auch für die Mörtelbindung, Zement- und Betonuntersuchungen wird das Polarisationsmikroskop viel mehr als bisher zu Rate gezogen werden müssen.»

Zweites Zitat von Niggli (Wilk 1974) zu Färbeverfahren in der Beton-Mikroskopie:

« Eine weitere Eigenschaft, deren Bedeutung für die Druckfestigkeit, Frostbeständigkeit, Wetterbeständigkeit, Abnutzbarkeit, Polierbarkeit usw. schon lange erkannt wurde, ist die Raumerfüllung. Es genügen indessen Angaben über das Porenvolumen allein nicht; mikroskopische und Färbeverfahren müssen über die Gestalt der Hohlräume Auskunft geben ... Auch gilt es die ersten Anzeichen der Lockerung eines Gefüges zu beachten.»

Bereits 1928 gründete die Schweizer Zementindustrie ein Studienbüro, das alle Erfahrungen im Betonstrassenbau zu sammeln und zu verarbeiten hatte. Daraus entstand 1929 die Betonstrassen AG (BAG 1940). In dieser Zeit entwickelte sich der Stahlbetonbau und nach dem 2. Weltkrieg kam mit den ersten modernen Fahrmischern in den USA der Transportbeton auf. Diese Logistik erlaubte eine Vervielfachung der Umsatzmengen und war Grundlage für grosse Infrastrukturbauten. Die mangelnde Erfahrung wie Beton formuliert sein muss, damit er sich im alpinen Klima bewährt, wurde jedoch durch zahlreiche Schäden in der Zeit bis 1966 offenbart. In der Folge verbot die Schweizerische Bundesregierung den Bau von Strassen und Flugpisten mit Beton und verlangte die Entwicklung materialtechnischer Messverfahren zur Dauerhaftigkeit von Beton. Mit dieser Aufgabe betraute sie die Betonstrassen AG und die TFB AG (damals «Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie», heute «Technik und Forschung im Betonbau AG»).

Es wurde vermutet, dass die Dauerhaftigkeit mit dem Betongefüge zu tun hat, aber nirgends in Europa gab es die für diesen Nachweis erforderlichen Prüfverfahren.

Also wurde man auf Alberto Romer aufmerksam. Er hatte sich die Lichtmikroskopie am biologischen Institut der ETH bei Prof. Frey-Wysling angeeignet und war durch die Mitarbeit bei der Versuchsanstalt für Wasser und Erdbau (VAWE) mit der Druck-

imprägnation von geologischen Dünn- und Anschliffpräparaten vertraut. Mit diesem Know-How experimentierte er bereits mit verdünnten Epoxidharzen (aber noch ohne Farbstoff) und imprägnierte damit Betonproben, um durch Anschleifen die Luftporen sichtbar zu machen. George Dobrolubov von der Betonstrassen AG beauftragte Alberto Romer eine Präparations- und Messtechnik zu entwickeln, welche die Luftporengrösse eines Betons und deren Verteilung quantitativ bestimmen kann. Da die bisherigen Experimente wegen mangelndem Kontrast nur eine ungenügende Quantifizierung zuliessen, begann Romer mit fluoreszierenden Farbstoffen zu experimentieren und reiste eigens nach Wetzlar zur Firma Leitz, um sich die Fluoreszenzmikroskopie anzueignen.

Die Möglichkeiten zur Porenanalyse mit dieser neuen Technik waren verblüffend und Romer erhielt vom VSZKGF (Verein Schweizerischer Zement-, Kalk- und Gips-Fabrikanten) den Auftrag nach Amerika zu reisen, um zu erkunden wie die Amerikaner das Luftporengefüge von Beton analysieren. Denn dazumal gab es bereits die ASTM C 457, welche Laborproben anschnitt und die Luftporen mit Pigmenten einfüllte und somit kontrastierte. Diese Testmethode galt es für die Schweiz zu adaptieren. Romer erkannte durch seinen Besuch vier Dinge:

- 1) Die Analyse sollte an Dünnschliffen (Präparatdicke 0,02 - 0,03 mm) aus Bohrkernproben von den Betonstrassen und nicht wie in den USA an Anschliffen aus Laborprismen 12 cm x 36 cm durchgeführt werden.
- 2) Anstelle eines Anschliffes sind mit Dünnschliffen präzisere fluoreszenzmikroskopische Kontrastierungen und Quantifizierungen möglich.
- 3) Zusätzlich erlaubt die Fluoreszenzmikroskopie an Dünnschliffen die Beobachtung morphologischer Merkmale wie Mikrorisse, Kapillarität, Verbundstörungen, welche neben den Luftporenkennwerten die Dauerhaftigkeit massgeblich beeinflussen.
- 4) Es braucht eine begleitende schnelle physikalische Korrelationsprüfung der Frost(-Tausalz)-Beständigkeit für Bohrkern aus Strassenbeton. Diese wurde von Romer in Anlehnung an ähnliche Prüfverfahren in den USA adaptiert.

Romers Experimente zur «Concrete Petrography» (wie die Amerikaner die Mikroskopie am Beton nennen) waren inspiriert durch die Grundlagenstudien von Powers (1949) und den betonmikroskopischen Arbeiten von Erlin (1970).

