

Entwicklung eines Betonprobekörpers zur Qualitätsbewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren

Fabian DETHOF¹, Andrea Paola CASTRO CABEZA¹, Sylvia KEßLER¹
¹ Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

Kontakt E-Mail: dethoff@hsu-hh.de

Kurzfassung. Im Rahmen des WIPANO-Projektes „normPOD“ wird eine Vornorm zur Durchführung probabilistischer Zuverlässigkeitsbewertung für zerstörungsfreie Prüfverfahren entwickelt. Diese Vornorm strebt eine Allgemeingültigkeit für alle Anwendungsbereiche an, wie z.B. die Metallinspektion oder dem Bauwesen. Für den Anwendungsfall im Bauwesen wird darin beschrieben, nach welchen Kriterien ein Betonprobekörper zur Durchführung einer probabilistische Qualitätsbewertung von ZfP-Verfahren entworfen werden kann (DoE). Maßgebliche Einflussgrößen für das Design des Probekörpers sind zum einen das angewendete Prüfverfahren sowie die Prüfsituation (z.B. Inspektion einer Tunnelinnenschale), die mit dem Testobjekt nachempfunden werden soll. Aus der Prüfsituation ergeben sich zumeist auch Randbedingungen zur verwendeten Betonrezeptur und dem Bewehrungsgrad. Die Herstellung künstlicher Defekte, z.B. Kiesnester, wird ebenfalls in der Vornorm beschrieben. Eine große Herausforderung bei der Herstellung eines Probekörpers zur Qualitätsbewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren ist es, die Größe und Tiefe der implementierten Defekte so abzuschätzen, dass ihre Detektion weder trivial noch unmöglich ist. In dieser Arbeit wurden daher numerische Simulationen genutzt, um diese Abschätzungen vor Anfertigung des Probekörpers zu treffen. Der angefertigte Betonprobekörper wurde für die Qualitätsbewertung der Ultraschall- und Impakt-Echo-Prüfung konzipiert, wobei aufgrund der gewählten Dimensionen der Fokus auf der Ultraschallprüfung lag. Aus den numerischen Simulationen konnte das Messergebnis qualitativ vorhergesagt werden und hat sich damit als gutes Hilfsmittel für die Konzeption zukünftiger Probekörper erwiesen.

Einführung

In der zerstörungsfreien Prüfung spielen Referenzprobekörper eine wichtige Rolle, da sie eine der wenigen Quellen sind, um Messdaten zu erhalten, bei denen das zugrunde liegende Modell bzw. die Defektsituation bekannt ist. Solche Daten sind besonders wertvoll für Anwendungen im Bereich des maschinellen Lernens [1] sowie auch für Zuverlässigkeitsanalysen zur Qualitätsbewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren [2].

Durch einen Referenzprobekörper wird eine kontrollierte Prüfsituation geschaffen, bei der Art, Größe und Tiefenlage der Defekte bekannt sind. So kann auch untersucht werden, in welcher Art und wie stark sich bestimmte Defektsituationen bei unterschiedlichen Prüfverfahren auf das Messresultat auswirken. Dieser Ansatz wird auch bei der Zuverlässigkeitsbewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren angewandt, jedoch ist es insbesondere bei Probability of Detection (PoD)-Analysen nötig, dass mindestens 80% der



Daten in einem Bereich liegen, bei dem die Detektionswahrscheinlichkeit zwischen 10% und 90% liegt [3]. Dies bedeutet zugleich, dass für die Konzipierung der Referenzprobekörper bereits grobe Abschätzungen zu den erwarteten ZfP-Messergebnissen vorliegen müssen. In diesem Paper wird ein Ansatz präsentiert, wie diese Informationen für Referenzprobekörper aus Stahlbeton durch numerische Simulationen gewonnen werden können. Dazu wird zunächst die Konzeption des Probekörpers samt den dazugehörigen Vorüberlegungen und Simulationen beschrieben. Anschließend wird auf die Produktion des Probekörpers, das BetondeSIGN und die Herstellung der künstlichen Defekte eingegangen. Zum Schluss werden die Messergebnisse der am Probekörper durchgeführten ZfP-Methoden präsentiert und diskutiert.

