

# Ultraschallprüf- und Analysetechniken zur zerstörungsfreien Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen

Daniel ALGERNON<sup>1</sup>, Sascha FEISTKORN<sup>1</sup>, Yves SCHIEGG<sup>2</sup>, Björn MÜHLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, Wallisellen, Schweiz

<sup>2</sup> TFB AG, Wildegg, Schweiz

Kontakt E-Mail: daniel.algernon@svti.ch

**Kurzfassung.** Kiesnester bergen die Gefahr von Strukturschwächungen und Dauerhaftigkeitsproblemen für Stahlbetonbauwerke. Die Detektion von Kiesnestern bildet die Grundlage für die Früherkennung von Mängeln und Schäden bzw. für die Zustandsbeurteilung bestehender Bauwerke. Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens bestand darin, die Möglichkeiten und Grenzen zerstörungsfreier Prüfverfahren hinsichtlich der Detektion von Kiesnestern zu ermitteln und zu optimieren. Hierfür wurden sowohl experimentelle als auch analytische Untersuchungen durchgeführt. Mit dem Ziel einer realistischen Repräsentation des Schadensphänomens wurden Betonprobekörper gefertigt, die unterschiedliche Kiesnestsprägungen beinhalten sowie praxisnahe Randbedingungen für die Ermittlung der Leistungsfähigkeit verschiedener Prüfverfahren und Prüftechniken aufweisen. Die Untersuchungen erfolgten primär mit dem Ultraschallverfahren sowohl in Puls-Echo- als auch in Full-Matrix-Capture-Konfiguration sowie unter Anwendung verschiedener Signalverarbeitungsalgorithmen. Darüber hinaus wurden ergänzende Untersuchungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren durchgeführt. Grundsätzlich folgte die Kiesnestdetektion dabei einer systematischen musterbasierten Analyse, die der diffusen Anzeigencharakteristik gerecht wird. Die experimentellen Untersuchungen wurden durch rechnerische Modellierung und Simulation mit der Software CIVA gestützt. Darüber hinaus wurde auf Basis der Daten aus Experiment und Simulation das Potenzial Künstlicher Intelligenz im Sinne der Generierung eines Deep Learning-Modells demonstriert. Dieses zeigt in einem ersten Schritt die automatisierte Detektion von Kiesnestern auf Basis von Spektrogrammen. In einer faktoriellen Analyse werden die Ergebnisse hinsichtlich des Leistungsvermögens der herangezogenen Verfahren und Techniken quantifiziert. Insbesondere werden wesentliche Kriterien für die Kiesnestdetektion in einer Prüfanweisung implementiert.

## Einführung

Für die Sicherstellung der Standsicherheit sowie der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken stellt die Überwachung der Integrität des Betons während der Bauausführung eine wichtige Basis dar. Im Sinne baubegleitender qualitätssichernder Massnahmen sind insbesondere zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden notwendig.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die kiesnestfreie Herstellung von Betonbauteilen. Kiesnester entstehen insbesondere bei ungenügender Verdichtung bzw. durch



Entmischungen aufgrund einer zu grossen Fallhöhe des Betons. Abgesehen von der offensichtlichen Verringerung der Sichtbetonqualität setzen Kiesnester die Dauerhaftigkeit der Konstruktion herab [1].



Beispiel von oberflächennahen Kiesnestern



Beispiel eines Kiesnests im Wandfuss einer Stützmauer

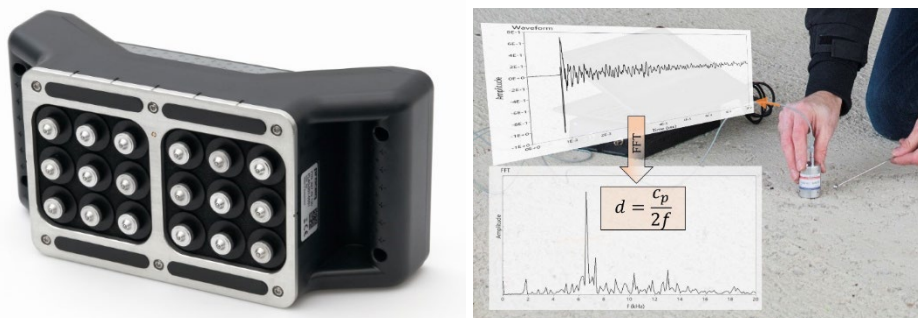
*Abb.1 Beispiele von Kiesnestern/*

Zur Ausnutzung des Potenzials zerstörungsfreier Prüfverfahren in der Baupraxis [2] bedarf es zuverlässiger Information hinsichtlich der Leistungsfähigkeit für die konkret anzutreffenden Prüfaufgaben und deren beträchtlich variierenden Randbedingungen. In einem durch das Bundesamt für Strassen (ASTRA) geförderten Forschungsvorhabens [3] sollte der Frage nachgegangen werden, unter welchen Bedingungen ein Kiesnest bzw. eine Entmischung detektiert werden kann und wie genau deren Grössen bestimmt werden können.