2. VON DER MATERIALWISSENSCHAFT IN DIE NORM

Nach der Rückkehr aus Amerika folgte eine Grossuntersuchung der Betonstrassen AG, ausgeführt durch die von Romer 1968 gegründete LPM AG (damals «Labor für Präparation und Methodik», heute «Labor für Prüfung und Materialtechnologie»). Untersucht wurden 20-30 Jahre alte, beständige und unbeständige Betonstrassen aus der ganzen Schweiz. Dies geschah durch eine Bestimmung der Frost(-Tausalz)-Beständigkeit mittels Fluoreszenzlicht-Mikroskopie (Bestimmungsmethode I, kurz BE I) und ergänzend mittels Frost(-Tausalz)-Wechselbelastungen (Bestimmungsmethode II, kurz BE II).

Die positiven Ergebnisse basierend auf einem kombinierten Untersuchungskonzept von diagnostischen Bestimmungen BE I (Porenanalyse und morphologische Gefügequalität) und physikalischen Korrelationsprüfungen BE II hatte nebst der Betonstrassen AG auch das Bundesamt für Strassen ASTRA überzeugt.

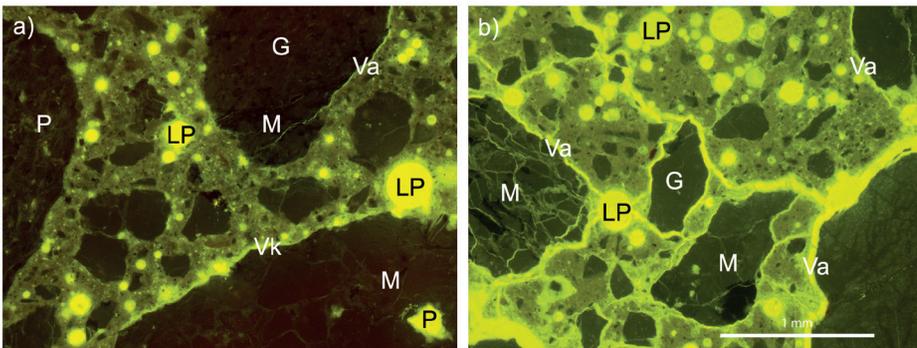


Fig. 1 a) Dieser Beton zeigt gemäss BE I eine gute Luftporenverteilung (LP) und trotzdem besteht er die Frost-Tau-Zyklen gemäss BE II nicht.
b) Die Gefügeschädigungen durch die Frost(-Tausalz)-Prüfung (BE II) ist damit zu erklären, dass dieser Beton eine Gesteinskörnung (G) aus Grauwacke enthält, die rissig (M) und porös (P) ist. Zudem lassen sich Verbundstörungen durch Ablösungen (Va) und erhöhte Kapillarität (Vk) feststellen.

Begleitet mit dem Verfahren BE I und wo nötig BE II, durften in den frühen 1970er-Jahren wieder Betonstrassen gebaut werden. Die in Wilk (1974) erwähnte Studentengruppe der SIA-Fachgruppe für Brückenbau und Hochbau im Oktober 1972 kann als Startschuss zur Etablierung frosttausalzbeständiger Betone in der Schweiz betrachtet werden. Damit wurde der Nachweis erbracht, dass auch die Schweiz frosttausalzbeständige Betonstrassen bauen kann. Alle kantonalen Tiefbauämter, respektive deren Kantonsingenieure waren überzeugt. Von nun an begleitet und überprüft die LPM AG alle Betonstrassen und Pistenobjekte im Auftrag der Betonstrassen AG.

Nach dem statistischen Korrelationsnachweis der Daten aus der Grossuntersuchung der Betonstrassen AG bei einer vom Bund beauftragten Fachstelle in Bern, kam es zum Normenanhang für die diagnostische Bestimmung BE I als Steuergrösse der Frost(-Tausalz)-Beständigkeit und für das physikalische Korrelationsprüfverfahren BE II an Betonstrassen und Flugpisten - beide Verfahren, BE I und BE II nach Dobrolubov und Romer (1977).

Die diagnostische Frost(-Tausalz)-Beständigkeitsbestimmung BE I hat zwei grosse Vorteile: Erstens, sie kann innerhalb von nur 3 bis 5 Tagen Resultate liefern und eignet sich daher für die Qualitätssicherung während Betonierarbeiten (Baustellenüberwachung).

Zweitens, sie liefert Informationen zum Betongefüge, welches in direktem Zusammenhang zu den Baustellenbedingungen, den Verarbeitungsprozessen und Formulierungsparametern steht.

Das Gefüge des Betons ist quasi das Gedächtnis seiner Einflussfaktoren. Wer es lesen kann, gewinnt wichtige Hinweise für eine Optimierung von Rezeptur, Applikation und Nachbehandlung des Betons zur Gewährleistung einer hohen Dauerhaftigkeit.

