Mag. Dr. Helga Zeitlhofer
Allgemein beeidete und gerichtlich zertifizierte Sachverständige für das Bauwesen

Forensische Mikroskopie bei Betonschäden

Die forensische Mikroskopie stellt ein essenzielles Werkzeug zur objektiven Analyse und Bewertung von Betonschäden dar. Durch den Einsatz von Polarisations-, Durchlicht- und Fluoreszenzmikroskopie können mikrostrukturelle Eigenschaften von Beton präzise erfasst und Schadensmechanismen eindeutig identifiziert werden. Die Methode ermöglicht differenzierte Rückschlüsse auf Herstellungsfehler, Einbauprobleme, Planungsdefizite sowie Langzeiteinflüsse (wie chemische Reaktionen oder Umwelteinwirkungen). Gerade im Kontext zunehmend komplexer Materialsysteme und neuer Normenvorgaben bietet die forensische Mikroskopie gerichtsfeste, evidenzbasierte Aussagen, welche die Grundlage sachverständiger Gutachten bilden. Praxisbeispiele zeigen das breite Anwendungsspektrum und verdeutlichen die methodischen Vorteile gegenüber makroskopischer Beurteilung.

1. Einleitung

In der Begutachtungspraxis zeigt sich immer wieder, wie anspruchsvoll es ist, bei der Vielzahl an geltenden Normen, Richtlinien und technischen Regelwerken den Überblick zu behalten. Im Schadensfall stellt sich regelmäßig die Frage, ob die Ursache in der Planung, in der Ausführung oder in der Qualität der eingesetzten Materialien zu finden ist. Zusätzliche Komplexität entsteht durch die zunehmende Verwendung klimaschonender Ausgangsstoffe und neuer Zementsorten. Diese Entwicklungen sind aus ökologischer Sicht zu begrüßen, führen jedoch zu neuen Bewertungsfragen, die Planer, Ausführende und Sachverständige gleichermaßen betreffen.

Um bei der Klärung von Schadensfällen verlässliche und gerichtsfeste Aussagen treffen zu können, sind präzise und prozessorientierte Untersuchungsmethoden erforderlich. Eine dieser Methoden ist die forensische Mikroskopie von Beton, die tiefgreifende Einblicke in das Betongefüge und seine Veränderung im Laufe der Zeit ermöglicht.

Die forensische Mikroskopie ist seit Jahrzehnten in den USA und in vielen europäischen Ländern ein bewährtes Instrument zur diagnostischen Beurteilung von Betonbauwerken.[1] Bereits in den 1950er-Jahren wurde sie – zunächst vor allem in Nordeuropa – intensiv eingesetzt, als Länder wie Norddeutschland, die Niederlande und Dänemark mit massiven Schäden infolge der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) konfrontiert waren. Um die strukturellen Schadensursachen zu erfassen, wurde die ursprünglich aus der Geologie stammende Polarisationsmikroskopie erfolgreich für betontechnologische Fragestellungen adaptiert.[2] Ergänzt durch fluoreszenzmikroskopische Verfahren sowie die Rasterelektronenmikroskopie (REM) konnte die visuelle Darstellung und Bewertung betontechnologischer Merkmale entscheidend erweitert werden.[3]

Heute bietet die forensische Mikroskopie prozessorientierte Analysen, die weit über eine rein visuelle Betrachtung hinausgehen. Sie ermöglicht die gezielte Untersuchung von Betonrezepturen, Hydratationszuständen, Porenstruktur, Kornverteilung, Rissverläufen, Reaktionsprodukten und anderen mikrostrukturellen Eigenschaften. Damit lassen sich sowohl schleichende als auch akute Schadensmechanismen präzise erfassen und nachvollziehbar dokumentieren.[4]

In Österreich bildet die ÖNORM B 4710-1[5] die Grundlage für die Definition, Herstellung und Bewertung von Beton und dessen Eigenschaften. Diese Norm stellt die nationale Umsetzung der EN 206[6] dar. Darüber hinaus existiert eine Vielzahl an Richtlinien und Merkblättern für Beton mit speziellen Anforderungen, etwa im Straßenbau (RVS 08.17.02),[7] im Tiefbau (zB ÖBV-Richtlinien zu Bohrpfählen,[8] Schlitzwänden,[9] Weißen Wannen),[10] im Siedlungswasserbau (zB ÖBV-Merkblatt „Beton für Kläranlagen“)[11] oder im Tunnelbau (zB ÖBV-Richtlinie zu Spritzbeton).[12]

Gerade in diesem komplexen Normenumfeld ist es für Gerichtssachverständige unerlässlich, auf bewährte, objektive Analysemethoden zurückzugreifen. Die forensische Mikroskopie stellt hier ein leistungsstarkes Werkzeug dar, um Schadensursachen zweifelsfrei zu identifizieren und eine sachlich fundierte Bewertung im Rahmen von Gutachten zu ermöglichen.