Hierbei sollte auf kürzlich angestellte Initiativen aufgebaut werden, welche insbesondere auf die Entwicklung von Herstellungsweisen künstlicher Kiesnester zielten, die den relevanten Schadensbildern im Feld sehr nahekommen, dabei jedoch kontrolliert hergestellt werden und somit eine sehr gute Referenz zur Beurteilung von ZfP-Verfahren bieten [4].

### Angewendete Prüfverfahren

Entmischungen und Kiesnester führen zu einer lokalen Erhöhung der Porosität und damit zu einer Änderung bestimmter Materialeigenschaften. Insbesondere die lokale Änderung der Rohdichte und des Elastizitätsmoduls hat einen signifikanten Einfluss auf zerstörungsfreie Prüfverfahren, die auf der Aussendung von elastischen Wellen beruhen. Diese Vorgehensweise ist in dem zerstörungsfreien Prüfverfahren Ultraschall (Time-of-Flight, Pulse-Echo, Sampling-Phased-Array) umgesetzt [5]. Die Ultraschallprüfung wird demzufolge als zielführend betrachtet. Ebenso beruht das Impakt-Echo-Verfahren [6][7] auf der Nutzung elastischer Wellen und wird ebenfalls in die Studie einbezogen.



*Abb.2 Transversalwellenprüfkopf (Proceq) für die Prüfung von Stahlbetonbauteilen (links) und Prinzipdarstellung des Impakt-Echo-Verfahrens.*

## Testkörper

Für die experimentelle Untersuchung des Leistungsvermögens von ZfpBau-Verfahren im Hinblick auf die Detektion von Kiesnestern und die Erarbeitung diesbezüglicher Herangehensweisen ist die Repräsentation des Phänomens unter kontrollierten Bedingungen entscheidend. Dies erfolgt in Form von Testkörpern, welche das Prüfproblem in geeigneter und somit realistischer Weise widerspiegeln.

Um wesentliche Aspekte (realistische Struktur und Positionsgenauigkeit) abzusichern, wurden diverse Vorversuche zur Herstellung und Fixierung eines Kiesnesters in einer Schalung durchgeführt sowie auf die Erfahrungen eines internationalen Ringversuchs zur Herstellung von Testkörperreferenzen zurückgegriffen [4].

In einem weiteren Versuch wurden diese Kiesnester mit Schnüren in die Schalungen der zu betonierenden Testkörper in unterschiedlichen Höhenlagen eingehängt und sowohl in lateraler als auch Tiefenlage präzise in der Schalung ausgerichtet.

Es gelang die Vorgehensweise zur künstlichen Erzeugung von Kiesnestern erfolgreich anzuwenden. Die künstlichen Kiesnester werden in ihrer Struktur als sehr realitätsnah angesehen. Gleichzeitig ist die Herstellung sehr gut steuerbar, so dass im Schluss eine sehr realistische Grundlage für experimentelle Untersuchungen geschaffen wurde.

Die Vorgehensweise für die Kiesnesterherstellung wurde für einen Testkörper (TK2) angewendet. Vor dem Betonieren wurden die Kiesnester mit Fäden in die Schalung gehängt und ausgerichtet. Der fertiggestellte Testkörper TK2 nach Abschluss ist in Abb.3 dargestellt.



*Abb.3 Eingehängte Kiesnester (rechts) und Übersicht Testkörper TK2 (Mitte und links)*