Romer und Dobrolubov perfektionierten die Gefügeanalyse von Beton als eine Steuergrösse beim Einbau, indem sie nicht nur zahlreiche weitere Gefügeeigenschaften definierten, sondern auch eine quantitative Gewichtung vorschlugen, die zuletzt einen Index für die Qualitätsbeurteilung liefert (Romer und Dobrolubov 1972, Dobrolubov und Romer 1977). Die Publikation von Wilk und Dobrolubov (1981) mit Mikroskopaufnahmen der LPM AG beinhaltet eine sehr gelungene Darstellung mit den wichtigsten Arten von Gefügeschädigungen sowie deren Einflussfaktoren und Steuergrössen auf der Baustelle.

Die beiden Prüfmethode BE I und BE II wurden 1976 zur Richtlinie der Schweizer Norm SNV 640 461 «Zementbeläge - Ausführung, Anforderungen» erhoben, ein Jahr später publiziert (Dobrolubov und Romer 1977) und erhielten 2010 mit der SN VSS 640 464 «Betondecken - Prüfmethode zur Bestimmung des Frost und Frosttaumittelwiderstands» eine eigene Norm (heute VSS 40 464). Ihr Prüfkonzept ist in Tabelle 1 schematisch dargestellt.

Die mikroskopische Gefügebeurteilung, wie sie in der geltenden Norm beschrieben ist, kennt 6 Gefügekomponenten, die in 13 Gefügeparameter differenziert sind und welche über ein quantitatives Bewertungssystem zu einem Qualitäts-Index (QI in Tab. 1) verrechnet werden können.

TABELLE 1

Schematische Darstellung der Bestimmung der Frost(-Tausalz)-Beständigkeit mittels BE I gegenüber BE II gemäss der Schweizer Norm VSS 40 464.

Schweizer Norm	Bestimmungsmethode	Material	Prüfkörper	Prüfmethoden	Output	Widerstandswerte für Frost- und Frosttaumittelwiderstand		
VSS 40 464 Betondecken - Prüfmethoden zur Bestimmung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands	BE I 3-5 Tage	1 Würfel (150 mm) oder 2 BK	2 Dünn-schliffe 4 Halb-zylinder	Mikroskopische Gefügebeurteilung QI = 0 bis -9 Poren-analyse Poren-sättigungs-kennwerte QI ab -10	Z _o QI Zementgehalt Qualitätsindex A A ₃₀₀ AF Gesamtluftporengehalt Gehalt an Mikroluftporen Abstandsfaktor U _E n ρ _{R110} Kapillarwasseraufnahme Gesamtporosität Trockenrohdichte	WF-P > 80 % (hoch)	WFT-P > 80 % (hoch)	WFT-P = 80 - 50 % (mittel)
	BE II 14 Tage	1 Würfel od. 2 BK	6 Prismen	Längenmessung	L _n Mittlere (irreversible) Längendehnung nach n Zyklen	WF-L > 80 % (hoch)	WFT-L > 80 % (hoch)	WFT-L = 80-50 % (mittel)
						XF3	XF4	XF2
						Expositionsklassen (CH; SN EN 206)		

Der Farbschlüssel bezieht sich auf die Mikroskopische Gefügebeurteilung (gelb), Porenanalyse und -sättigungskennwerte (blau) und zyklennabhängige irreversible Längendehnung (grün). Beträgt der Qualitätsindex (QI) 0 bis -9, so genügt die Bestimmungsmethode BE I. Bei gravierend gestörter Gefügequalität mit QI ab -10 verlangt die Norm zwingend die Bestimmungsmethode BE II. Die diagnostische Bestimmung BE I liefert aber jeweils die Gefügeparameter zur Begründung der Widerstandswerte. BE I kann bereits an 1-2 Tage alten Beton durchgeführt werden. BE II wird an mindestens 28 Tage alten Betonproben durchgeführt. Die Betonexpositionsklassen (grau) sind in der Norm SN EN 206 definiert.

In Lane (2006) ist festgehalten, dass es die englische Publikation von Wilk, Dobrolubov und Romer (1974) war, welche die Fluoreszenzmikroskopie zur Gefügeuntersuchung von Beton erstmalig einem internationalen Publikum kundtat. So wie sich die Schweizer von den Amerikanern inspirieren liessen und damit die Beton-Petrographie weiter entwickeln konnten, sprach sich dieser Erfolg auch bei den Amerikanern um.

Zusätzlich gab es ein konkretes Problem mit den Betonfluggpisten auf dem amerikanischen Stützpunkt in Ramstein, Deutschland (Mather 1974). So kam es, dass Katharine und Bryant Mather über den Atlantik flogen und im Mai 1974 und September 1976 die Betonstrassen AG in Wildegg und die LPM AG in Beinwil am See besuchten, um einen Amerikanisch-Schweizerischen-Kooperationsvertrag zu beschliessen. In der Einleitung zu dessen Arbeitsplan (Dobrolubov, Romer, Wilk, Mather und Dillard 1976) ist zu lesen, dass im Januar 1974, anlässlich des 54. Annual

Meeting des Transportation Research Board, Washington D. C., Dobrolubov einen Vortrag mit dem Titel «Development in Quality Control of Concrete during Paving» gehalten habe. Das Interesse wäre so gross gewesen, dass Dobrolubov und Romer als Gäste zu einer Arbeitsgruppenbesprechung des «Committee on Basic Research Pertaining to Portland Cement and Concrete» eingeladen wurden. Während dieser Sitzung entstand die Idee für die oben erwähnte Forschungskooperation zwischen Howard Newlon, Virginia Highway & Transportation Research Council; Mrs. Katharine Mather, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station; George Dobrolubov, Betonstrassen AG und Bert Romer, LPM-Labor. Ziel war die «Adaption of Swiss Microscopic Method Dobrolubov and Romer» für die American Society for Testing and Materials (ASTM) und das U.S. Army Corps of Engineers.