2. Methodenbeschreibung

Die forensische Mikroskopie von Beton basiert auf der Kombination verschiedener mikroskopischer Verfahren (insbesondere der Durchlichtmikroskopie, der Polarisationsmikroskopie und der Fluoreszenzmikroskopie). Grundlage für die Analyse ist stets ein Dünnschliff (siehe Abbildung 1, Bildteil B) der zu untersuchenden Betonprobe, der detaillierte Einblicke in das Gefüge und potenzielle Schadensmerkmale im Mikrometerbereich ermöglicht. Zur Herstellung eines geeigneten Präparats wird die entnommene Betonprobe zunächst in Quader mit den Abmessungen 40 × 40 × 20 mm zugeschnitten. Anschließend erfolgt die Einbettung der Probe in ein fluoreszierendes Harz (siehe Abbildung 1, Bildteil A). Dieses dringt – unterstützt durch mehrfaches Vakuumimprägnieren – tief in das Material ein, füllt Risse, Verdichtungsporen, Kapillarporen sowie

das Luftporensystem aus, stabilisiert die Struktur mechanisch und macht Hohlräume für die spätere Untersuchung sichtbar.

Nach der vollständigen Harztränkung wird die Probe auf einen Objektträger mit einer Fläche von 4 × 4 cm aufgeklebt und auf eine Schichtdicke von 20 bis 25 µm plangeschliffen. Abschließend wird das Präparat mit einem Deckglas abgedeckt und versiegelt. Das fertige Präparat ermöglicht im Anschluss die Analyse durch verschiedene mikroskopische Verfahren.

Für die Fluoreszenzmikroskopie wird ein spezielles Beleuchtungssystem verwendet, das einen Wellenlängenbereich von 450 bis 490 nm aus dem Halogenlicht herausfiltert. Diese Lichtfrequenz ist auf das fluoreszierende Pigment im Harz abgestimmt, wodurch eine klare Darstellung der porösen Bereiche erreicht wird (siehe Abbildung 1, Bildteil C). Alternativ kann auch mit einer Lichtquelle im besagten Wellenlängenbereich gearbeitet werden. Die fluoreszierenden Strukturen entsprechen den Hohlräumen und lassen eine exakte Zuordnung und Quantifizierung von Porenräumen, Rissen und weiteren Hohlraumbildungen zu – ein wesentlicher Vorteil bei der Beurteilung der inneren Strukturqualität von Beton.

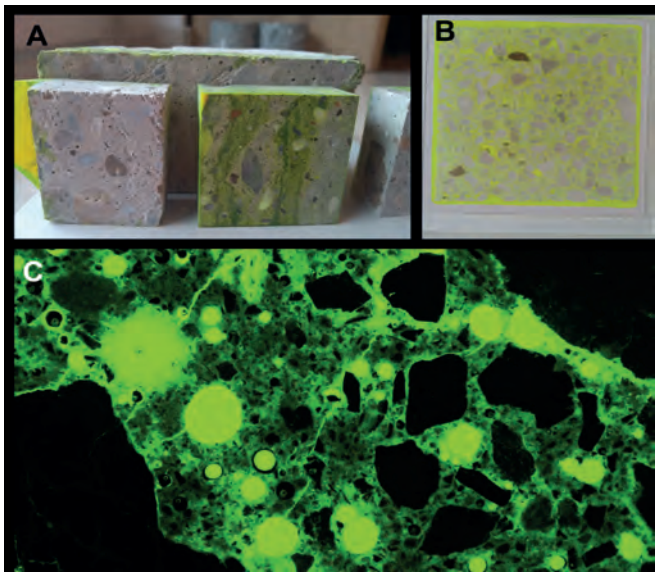

Abbildung 1: Übersicht der Probenpräparation für die Betonmikroskopie. **A:** Zuschnitt der Betonprobe in Probekörper 4 x 4 x 2 cm und Einbettung in fluoreszierendes Harz. **B:** 4 x 4 cm Dünnschliff des Präparats mit einer Schliffdicke von 20 µm. **C:** Aufnahme des Dünnschliffpräparates mit 50-facher Vergrößerung und fluoreszierender Beleuchtung

Die Polarisationsmikroskopie, als Teilaspekt der forensischen Mikroskopie beruht auf der Nutzung linear polarisierten Lichts und macht sich die Doppelbrechung kristalliner Strukturen zunutze. Sie erzeugt charakteristische Interferenzfarben und Muster, die Rückschlüsse auf Kristallorientierungen, Mineralphasen und sekundäre Reaktionsprodukte zulassen. Sie wird eingesetzt zur Beurteilung der Zementmatrix, von Reaktionsgefügen und Sekundärreaktionen (zB Ettringitbildung oder Alkali-Kieselsäure-Reaktion), zur Analyse der Kornbindung und Kontaktverhältnisse sowie zur Verfolgung von Rissverläufen und Alterungsprozessen. Durch die geringe Schliffdicke lassen sich strukturelle Zusammenhänge aufdecken, die bei makroskopischer Betrachtung verborgen bleiben. In Kombination mit der Fluoreszenzmikroskopie, welche umfangreine Informationen über Hohlraumsysteme und Dichtheit der Zementmatrix zulässt, ergeben sich eine umfassende mikrostrukturelle Beschreibung des Ist-Zustands und Hinweise zu Prozessen, die zur Schadensentstehung beigetragen haben.