1. Konzeption (Design of Experiment)

1.1 Vorüberlegungen und Randbedingungen

Der hier beschriebene Probekörper wurde im Rahmen des WIPANO-Projektes „normPOD“ hergestellt und soll zur Überprüfung der Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren dienen. Der Fokus lag hier im speziellen auf der Ultraschall- und Impakt-Echo Prüfung, da für diese Prüfungen als einzige eine Richtlinie im Bauwesen zu deren Durchführung existiert (RI-ZFP-TU [4]).

Die Abmessungen des Probekörpers sollten zunächst klein gehalten werden, um im Falle von Konzeptions- oder Ausführungsfehlern nicht zu viele Ressourcen zu verbrauchen. Weiterhin musste der Probekörper eine gewisse Mindestdicke aufweisen, die ein Vielfaches größer ist als die bei der Ultraschallprüfung verwendete Wellenlänge (ca. 6 cm), um bei der Ultraschallmessung reflektierte Signale erhalten zu können. Um RandeFFekte zu minimieren, wurde eine plattenähnliche Form mit Dimensionen von $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$ gewählt. Für die Bewehrung wurde Bewehrungsstahl mit einem Durchmesser von 12 mm und einem Abstand von 20 cm herangezogen. Die Betondeckung sollte an allen Seiten 50 mm betragen. Mit diesen Randbedingungen kommt eine Inspektion an diesem Probekörper der an einer realen Betonplatte, wie man sie beispielsweise an Wänden hat, recht nahe.

Als Defekte sollten im Probekörper künstlich hergestellte Kiesnester eingebracht werden. Um die Größe der Kiesnester, sowie die Tiefenlage zu bestimmen, wurden zunächst einige Vorsimulationen durchgeführt. Da das Seitenverhältnis des Probekörpers recht klein ist und somit für die Impakt Echo Prüfung starke GeometrieFFekte zu erwarten sind [5], lag der Fokus in den Simulationen auf der Ultraschallprüfung. Aus den Vorsimulationen sollte zunächst abgeschätzt werden, ob es möglich ist, mit dem zur Verfügung stehenden Messequipment (Proceq Pundit PD 8000, 40 kHz Prüffrequenz), ein klares Rückwandecho (RWE) im unbeschädigten Zustand zu erhalten. Aus der Literatur [6] geht hervor, dass Kiesnester in Ultraschalldaten sowohl eine direkte Reflexion als auch ein abgeschwächtes, verschobenes oder abgeschirmtes RWE hervorrufen können. Dementsprechend ist das RWE die maßgebende Referenz für die Detektion von Kiesnestern mithilfe der Ultraschallprüfung. Weiterhin soll mit den Simulationen auch abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss der Kiesnester auf das Messergebnis sein wird. Zusätzlich kann unter Verwendung eines heterogenen, numerischen Betonmodells abgeschätzt werden, was für ein Signal-zu-Rauschen Verhältnis bei der Inspektion zu erwarten ist, bzw. wie hoch das Rauschniveau generell ausfallen wird [7].

1.2 Numerische (Vor-)Simulationen

Um Simulationen durchzuführen, mit denen die Detektierbarkeit bestimmter Defekte untersucht werden soll, müssen die Simulationsergebnisse in einem realistischen Maße

verrauscht sein. Bei realen Ultraschallprüfungen an bewehrtem Beton resultiert dieses Rauschen zu einem großen Teil aus der Streuung elastischer Wellen an der Bewehrung, sowie an den internen Grenzflächen zwischen Zementmatrix, Gesteinskörnung und Poren [8]. Aus diesem Grunde wird für die Simulationen nicht nur die Bewehrung, sondern auch der Beton mit seinen einzelnen Bestandteilen explizit diskretisiert. Die Diskretisierung des Betons folgt dabei den Algorithmen beschrieben in [8] [9] und wird in [10] genauer erläutert.

Für das numerische Betonmodell wurde bei den Vorsimulationen eine mittlere P-Wellengeschwindigkeit von 4200 m/s gewählt, während die Scherwellengeschwindigkeit 2400 m/s beträgt. Für die Gesteinskörnung variieren diese Werte um ± 600 m/s für P-Wellen und ± 400 m/s für S-Wellen. Die Dichte der Zementmatrix wurde auf 2400 kg/m^3 festgesetzt, während die Dichte der Gesteinskörnung, die für den Probekörper verwendet werden sollte, experimentell mithilfe des Pyknometer-Verfahrens auf 2790 kg/m^3 (für Gesteinskörnung $< 2 \text{ mm}$), 2606 kg/m^3 ($2 \text{ mm} < \text{Gesteinskörnung} < 8 \text{ mm}$) und 2456 kg/m^3 (Gesteinskörnung $> 8 \text{ mm}$) bestimmt wurde. Die Simulationen wurden mit EFIT in 3D durchgeführt [8]. Ein Beispiel für ein simuliertes Signal ohne implementierten Defekt ist in Abb.1 zu finden.

