

Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen

Akronym: ZUVERSICHT



Schlussbericht Teil I (Kurzbericht)

30.10.2023

Förderkennzeichen:	03G0886A-D
Projektlaufzeit:	01.02.2020 – 30.06.2023
Projektträger:	Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH
Zuwendungsempfänger:	IAB-Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) HafenCity Universität Hamburg, Professur Technisches Infrastrukturmanagement (HCU) Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak)

Das Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die inhaltliche Verantwortung dieser Veröffentlichung liegt bei den durch die beteiligten Einrichtungen benannten Projektleitern.

Verbundpartner



Verbundkoordinator:
IAB-Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gemeinnützige GmbH
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar
Projektleitung: Dipl.-Ing. (FH) Torsten Schmidt
t.schmidt@iab-weimar.de
www.iab-weimar.de
Kennzeichen: 03G0886A



Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbe-
benschäden (EDAC)
Marienstraße 13B
99423 Weimar
Projektleitung: Dr.-Ing. Jochen Schwarz
schwarz@uni-weimar.de
www.edac.biz
Kennzeichen: 03G0886B



HafenCity Universität Hamburg (HCU)
Professur Technisches Infrastrukturmanage-
ment
Henning-Voscherau-Platz 1
20457 Hamburg
Projektleitung: Prof. Ingo Weidlich
ingo.weidlich@hcu-hamburg.de
www.hcu-hamburg.de
Kennzeichen: 03G0886C



Institut für Automation und Kommunikation
e.V. (ifak)
Werner-Heisenberg-Straße 1
39106 Magdeburg
Projektleitung: Dr. Jens Alex
jens.alex@ifak.eu
www.ifak.eu
Kennzeichen: 03G0886D

Autoren

Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB)

Teilvorhaben: Untersuchung von Schäden erdverlegter Infrastruktur und Entwicklung von Entscheidungshilfen

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC)

Teilvorhaben: Gefährdungskonsistente Beanspruchungs- und Risikoszenarien für erdverlegte Infrastrukturnetze und -komponenten

Bericht:

Dr.-Ing. Jochen Schwarz

Dr.-Ing. Silke Beinersdorf

Bearbeiter im Vorhaben:

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann

Dr.-Ing. Christian Golbs

Dipl.-Ing. Tobias Langhammer

HafenCity Universität Hamburg (HCU), Professur Technisches Infrastrukturmanagement

Teilvorhaben: Untersuchung der seismischen Antwort erdverlegter Infrastrukturen durch numerische und experimentelle Untersuchungen als integraler Bestandteil einer proaktiven Ingenieuranalyse

Dr.-Ing. Gersena Banushi

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak)

Teilvorhaben: Simulationsmodelle und -werkzeuge für die Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur

Dr. Jens Alex

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1 Aufgabenstellung	2
1.1 Gesamtziel des Vorhabens	2
1.2 Darstellung der Problemlage	3
1.3 Stand der Wissenschaft und Technik	4
2 Darstellung der Verbundpartner	5
2.1 IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH.....	5
2.2 Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC).....	5
2.3 HafenCity Universität Hamburg (HCU)	6
2.4 Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak)	6
3 Ablauf des Vorhabens	8
4 Wesentliche Ergebnisse	9

1 Aufgabenstellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Gesamtziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Methodik zur Beurteilung des Schadenpotenzials für die bestehende, erdverlegte Infrastruktur im Erdbebenfall. Hierbei galt es, die Verletzbarkeit von ver- und entsorgungsrelevanten Leitungsnetzen und deren Gefährdungspotenziale systematisiert hinsichtlich schadensmindernder Faktoren zu untersuchen.

Im Rahmen des Projektes wurden Skalierungsebenen genutzt, die von der mikroskaligen Betrachtung der Rohrmaterialien bis hin zur makroskaligen Betrachtung der Leitungsnetzstruktur reichen, um Schadensprognosen und Zustandsbewertungen in seismisch kritischen Bereichen vorzunehmen.

Die Zuordnung von Netzstrukturdaten und Erdbebenintensitäten zu Schadenswahrscheinlichkeiten und Schadensarten wurde über systematisch durchgeführte FEM-Simulationen von Rohr-Boden-Systemen für die Netze und deren Gefährdungsfaktoren berechnet und archiviert. Diese wurden validiert. Die Ergebnisse der mehrmethodischen Bewertung und Methoden zur Ermittlung des Ist-Zustandes flossen in ein zu entwickelndes Simulations-Tool ein. Bild 1 zitiert die mit der Antragstellung angestrebte Skalierungs- und Methodeninterdisziplinarität des Vorhabens.

Die wissenschaftlichen Ziele gliederten sich in das Netzdatenmanagement, die Entwicklung von Verletzbarkeitsklassen, die Ermittlung von Gefährdungspotenzialen sowie die Entwicklung und Tests eines Simulations-Tools mit einer mehrmethodischen Datenverarbeitung.

Das Ziel des zu entwickelnden Simulations-Tools war es, proaktiv und im Schadensfall schnell geschädigte Abschnitte zu erkennen, Maßnahmen zur Schadensminderung vorzuschlagen und Entscheidungsträger in ihrem Krisenmanagement zu unterstützen. Die Integration aller verfügbarer Ist-Daten und Ergebnisse der Forschungsarbeit ermöglichte die Entwicklung von Vorsorgemaßnahmen und eine schnelle Schadensdetektion. Somit ist eine zeitnahe Wiederinbetriebnahme kritischer Infrastruktur zur Sicherung der Ver- und Entsorgung der Bevölkerung möglich.

Im Rahmen des Projektes sind die vorhandenen methodischen Ansätze zur Abschätzung der seismischen Einwirkungen am Standort und zur Beschreibung der Verletzbarkeit aufgegriffen, weiterentwickelt, auf die Besonderheiten erdverlegter Rohrleitungen und die Gegebenheiten der deutschen Erdbebengebiete übertragen bzw. angepasst worden.