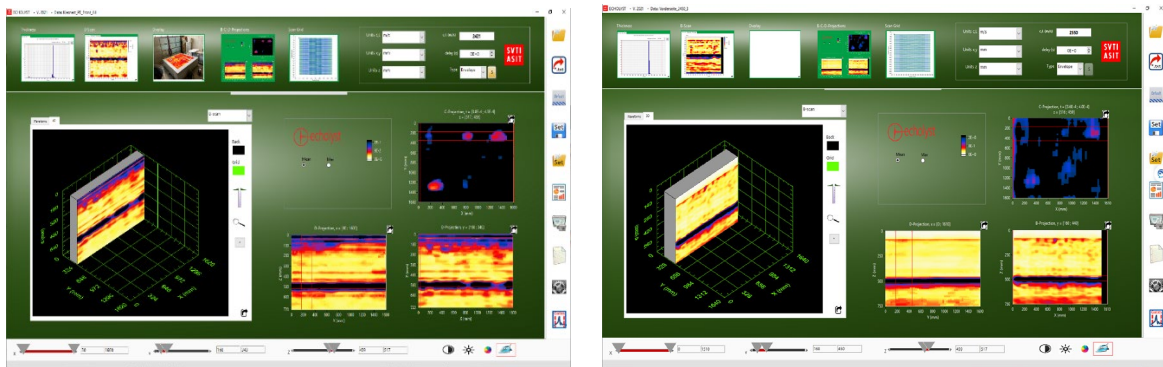
## Experimentelle Untersuchungen

### *Ultraschall*

Auf einer Fläche von 160 x 160 cm wurde auf beiden Seiten des Testkörpers ein Messpunkttraster mit einem Punktabstand von jeweils 2 cm in beide Richtungen gezeichnet. Es ergeben sich insgesamt 81 Messlinien mit jeweils 81 Messpunkten und somit insgesamt 6,561 Messpunkte pro Seite des Testkörpers, die mit den unterschiedlichen Prüfsystemen zu erfassen sind. Die Messungen wurden mit einem Proceq Pundit PE 200 Schallkopf in Impuls-Echo-Anordnung mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz durchgeführt. Zusätzlich wurden Messungen mit einem Proceq Pundit 250 Schallkopf in Array-Anordnung ebenfalls mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz durchgeführt. Hierbei wurde aufgrund der Prüfkopf-Apertur jedoch ein Messpunktabstand von 10 cm in horizontaler und 4 cm in vertikaler Richtung als ausreichend erachtet. Hierbei ergeben sich 41 Messlinien mit jeweils 15 Messpunkten und somit insgesamt 615 Messpunkte pro Seitenfläche des Testkörpers.

Die Daten der beiden Ultraschallmessgeräte (Pundit PL-200 PE und Pundit 250 Array) gemessen wurden, mit der Software ECHOLYST [8] dargestellt, sowohl mit als auch

ohne Anwendung des SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique)-Algorithmus, der eine Fokussierung bewirkt und das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert.



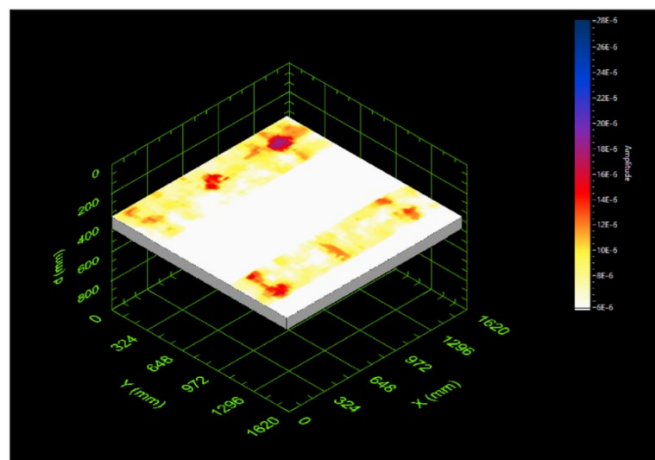
**Abb.4** Übersichtsdarstellung Pundit PL-200 PE (links) und Pundit 250 Array (rechts) mit der ECHOLYST-Software, gemessen von der Vorderseite

Die Ergebnisdarstellungen werden dahingehend interpretiert, ob und in welcher Weise sich darin die entsprechenden Kiesnester abbilden bzw. detektieren lassen. Dabei zu beachten ist die Unterscheidung in die beiden Bereiche mit Armierung in der oberen Hälfte (niedrige y-Koordinaten) und ohne Armierung in der unteren Hälfte (hohe y-Koordinaten).

### *Impakt-Echo*

Die im Vorhaben durchgeführten Impakt-Echo-Messungen stellen eine Ergänzung zu den Ultraschallmessungen dar. Das Impakt-Echo-Verfahren ist in besonderem Masse anfällig hinsichtlich Geometrieeffekten. Für die sinnvolle Anwendung sind plattenartige Bauteile eine Voraussetzung. Diese ist für den Testkörper TK2 nur marginal erfüllt.

Die Messungen am Testkörper TK2 wurden zunächst mit dem etablierten Messkopf des Typs Olson CTG-2 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine signifikante Überschattung durch Geometrieeffekte. Die Beurteilung ist hinsichtlich der Detektierbarkeit der Kiesnester somit kaum möglich. Im weiteren Verlauf wurden verschiedene Kombinationen aus Sensor und Anregung erprobt und deren Anfälligkeit auf die besagten Geometrieeffekte beobachtet. Am zielführendsten erwies sich hier die Kombination aus einem Sensor des Typs Germann Instruments Mark IV und einer Stahlkugelanregung mit 12 mm Durchmesser. Die entsprechenden Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen für die Messung von der Vorderseite dargestellt.



**Abb.5** C-Bilddarstellung im Bereich der Rückwand für den Impakt-Echo-Datensatz mit optimierter Kombination von Sensor und Impakt-Anregung. Das Amplitudenbild zeigt Strukturen, welche mit den Positionen der Kiesnester eine gute Übereinstimmung aufweisen.

In der Darstellung in Abb.5 ist eine erstaunlich gute Übereinstimmung der Anzeigen mit den Kiesnestpositionen zu beobachten. Obgleich dieses Ergebnis als vielversprechend interpretiert werden kann, ist bei dieser Interpretation Vorsicht geboten, da der Einfluss der Geometrieffekte für dieses Verfahren bei der gegebenen Testkörpergeometrie massiv ist. Eine eindeutige Aussage hinsichtlich des Leistungsvermögens würde für das Impact-Echo-Verfahren einer deutlich weiter gestreckte Testkörpergeometrie bedürfen.