Katharine Mather war dazumal Vorsitzende der ASTM, Subcommittee on Petrography of Concrete and Aggregates. Sie war eine anerkannte Expertin für Beton-Petrographie und Autorin zahlreicher Publikationen (siehe Publikationsliste in Lane 2006).

Damit schloss sich ein Kreis von gegenseitiger Inspiration, welche die Gesellschaften zu beiden Seiten des Atlantiks weitergebracht hat.

Innerhalb Europas wurde die «Methode D-R» (Dobrolubov-Romer) in Norwegen (Markestad 1977), Dänemark (Danish Ministry of Transportation 1980) und der damaligen UdSSR (Dobrolubov et al. 1983) etabliert.

Dazu ein Zitat von Markestad (1977):

« The reason why the Swiss reputation of good concrete roads has spread all over Europe, is according to my opinion, for a great deal due to the application of the D-R control system and its influence on the working procedures.»

3. VON DER QUALITÄTSSICHERUNG ZUR ZUSTANDSUNTERSUCHUNG VON BETON

Mit den zahlreichen Beurteilungen von Betongefügen im Rahmen der BE I Prüfung entwickelte sich in den 80er Jahren in der LPM AG eine grosse Fachkenntnis über gute, gestörte und geschädigte Betongefüge. In dieser Zeit stiegen die Kosten für Reparatur und Instandhaltung sprunghaft in die Höhe. Wittmann (1984) hielt fest: «Darüberhinaus haben spektakuläre Einstürze die Aufmerksamkeit breiter Schichten auf das Langzeitverhalten von Betonkonstruktionen gelenkt.» Neben der zunehmenden Aggressivität der damaligen Industrielatmosphäre kamen immer mehr Beton-

bauten in ein sanierungsbedürftiges Alter von 50 und mehr Jahren. Dies führte zu einer vertieften Analyse der Schädigungsmechanismen im Beton. Der Begriff "Betonkorrosion" begann sich zu etablieren. Gemeint ist damit das Verhalten des Zementsteins unter dem Einfluss von aggressiven Wässern, Säuren und Gasen, was sich durch treibende, lösende und weitere chemische und physikalische Vorgänge im Betongefüge abzeichnet.

Nun war es nur noch ein kleiner Schritt durch die Anwendung der Lichtmikroskopie den Zustand und die Schädigung des Betongefüges zu beurteilen und daraus Instandsetzungsmassnahmen abzuleiten, wie beispielsweise in Romer & Rathgeb (1983). In den letzten 40 Jahren hat die LPM AG rund 20'000 Betongefüge mikroskopisch untersucht. Sie konnte gestützt auf die Gefügemerkmale den Zustand der Objekte feststellen und entsprechende Sanierungsmassnahmen empfehlen.