Die mikroskopischen Daten bilden eine wesentliche Grundlage für die forensische Analyse von Betonschäden, da sie eine differenzierte Bewertung von Materialeigenschaften, Herstellungsqualität und potenziellen Schadensmechanismen ermöglichen. Zudem können durch die Ergänzung von Bildauswertungssoftware quantitative Daten für eine genauere Spezifizierung von einzelnen Problemstellungen gewonnen werden.

3. Betongefüge

Das Mikrogefüge von Beton bezeichnet die innere Struktur des Baustoffs im mikroskopischen Maßstab. Es umfasst die räumliche Anordnung und Wechselwirkung der Zementmatrix, Gesteinskörnungen, Porenräume sowie eventuell vorhandener Reaktionsprodukte oder Risse. Dieses Gefüge entsteht im Zuge der Hydratation des Zements und ist maßgeblich von der Zusammensetzung des Betons (Betonausgangsstoffe), dem Wasserzementwert, der Verdichtung, der Nachbehandlung und der Einbauweise abhängig.

Obwohl Beton auf den ersten Blick als dichter und homogener Werkstoff erscheint, ist er auf mikroskopischer Ebene physikalisch inhomogen und von einer komplexen Porenstruktur durchzogen. Diese setzt sich aus Gelporen, Kapillarporen, Luftporen und eventuell entstandenen Mikrorissen zusammen. Die Größe, Verteilung und Vernetzung dieser Poren beeinflussten zentrale Eigenschaften des Betons wie Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Dichtigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen. Ein dichteres, gut ausgebildetes Mikrogefüge führt zu einem geringeren Transport von Wasser, Gasen und Schadstoffen in das Materialinnere und schützt so beispielsweise die Bewehrung vor Korrosion oder verhindert das Eindringen schädlicher Substanzen. Umgekehrt begünstigt ein offenes, poröses Gefüge die Einwirkung von Feuchtigkeit, chemischen Medien oder Frost, was langfristig zu Schäden führen kann.

Ein intaktes Betongefüge zeichnet sich durch eine homogene, dichte Matrix, einen guten Kornverbund, ein gleichmäßiges Porengefüge sowie einen hohen Hydratationsgrad aus (siehe Abbildung 2). Es weist homogen verteilte Kapillarporen auf, ist weitgehend frei von Mikrorissen und besitzt eine stabile Gefügestruktur über den gesamten Querschnitt hinweg. Solch ein Gefüge bildet die Grund-

lage für einen langlebigen, widerstandsfähigen und funktionalen Beton (sowohl in mechanischer als auch in chemisch-physikalischer Hinsicht).

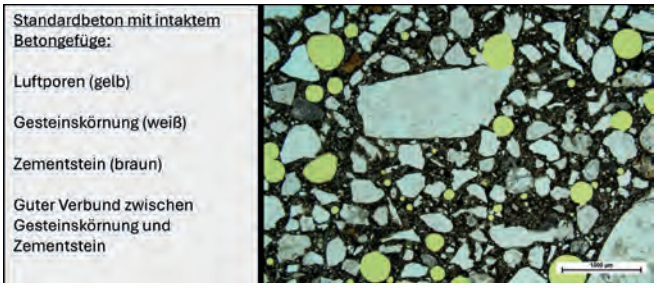

Abbildung 2: Beispiel eines intakten Betongefüges von einem Standardbeton mit Luftporenbildner; das Foto wurde im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 25-facher Vergrößerung aufgenommen

Die Realität aus der Praxis zeigt jedoch, dass das ideale Betongefüge nur erreicht wird, wenn sämtliche Prozesse von der Planung über die Herstellung bis hin zum Einbau und zur Nachbehandlung sorgfältig aufeinander abgestimmt sind. Fehler in der Frühphase, also im Frisch- und jungen Festbeton, hinterlassen im Gefüge dauerhafte Spuren, die auch nach Jahrzehnten noch nachweisbar sind. Denn Beton „vergisst“ nicht. So kann etwa eine unzureichende Nachbehandlung dazu führen, dass der Beton in der frühen Phase zu rasch austrocknet. Die Folge ist eine gestörte Hydratation an der Betonoberfläche, was sich in Form von gröberen Kapillarporen und einer Erhöhung der Helligkeit des Lichts bei der Fluoreszenzmikroskopie zeigt. Auch eine mangelhafte Verdichtung hinterlässt ihre Spuren: Lufteinschlüsse und ungleichmäßig verteilte Verdichtungsporen beeinträchtigen Homogenität und Gefügedichte und damit die Dauerhaftigkeit erheblich.