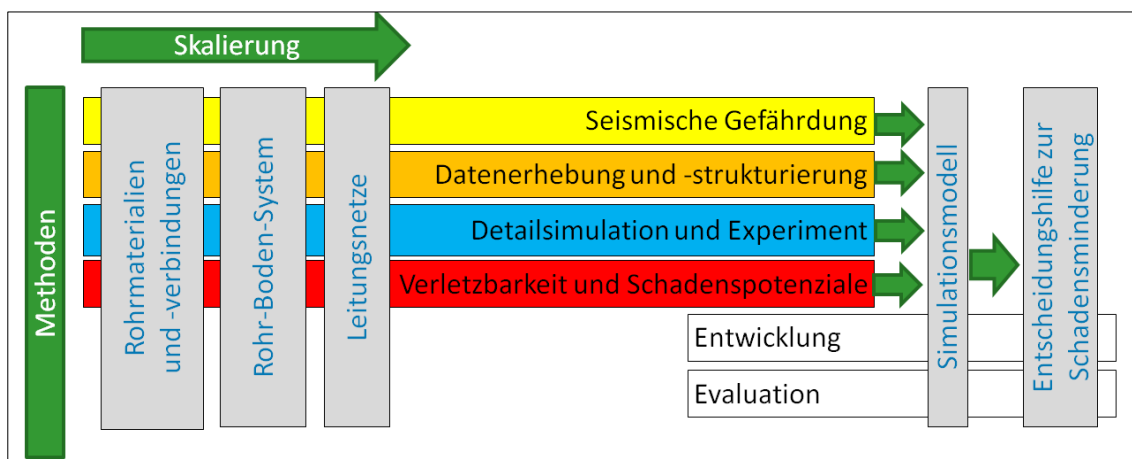


Bild 1: Zieldefinition des Forschungsvorhabens (gemäß Projektantrag)

1.2 Darstellung der Problemlage

Erdbeben bedrohen die Sicherheit erdverlegter Rohrleitungen durch transiente Verschiebungsdifferenzen fortschreitender Erdbebenwellen und infolge permanenter Verschiebungsdifferenzen ausgehend von oberflächennahen Verwerfungen, Hangrutschungen, Bodenverflüssigungen und seismischen Setzungen. Die Wirkungen von transienten und permanenten Verschiebungsdifferenzen sind in den modernen seismischen Richtlinien zwar berücksichtigt, münden aber letztlich nur in allgemeinen Auslegungshinweisen, die die lokalen Entscheidungsträger im Netzbetrieb und -management kaum unterstützen können.

Die analytischen Modelle sind ein wichtiges Entwurfswerkzeug für die vorläufige Berechnung der Rohrfestigkeit unter seismischer Einwirkung. Sie bieten auch die Grundlage für die Überprüfung komplexer numerischer Modelle. Normalerweise betrachten analytische Modelle die Rohrleitung als einfachen gebetteten Balken, mit dem die Interaktion der Rohrleitung mit dem Boden zum Beispiel mit einem Federmodell während der seismischen Belastung abgebildet wird.

Die meisten existierenden Analysemethoden für den Nachweis der Rohrleitungen gegen transiente Verschiebungsdifferenzen basieren insbesondere auf der Annahme, dass die seismische Erregung als ein Zug harmonischer Wellen modelliert und dass die Trägheit und die kinematischen Effekte der Interaktion der Rohrleitung mit dem Boden vernachlässigt werden können. Weiterhin kann der seismische Widerstand von unterirdischen Rohrleitungen mit der Methode der Winkler-Bettung eines Balkens und dem Kontinuumsansatz im Rahmen der Finite-Elemente-Methode bewertet werden.

Die Winkler-Bettung ist nicht in der Lage, das realistische Bodenverhalten für große Verformungen zu modellieren und die lokalen Instabilitäten der Rohrleitung auf der Querschnittsebene wie z. B. lokale Stauchungen und Ovalisierung zu erfassen. Die Finite-Elemente-Methode hat viele der Mängel des Winkler-Fundament-Modells nicht, weist jedoch erhebliche Nachteile hinsichtlich des erhöhten Rechenaufwands und der erforderlichen Ingenieurexpertise auf, um die Modelle für Routine-Ingenieuranwendungen zu analysieren.

Der Innovationsgehalt des Projekts findet sich in der Untersuchung der seismischen Verletzbarkeit von unterirdischen Rohrleitungen in städtischen Gebieten, die hinsichtlich mechanischer und geometrischer Eigenschaften sehr heterogen sind. Für die Untersuchung werden fortschrittliche numerische Rechenverfahren, durch experimentelle Daten validiert. Dazu ist die Definition typisierter Verlegesituationen für die unterschiedlichen in Siedlungsgebieten zu erwartenden Netz-Infrastrukturen erforderlich.

Das für das Vorhaben gewählte Kontinuumsverfahren ermöglicht, den Verlauf des Rohrleitungswiderstands in Bezug auf Querschnittsovalisierung und exzessive Zug- und Druckspannungen als Funktion der zunehmenden Bodenbewegung richtig zu bewerten und entsprechend die Grenzzustände des Rohrleitungsnetzes zu ermitteln. Die bewertete seismische Leistung der Rohrleitungssysteme kann durch Verletzbarkeitsfunktionen dargestellt werden und somit auch den Kanon der vorliegenden empirischen Formulierungen, mit denen Reparaturraten ereignisabhängig abgeschätzt werden, erweitern.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Abschätzung der Schädigung an erdverlegten Rohrleitungen erfolgt im Allgemeinen anhand von Verletzbarkeitsfunktionen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bodenbewegungsgrößen. In der Literatur werden verschiedene Funktionen vorgeschlagen, die die Beschreibung der Bodenbewegungsgrößen (wie *Peak Ground Acceleration PGA*, *Peak Ground Velocity PGV*) bzw. in Form rohrleitungsspezifischer Größen (z.B. *Peak Ground Strain*) voraussetzen. Die wesentliche Annahme besteht darin, dass die PGV in direktem Zusammenhang mit der maximalen Bodendehnung steht und mit ihr ein maßgeblicher Parameter für Rohrleitungsschäden (infolge der Ausbreitung seismischer Wellen) gegeben ist.

Die meisten Studien zur Verletzbarkeit erdverlegter Rohrleitungen basieren auf empirischen Daten und geben oftmals ausschließlich die mittlere Reparaturrate pro Einheitslänge an. Nur wenige Verletzbarkeitskurven folgen dem klassischen Ansatz der Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Wie die Studien zum Stand der Technik bezüglich der seismischen Verletzbarkeit von erdverlegten Leitungen zeigen, basieren die meisten in der Literatur publizierten Funktionen auf empirischen Werten, was deren Anwendbarkeit (auf Grund der geringen Datengrundlage) bzw. Übertragbarkeit auf analoge Verhältnisse einschränkt. Weiterhin beziehen sich die meisten verfügbaren Verletzbarkeitsfunktionen auf segmentierte Rohrleitungen aus Gusseisen oder Asbestzement, die eine andere seismische Antwort als andere Typen von Rohrleitungen aufweisen. Daraus resultieren letztendlich auch die hohen Unsicherheiten in der Anwendung dieser Funktionen im Rahmen von Risikostudien.