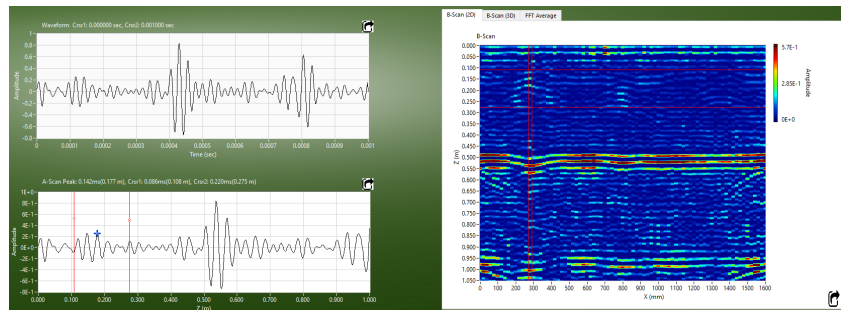
### Aus- und Bewertung der Ergebnisse

Basierend auf den konzipierten Testkörpern, den durchgeführten Messungen sowie den Simulationsergebnissen werden Empfehlungen für die Detektion von Kiesnestern gegeben. Diese folgen dem Ziel, einfache und in der Praxis anwendbare Detektionskriterien zu definieren, die aus den aufgezeichneten Messdaten in wenigen Schritten ausgelesen werden können:

- Direkte Kiesnestreflexion **DKR**
- Abschattung der Rückwand **RWA**
- Schwächung der Rückwandreflexion **RWS**
- Verschiebung der Rückwand **RWV**

#### Direkte Kiesnestreflexion (DKR):

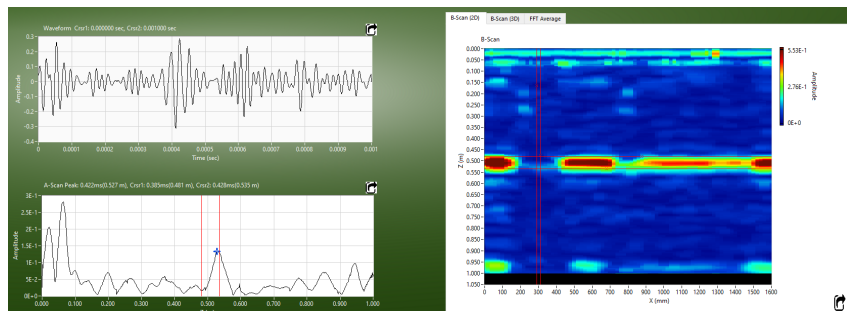
Eine Reflexion wird als direkte Kiesnestreflexion gewertet, wenn in den A-, B- oder C-Bildern an der Sollposition des Kiesnests eine im Vergleich zum Rauschen höhere Signalamplitude vorliegt, siehe beispielhaft Abb.6.



**Abb.6** Beispiel einer direkten Kiesnestreflexion innerhalb der rot gekennzeichneten Gates

#### Abschattung der Rückwand (RWA):

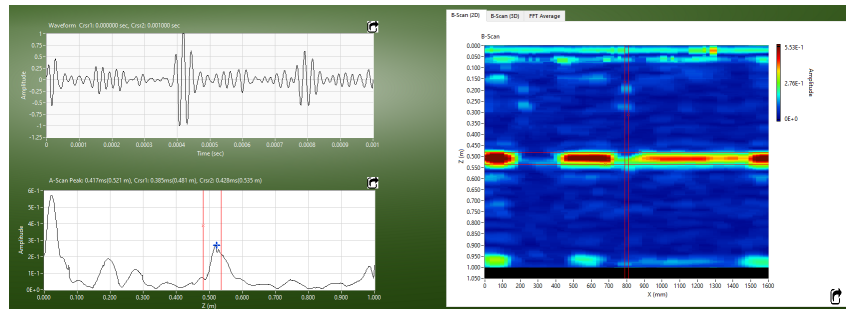
Eine Rückwandabschattung wird als eine solche gewertet, wenn die unter einem Kiesnest liegende Rückwandfläche keine sich nennenswert aus dem Rauschen abzeichnende Amplitude aufweist, siehe Abb.7.



**Abb.7** Beispiel einer Rückwandabschattung innerhalb der rot gekennzeichneten Gates

### Schwächung der Rückwandreflexion (RWS):

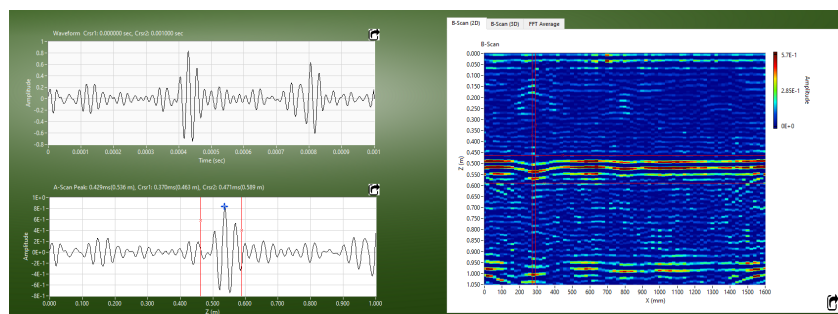
Eine Rückwandschwächung wird als eine solche gewertet, wenn die unter einem Kiesnest liegenden Rückwandfläche eine geringere Amplitude als die benachbarte Rückwandanzeige aufweist, siehe Abb.8.