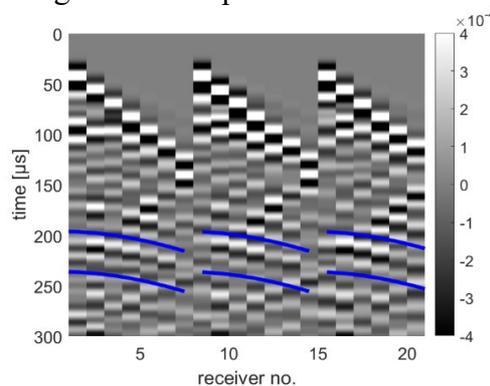


Abb. 1. Simulation eines Reflexionssignals in einem heterogenen Medium ohne implementierten Defekt. Blau markiert den Einsatz des RWE.

Das RWE ist in der Simulation (Abb.1) klar zu erkennen, obwohl das Rauschniveau insgesamt aufgrund der Heterogenität des Betons sowie den zusätzlichen Reflexionen an den Seiten insgesamt recht hoch ist. Jedoch existiert kurz vor Eintreffen des RWEs ein Zeitfenster (bei 100-200 μs Laufzeit), in dem das Rauschniveau etwas geringer ist und Reflexionen von Kiesnestern nicht zu stark durch die kleinen Dimensionen des Probekörpers gestört werden. Aus diesem Grunde wurde beschlossen, die Kiesnester in einer Tiefe von 10 cm (bezogen auf die Kiesnestmitte) zu platzieren.

Um den Einfluss der Kiesnester auf das Messergebnis zu untersuchen, wurden ebenfalls Testsimulationen mit numerisch implementierten Kiesnestern durchgeführt. Da Kiesnester Regionen sind, in denen Gesteinskörnung und Zementleim nicht gut miteinander vermischt bzw. entmischt sind, sodass es dort vermehrt zur Bildung großer Poren kommt [6], war auch solch ein Porencluster eine erste Annahme, um die Kiesnester numerisch abzubilden [6]. Dieses Porencluster führte jedoch zu numerischen Instabilitäten, welche durch zu hohe Amplituden in den kleinen Porenzwischenräumen hervorgerufen wurden [7]. Das Kiesnestmodell, welches stattdessen in den Simulationen verwendet wurde, ist in [7] beschrieben. Hier wurde jedoch eine Zementleimdichte von 400 kg/m^3 angenommen. Mit diesem Modell ist der Reflexionskoeffizient zwischen Gesteinskörnung und dem umgebenden Material im Bereich der Kiesnester hoch, es wird eine unebene Reflexionsoberfläche geschaffen und starke lokale Amplituden können dadurch, dass es in den Porenzwischenräumen keine Totalreflexion gibt, vermieden werden. Auch kann das Modell damit für die Simulation beider Prüfverfahren verwendet werden. Eine Validierung dieses Kiesnestmodells konnte für die Ultraschallprüfung nicht durchgeführt werden. Für die Impakt Echo Prüfung wurde eine Validierung anhand von Messdaten eines anderen

Probekörpers versucht [6] [7], jedoch war der Einfluss der Kiesnester in den Referenzdaten zu schwach, um das Modell validieren zu können.

Für die Herstellung der realen Kiesnester standen Kugelformen mit Durchmessern von 6, 8, 10 und 12 cm zur Verfügung. In Abb.2 ist das Reflexionssignal eines 6 cm großen Kiesnestes in einer Tiefe von 10 cm simuliert worden. Hier erkennt man zwar keine direkte Reflexion des Kiesnestes, jedoch ist zu erkennen, dass das Rückwandecho sichtbar geschwächt ist. Noch deutlicher wird dieser Unterschied bei der Betrachtung des Differenzsignals zwischen der Simulation mit und ohne implementiertem Kiesnest (s. Abb.2, rechts). Es sind nur die Signalanteile dargestellt, welche direkt durch das Kiesnest beeinflusst worden sind. Hier ist die Schwächung des RWEs das amplitudenstärkste Signal. Auch die direkte Kiesnestreflexion lässt sich so gut erkennen, obwohl die dazugehörige Amplitude sehr schwach ist.