In aktuellen Studien wurden für die Entwicklung analytischer Verletzbarkeitsfunktionen vereinfachte numerische Methoden, wie den Ansatz der Winkler-Bettung eines Balkens, verwendet. Diese basieren auf inkrementellen dynamischen Analysen (IDA), entweder durch Nutzung von PGA oder PGV. Weitere Verbesserung kann durch die Betrachtung eines detaillierteren Modellierungsansatzes und einer größeren Anzahl von Bodenbewegungen erreicht werden.

In Anbetracht dieser Situation wird erwartet, dass analytische Verletzbarkeitskurven, die mit experimentellen Ergebnissen abgeglichen sind, eine zuverlässigere Schadensprognose an erdverlegten Rohrleitungen unter Berücksichtigung einer breiteren Palette seismischer Szenarien, Bodentypen und -typologie bieten. In diesem Zusammenhang trägt die Definition erfahrungsbasierter Grenzzustandskriterien (Schadensgrade) erheblich zur Anwendung und Aussagezuverlässigkeit bei.

Die Bewertung der seismischen Reaktion erdverlegter Rohrleitungen wird bis dato ausschließlich durch experimentelle Untersuchungen sowie durch einfache, analytische oder komplexere numerische Ansätze vorgenommen. Eine Übertragung auf andere Rohrleitungssysteme ist aufgrund der Unterschiede nicht ohne Detailbetrachtung möglich. Es gibt nur wenige vollständige Fallstudien oder experimentelle Untersuchungen, die eine Systematisierung der Rohrleitungstypen (ansatzweise) in Gänze anzubieten vermögen. Für die Abbildung von erdverlegten Infrastrukturnetzen existieren jedoch seit geraumer Zeit Computersimulationsmodelle. Beispielsweise sind für Abwasserkanalnetze detaillierte (hydrodynamische) und vereinfachte (hydrologische) Modellierungsansätze und entsprechende Implementierungen als Simulationssoftware Stand der Technik. Ein Simulationssystem, das beide Ansätze in sich vereinigt, ist der im Vorhaben weiterentwickelte Simulator SIMBA#, der sich durch seine Flexibilität bzgl. Modulerweiterungen und Anbindbarkeit an Fremdprogramme auszeichnet. Entsprechend können auf diese Weise sowohl mikro- als auch makroskalige Modellierungsansätze umgesetzt werden.

In Spiegelung vorhandener bzw. aktueller Forschungsprojekte und -arbeiten ist festzustellen, dass sich die verfolgten Ansätze im Wesentlichen nur auf einzelne Infrastrukturen (z. B. Trinkwasser oder Abwasser oder Energieversorgung) konzentrieren und zudem Katastrophenfälle (wie z. B. Auswirkungen von Erdbeben) nicht einbeziehen. An dieser Stelle setzte ZUVERSICHT auf, indem zum einen methodisch ein sektorübergreifender Ansatz verfolgt und zum anderen auf das spezielle Anwendungsszenario „Erdbeben“ und Analyse des entsprechenden Gefährdungspotenzials fokussiert wurde.

2 Darstellung der Verbundpartner

2.1 IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH

Am IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH forschen und entwickeln 115 Personen. Das Forschungs- und Dienstleistungsspektrum ist infolge der interdisziplinären Zusammenarbeit der Forschungsbereiche Baustoffe, Technische Systeme und Prozesstechnik thematisch breit gefächert. Der Fachbereich Infrastruktur, im Forschungsbereich Technische Systeme, engagiert sich in allen Bereichen des Tief- und Rohrleitungsbaus. Entwickelt werden Produkte und Verfahren zur Inspektion und Sanierung von Rohrleitungen. Seit 1996 arbeitet das FITR (Forschungsinstitut für Tief- und Rohrleitungsbau e. V.), welches 2012 in das IAB fusionierte, mit Flüssigböden (ZFSV = zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe) und entwickelte den Weimarer Bodenmörtel als selbstverdichtendes Verfüllmaterial. Darüber hinaus gehören die Bewertung der Restlebensdauer von Rohren sowie die Bestimmung der statischen Eigenschaften, im integrierten Rohrlabor und Zug-Druck-Prüfeinrichtungen sowie das messtechnisch begleitete Netzmonitoring zu den Forschungs- und Entwicklungsaufgaben.

2.2 Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC)

Das Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Earthquake Damage Analysis Center; EDAC) ist seit zwei Jahrzehnten als Forschungszentrum an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar tätig und an mehr als 80 nationalen und internationalen Forschungsvorhaben (in der Regel projektleitend) beteiligt. Das EDAC verfügt über exzellente und langjährige Erfahrungen in der Bewertung von Erdbebenschäden, der empirischen und analytischen Schadensprognose sowie der Beschreibung von standortspezifischen Gefährdungspotenzialen.

Die am EDAC entwickelten Bewertungs-Tools und Schadensmodelle für typische Bauweisen zur Quantifizierung der Schadenspotenziale infolge extremer Naturgefahren begründen sich auf den Ergebnissen von Erkundungsmissionen und Soforteinsätzen zur Ingenieuranalyse der Schäden in den von Erdbeben, Hochwasser und Tsunami bzw. von Tornado betroffenen Gebieten.

Der Leiter des EDAC, Dr.-Ing. Jochen Schwarz, hat als Mitglied des SC8 Project Teams zur Neufassung von EN 1998-4:2006 Eurocode 8: *Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines*; German version EN 1998-4:2006 und seit 2015 im Project team M/515/PT1 *Evolution of Eurocode 8, Part 1: Material-independent sections* verantwortlich an der Erarbeitung der neuen europäischen Normengeneration mitgewirkt.