*Abb.8 Beispiel einer Rückwandschwächung innerhalb der rot gekennzeichneten Gates*

### Verschiebung der Rückwand (RWV):

Eine Verschiebung der Rückwandreflexion wird als eine solche gewertet, wenn sich die Reflexion der Rückwand im Bereich eines Kiesnests sichtbar zu längeren Laufzeiten hin verschiebt und sich somit von der sie umgebenden Rückwandanzeige unterscheidet.



*Abb.9 Beispiel einer Rückwandverschiebung innerhalb der rot gekennzeichneten Gates*

Folgendes Fazit lässt sich ziehen:

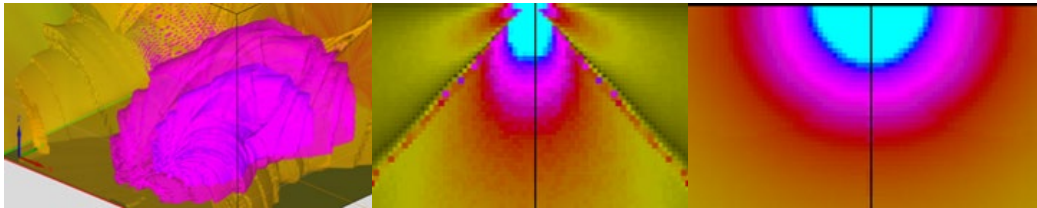
- In einer Tiefe von 200 mm ohne vorliegende Bewehrung können alle drei Kiesnester der Grösse 100 mm, 150 mm und 200 mm direkt detektiert werden.
- In einer Tiefe von 300 mm ohne vorliegende Bewehrung können die Kiesnester der Grösse 150 mm und 200 mm direkt detektiert werden.
- In einer Tiefe von 200 mm mit vorliegender Bewehrung kann ein Kiesnest der Größe 200 mm unter Anwendung von SAFT direkt detektiert werden.
- In einer Tiefe von 300 mm mit vorliegender Bewehrung können die Kiesnester der Grösse 150 mm und 200 mm unter Anwendung von SAFT direkt detektiert werden.

### **Modellierung und Simulation**

Ziel des Einsatzes von Modellierungs- und Simulationstechniken in diesem Vorhaben war es, die komplexe Fragestellung der Kiesnestdetektion und -quantifizierung beherrschbar zu gestalten, Einflussfaktoren zu identifizieren, zu verstehen, zu quantifizieren sowie relevante Signalmuster zu erkennen. Für die objektive Leistungsbeurteilung des eingesetzten Ultraschallprüfsystems hinsichtlich der Detektion und Beschreibung von Kiesnestern bedurfte es systematischer Untersuchungen an einer Vielzahl geeigneter Testkörper und Kiesnester, deren Anzahl beträchtlich wird, wenn die Kombination mit den variierenden

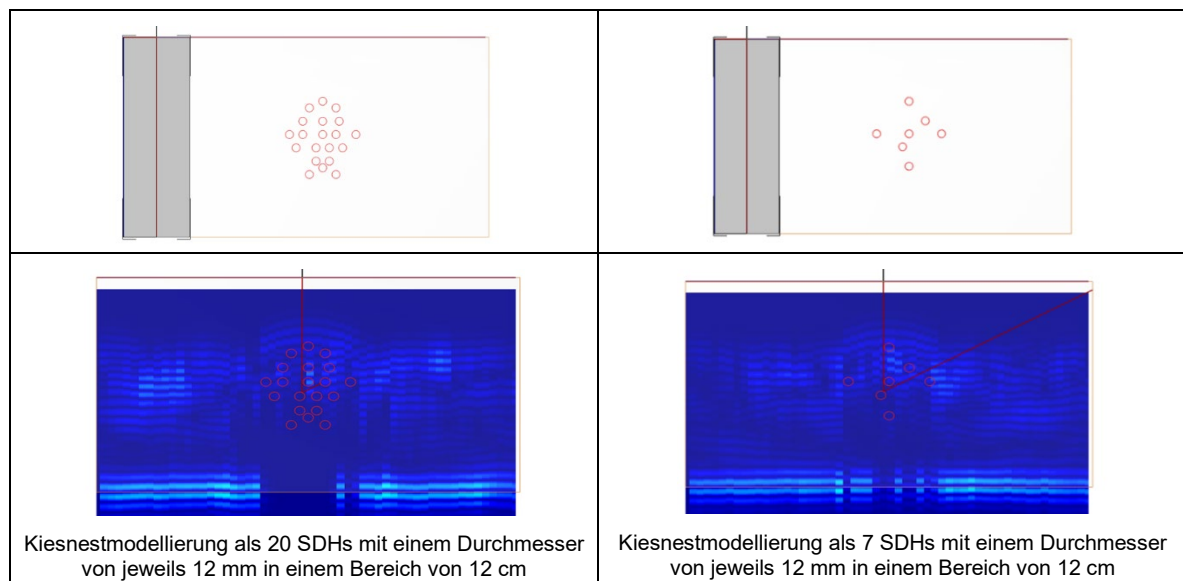
Parametern des umgebenden Testobjektes umfassend zu analysieren ist. Ein Teil dieser Variationen wurden im Rahmen dieses Vorhabens experimentell umgesetzt wie die Variation der Größe sowie des Aufbaus des Testkörpers. Durch Simulationsrechnungen kann die Anzahl hingegen beträchtlich verringert werden, da die Variation hierin erfasst ist. Sofern die vereinfachenden Annahmen semi-analytischer Ansätze insbesondere betreffend Homogenisierung des Werkstoffs für den jeweiligen Anwendungsfall vertretbar erscheinen, stellt das CIVA-Programmpaket einen möglichen Weg dar [9].