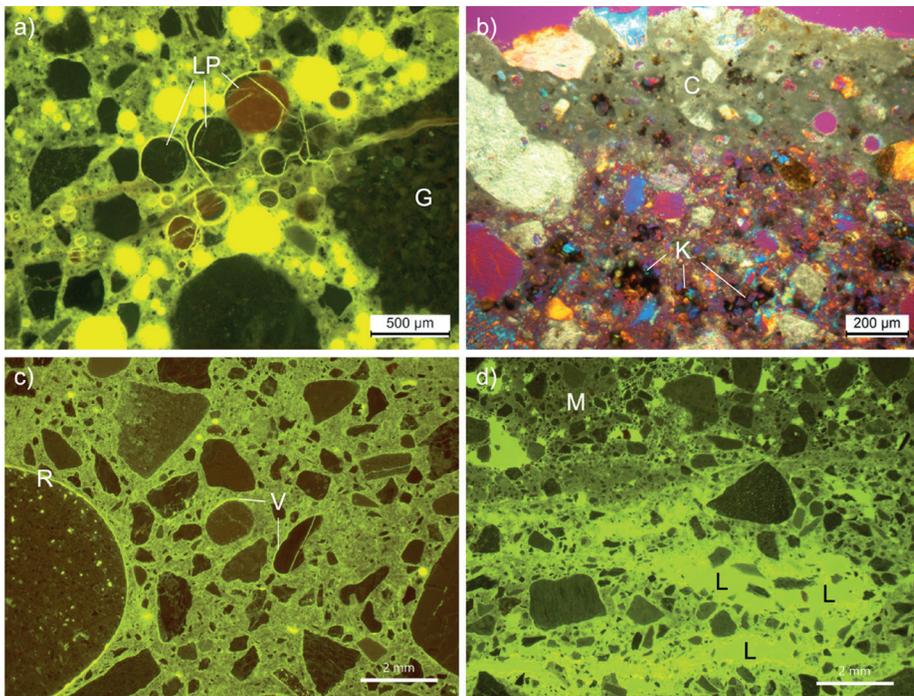


Fig. 2 a) Mit Alkali-Silika-Gel verfüllter Riss aus Gesteinskorn (G) hinauslaufend und verfüllte Luftporen (LP) in einem Beton B45/35, Baujahr 1999.
 b) Portlandzement-Klinkerkörner (K) in einem gering bis mittel hydratisierten 28 Jahre alten Beton (Baujahr 1988) mit einer karbonatisierten (C) Oberfläche.
 c) Hoher Verdichtungsgrad ohne Luftporen und Verbundstörungen (V) entlang Gesteinskörnern mit lokalen Rissablösungen (R) stellen den Frostwiderstand, der für diesen Elementbeton erreicht werden sollte, in Frage.
 d) Die mikroskopische Zustandsuntersuchung eines Sandfangs einer Abwasserreinigungsanlage ergab eine äussere, relativ kompakte Mörtelschicht (M) mit gutem Verbund zu einem stark gestörten Traggrund mit vielen Lunkern (L).

4. VOM BETON ZU DEN MODERNEN MÖRTELN UND BESCHICHTUNGEN

Analog zur Beton-Petrographie eignet sich die Lichtmikroskopie im Polarisations- und Fluoreszenzmodus zur Gefügeuntersuchung von Mörteln und Beschichtungen, insbesondere auch bei Schadensfällen. Weil Mörtel- und Beschichtungssysteme oftmals mehrschichtig sind, spielen die Gefüge an den Verbundstellen eine besonders wichtige Rolle. Bei diesen Verbundstellen handelt es sich um zeitlich hintereinanderliegende Arbeitsgänge. Die Gefügeanalyse von Mehrschichtsystemen bedarf deswegen der Kenntnis der Applikationstechniken.

Eine grosse Herausforderung ergibt sich aber schon bei der Probenentnahme und Präparation. So sind Mehrschichtsysteme unterschiedlich porös und dünn. Dazu enthalten sie nebst mineralischen auch organische Zusatzmittel, welche sich bei der Dünnschliff-Präparation auflösen können. Wo für die Dünnschliffherstellung von Betonproben eine Standardpräparationsmethode gute Dienste leistet, kann dies bei Mörteln und Beschichtungssystemen nicht vorausgesetzt werden. Es ist zu empfehlen, mit dem Präparator die Probenmaterialien jeweils zu besprechen und allenfalls eine Einbettung oder Vakuumvorimprägnation vor dem ersten Schnitt zu veranlassen.

Hinsichtlich moderner Polymer-Zement-Mörtel stellt die Publikation von Jenni et al. (2006) einen vielzitierten Durchbruch dar. Erstmals gelang es Mörteladditive, die im Promillebereich dosiert sind, mit Fluoreszenzmittel zu markieren und in ihrer Verteilung in einem 3 mm dünnen Mörtelbett zu quantifizieren. Dieselbe Methodik wurde von DeGasparo et al. (2009) auf die komplexesten Mörtelsysteme, selbstverlaufende Bodenspachtelmassen angewandt. Damit konnten die Autoren aufzeigen, welche Mechanismen während dem Anrühren, der Applikation und dem Aushärten, welche Gefüge generieren, wie dabei die verschiedenen Zusatzmittel an Grenzflächen an- oder abgereichert werden und dadurch die Verbundeigenschaften beeinflussen. Zurbruggen et al. (2007) zeigen wie Mörteladditive das Mikrogefüge prägen und Bühler et al. (2011) fokussieren auf die Oberfläche eines Klebmörtels und untersuchen die Ursachen der Offenzeit.

Bei all diesen Studien spielte die Lichtmikroskopie eine zentrale Rolle hinsichtlich einer quantitativen Gefügeanalyse, nicht zuletzt deswegen, weil die Lichtmikroskopie die Makrowelt mit der Mikrowelt verbindet. Fig. 3 zeigt zwei Übersichten bei geringer Vergrösserung, welche zahlreiche Gefügemerkmale erkennen lassen, die auch mit einer guten Lupe erkennbar wären.

In vielen Fällen ist eine Übersicht Ausgangspunkt für tiefergehende Vergrösserungen und Detailaufnahmen. Die Übersicht liefert aber den Kontext sowohl zum makro-

skopischen Schadensfall als auch für Details bei starken Vergrößerungen. Diese Skalierung vom Zentimeter bis hinab zum Mikrometer über vier Größenordnungen leistet die Lichtmikroskopie am effizientesten.