Als Mitglied des DIN-NABau „Erdbeben, Sonderfragen“ (seit 2000 als stellvertretender Obmann) zeichnet er für die Baunormung in deutschen Erdbebengebieten mitverantwortlich. Die aktuellen Festlegungen zu den seismischen Einwirkungen in DIN 4149:2005 bzw. E DIN EN 1998-1/NA sind auf die Grundlagenarbeiten des EDAC zurückzuführen. Weitere Forschungslinien des EDAC beinhalten seismische Standortbewertungen und standortspezifische Einwirkungsmodelle auf Basis messtechnischer Erkundungsmethoden, großräumige Gefährdungs- und Risikoanalysen, probabilistische Schadensprognosen auf Basis simulierter Ereignisbibliotheken, die Bewertung der Verletzbarkeit von typisierten Bestandsbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren und Entwicklung der dazu erforderlichen Hilfsmittel (Software-Lösungen). Sie können in Projektberichten und Publikationen sowie den vertiefenden Erläuterungen der Internet-Präsentation (www.edac.biz) nachvollzogen werden.

2.3 HafenCity Universität Hamburg (HCU)

Das Teilvorhaben „Untersuchung der seismischen Antwort erdverlegter Infrastrukturen durch numerische und experimentelle Untersuchungen als integraler Bestandteil einer proaktiven Ingenieuranalyse“ wurde an der HafenCity Universität (HCU) im Bereich Technisches Infrastrukturmanagement des Bauingenieurwesens unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich durchgeführt. Dieser Forschungsbereich existiert an der HCU seit September 2016. Die Themen im Bereich der Interaktion Rohrleitung-Boden sind dabei in einem Forschungsfeld zusammengefasst, das Prof. Weidlich schon seit rd. 15 Jahren begleitet. Mit seiner Berufung wurde dieses Forschungsfeld von Prof. Weidlich an der HafenCity Universität etabliert und verstärkt weiterverfolgt. Alle grundlegenden und besonderen Einwirkungen auf Netzinfrastrukturen werden behandelt und werden auch teilweise zum Lehrstoff für die Studierenden (z. B. in den Kursen „Leitungsbau“, „Energie-Infrastruktur“ und „Bauverfahren für Transformation und Sanierung“). Diese Verzahnung zwischen Forschung und Lehre wurde auch im durchgeführten Projekt umgesetzt.

Ein stetiger Abgleich aktueller Entwicklungen und Belange der unterschiedlichen Rohrleitungsbranchen wird durch die Gremienarbeit von Prof. Weidlich sichergestellt. Hier sind vorrangig folgende Aktivitäten zu nennen: Mitarbeit in der Arbeitsgruppe CEN/TC 107/WG 13 “Preinsulated district heating pipe systems - Design and installation” der EN 13941, etc. Gleichzeitig wird im Bereich Einwirkungen auf Netzinfrastrukturen weiter geforscht.

2.4 Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak)

Das ifak - Institut für Automation und Kommunikation e. V. - ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung und zugleich An-Institut der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Es besteht seit 1991 mit 52 Beschäftigten in den Fachbereichen Elektrotechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik, Informatik und Umweltingenieurwesen. Das Geschäftsfeld „Wasser und Energie“ arbeitet seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Automatisierung und der Entwicklung von Simulationssoftware für Anlagen der Abwasserreinigung in kommunalen und industriellen Anwendungen und gehört zu den weltweit führenden Arbeitsgruppen auf dem Gebiet der Modellierung von Abwassersystemen.

Die Mitarbeiter des Geschäftsfelds „Wasser und Energie“ sind durch ein enges, internationales Kontaktnetzwerk und die Mitgliedschaft und aktive Mitarbeit in zahlreichen Fachgremien (u. a. DWA-Arbeitsgruppe ES2.4 „Integrale Abflusssteuerung“; IWA-IAHR-Arbeitsgruppe „Real time control“; DWA-KA13 „Automatisierung von Kläranlagen“; VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik) in der Fachwelt vernetzt. Themen sind u. a.: Entwicklung komplexer Simulationssysteme im Abwasserbereich, Entwicklung von Planungswerkzeugen für städtische Infrastrukturen, Forschungsarbeiten zur Nutzung der Simulation in der ingenieurtechnischen Praxis, Modellbildung und Simulation von Systemen im Abwasserbereich (z. B. Kanalnetz, Kläranlage, Schlammbehandlung, Gewässer, Algenbecken), Modellierung und Simulation von Klärschlammprozessen und Simulation des Abwassermanagements in industriellen Anwendungen (Chemische Industrie, Automobilbau, Stahlindustrie). Das ifak hat ein offenes und leicht erweiterbares System zur dynamischen Simulation von Abwassersystemen (SIMBA#) entwickelt, baut dieses kontinuierlich aus und vermarktet es über Partner international.

3 Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der Zielsetzung, eine Methodik zur Abschätzung von potentiellen Schäden im Erdbebenfall für bestehende kritische bodenverlegte Infrastruktur zu entwickeln, waren in der Projektlaufzeit von 36 Monaten die sieben in der Antragstellung skizzierten Arbeitspakete umzusetzen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Arbeitspakete und Zuordnung der Verantwortlichkeiten

	Inhalt/ Zielstellung	Federführung
AP 1	Gefährdung und Einwirkungskenngrößen	EDAC
AP 2	Datenerhebung und Datenstrukturierung	IAB
AP 3	Detailsimulation und Experiment	HCU
AP 4	Verletzbarkeit, Interaktions- und Schadenspotentiale	EDAC
AP 5	Simulations-Tools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung	ifak
AP 6	Handlungsempfehlungen zur Schadensminderung	IAB
AP 7	Evaluation des Simulations-Tools	HCU

Die spezifische Verantwortlichkeit der Arbeitspakete ist Tabelle 1 zu entnehmen. Aufgrund des interdisziplinären Ansatzes und der vorliegenden Fach- und Methodenkompetenz der Verbundpartner und nicht zuletzt zur Gewinnung von Synergieeffekten wurde die Beteiligung aller Partner an den Arbeitspaketen vorgesehen.

Die Verbundkoordination wurde durch das IAB wahrgenommen.

Die Projektlaufzeit war für den Zeitraum vom 01.02.2020 bis 31.01.2023 bewilligt.

Im Verlauf des Projektes gab es auf Grund der starken Einschränkungen durch die COVID19-Maßnahmen, welche ab dem Frühjahr 2020 zum Tragen kamen, Probleme mit der Datenerhebung bei den Versorgungsunternehmen vor Ort (AP 2). Da diese Daten grundlegend bei der Modellentwicklung, im Software Tool und den praktischen Versuchen im Versuchsstand waren, waren auch die nachfolgenden Arbeitspakete 3 bis 7 betroffen. Somit war schon in diesem Projektstadium von einer veränderten Abfolge der Bearbeitung auszugehen und eine Konzentration in 2021 und weiter verteilt, bis 2022/23, anzustreben.