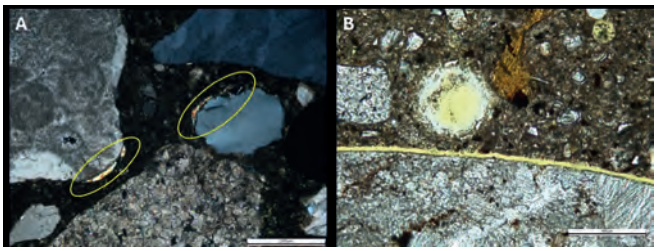

Abbildung 3: A: Betonbluten; Bildung von Portlandit im Grenzbereich der Gesteinskörnung während der Aushärtungsphase; Aufnahme im Durchlicht bei gekreuzten Polarisatoren und 50-facher Vergrößerung. **B:** Verbundstörung; fehlender Verbund zwischen der groben Gesteinskörnung und den Zementstein; Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 100-facher Vergrößerung

Ein weiteres Beispiel ist das sogenannte Betonbluten (siehe Abbildung 3, Bildteil A), bei dem sich Wasser an der Oberfläche sowie innerhalb des Betons im Grenzbereich der groben Gesteinskörung zum Zementstein absetzt und zu Verbundstörungen (siehe Abbildung 3, Bildteil B) sowie lokalen Erhöhung der Kapillarporosität führen kann. Auch wenn dies nicht zwangsläufig zu einem Schaden führen muss, wird dadurch die Dauerhaftigkeit des Bauwerks maßgeblich beeinträchtigt und die Anfälligkeit für Schäden zu einem späteren Zeitpunkt signifikant erhöht.

All diese Einflüsse sind im Mikrogefüge des Betons erkennbar, unabhängig davon, ob der Beton äußerlich schadensfrei erscheint oder bereits sichtbare Mängel aufweist. Mit der forensischen Mikroskopie lassen sich solche Gefügeschäden noch Jahrzehnte später identifizieren und den jeweiligen Fehlerquellen zuordnen.

4. Praxisbeispiele

4.1. Allgemeines

Gefügeschäden in Beton sind nicht nur theoretische Phänomene, sondern treten in der Praxis regelmäßig auf, oft mit weitreichenden Konsequenzen für die Dauerhaftigkeit und Sicherheit von Betonbauwerken. Anhand ausgewählter Praxisbeispiele werden im Folgenden typische Schadensmuster, ihre mikrostrukturellen Ursachen sowie die forensischen Nachweismöglichkeiten exemplarisch dargestellt.

4.2. Unzureichende Festigkeiten von ausgehärtetem Beton (mehr als 28 Tage) in der Baupraxis

4.2.1. Vorbemerkung

Die Ursachen für ungenügende Festigkeitsentwicklung von Beton (trotz Auswahl der entsprechenden Betonfestigkeitsklasse) können vielfältig sein und sind häufig auf eine Kombination mehrerer Faktoren zurückzuführen. Nachfolgend werden die wesentlichen Einflussgrößen, welche in der Baupraxis häufig auftreten, systematisch dargestellt.

4.2.2. Planungsfehler

Fehler in der Planungsphase bei der Festlegung der richtigen Betonsorte bzw Spezialanforderungen (ÖNORM B 4710-1) können maßgeblich zur Beeinträchtigung der planmäßigen Festigkeitsentwicklung beitragen. Typische Beispiele hierfür sind:

- **Ungeeignete Wahl der Betonsorte:** Wird ein Beton gewählt, der die erforderlichen Expositionsklassen nicht erfüllt, kann dies zu einer unzureichenden Beständigkeit und Festigkeit führen. Zu nennen sind etwa:
  - der Einsatz von Betonen mit geringer Wärmeentwicklung (Wärmeentwicklungsklassen WE1 oder WE2) bei massiven monolithischen Bauteilen, wodurch bei Überschreitung einer kritischen Temperatur (70° C) eine Schädigung im frühen Betonalter auftritt, die in weiterer zeitlicher Folge zur sekundären (verzögerten) Ettringitbildung (*delayed ettringite formation* – DEF) führt;
  - die falsche Zuordnung der Betonrezeptur zu einer notwendigen Frostwiderstandsklasse (XF1 bis XF4),

insbesondere bei Bauteilen mit Frost-Tausalz-Exposition;

– der Verzicht auf sulfatbeständigen Zement (C3A-freier Zement) bei erdberührten Bauteilen im Bereich von sulfathaltigem Grundwasser, Fels oder Boden;

– fehlerhafte Annahmen zu den mechanischen Beanspruchungen im frühen Betonalter, insbesondere bei frühzeitiger Belastung durch Folgegewerke oder Eigengewicht.