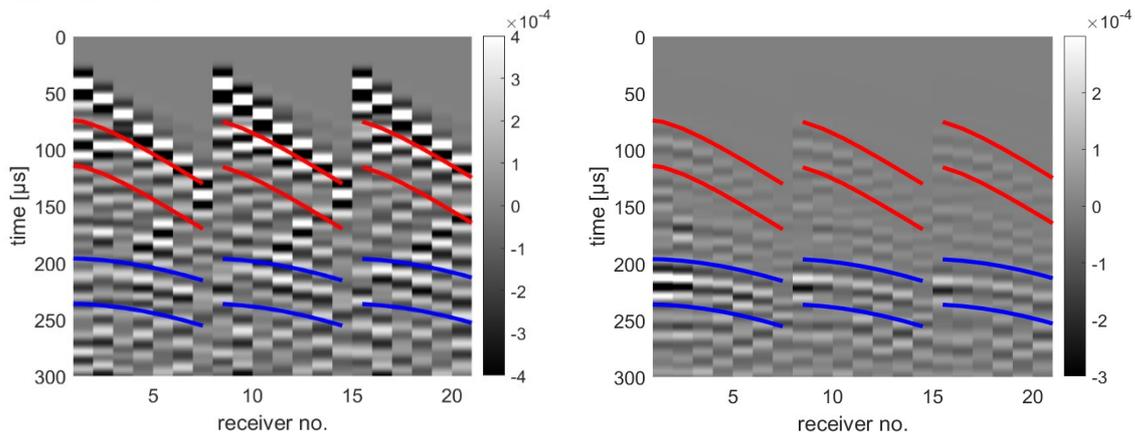


Abb. 2. Links: Simulation einer Ultraschallprüfung mit implementiertem Kiesnest (6 cm Durchmesser); Blau: reales RWE. Rot: theoretischer Bereich der Kiesnestreflexion.
Rechts: Differenzsignal zwischen Simulation mit und ohne Kiesnest. Rot: direkte Kiesnestreflexion. Blau: Abschwächung des RWE.

Da aus den Simulationen hervorging, dass ein Kiesnest mit einem 6 cm Durchmesser einen sichtbaren Einfluss auf das RWE hat, jedoch die direkte Reflexion kaum erkennbar ist, wurde diese Größe für alle im Probekörper verbauten Kiesnester gewählt. Mit einer Mittenfrequenz des Prüfsystems von 40 kHz und einer betontypischen S-Wellengeschwindigkeit ergibt sich eine Wellenlänge von 6 cm, sodass es realistisch erscheint, dass diese Defektgröße in einem Bereich liegt, der für eine POD-Analyse relevant ist. Da die Dimensionen des Probekörpers klein gehalten sind, wurde beschlossen, nur drei Kiesnester derselben Größe (6 cm) im Probekörper zu platzieren. Um dennoch drei unterschiedliche Prüfsituationen zu kreieren, wurde je ein Kiesnest exakt unter einem Bewehrungsstab, direkt neben einem Bewehrungsstab und exakt in die Mitte des Bewehrungsgitters platziert. Ein 3D-Modell des Probekörpers kann Abb.3 entnommen werden.

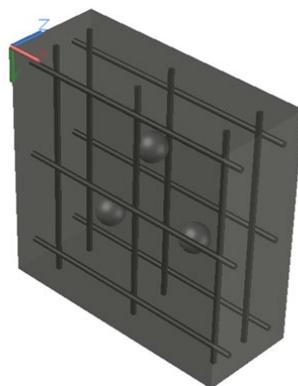


Abb. 3. 3D-Modell des Probekörpers.