Basierend auf der Arbeit von Dr. S. Maack [10] sowie auf den Angaben des Herstellers (siehe Tab. 6), die Parameter für einen Punktkontaktprüfkopf in CIVA modelliert.



**Abb.10** modellierter punktförmiger Transversalwellenprüfkopf mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz mit einem in der x-Achse polarisiertem Schallfeld; links: räumliche Darstellung des modellierten Schallfeldes; Mitte: Richtcharakteristik in Richtung der x-Achse; rechts: Richtcharakteristik in Richtung der y-Achse

Es lässt sich zusammenfassen, dass die Modellierung der an Betonbauwerken üblichen Prüftechnik trocken ankoppelnder Transversalwellenpunktkontaktprüfköpfe als erfolgreich bezeichnet werden kann. Allerdings sind symmetrische Artefakte in der Richtcharakteristik der x-Achse abweichend im Modell aufgetreten, die nicht eliminiert werden konnten.



**Abb.11** qualitative Ergebnisse der untersuchte Kiesnestmodelle; Modellierung des Rauschens mit einer Dichte von  $10\text{pts.mm}^3$  sowie einer Amplitude von  $50.000\text{S.I.}$

Mit dem Ziel die Realität in CIVA hinreichend abzubilden, wurden Parameter im Modell variiert, um qualitativ vergleichbare Prüfsystemantworten von einem modellierten Kiesnest zu erhalten. Exemplarisch sind in der nachfolgenden Abbildung Parameter des Kiesnests als auch die zugehörigen Signalantworten mit einer qualitativen Bewertung dargestellt. Dies wird durch die Verwendung von Anhäufungen kleiner Reflektoren im Modell erreicht.

## Bewertung und Empfehlungen für die Kiesnestdetektion

Eine ausführliche tabellarische Auswertung des beobachteten Leistungsvermögens findet sich im Abschlussbericht des Vorhabens [3]. Daraus geht hervor, dass jedes der Kriterien seine Berechtigung hat und in der Auswertung zu berücksichtigen ist. Insbesondere gilt dies für Kiesnester mittlerer bis kleine Größe (100 mm und 150 mm Durchmesser). Somit ist es wichtig, jedes der genannten Kriterien in der Praxis heranzuziehen. Die Beschränkung auf ein einzelnes Kriterium würde die Detektionswahrscheinlichkeit signifikant reduzieren. Dies unterstreicht erneut die Komplexität des Phänomens Kiesnest. Insbesondere ist zu beachten, dass die herangezogenen Kriterien in ihrer Anwendung nicht trivial sind und einer gewissen Erfahrung bedürfen.

Aus der erkannten Komplexität erwächst zum einen die Erkenntnis, dass die Entwicklung strukturierter Vorgehensweisen (Prüfprozeduren und -anweisungen [11]) ein wichtiges zukünftiges Ziel sein muss. Zum anderen geht daraus die Motivation hervor, weitergehende Analysemöglichkeiten wie insbesondere der Künstlichen Intelligenz auf Basis von Machine Learning heranzuziehen.

## Anwendung von Machine Learning

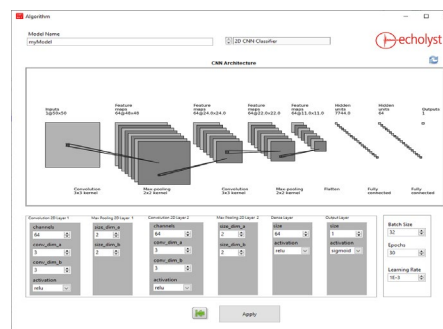
Während sich die Auswertung und Interpretation der Daten zerstörungsfreier Prüfungen, und insbesondere Ultraschalluntersuchungen, in der Praxis oft als komplex erweisen, bedeutet die zugrundeliegende physikalische Komplexität einen hohen Informationsgehalt der Signale, weit über die klassisch genutzten Merkmale (Amplitude, Laufzeit) hinaus. Ein Machine Learning-Modell ist in der Lage, den gesamten Signalgehalt in die Auswertung einfließen zu lassen und zuvor verborgene Korrelationen zu nutzen [12][13].