4.2.3. Mängel im Betondesign und im Umgang mit Frischbeton

Auch auf der Ebene der Betonzusammensetzung und -verarbeitung können fehlerhafte Ausführungen die Festigkeitsentwicklung beeinträchtigen:

- **Unzureichende Betonstabilität:** In Bauprojekten mit hohen Betonsäulen (zB Bohrpfähle, Schlitzwände) oder großen Betonierhöhen kann es infolge des hydrostatischen Drucks zu einer Entmischung (Gradierung der Gesteinskörnung, Sedimentation und Betonbluten [siehe Abbildung 4, Bildteil E]) kommen. Der Einsatz einer stabilen Betonrezeptur, angepasst an die Projektgegebenheiten, ist hier essenziell. Ebenso ist eine ausreichende Mischzeit essenziell, da eine vollständige Benetzung der Gesteinskörnung mit Zementleim etwaigen Instabilitäten entgegenwirken kann (siehe Abbildung 4, Bildteil F).
- **Zusätzliche Wasserzugaben auf der Baustelle bei der Verwendung von Transportbeton:** Die nachträgliche Verdünnung des Betons durch Wasser beeinträchtigt nicht nur die Druckfestigkeit, sondern kann auch die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit erheblich reduzieren. Zudem kommt es in der Regel bei nachträglicher Wasserzugabe zu erheblichen Inhomogenitäten, welche zu einem zusätzlichen Festigkeitsdefizit führen (siehe Abbildung 4, Bildteil D).
- **Ungeeignete oder übermäßige Verdichtung:** Der Beton darf nur bis zur vollständigen Verdichtung gerüttelt werden. Eine darüber hinausgehende Vibration kann zum Entmischen, zum Austreten der Luftporen und zur Kornabstufung führen (siehe Abbildung 4, Bildteil C).

4.2.4. Kontrolle der Betonanlieferung

Die Übereinstimmung der gelieferten Betonsorte mit der geplanten Rezeptur ist zwingend zu überprüfen und wird bei den meisten Großprojekten durch Fremdüberwachung durchgeführt. Hierzu sind ein Abgleich des angelieferten Frischbetons mit dem Lieferschein sowie das Testen von Stichproben erforderlich. Bei Zweifeln an der Identität des angelieferten Betons bzw bei Unklarheiten hinsichtlich der tatsächlichen Zusammensetzung im Festbeton (vor allem bei älteren Betonbauten) kann nur eine forensisch-mikroskopische Analyse Klarheit schaffen. Durch Anwendung polarisations- und fluoreszenzmikroskopischer Verfahren lassen sich unter anderem folgende Parameter rekonstruieren:

- verwendete Gesteinskörnung und Größtkorn;
- Art und Menge des Zements;
- Einsatz von Luftporenbildnern;
- Wasserbindemittelwert;
- Betonalter (Bestimmung über die Karbonatisierungstiefe).

Diese Parameter erlauben Rückschlüsse auf die ursprünglich eingesetzte Betonsorte und deren Expositionsklassen.

4.2.5. Mängel beim Einbau und bei der Nachbehandlung

Fehler bei der Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons können die Entwicklung der Festigkeit erheblich beeinträchtigen:

- **Unzureichende Nachbehandlung:** Das Fehlen einer ausreichenden Nachbehandlung führt zu unkontrollierter Verdunstung, was insbesondere an der Betonoberfläche zu Festigkeitsdefiziten führt. Die intakte Ausbildung der Betonoberfläche kann mittels Fluoreszenzmikroskopie überprüft werden (siehe Abbildung 4, Bildteil B).