2. Produktion

2.1 Herstellung der künstlichen Kiesnester

Bei der Produktion des Probekörpers wurde zunächst mit der Herstellung der Kiesnester begonnen, da künstlich hergestellte Kiesnester typischerweise separat vom restlichen Beton hergestellt werden [11]. Die Kiesnester können mit einem Porenbeton hergestellt werden, der dann anschließend in Kunststoffformen gegossen wird, um die gewünschten Dimensionen zu erhalten. Dabei ist auf ein genaues Verhältnis zwischen Gesteinskörnung und Zementleim zu achten. Es muss ausreichend Zementleim vorhanden sein, um die Gesteinskörner untereinander zu verbinden, ohne jedoch die Porenräume zwischen den Gesteinskörnern zu verfüllen. Nach dem Aushärten wurden die Kiesnester mit Mörtel überzogen, um zu verhindern, dass die außenliegenden Porenräume beim Betonieren verfüllt werden. Aufgrund der zusammenhängenden Porenstruktur und dem hohen Hohlraumanteil (15 - 35%) von Porenbeton, eignet er sich besonders gut für die Herstellung künstlicher Kiesnester [6] [12]. Für die Gesteinskörnung wird häufig ein Monogranulat mit einer maximalen Nenngröße von 16 mm und offener Kornabstufung verwendet. Jedoch nutzt man für die Kiesnester nur die Gesteinskörnung, die das 9,5 mm Sieb nicht passiert [11]. Porenbeton hat in der Regel einen niedrigen Wasserzementwert (0,3 – 0,4) um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. In diesem Falle wurde ein Wasserzementwert von 0,35 genutzt. Die für die Kiesnester verwendete Betonzusammensetzung kann Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1. Zusammensetzung der Betonmischung zur Kiesnesterherstellung.

Parameter	Bereich nach [13] [14]	Hier verwendet	Einheit
Zement	321-487	350	kg/m³
Wasser	84-161	140	L/m³
Wasserzementwert	0,25-0,35	0,40	-
Gesteinskörnung	1373-1692	1600	kg/m³
Zusatzstoff (Fließmittel)	1,5	1,5	M.-%/zem.

2.2 Betondesign

Nachdem die Kiesnester ausgehärtet waren, wurde der Beton für den Probekörper selbst angemischt. Bei der Mixtur wurde sorgfältig auf die Menge der verwendeten Zusatzmittel geachtet, um die korrekten plastischen Eigenschaften zu erzielen. Für die Gesteinskörnung wurde eine B16-Sieblinie verwendet. Das Ausbreitmaß für den verwendeten Beton betrug 530 mm, was einem sehr weichen Beton entspricht. Dies wurde mit Absicht so gewählt, um ein vollständiges Verfüllen zu garantieren und zusätzliche Poren- oder Defektbildung zu vermeiden. Nach 28 Tagen wurde die Dichte des Betons auf 2342 kg/m³ und die Druckfestigkeit auf 52 MPa bestimmt. Es ist hierbei anzumerken, dass die finale Dicke des Betons 17 anstatt 20 cm betrug. Die exakte Betonrezeptur kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2. Zusammensetzung der Betonmischung des Probekörpers.

Material	(kg/m³ Beton)	(kg/55L Beton)
Zement CEM I 52.5	374	20,6
0/2	721	39,6
4/8	0	0,0
2/8	545	30,0
8/16	503	27,7
Wasser	184	10,1
Fließmittel	1,21	0,067

3. Messergebnisse

3.1 Ultraschall

Nachdem der Beton ausgehärtet war, wurden sowohl Ultraschall- als auch Impakt Echo Messungen an dem Probekörper durchgeführt. Für die Ultraschallmessung wurde das Proceq Pundit PD8000 Arraymessgerät verwendet. Das verwendete Messgerät besitzt eine integrierte künstliche Intelligenz. Diese kann durch Erkennung eines auf dem Probekörper platzierten Referenzmaßbandes die Positionen einzelner Messpunkte bestimmen. Damit können Linienscans automatisch in ein einziges prozessiertes B-Bild umgerechnet werden. Um ein korrektes Processing zu ermöglichen, wurden zunächst Referenzmessungen zur Bestimmung der S-Wellengeschwindigkeit durchgeführt. Diese ergaben eine mittlere S-Wellengeschwindigkeit von 2740 m/s. Mit diesem Wert konnten anschließend die B-Scans aufgenommen werden. Dabei wurde das Messgerät jeweils so über den Probekörper bewegt, dass parallel, bzw. senkrecht zu den seitlichen Rändern, mittig über den Kiesnestpositionen gemessen wird. Demnach wurden zu jedem Kiesnest zwei B-Bilder, je eins in x- und y-Richtung (s. Abb. 4) aufgenommen.