Die notwendigen Änderungen im Ablauf des Projektes wurden schon frühzeitig, im August 2020, beim Projektträger angesprochen. Im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung manifestierte sich die Notwendigkeit der Verschiebung der Arbeitspakete, um eine ineinandergreifende interdisziplinäre Durchführung des Projektes durch die Verbundpartner zu ermöglichen.

Nach Beratung und Abstimmung im Projektteam wurde im Juli 2022 eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung, mit umfangreicher Begründung zu den Änderungen in der Bearbeitungsabfolge der einzelnen Arbeitspakete, beim Projektträger beantragt.

Die beantragten Verlängerungszeiträume für die einzelnen Partner stellen sich (nach vorheriger Abstimmung im Verbund) wie folgt dar:

- EDAC: Verlängerung der Laufzeit für 5 Monate bis einschließlich Juni 2023
- ifak: Verlängerung der Laufzeit für 5 Monate bis einschließlich Juni 2023
- HCU: Verlängerung der Laufzeit für 3 Monate bis einschließlich April 2023
- IAB: Verlängerung der Laufzeit für 3 Monate bis einschließlich April 2023.

Die kostenneutrale Laufzeitverlängerung wurde im Oktober 2022, entsprechend der durch die einzelnen Projektpartner beantragten Zeiträume, vom Projektträger bewilligt. Somit wurde die erforderliche Verlagerung der Arbeitsaufgaben gewährleistet; das Projekt konnte in allen Arbeitspaketen erfolgreich zum Abschluss gebracht werden.

4 Wesentliche Ergebnisse

Das wesentliche Ziel des Vorhabens konnte mit der Entwicklung und Umsetzung einer Methodik zur Abschätzung von potenziellen Schäden im Erdbebenfall für bestehende erdverlegte Infrastruktur erfolgreich umgesetzt werden. Dabei werden die in Abwasser-, Wasser- und Gasleitungsnetzen verwendeten Rohrtypen systematisiert, ihre Schadensanfälligkeit mittels Verletzbarkeitsklassen und -funktionen gekennzeichnet und in ausgewählten Testgebieten Schadenspotenziale im Rahmen von unterschiedlichen Ereignisszenarien quantifiziert.

Die in Deutschland erdbebengefährdeten Regionen/Gebiete werden identifiziert und Einwirkungsgrößen für die Abschätzung des Risikopotenzials erdverlegter (ver- und entsorgungsrelevanter) Rohrleitungsnetze bereitgestellt. Gefährdungskarten für die deutsche Erdbebenaunormung werden als Bewertungs- und für die durchgeführten Gefährdungsanalysen als Vergleichsmaßstab herangezogen.

Die Gefährdung erdverlegter Leitungen resultiert im Wesentlichen aus den Bodenbewegungen fortschreitender Erdbebenwellen und infolge permanenter Verschiebungsdifferenzen bzw. Setzungen, die aus tektonischen, bis zur Oberfläche vordringenden Vorgängen bzw. dem Versagen des Baugrunds (Verflüssigungseffekte) hervorgerufen werden können. Die Abschätzung der standortbezogenen Einwirkungen zur Bestimmung des Schädigungspotenzials wird anhand validierter Bodenbewegungsmodelle vorgenommen.

Von den für die deutschen Erdbebengebiete verfügbaren Stationen werden alle Erdbebenregistrierungen abgerufen, in digitaler Form transformiert und entsprechend ausgewertet. Die online verfügbaren Daten der deutschen und europäischen Messnetze wurden vorhabenkonform genutzt, um einerseits publizierte Bodenbewegungsmodelle in Abhängigkeit von den unterschiedlichen geologischen Untergrundverhältnissen zu validieren bzw. andererseits die regionalen Besonderheiten der Erdbebenausbreitung in verschiedenen Zielregionen herauszuarbeiten. Die Überprüfung der Erdbeben und ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeiten ermöglichen datenbasierte Einschätzungen, inwieweit für die Rohrleitungen Maßnahmen des *Early Warning* bzw. auch des *Rapid Loss Assessment* zur Anwendung gebracht werden können.

Um auch extreme Szenarien mit sehr großen Wiederholungsperioden zu berücksichtigen und über die für die nachweisrelevanten Bodenbewegungen (PGV, PGD) verfügen zu können, wurden probabilistische seismische Gefährdungsanalysen für das gesamte Bundesgebiet neu durchgeführt.

Dabei war es erforderlich, Ergebnisse in Form der makroseismischen Intensität vorzulegen. Sie gestattet den Bezug zur historisch dokumentierten Erdbebentätigkeit und zu den beobachteten Erdbebenwirkungen.

Die Intensität bietet aber auch die Grundlage zur Abschätzung der Bodenbewegungsparameter über sogenannte Konversionsbeziehungen. Bodenbewegungsparameter sind für die Schädigung erdverlegter Rohrleitungen relevant, werden aber durch die Baunormung nicht bereitgestellt bzw. stehen in den erforderlichen Bodenbewegungsmodellen nicht zur Verfügung. Entsprechende Auswertungen wurden auf Grundlage der italienischen Datenbank von Starkbebenregistrierungen ITACA vorgenommen.

Auf der Grundlage aktueller Gefährdungsanalysen werden Szenarien für unterschiedliche Wiederkehrperioden begründet, die Beanspruchungsgrößen für die Zustandsbewertung der Infrastruktur ermittelt und Parameter zur standortspezifischen Anpassung der Bodenbewegungen bereitgestellt. Die Verletzbarkeitsbewertung wird nach der EMS-98 für typische Netzstrukturen, Rohrmaterialien und -komponenten vorgenommen. In diesem Kontext ist die Entwicklung eines Klassifikationsschemas der Rohrleitungstypen nach Verletzbarkeitsklassen hervorzuheben, das dem Vorbild der EMS-98 konzeptionell und in den Elementen zur Kennzeichnung der Streubereiche folgt.

Die Tabelle der Verletzbarkeitsklassen wurde für die wesentlichen Rohrleitungstypen (Material, Durchmesser) aus weltweiten Schadensanalysen abgeleitet. Die musterhafte Anwendung erfolgte für die Bestandsdaten der Testgebiete Albstadt und Köln.