Im Rahmen des beschriebenen Forschungsvorhabens sollten die Möglichkeiten der Anwendung von Machine Learning bezüglich der Detektion von Kiesnestern lediglich ergänzend zu den vorangegangenen klassischen Betrachtungen und in Ansätzen vollzogen werden. Für die Generierung der KI-Modelle wird ein Deep Learning angewendet [14][15][16] (Abb.12). Hierfür wird das KI-Modul der Software ECHOLYST herangezogen.

### Multilayer Perceptron Neural Network (MLP)



### Convolutional Neural Network (CNN)

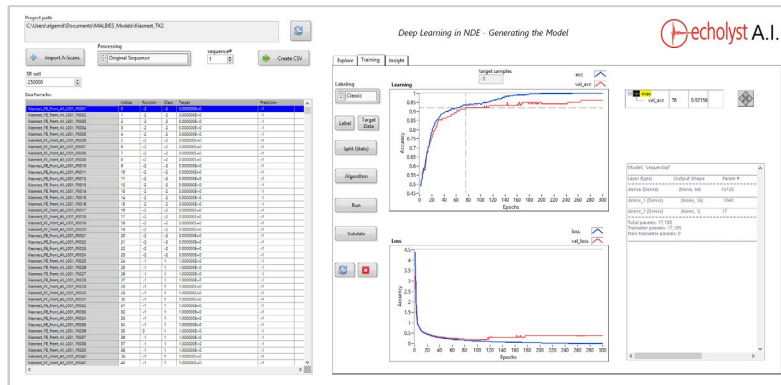


**Abb.12** Deep Learning-Architekturen. Links: Multilayer Perceptron Neural Network (MLP). Rechts: Convolutional Neural Network (CNN).

Für die Bereitstellung der Datensätze ist die entsprechende Form bzw. Vorbereitung der Datensätze von Bedeutung. Dieses Preprocessing kann in einer Filterung, einem Downsampling, einer Transformation in den Frequenzbereich, einer Spektrogrammdarstellung, etc. bestehen. Weiter können jeweils benachbarte Datensätze zu einem Datensatz zusammengefasst werden, um auf diese Weise eine weniger isolierte Betrachtung zu gewährleisten.



Der Trainingsverlauf kann anhand der Lernkurven nachvollzogen werden. Für die Fragestellung der Kiesnestdetektion wurden Puls-Echo-Datensätze (Sender/Empfänger) verwendet. Wie in den vorangegangenen Abschnitten ausgeführt, ist die bislang verfolgte klassische Analyse komplex und bedarf der Einbeziehung mehrerer Kriterien. Ziel ist es, durch Deep Learning ein Modell zu generieren, das Datensätze in die Kategorien „Kiesnest“ und „intakt“ klassifiziert und somit ein Detektionsmodell darstellt. Insbesondere soll dieses Modell nur anhand eines Teils der Daten, und zwar den großen Kiesnestern (Durchmesser 200 mm), trainiert und dahingehend beurteilt werden, wie es den Bereich der kleinen Kiesnester klassifiziert. Eine Übersicht über die resultierenden Trainingskurven ist in *Abb.13* dargestellt.



**Abb.13** Übersichtsbildschirmabgabe für Puls-Echo-Datensätze des Testkörpers TK2. Rechts oben dargestellt sind die Lernkurven für Trainingsdatensätze (blau) und Testdatensätze (rot). Links unten dargestellt sind die entsprechenden Verläufe der Verlustfunktion. Die dabei erreichte Validierungsgenauigkeit für die Testdatensätze beträgt etwa 92%.

Die hier lediglich skizzierte Modellgenerierung dient der Demonstration des Deep Learning-Ansatzes. Das daraus hervorgegangene Modell erhebt keinen Anspruch darauf, allgemeingültig zu sein. Für die Generierung eines Modells für den Einsatz in praktischen Anwendungen bedarf es hingegen einer deutlich weitreichenderen Datenbasis, welche eine Vielzahl repräsentativer Szenarien und Kiesnestausprägungen umfasst.

## Fazit

In dem Forschungsvorhaben ist die Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen untersucht worden. Der Untersuchung typischer Signalantworten und der Erarbeitung wesentlicher Detektionskriterien kam besondere Bedeutung zu.