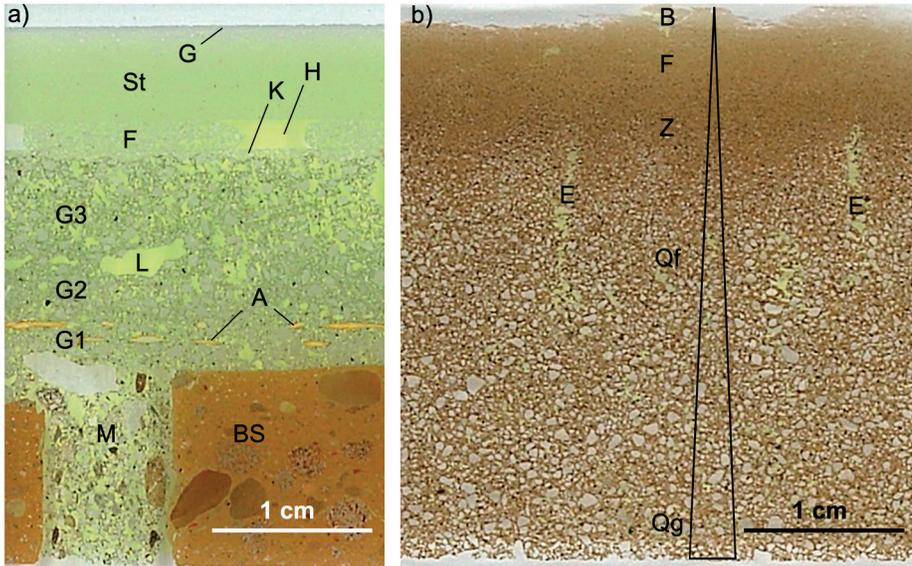


Fig. 3 a) Wandaufbau mit Backsteinmauerwerk (BS: Backstein, M: Mauermörtel), 3 Lagen Grundputz (G1: mit 2 Lagen Armierungsgewebe A, G2: dichter Grundputz, G3: Grundputzschicht mit zahlreichen Lunkern L, worin eine schadhafte Abscherung stattfand), Fliesenkleber (K: Kratzspachtelschicht, F: Floatinglage mit dazwischenliegenden Kämmhohllagen H) und einer glasierten (G) Steingutfliese (St).

b) Vergussmörtel, der stark segregierte. Das grobe Quarzsandkorn (Qg, Ø 0.7 mm) liegt zuunterst, darüber das feinere Quarzsandkorn (Qf, Ø 0,4 mm), darüber eine Lage ohne Quarzsandkorn bestehend aus Zementkörnern (Z, Ø 0.06 mm) und Feinstkorn (F) und zuoberst eine abkheidende Bojakenschicht (B, Ø 0.02 mm). Bemerkenswert sind die steilstehenden Entwässerungskanäle (E), die während der Segregation als Schlote für Wasser und Feinstbestandteile agierten. Das Dreieck symbolisiert ein «fining-upward» mit gegen oben feiner werdender Korngrösse.

5. VON HEUTE IN DIE ZUKUNFT

Die vier Mikroskopaufnahmen (Fig. 4) derselben Stelle zeigen, wie unterschiedliche Beleuchtungs- und Filterkombinationen mittels eines kombinierten Polarisations-Fluoreszenzlicht-Mikroskopes jeweils ein anderes Gefügemerkmal besonders gut kontrastieren können. Diese Vielfalt an Kontrastiermöglichkeiten mittels einfacher Handgriffe am Lichtmikroskop, an welchem mit einem Schwenk am Objektivrevolver über drei Größenordnungen die Vergrößerung variiert werden kann und das auch im Unterhalt sparsam ist, stellt einen Effizienzvorteil dar, der mit kaum einer anderen Methode streitig gemacht werden kann.

Die zentrale Herausforderung der Lichtmikroskopie ist aber die grosse Erfahrung, die sie beansprucht und die Tatsache, dass sie nur noch bei den Mineralogen und Geologen in der Ausbildung einen Platz hat. Aber auch da wird sie durch zunehmende Studieninhalte konkurriert.

Aus diesem Grund ist der Baubranche und ihrem Gutachterwesen geraten, das Mikroskopie-Know-How zu pflegen und auch aus Eigeninitiative an die nächste Generation zu tradieren. Deswegen führt die LPM AG regelmässig interne Schulungen durch und wirkt an Mikroskopie-Weiterbildungsseminaren mit.