Im Projekt wurden von mikroskaligen Bewertungen der Rohrmaterialien und Rohr-Boden-Systeme (FEM-Simulation, Experimente) bis hin zur makroskaligen Betrachtung der Leitungsnetzstruktur Untersuchungen durchgeführt. Mit dem im Projekt entwickelten Simulationswerkzeug können proaktiv die vorhandene Gefährdung bewertet und Maßnahmen zur Verringerung der Verletzbarkeit von erdverlegten Versorgungssystemen in ihrer Effizienz überprüft werden.

Die auf den Auswertungen von Erdbebenschäden basierenden Verletzbarkeitsfunktionen wurden aufbereitet und mit den Funktionen für die Verletzbarkeitsklassen abgeglichen. Die Funktionen geben in der vorliegenden Form die Reparaturrate (RR) bezogen auf eine jeweils vereinheitlichte Länge der Rohrleitung (z. B. 1 km) in Abhängigkeit von den durch die Gefährdungsanalysen berechneten bzw. aus Konversionsbeziehungen abgeleiteten Kenngrößen der maximalen Bodenbewegung (PGA, PGV) und Intensität an.

In Detailsimulationen und Experimenten wurden Untersuchungen zur Kennzeichnung der Schadensvorgänge und Wirkmechanismen durchgeführt. Sie bilden die Grundlage, um die Vertrauenswürdigkeit der analytisch prognostizierten, verformungsabhängigen Schädigungsgrade unterschiedlicher, für das Zielgebiet repräsentative Rohrleitungstypen begründen und diese in Verletzbarkeitsfunktionen überführen zu können. Ergebnisse werden anhand der in der Literatur verfügbaren, aus Schadensbeobachtungen weltweiter Starkbeben abgeleiteten (d. h. empirischen) Funktionen gespiegelt.

Der gewählte Ansatz ermöglicht die Übertragung des gewählten methodischen Ansatzes auf weitere Rohrleitungstypen und im Vorhaben konkret die Implementation in die Simulationstools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung.

Mit den im Projekt erhobenen Angaben zu den verschiedenen Rohrleitungsnetzen können in den Erdbebenregionen Deutschlands auch Worst-Case-Szenarien ausgewertet werden. Für den Anwendungsbezug konnte ein wesentliches Projektziel mit der Einbindung der Kooperationspartner und der Übernahme der Daten zum Abwasser-, Trinkwasser- und Gasnetz erreicht werden. Diese wurden exemplarisch für das Test- bzw. Untersuchungsgebiet Albstadt aufbereitet, die Anwendung der Verletzbarkeitstabelle auf die Bestandsdaten wurde vorgestellt. Gezeigt wurde, wie in den Szenarien auch eine synoptische Betrachtung vorgenommen werden kann.

Die Kennzeichnung der Rohrleitungstypen nach Verletzbarkeitsklassen wurde für das Simulationsprogramm SIMBA# als taugliche Grundlage getestet und in dessen modulare Struktur aufgenommen.

Implementiert wurden neben den Versorgungsnetzen u. a. die Zonierung der Untergrundklassen in Albstadt (Tailfingen und Onstmettingen) sowie die Zuordnung der einwirkungserhöhenden Bodenfaktoren sowie Rasterdaten für PGV und PGA für Deutschland mit Wiederkehrperioden von 1000 und 2500 Jahren. Weitere Datenebenen zur Kennzeichnung der tektonischen Situation und Herdlagen in der Umgebung der Testgebiete bzw. standortspezifischen Variation der Einwirkungen können interaktiv integriert und zur Situationsbeurteilung herangezogen werden.

Im wissenschaftlichen Bericht (Teil II) werden das jeweilige methodische Vorgehen, die Interaktionen zwischen den Projektpartnern und die erreichten Ergebnisse im Detail gewürdigt. Die Abschnitte übernehmen die Nummerierung der einzelnen Arbeitspakete; die beteiligten Einrichtungen werden in ihrer Autorenschaft und den Textbeiträgen ausgewiesen.

Nach Abschluss des Projektes ZUVERSICHT werden auf der Website des EDAC (<https://edac.biz/projekte/zuversicht>) wesentliche, von den Verbundpartnern gemeinsam erarbeitete Projektergebnisse zur Verfügung gestellt und im Weiteren auch gepflegt. Zudem wird ein Tool zur interaktiven Bewertung der seismischen Gefährdungssituation und der zu erwartenden Schädigung verschiedener Typen erdverlegter Rohrleitungen im Erdbebenfall angeboten.

Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen

Akronym: **ZUVERSICHT**



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Schlussbericht Teil II (eingehende Darstellung)

30.10.2023

Förderkennzeichen:	03G0886A-D
Projektlaufzeit:	01.02.2020 – 30.06.2023
Projektträger:	Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH
Zuwendungsempfänger:	IAB-Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) HafenCity Universität Hamburg, Professur Technisches Infrastrukturmanagement (HCU) Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak)

Das Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die inhaltliche Verantwortung dieser Veröffentlichung liegt bei den durch die beteiligten Einrichtungen benannten Projektleitern.

Verbundpartner



Verbundkoordinator:

**IAB-Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gemeinnützige GmbH**

Über der Nonnenwiese 1

99428 Weimar

Projektleitung: Dipl.-Ing. (FH) Torsten Schmidt

t.schmidt@iab-weimar.de

www.iab-weimar.de

Kennzeichen: 03G0886A



Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

**Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbe-
bensschäden (EDAC)**

Marienstraße 13B

99423 Weimar

Projektleitung: Dr.-Ing. Jochen Schwarz

schwarz@uni-weimar.de

www.edac.biz

Kennzeichen: 03G0886B



HafenCity Universität Hamburg (HCU)

**Professur Technisches Infrastrukturmanage-
ment**

Henning-Voscherau-Platz 1

20457 Hamburg

Projektleitung: Prof. Ingo Weidlich

ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

www.hcu-hamburg.de

Kennzeichen: 03G0886C



**Institut für Automation und Kommunikation
e.V. (ifak)**

Werner-Heisenberg-Straße 1

39106 Magdeburg

Projektleitung: Dr. Jens Alex

jens.alex@ifak.eu

www.ifak.eu

Kennzeichen: 03G0886D

Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung von potenziellen Schäden im Erdbebenfall für bestehende erdverlegte Infrastruktur. Dabei wurden die in Abwasser-, Wasser- und Gasleitungsnetzen verwendeten Rohrtypen systematisiert, ihre Schadensanfälligkeit mittels Verletzbarkeitsklassen und -funktionen gekennzeichnet und in ausgewählten Testgebieten Schadenspotenziale im Rahmen von unterschiedlichen Ereignisszenarien quantifiziert.