Generell fallen in allen aufgenommenen B-Bildern die Reflexionen der Bewehrungsstäbe sehr stark aus. Auch das Rückwandecho ist in allen Messungen klar zu erkennen. Jedoch ist das Rückwandecho in der Nähe der Ränder des Probekörpers unterbrochen und zu größeren Tiefen hin verschoben. Da dieser Effekt direkt unterhalb der äußeren Bewehrungsstäbe auftritt und sich alle Bewehrungsstäbe durch den gesamten Probekörper hindurchziehen, bleibt unklar, ob dieser Effekt durch die Bewehrung oder durch Randeffekte verursacht wurde. Da sich so etwas an den mittleren Bewehrungsstäben nicht beobachten lässt, liegt es jedoch nahe, dass es sich hier um Randeffekte, wie beispielsweise die Reflexion einer Rayleighwelle handelt.

Weiterhin ist in fast allen Messungen die direkte Kiesnestreflexion sehr schwach und teilweise kaum zu erkennen. Beispielhaft sind die aufgenommenen B-Scans für Kiesnest 2 in Abb. 5 dargestellt. Hier ist die direkte Kiesnestreflexion nur bei der Messung orthogonal zur Bewehrung sichtbar. Eine Abschwächung des Rückwandechos ist hier in beiden Fällen und auch generell in allen Fällen erkennbar. Jedoch ist die Schwächung des Rückwandechos im Falle der Messung parallel zur Bewehrung nicht allzu stark. In Kombination mit der kaum erkennbaren direkten Reflexion ist hier fraglich, ob das Kiesnest in der Praxis auch zuverlässig entdeckt werden würde. Insgesamt zeigen die Resultate in etwa das Ergebnis, welches bereits von der Simulation vorhergesagt wurde.

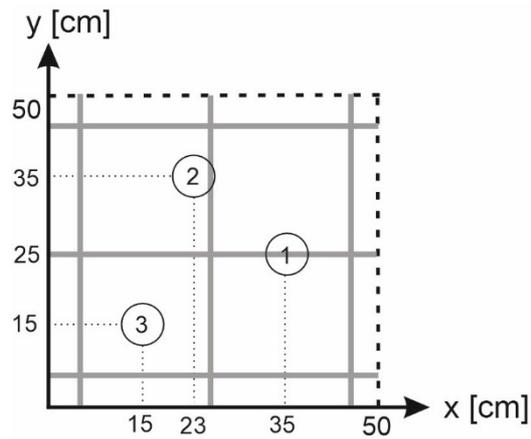


Abb. 4. Koordinatensystem der Messungen. Zusätzlich sind die Kiesnestpositionen sowie die Bewehrung (grau) eingezeichnet.