  Im Rahmen des von der Österreichischen Forschungs förderungsgesellschaft (FFG) geförderten Forschungsprojekts „InforMi“ (Instandsetzungsplanung auf Basis der forensischen Mikroskopie; Forschungsprojekt von Betonmikroskopie e.U. und der Universität für Bodenkultur Wien [BOKU]) wurde eine Methode zur quantitativen Bewertung von Nachbehandlungsdefiziten entwickelt. Diese basiert auf fluoreszenzmikroskopischer Analyse in Kombination mit softwaregestützter Bildauswertung (ImageJ).
- **Verzögerte Wasserzugabe:** Die verspätete Zugabe von Wasser (z B zur Verarbeitungserleichterung) beeinträchtigt die Homogenität und den Wasserbindemittelwert des Betons (siehe Abbildung 4, Bildteil D).
- **Zu starke oder schlechte Verdichtung:** Eine zu lange Verdichtung führt – wie oben erwähnt – zu Entmischungseffekten, zum Austritt und zur Akkumulation von Luftporen (siehe Abbildung 4, Bildteil C) sowie zu einer veränderten Gradierung der Gesteinskörnung. Ebenso schädlich ist eine unzureichende Verdichtung, da hier die Dichtigkeit des Betongefüges reduziert wird und lokal große Fehlstellen (Lunker, Kiesnester) auftreten können (siehe Abbildung 4, Bildteil A). Unter Lunkern versteht man lokal begrenzte Hohlräume im erhärteten Beton, die vorrangig durch unzureichende Verdichtung, mangelhafte Entlüftung oder ungeeignete Schalungsgeometrien entstehen. Besonders betroffen sind Bauteilbereiche mit hoher Bewehrungsdichte oder schwer zugänglichen Schalungszonen. Lunker

stellen nicht nur optische Mängel dar, sondern führen auch zu einer lokalen Reduktion der Tragfähigkeit und zu erhöhtem Wassereindringen, was wiederum die Bewehrungskorrosion begünstigen kann. In exponierten Bauteilen (zB Außenbauteile mit Frost- oder Tausalzbeanspruchung) stellen sie ein erhebliches Risiko für die Dauerhaftigkeit dar.

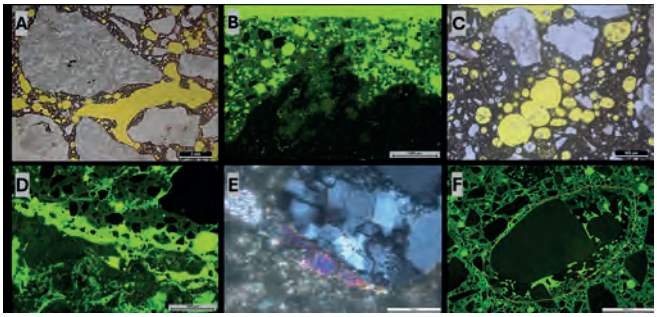

Abbildung 4: Exemplarische Mikroskopieaufnahmen von häufigen Ursachen für generell oder lokal auftretenden Festigkeitsdefiziten bei Beton. **A:** Mangelnde Verdichtung unter Ausbildung lang gestreckter Hohlräume, Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 15-facher Vergrößerung. **B:** Poröse Betonoberfläche resultierend aus der Austrocknung der Zementmatrix während der Hydratation durch unzureichende Nachbehandlung; Aufnahme bei fluoreszierendem Licht und 25-facher Vergrößerung. **C:** Akkumulation von Luftporen durch zu lange Verdichtung; Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 50-facher Vergrößerung. **D:** Inhomogenität der Kapillarporosität durch verzögerte Wasserzugabe; Aufnahme bei fluoreszierendem Licht und 100-facher Vergrößerung. **E:** Ausbildung von Portlandit (Calciumhydroxid) infolge von internem Betonbluten; Aufnahme im Durchlicht bei gekreuzten Polarisatoren und 100-facher Vergrößerung. **F:** Fehlende Zementhaut um Gesteinskörnung innerhalb der gelben Markierung als direkte Auswirkung einer zu kurzen Mischzeit; Aufnahme bei fluoreszierendem Licht und 100-facher Vergrößerung

4.3. Rissbildung und Abplatzungen

Risse in Betonbauteilen stellen eine häufige Erscheinung dar und können vielfältige Ursachen technischer, chemischer oder physikalischer Natur haben. Die Differenzierung zwischen beanspruchungsbedingten (mechanischen) Rissen (zB durch Setzen, Bauwerksverformungen oder Lasten; siehe Abbildung 5, Bildteil B) und herstellungsbedingten Rissen (zB planungsbedingte Risse, thermische Gradiente oder mangelhafte Nachbehandlung) ist für die gutachterliche Beurteilung wesentlich. Zusätzlich können Risse bis hin zu Abplatzungen infolge von Sekundärreaktionen wie der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (siehe Abbildung 5, Bildteil A) und treibenden Reaktionen durch Kontaminationen der Betonausgangsstoffe (siehe Abbildung 5, Bildteile D und E) auftreten.

Für die Beurteilung der Schadensursache mithilfe der forensischen Mikroskopie wird neben den geometrischen Rissparametern (Breite, Länge, Verlauf) auch das zeitliche Auftreten der Risse ermittelt. Die Bestimmung des Rissalters ist nur für Risse auf der Betonoberfläche eindeutig möglich, da eine genaue Quantifizierung über die Breite der Karbonatisierung entlang des Rissverlaufs erfolgt (siehe Abbildung 5, Bildteil C).