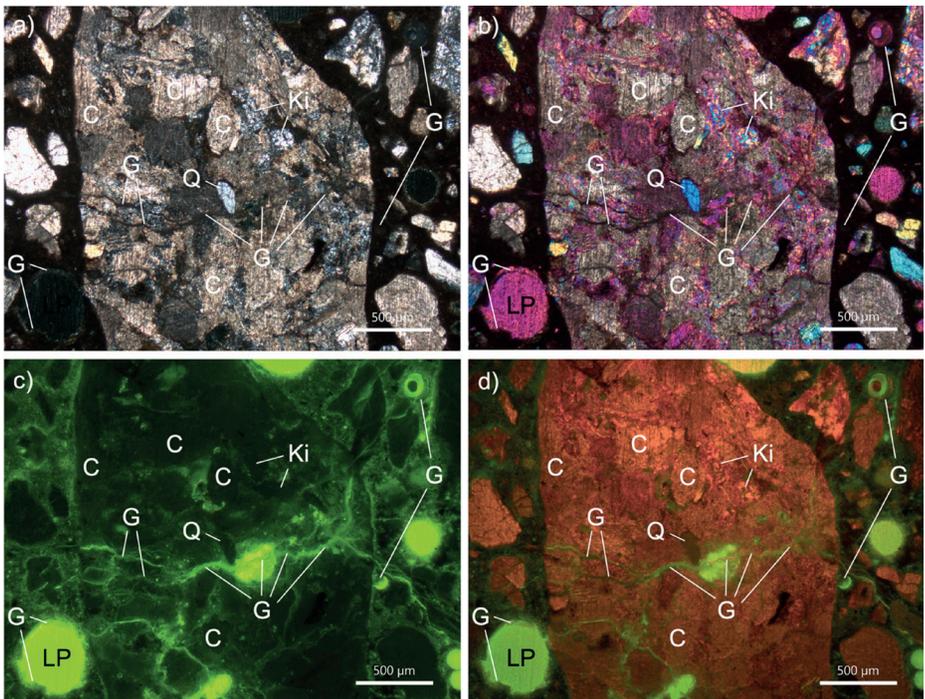


Fig. 4 Gesteinskomponente aus Kieselkalk in einem Beton mit Alkali-Aggregat-Reaktion. Derselbe Ausschnitt mit gekreuzten Polarisatoren (a), zusätzlich mit dem Rot I-Plättchen (b), unter Fluoreszenzlicht (c) und Fluoreszenzlicht kombiniert mit polarisiertem Durchlicht (d).

(Legende: C: Karbonatische Bereiche, Ki: Kieselige Nester mit mikrokristallinem Quarz oder Chalcedon, Q: detritisches Quarzkorn, LP: Luftporen, G: Alkali-Silika-Gel)



Fig. 5
Katharine Mather
(1916-1991)
(Quelle: Transportation
Research Board auf
Facebook)

In Lane (2006) findet sich das folgende zukunftssträchtige Zitat von Katharine Mather:

« The best petrographic examination is the one that finds the right questions and answers them with maximum economy in minimum time, with a demonstration clear to all concerned that the right questions were answered with all necessary and no superfluous detail. In practice, the approach to the ideal varies depending on the problem, the skill with which the questions are asked, and the skill of the petrographer. One measure of the petrographer's skill is knowing when to stop, either because the problem is adequately solved, or, in some cases, because it has been shown to be insoluble under the circumstances.»

Katharine Mather definierte die Beton-Petrographie über die ökonomische Effizienz. Diese ist zweifelsohne eine Voraussetzung für eine effiziente Bauwerksanalyse, welche es auch in Zukunft brauchen wird. Daher hat die Lichtmikroskopie mit all ihren Facetten der Hellfeld-, Polarisations- und Fluoreszenzmikroskopie, welche, wie oben ausgeführt, an demselben Gerät durch Umschalten mit wenigen Handgriffen erfolgen kann, einen fast unschlagbaren Vorteil, den sie mit grosser Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft auszuspielen vermag.



Fig. 6
Im Juni 2021 haben Daniel Ehrler (links) und Roger Zurbruggen (rechts) Alberto Romer in seinem Malatelier zuhause in Beinwil am See besucht, um die schweizer Geschichte der Beton-Petrographie aus erster Hand zu erfahren. Trotz eines Augenleidens, weswegen Alberto Romer vor 12 Jahren die Beton-Petrographie aufgeben musste, malt er eindruckliche Landschaftsbilder mit Sujets rund um seinen Wohnort am Hallwilersee.

SCHLUSSBEMERKUNG

Was war das Erfolgsrezept von Dobrolubov und Romer? Aus dem Archivmaterial zahlreicher Briefe, Verträge und Widmungen ergibt sich das Bild einer Partnerschaft zweier Wissenschaftler, die sich ideal ergänzten. Dobrolubov war Ingenieur, Netzwerker, begnadeter Kommunikator und hatte die Rolle eines Research Managers, der vor allem die Aufträge und Mittel beschaffte. Romer hingegen ist der anerkannte Baustoffexperte, Techniker und Erfinder, der von Grund auf ein Betonlabor, die LPM AG gründete. Ihm gelang es, von verschiedensten wissenschaftlichen Gebieten einzelne Bausteine herzunehmen und daraus eine analytische Innovation zu kreieren.

Alberto Romer und George Dobrolubov haben international anerkannte wissenschaftliche Pionierarbeit geleistet, die hiermit gewürdigt werden soll.

LITERATUR

- ASTM (1960): Microscopical determination of air-void content and parameters of the air-void system in hardened concrete. ASTM C 457.
- BAG (1940): Mitteilung Nr. 4: Aufgabenkreis der Betonstrassen A.G. (BAG), Wildegg. Beilage zum Cementbulletin, Band 8-9 (1940-1941), Heft 13.
- Bühler Th., Zurbruggen R., Piele U., Huwiler L. and Raso R. (2013): Dynamics of early skin formation of tiling mortars investigated by microscopy and diffuse reflectance infrared Fourier transformed spectroscopy. *Cement and Concrete Composites*, 37, 161-170.
- Danish Ministry of Transportation (1980): Concrete durability - an investigation of recently constructed motorway bridges in Denmark. Bridge Division, May 1980, 63 pp. plus appendices.
- De Gasparo A., Herwegh M., Zurbruggen R. and Scrivener K. (2009): Quantitative distribution patterns of additives in self-leveling flooring compounds (underlayments) as function of application, formulation and climatic conditions. *Cement and Concrete Research*, 39, 313-323.