Im Vorhaben wurden die in Deutschland erdbebengefährdeten Regionen/Gebiete identifiziert und Einwirkungsgrößen für die Abschätzung des Risikopotenzials erdverlegter (ver- und entsorgungsrelevanter) Rohrleitungsnetze bereitgestellt. Gefährdungskarten für die deutsche Erdbebenbaunormung wurden als Bewertungs- und für die durchgeführten Gefährdungsanalysen als Vergleichsmaßstab herangezogen.

Die Gefährdung erdverlegter Leitungen resultiert im Wesentlichen aus den Bodenbewegungen fortschreitender Erdbebenwellen und infolge permanenter Verschiebungsdifferenzen bzw. Setzungen, die aus tektonischen, bis zur Oberfläche vordringenden Vorgängen bzw. dem Versagen des Baugrunds (Verflüssigungseffekte) hervorgerufen werden können. Die Abschätzung der standortbezogenen Einwirkungen zur Bestimmung des Schädigungspotenzials wird anhand validierter Bodenbewegungsmodelle vorgenommen.

Von den für die deutschen Erdbebengebiete verfügbaren Stationen wurden alle Erdbebenregistrierungen abgerufen, in digitaler Form transformiert und entsprechend ausgewertet. Die online verfügbaren Daten der deutschen und europäischen Messnetze wurden vorhabenkonform genutzt, um einerseits publizierte Bodenbewegungsmodelle in Abhängigkeit von den unterschiedlichen geologischen Untergrundverhältnissen zu validieren bzw. andererseits die regionalen Besonderheiten der Erdbebenausbreitung in verschiedenen Zielregionen herauszuarbeiten. Die Überprüfung der Erdbeben und ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeiten ermöglichten datenbasierte Einschätzungen, inwieweit für die Rohrleitungen Maßnahmen des *Earthquake Early Warning* bzw. auch des *Rapid Loss Assessment* zur Anwendung gebracht werden können.

Um auch extreme Szenarien mit sehr großen Wiederholungsperioden zu berücksichtigen und um überhaupt über die für die nachweisrelevanten Bodenbewegungen (PGV, PGD) verfügen zu können, wurden probabilistische seismische Gefährdungsanalysen (PSGA) für das gesamte Bundesgebiet neu durchgeführt. Dabei war es erforderlich, Ergebnisse in Form der makroseismischen Intensität vorzulegen. Sie gestattet nicht nur den Bezug zur historisch dokumentierten Erdbeben­tätigkeit und zu den beobachteten Erdbebenwirkungen, sondern bietet vielmehr auch den Einstieg, um über sogenannte Konversionsbeziehungen die Bodenbewegungsparameter abzuschätzen, die für die Schädigung erdverlegter Rohrleitungen relevant sind, durch die Baunormung nicht bereitgestellt werden bzw. in den erforderlichen Bodenbewegungsmodellen nicht zur Verfügung stehen. Entsprechende Auswertungen wurden auf Grundlage der italienischen Datenbank von Starkbebenregistrierungen ITACA vorgenommen. Auf der Grundlage aktueller Gefährdungsanalysen wurden Szenarien für unterschiedliche Wiederkehrperioden begründet, die Beanspruchungsgrößen für die Zustandsbewertung der Infrastruktur ermittelt und Parameter zur standortspezifischen Anpassung der Bodenbewegungen bereitgestellt. Die Verletzbarkeitsbewertung wurde nach der EMS-98 für typische Netzstrukturen, Rohrmaterialien und -komponenten vorgenommen. In diesem Kontext ist die Entwicklung eines Klassifikationsschemas der Rohrleitungstypen nach Verletzbarkeitsklassen hervorzuheben, das dem Vorbild der EMS-98 konzeptionell und in den Elementen zur Kennzeichnung der Streubereiche folgt.

Die Tabelle der Verletzbarkeitsklassen wurde für die wesentlichen Rohrleitungstypen (Material, Durchmesser) aus weltweiten Schadensanalysen abgeleitet. Die musterhafte Anwendung erfolgte für die Bestandsdaten der Testgebiete Albstadt und Köln.

Im Projekt wurden von mikroskaligen Bewertungen der Rohrmaterialien und Rohr-Boden-Systeme (FEM-Simulation, Experimente) bis hin zur makroskaligen Betrachtung der Leitungsnetzstruktur Untersuchungen durchgeführt. Mit den im Projekt entwickelten Simulationswerkzeugen können proaktiv die vorhandene Gefährdung bewertet und Maßnahmen zur Verringerung der Verletzbarkeit von erdverlegten Versorgungssystemen in ihrer Effizienz überprüft werden. Die auf den Auswertungen von Erdbebenschäden basierenden *Fragility Functions* wurden aufbereitet und mit den Funktionen für die Verletzbarkeitsklassen abgeglichen. Die Funktionen geben in der vorliegenden Form die Reparaturrate (RR) bezogen auf eine jeweils vereinheitlichte Länge der Rohrleitung (z. B. 1 km) in Abhängigkeit von den durch die Gefährdungsanalysen berechneten bzw. aus Konversionsbeziehungen abgeleiteten Kenngrößen der maximalen Bodenbewegung (PGA, PGV) und Intensität an.

In Detailsimulationen und Experimenten wurden Untersuchungen zur Kennzeichnung der Schadensvorgänge und Wirkmechanismen durchgeführt. Sie bildeten die Grundlage, um die Vertrauenswürdigkeit der analytisch prognostizierten, verformungsabhängigen Schädigungsgrade unterschiedlicher, für das Zielgebiet repräsentativer Rohrleitungstypen begründen und diese in Verletzbarkeitsfunktionen überführen zu können. Ergebnisse wurden anhand der in der Literatur verfügbaren, aus Schadensbeobachtungen weltweiter Starkbeben abgeleiteten (d. h. empirischen) Funktionen gespiegelt.

Der gewählte Ansatz ermöglichte die Übertragung des gewählten methodischen Ansatzes auf weitere Rohrleitungstypen und im Vorhaben konkret die Implementation in die Simulationstools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung.