Eine sachverständige Bewertung erfordert stets die Gesamtschau aus Planungs-, Ausführungs- und Nutzungsparametern, wobei auch normative Grenzwerte und technische Richtlinien (zB ÖNORM B 4710-1) heranzuziehen sind.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch mögliche Rissursachen und ein Beispiel eines treibenden Angriffs. welcher Abplatzungen zur Folge hat.

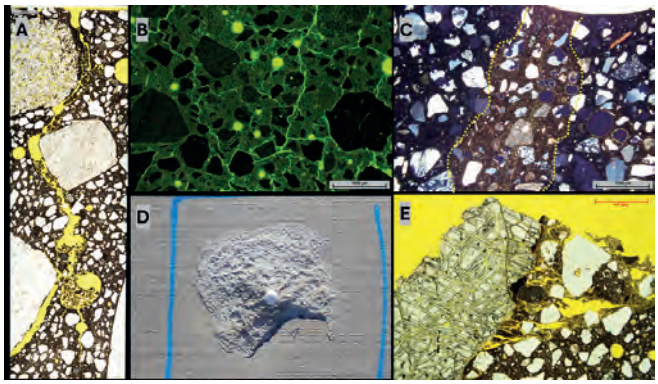

Abbildung 5: Typische Schadensbilder von Rissen und Abplatzungen. **A:** Anschnitt eines Netzrisses infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion; Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 10-facher Vergrößerung. **B:** Netzrissbildung durch mechanische Beanspruchung; Aufnahme bei fluoreszierendem Licht und 25-facher Vergrößerung. **C:** Riss mit seitlicher Karbonatisierung (gelbe Markierung); Aufnahme im Durchlicht bei gekreuzten Polarisatoren. **D:** Aufwölbung der Betonoberfläche mit anschließender Abplatzung durch Kontamination in der Gesteinskörnung; Fotoaufnahme, blaue Linien entsprechen einer Fläche von rund 35 x 35 cm. **E:** Mikroskopische Aufnahme der Abplatzung aus Bild D; Kontamination der Gesteinskörnung durch Periklas (MgO), welcher durch Wasseraufnahme zu Brucit ($Mg(OH)_2$) reagiert; dieser Prozess geht mit einem Volumenzuwachs um den Faktor 2,1 einher; Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 25-facher Vergrößerung

4.4. Neue Herausforderungen – Recyclingbeton

In der jüngeren Entwicklung der Bauwirtschaft ist der zunehmende Einsatz von neuen innovativen Baustoffen zu beobachten, die auf eine Reduktion des ökologischen Fußabdrucks abzielen. Neben der Anwendung neuer Zementsorten (insbesondere der CEM II/C-M-Zemente gemäß EN 197-5)[13] finden auch alternative Zementbestandteile (wie rezyklierte Feinanteile aus Betonbruch oder Ziegelmehl gemäß EN 197-6)[14] vermehrt Verwendung.

Parallel dazu kommt es verstärkt zum Einsatz von Recyclingbetonen, bei denen die natürliche Gesteinskörnung teilweise bis vollständig mit Betonrecyclingkörnungen ersetzt wird. Die grundlegenden Anforderungen an Recyclinggesteinskörnungen sind in der EN 12620[15] festgelegt. Darüber hinaus regelt die nationale ÖNORM B 4710-1 die spezifischen Einsatzbedingungen, die zulässigen Anteile sowie die Einschränkungen in Bezug auf

Expositionsklassen und betontechnologische Eigenschaften.

Da es sich bei derartigen Materialien um vergleichsweise junge Entwicklungen handelt, die sich zum Teil noch im Forschungsstadium befinden, ist die Langzeitperformance dieser Betone (insbesondere hinsichtlich potenzieller Schadensmechanismen) derzeit nicht in allen Aspekten abschließend beurteilbar. Obwohl die eingesetzten Materialien vor ihrer Verwendung einer normkonformen Prüfung unterzogen werden, kann das Auftreten neuartiger oder bislang nicht dokumentierter Schädigungsphänomene sowie abweichender Eigenschaften im Vergleich zu konventionellem Beton nicht ausgeschlossen werden.

Insbesondere ist im Rahmen zukünftiger Schadensanalysen auch die Notwendigkeit einer adaptierten Baupraxis zu berücksichtigen, etwa durch veränderte Anforderungen an die Betonrezepturen (insbesondere den Zusatzmitteln; angepasste Fließ- und Luftporenmittel), Nachbehandlung oder modifizierte Einbauprozesse, welche sich aus den veränderten Materialkennwerten ergeben können. Diese Aspekte sind essenziell für die sachgerechte Beurteilung etwaiger Abweichungen oder Schäden und müssen integraler Bestandteil der gutachterlichen Bewertung sein.