Für die zu betrachtenden zerstörungsfreien Prüfverfahren wurde das Ultraschallverfahren in den Fokus des Vorhabens gestellt. Es weist für die Kiesnestdetektion das höchste Potenzial auf. Die Analysen verdeutlichen die Komplexität der Kiesnestcharakteristik. Es werden mehrere Kriterien zur Detektion, einschliesslich direkter Kriterien bezüglich einer Detektion im Volumen als auch indirekter Kriterien hinsichtlich einer Abschattung, Schwächung oder Verschiebung der Rückwandanzeige herangezogen. Die diffuse Gestalt ist ein wesentliches Merkmal von Kiesnestern. Durch die verfolgte systematische Analyse anhand der musterbasierten Kriterien wird eine hohe Detektionswahrscheinlichkeit mit dem Ultraschallverfahren ermöglicht.

Die experimentelle Untersuchung wurde durch theoretische Analysen in Form von Simulationsrechnungen gestützt. Insbesondere wurde ein neues Konzept für die Modellierung von Kiesnestern in der Simulationsumgebung CIVA entwickelt.

Ergänzende Untersuchungen fanden mit dem Impakt-Echo-Verfahren statt. Die herangezogenen Testkörper sind jedoch klar unter Gesichtspunkten der Ultraschallprüfung

konzipiert und besitzen gedrungene Abmessungen, welche bei der Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens mit massiven Geometrieeffekten verbunden sind. Zur Vermeidung einer Überinterpretation unter an sich nicht geeigneten Randbedingungen wird auf eine weiter vertiefende Analyse verzichtet. Dennoch sind die erzielten Ergebnisse vielversprechend.

Auch wurde der Ansatz Künstlicher Intelligenz im Sinne eines Detektionsmodells für Kiesnester in den Grundzügen angetastet. Die generierten Modelle untermauern die Vorteile sowie das Potenzial der Nutzung von Deep Learning zur Detektion von Kiesnestern, sind aber vorerst nur als Demonstration der Vorgehensweise zu betrachten. Sie können und sollen in der aktuellen Ausführung noch nicht als allgemeingültig beschrieben werden.

Die Aufgabe der Detektion von Kiesnestern kann als anspruchsvoll bezeichnet werden, ist jedoch durch die bestehende Ultraschallprüftechnik unter Anwendung klarer Kriterien in Verbindung mit einer gewissen Erfahrung durchaus realistisch.

## Danksagung

Die beschriebenen Inhalte sind entstanden im Forschungsvorhaben AGB 2018/006 - „Zerstörungsfreie Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen“, gefördert durch das Bundesamt für Strassen (ASTRA).

## Referenzen

- [1] Cemsuisse: Sichtbeton - Vorbeugende Massnahmen, 2018. [Online]. Available: [http://www.cemsuisse.ch/sichtbeton/maengel/maengel\\_kiesnester/index.html?lang=de](http://www.cemsuisse.ch/sichtbeton/maengel/maengel_kiesnester/index.html?lang=de). [Zugriff am 20.10.2018].
- [2] Mühlan, B., Schiegg, Y. Algernon, D., Feistkorn, S.: Zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfP): Bedürfnisse der Praxis und Stand der Technik, *ASTRA-Forschungsbericht 688*, November 2018
- [3] Algernon, D., Feistkorn, S., Schiegg, Y., Mühlan, B., „Zerstörungsfreie Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen“, *ASTRA-Forschungsbericht 705*, 2021.
- [4] Maack, S., Scott, D. und S. Villalobos: Validation of artificial defects for Non-destructive testing. *ICCRRR, Kapstadt, 2018*.
- [5] M. Krause, "Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen," in *Bauphysik-Kalender*, E. Cziesielski, Ed., Berlin, Ernst & Sohn, 2004, pp. 341-352.
- [6] DGZfP Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, „DGZfP-Merkblatt B11: Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen.“ *DGZfP, Berlin, 2020*.
- [7] M. J. Sansalone and W. B. Streett, "Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry", *Jersey Shore, PA (USA): Bullbrier Press, 1997*.
- [8] D. Algernon, S. Feistkorn, M. Hagenbruch, P. Kicherer, L. Rössler and M. Scherrer, "Entwicklung eines Impact-Echo-Systems für Scanning, Analyse und Machine Learning," *ZfP-Zeitung*, pp. 34-41, 12 2020.
- [9] General Introduction to CIVA, *Massy: EXTENDE S.A.*
- [10] S. Maack: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen; *BAM-Dissertationsreihe Band 95*, 2012.
- [11] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, „Leitfaden für die Erstellung von Prüfanweisungen für die Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (ZfPBau)“, Berlin, 2021
- [12] C. Völker, „Datenfusion zur verbesserten Fehlstellendetektion bei der zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauwerken“, *Universität des Saarlandes, 2017*.
- [13] D. Algernon, „Machine Learning – Potenzial und Anwendung in der Zerstörungsfreien Bauwerksprüfung“, *in Fachtagung Bauwerksdiagnose 2020, Berlin, 2020*.
- [14] J. Schmidhuber, „Deep Learning in Neural Networks: An Overview“, *Neural Networks, Bd. 61, pp. 85-117, 2015*.
- [15] S. Russel und P. Norvig, "Artificial Intelligence: A Modern Approach", *Hrsg., New York: Prentice-Hall, 2003*.
- [16] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville, "Deep Learning", *MIT Press, 2016*.