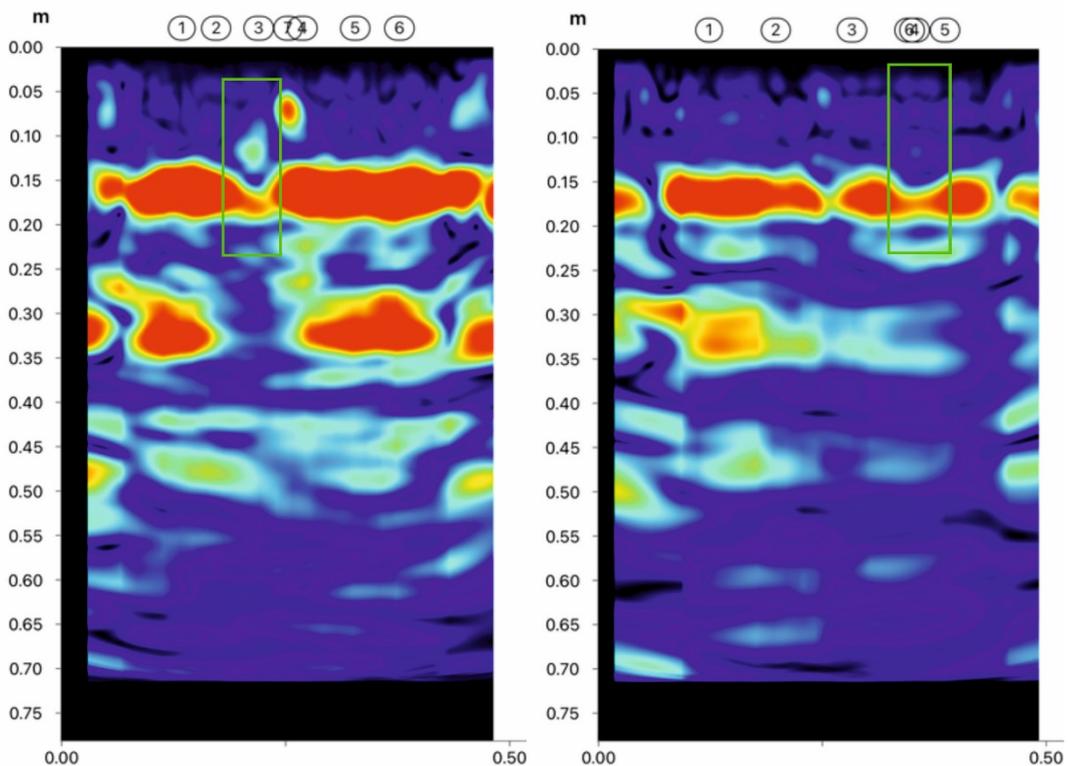


Abb. 5. B-Scans in x- (links) und y-Richtung (rechts) oberhalb von Defekt 2. Kiesnestindikationen sind grün umrandet.

3.2 *Impakt Echo*

Trotz des für die Impakt Echo Messung unvorteilhaften Seitenverhältnisses, wurden dennoch Messungen durchgeführt, um den Einfluss der Kiesnester sowie der Geometrieeffekte auf die Resonanzfrequenz zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Messergebnisse sind im Folgenden beschrieben.

Da bei der Ultraschallmessung bereits mit 2740 m/s bereits eine sehr hohe S-Wellengeschwindigkeit gemessen wurde, kann über Abschätzung eines Poissonverhältnisses auch die P-Wellengeschwindigkeit und damit die erwartete Resonanzfrequenz

für die Impakt Echo Messung abgeschätzt werden. Unter Annahme eines für Beton typischen Poissonverhältnisses von 0,2 kann die P-Wellengeschwindigkeit damit auf 4475 m/s abgeschätzt werden, was insgesamt ein recht hoher Wert ist und damit auf eine gute Verdichtung des Betons hindeutet. Über die Formel für die Resonanzfrequenz bei der Impakt Echo Messung kann mit der Dicke von 17 cm eine erwartete Resonanzfrequenz von 12,6 kHz abgeschätzt werden.

In den Messergebnissen ist die Dickenresonanz jedoch nicht klar zu erkennen, da die Ergebnisse stark von Geometrieeffekten beeinflusst sind. Insbesondere im tieffrequenten Bereich sind die Geometrieeffekte sehr dominant. An den Kiesnesterpositionen sind jeweils nur leichte Indikationen für die Kiesnester zu erkennen. Diese würden in einer realen Inspektion höchstwahrscheinlich nicht detektiert werden. Jedoch ist anzumerken, dass der C-Scan bei einer Frequenz von ca. 11,1 kHz einen Einfluss der Kiesnester erkennen lässt. Dieser ist zusammen mit einem B-Scan für das Kiesnest 3 in Abb. 6 dargestellt.

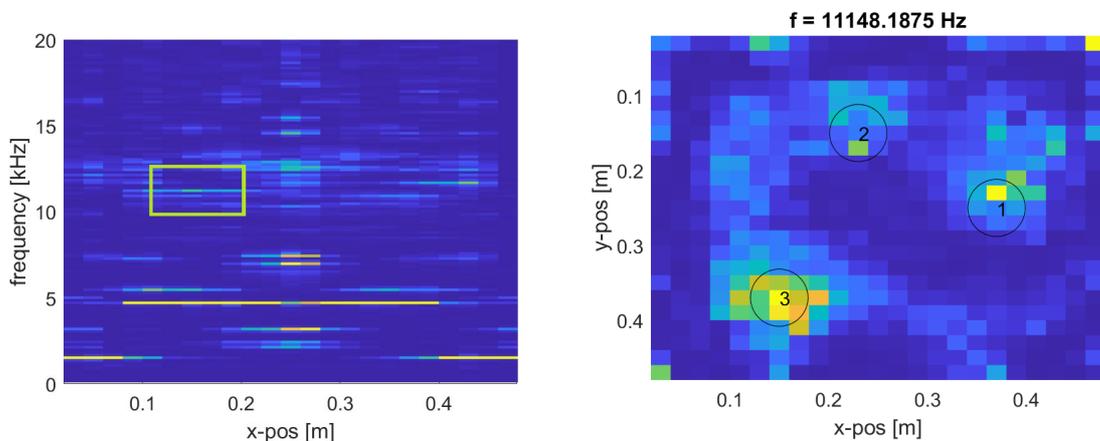


Abb. 6. B-Scan der Impakt-Echo-Messung in x-Richtung (links) oberhalb von Defekt 3. Kiesnesterindikationen sind grün umrandet. Rechts ist der C-Scan für eine Frequenz von 11,1 kHz dargestellt.