- Dobrolubov G., Romer A., Wilk W., Dillard J. H. and Mather B. (1976): Working plan/Arbeitsplan zwischen der Highway & Transportation Research Council, Commonwealth of Virginia, USA; dem Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Mississippi, USA; der Betonstrassen AG, Wildegg, Schweiz und der LPM AG, Beinwil am See, Schweiz, 3.5.1976.
- Dobrolubov G. und Romer B. (1977): Richtlinien zur Bestimmung und Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit von Zementbeton. Verfahren nach Dobrolubov-Romer. Schweizer Norm SN 640 461 Ziff. 43. Separatdruck: Strasse und Verkehr, Nr. 10+11, S. 405-411.
- Dobrolubov G., Ratinov V. B. and Rozenberg T. I. (1983): Forecasting the durability of concrete with admixtures. Stroizdat, Moscow, 213 pp.
- Erlin B. (1979): Analytical techniques. In: Observations of the performance of concrete in service. Highway Research Board, HRB Special Report 106, pp. 29-37.
- Jana D. (2005): Concrete petrography – past, present, and future. 10th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Scotland, 2005.
- Jenni A., Herwegh M., Zurbruggen R., Aberle T. and Holzer L. (2003): Quantitative microstructure analysis of polymer-modified mortars. Journal of Microscopy, Vol. 212, pp. 186-196.
- Lane S. (2006): Petrographic methods of examining hardened concrete: a petrographic manual. Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-HRT-04-150, 353 pp.
- Markestad A. (1977): The Dobrolubov-Romer system for control of concreting work. Personal letter (16.05.1977) of Prof. A. Markestad, University of Trondheim, Division of Building Materials, Head of Materials Section of Cement and Concrete Research Institute, Norway to the attention of G. Dobrolubov and A. Romer.
- Mather B. (1974): Letter (27.11.1974) from Bryant Mather, Chief Concrete Laboratory, Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, to the attention of Dobrolubov G., Betonstrassen AG, Wildegg, Schweiz.

- Powers T. C. (1949): The air requirement of frost-resistant concrete. Highway Research Board Bulletin, 32, 285-297.
- Romer B. und Dobrolubov G. (1972): Angewandte Mikroskopie bei der Baustoffprüfung: Beton, Mörtel, Zement, Kalk, Gips, Keramik. Betonstrassen, Mitteilungsblatt der Betonstrassen AG Wildegg, Nr. 90/91, S. 1-16. Derselbe Beitrag erschien ein Jahr später in englischer Sprache (Romer, 1973).
- Romer B. (1973): Practically-applied microscopical examination of construction materials: for concrete, mortar, cement, chalk, plaster and ceramic. Proceedings of the International Symposium Prague, Sept. 18-21, 1973, Preliminary Report - Part I, pp. 187-211.
- Romer B. und Rathgeb P. (1983): Frost-Tausalz-Schäden an Betonplatten, Parkflächen in Parkhaus. In: Kunz H. und Rösli A. (Editoren): Baumängel - Behebung und Vorbeugung. Band 7, Frost-Tausalz-Schäden, Institut für Hochbauforschung, ETH Zürich, S. 35-60.
- SN EN 206:2013+A1:2016: Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- VSS 640 464 (Ausgabe 2019-03): Betondecken - Prüfmethode zur Bestimmung des Frost- und Frosttaumittelwiderstands. Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, VSS.
- Wilk W., Dobrolubov G. and Romer B. (1974): Development in quality control of concrete during construction. Transportation Research Record 504. Transportation Research Board, Washington, DC.
- Wilk W. (1974): Zur Einwirkung von Tausalzlösungen auf Tragwerke in Beton. Schweizerische Bauzeitung, Band 92, Heft 21, S. 506-509.
- Wilk W. (1980): Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton. Internationales Symposium, Wien, Juni 1980. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 42, S. 1041-1043.
- Wilk W. und Dobrolubov G. (1981): Kontrolle und Optimierung der Werkstoff-Qualität während des Beton-Einbaues mittels mikroskopischer Gefügeuntersuchung im Hinblick auf Dauerhaftigkeit. Mitteilungen der Betonstrassen AG, Wildegg, Nr. 127/128.

- Wittmann F. H. (1984): Gefüge und Beständigkeit des Betons. Referate der Studientagung, 3. und 4. April 1984, Zürich, FIB, SIA-Fachgruppe für industrielles Bauen, SIA-Dokumentation 72.
- Zurbriggen R., Herwegh M., Jenni A., De Gasparo A., Holzer L. and Aberle T. (2007): The influence of organic additives on the microstructural development and properties of mortars. ZKG International, Material Science, No. 2-2007, vol. 60, pp. 62-73.