Die in Abbildung 6 dargestellten Beispiele zeigen im Bildteil A einen guten Verbund der Recyclingfragmente mit dem Zementstein und im Bildteil B eine Verbundstörung, welche mit der Ausbildung einer offenen Spalte zwischen Recyclinggesteinskörnung und Zementstein einhergeht. Ursächlich konnte in dem konkreten Beispiel die Verbundstörung auf eine Überdosierung des Fließmittels zurückgeführt werden, was zusätzlich durch die Überprüfung des Chargenprotokolls der betroffenen Mischung untermauert werden konnte.

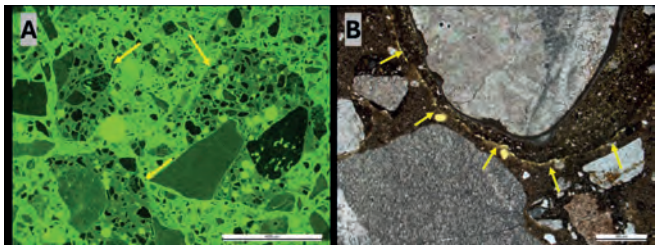

Abbildung 6: Mikrogefüge von Recyclingbeton. **A:** Recyclinggesteinskörnung (gelbe Pfeile) mit gutem Verbund in Beton; Aufnahme mit fluoreszierendem Licht und 15-facher Vergrößerung. **B:** Gestörte Verbundzone von Recyclingfragment und Zementstein (gelbe Pfeile); Aufnahme im Durchlicht bei parallelen Polarisatoren und 50-facher Vergrößerung

5. Zusammenfassung

Die zunehmende Komplexität der Betontechnologie sowie der Einsatz neuer, klimaschonender Materialien stellen Sachverständige vor neue Herausforderungen bei der Ursachenanalyse von Betonschäden. Die forensische Mikroskopie erweist sich hier als unverzichtbare Methode zur objektiven, reproduzierbaren und gerichtsfesten Bewertung von Schadensfällen. Mittels Dünnschliffpräparaten und spezieller Beleuchtungstechniken lassen sich selbst feinste mikrostrukturelle Veränderungen (etwa Porenverteilungen, Rissverläufe, Reaktionsprodukte oder Verdichtungsfehler) eindeutig nachweisen.

Die dargestellten Praxisbeispiele zeigen auf, dass viele Schäden auf nicht sichtbare oder nur mikroskopisch nachweisbare Einflüsse zurückzuführen sind, sei es durch unzureichende Nachbehandlung, fehlerhafte Rezepturen, mangelhafte Verdichtung oder thermisch-chemische Reaktionen. Besonders beim modernen Beton (wie Recyclingbeton) ist eine mikroskopische Beurteilung aufgrund unbekannter Langzeitverhalten von zentraler Bedeutung.

Für Gerichtssachverständige bedeutet dies: Die evidenzbasierte Gutachtenerstellung kann durch fundierte Anwendung mikroanalytischer Methoden untermauert werden. Durch die forensische Mikroskopie erfolgt eine technisch belastbare und nachvollziehbare Beurteilung von Schadensmechanismen im Beton, die dem Anspruch gerichtlicher Verwertbarkeit und technischer Objektivität gerecht wird.

Anmerkungen:

1 *Brown*, Petrography of Cement and Concrete, Journal of the PCA Research and Development Laboratories 3/1959, 23.

2 ASTM C 856:2004: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.

3 DS 423.40:2002: Testing of concrete – Hardened concrete – Production of fluorescence impregnated thin section; DS 423.42:2002: Testing of concrete – Hardened concrete – Concrete composition.

4 *Poole/Sims*, Concrete Petrography[2] (2020).

5 ÖNORM B 4710-1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton (Ausgabe: 1. 1. 2018).

6 ÖNORM EN 206: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (Ausgabe: 1. 7. 2021).

7 RVS 08.17.02: Deckenherstellung (Ausgabe: Oktober 2024).

8 ÖBV-Richtlinie „Bohrpfähle“ (Ausgabe: August 2019).

9 ÖBV-Richtlinie „Schlitzwände“ (Ausgabe: August 2019).

10 ÖBV-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ (Ausgabe: Februar 2018).

11 ÖBV-Merkblatt „Beton für Kläranlagen“ (Ausgabe: März 2025).

12 ÖBV-Richtlinie „Spritzbeton“ (Ausgabe: Oktober 2024).

13 ÖNORM EN 197-5: Zement – Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI (Ausgabe: 15. 6. 2021).

14 ÖNORM EN 197-6: Zement – Teil 6: Zement mit rezyklierten Baustoffen (Ausgabe: 1. 12. 2023).

15 ÖNORM EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton (Ausgabe: 15. 2. 2014).

Korrespondenz:
Mag. Dr. Helga Zeitlhofer
Tivoligasse 52/13, 1120 Wien
Tel.: 0664 / 155 43 27
E-Mail: zeitlhofer@betonmikroskopie.at