4. Zusammenfassung

Es wurde ein Stahlbetonprobekörper zur Zuverlässigkeitsbewertung der Ultraschall- und Impakt-Echo-Messung zur Detektion von Kiesnestern entwickelt. Künstliche Kiesnester wurden erfolgreich mit Porenbeton hergestellt. Da aus den Vorsimulationen das tatsächliche Messergebnis abgeschätzt werden konnte, erscheint es hilfreich, solche Simulationen auch bei der Konzeption zukünftiger Probekörper durchzuführen. Eine probabilistische Bewertung der Inspektionsergebnisse, wie sie in der Vornorm thematisiert wird, ist mit dem Probekörper nicht möglich, da hier nur drei Defekte verbaut wurden. Für eine probabilistische Qualitätsbewertung (z.B. durch eine PoD-Analyse) sind mehr Defekte in unterschiedlichen Größen und Tiefen notwendig. Zur hier durchgeführten Vorstudie in Bezug auf die Kiesnestererkennung durch das Ultraschall- und Impakt Echo Verfahren ist festzuhalten, dass sowohl die Messrichtung, der Verlauf der Bewehrung, als auch die Position der Kiesnester relativ zur Bewehrung einen Einfluss auf das Ultraschallmessergebnis und damit auch auf die Detektierbarkeit haben. Mithilfe der Impakt-Echo-Messung konnte keines der Kiesnester detektiert werden, jedoch war ein Einfluss der Kiesnester auf die Messdaten erkennbar.

Referenzen

- [1] C. Thurnherr, A. Muller and D. Algernon, "Simulationsbasiertes Deep Learning-Modell für die Detektion von Fehlstellen in Betonstrukturen," in *DGZfP-Jahrestagung 2022*, Kassel, 2022.
- [2] J. Kurz, A. Jüngert, S. Dugan and G. B. C. Dobmann, "Reliability considerations of NDT by probability of Detection (POD) determination using ultrasound phased array," *Engineering failure analysis*, vol. 35, pp. 609-617, 2013.
- [3] A. Berens, "Probability of Detection (POD) Analysis for the Advanced Retirement for Cause (RFC)/Engine Structural Integrity Program (ENSIP) Nondestructive Evaluation (NDE) System-Volume 1: Pod Analysis," Dayton Univ. OH Research Inst., 2000.
- [4] B. f. Straßenwesen, "Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU)," 2007.
- [5] F. Schubert and B. Köhler, "Ten lectures on impact-echo," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 27, pp. 5-21, 2008.
- [6] D. Algernon, S. Feistkorn, Y. Schiegg and B. Mühlán, "Zerstörungsfreie Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen," Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2021.
- [7] F. Dethof, D. Algernon, C. Thurnherr and S. Keßler, "How to conduct Impact Echo simulations for non-destructive testing at concrete structures for the nuclear industry," in *Proceedings of the International Conference on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications*, Espoo, Finland, 2023.
- [8] F. Schubert and B. Köhler, "Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity," *Journal of computational acoustics*, vol. 9, no. 04, pp. 1543-1560, DOI: 10.1142/S0218396X01000978, 2001.
- [9] A. Asadollahi and L. Khazanovich, "Numerical investigation of the effect of heterogeneity on the attenuation of shear waves in concrete," *Ultrasonics*, vol. 91, pp. 34-44, 2019.
- [10] F. Dethof and S. Keßler, "Simulation von Impakt Echo Inspektionen in Beton zur Analyse der Detektionswahrscheinlichkeit," in *DGZfP-Berichtsband BB 177*, Kassel, 2022.
- [11] S. Maack, S. Villalobos and D. Scott, "Validation of artificial defects for Non-destructive testing measurements on a reference structure," MATEC web of conferences, 2018.
- [12] K. Smith and J. Krstulovich, "Pervious concrete," US Federal Highway Administration FHWA, 2012.
- [13] E. Khankhaje, M. Rafieizonooz and J. Mirza, "Characteristics of Pervious Concrete Incorporating Cockleshell as Coarse Aggregate for Pavements," *Journal of Transportation Engineering, Part: B Pavements*, vol. 148, no. 2, p. 0402206, 2022.
- [14] A. Chandrappa and K. Biligiri, "Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review," *Construction and building materials*, vol. 111, pp. 262-274, 2016.