Mit den im Projekt erhobenen Angaben zu den verschiedenen Rohrleitungsnetzen können in den Erdbebenregionen Deutschlands auch Worst-Case-Szenarien ausgewertet werden. Für den Anwendungsbezug konnte ein wesentliches Projektziel mit der Einbindung der Kooperationspartner und der Übernahme der Daten zum Abwasser-, Trinkwasser- und Gasnetz erreicht werden. Diese wurden exemplarisch für das Test- bzw. Untersuchungsgebiet Albstadt aufbereitet, die Anwendung der Verletzbarkeitstabelle auf die Bestandsdaten wurde vorgestellt. Gezeigt wurde, wie in den Szenarien auch eine synoptische Betrachtung vorgenommen werden kann.

Die Kennzeichnung der Rohrleitungstypen nach Verletzbarkeitsklassen wurde für das Simulationsprogramm SIMBA# als taugliche Grundlage getestet und in dessen modulare Struktur aufgenommen. Implementiert wurden neben den Versorgungsnetzen u. a. die Zonierung der Untergrundklassen in Albstadt (Tailfingen und Onstmettingen) sowie die Zuordnung der einwirkungserhöhenden Bodenfaktoren sowie Rasterdaten (GeoTIFF) für PGV und PGA für Deutschland mit Wiederkehrperioden von 1000 und 2500 Jahren (Daten und QGIS-Arbeitsbereich). Weitere Datenebenen zur Kennzeichnung der tektonischen Situation und Herdlagen in der Umgebung der Testgebiete bzw. standortspezifischen Variation der Einwirkungen können interaktiv integriert und zur Situationsbeurteilung herangezogen werden.

Autoren

Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB)

Teilvorhaben: Untersuchung von Schäden erdverlegter Infrastruktur und Entwicklung von Entscheidungshilfen

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC)

Teilvorhaben: Gefährdungskonsistente Beanspruchungs- und Risikoszenarien für erdverlegte Infrastrukturnetze und -komponenten

Bericht:

Dr.-Ing. Jochen Schwarz

Dr.-Ing. Silke Beinersdorf

Bearbeiter im Vorhaben:

Dipl.-Ing. Christian Kaufmann

Dr.-Ing. Christian Golbs

Dipl.-Ing. Tobias Langhammer

HafenCity Universität Hamburg (HCU), Professur Technisches Infrastrukturmanagement

Teilvorhaben: Untersuchung der seismischen Antwort erdverlegter Infrastrukturen durch numerische und experimentelle Untersuchungen als integraler Bestandteil einer proaktiven Ingenieuranalyse

Dr.-Ing. Gersena Banushi

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak)

Teilvorhaben: Simulationsmodelle und -werkzeuge für die Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur

Dr. Jens Alex

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1 Gefährdung und Einwirkungskenngrößen (EDAC)	8
1.1 Gefährdungskarten	8
1.2 Auswertung von Erdbebenregistrierungen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten	10
1.3 Schüttergebietskarten (SHAKEMaps)	12
1.4 Schadensrelevante Bodenbewegungen	13
2 Datenerhebung und Datenstrukturierung (IAB, EDAC).....	15
2.1 Recherche.....	15
2.1.1 Seismische Einwirkungen	15
2.1.2 Effekte der Bodenverflüssigung	15
2.1.2.1 Gefährdungspotenziale	15
2.1.2.2 Mechanismen und Phänomene.....	16
2.1.2.3 Beispiele aus Task-Force-Einsätzen	17
2.1.3 Erdbebenitätigkeit in Deutschland und Europa	18
2.1.3.1 Erdbebenkatalog für Deutschland und angrenzende Gebiete	18
2.1.3.2 Erdbeben in Europa.....	21
2.1.4 Zusammenführung der Daten für die Schadensprognose und Risikobewertung	21
2.1.5 Rohrleitungsschäden	23
2.1.5.1 Verformung der Rohrleitung infolge der Erdbebenwellen	23
2.1.5.2 Bleibende Verformungen infolge Scherung (<i>fault crossing</i>).....	23
2.1.5.3 Schadensarten an Rohrleitungen.....	24
2.1.5.4 Beispiele für Rohrleitungsschäden.....	25
2.2 Datenerhebung	25
2.3 Datenstrukturierung.....	26
3 Detailsimulation und Experiment (HCU, IAB)	29
3.1 Experimentelle Untersuchungen	29
3.1.1 Numerische Modellbildung des Rohr-Boden-Systems	29
3.1.1.1 Das diskrete Beam on Winkler Foundation Modell (BWFM).....	29
3.1.1.2 Das Kontinuumsmodell	30
3.1.2 Rohr-Boden-System	32
3.2 Numerische Analysen	34
3.2.1 Modellbildung.....	34
3.2.1.1 Numerische Modellbildung des Rohrmaterials	34
3.2.1.2 Modellbildung für den Boden und die Rohr-Boden Interaktion	35
3.2.2 Vergleich experimenteller und numerischer Ergebnisse.....	38

3.2.2.1	Verformungsantwort der PE-HD-Rohrleitung	38
3.2.2.2	Verformungsantwort der PP-Rohrleitung.....	40
4	Verletzbarkeit und Schadenspotenziale (EDAC)	42
4.1	Typisierung und Ableitung von Verletzbarkeitsklassen	42
4.2	Verletzbarkeitsfunktionen	44
4.3	Reparaturraten	44
4.4	Aufbereitung der relevanten Datenebenen im Testgebiet.....	45
4.4.1	Historische Erdbeben und potentielle Erdbebenherde	45
4.4.2	Lokale Untergrundeffekte.....	45
4.4.3	Transformation der Rohrleitungsnetze in Verletzbarkeitsklassen	45
4.5	Szenarien	46
4.5.1	Übersicht zur Vielfalt der Vorgehensweisen	46
4.5.2	Ergebnisse für das Testgebiet Albstadt.....	46
5	Simulationstools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung (ifak, EDAC)	48
5.1	Anforderungen und Lastenheft.....	48
5.2	Offline-Werkzeug zur Verletzbarkeitsanalyse und Maßnahmenplan Erstellung ..	49
5.2.1	Simulationsansätze zur Auswirkung von Erdbebenschäden auf Netze - Abwasser	49
5.2.2	Simulationsansätze zur Auswirkung von Erdbebenschäden auf Netze – Abwasser und Trinkwasser in Druckrohrleitungen.....	50
5.2.3	GIS basierte Arbeit.....	51
5.2.4	Vorbereitung und Unterstützung zur Arbeit mit realen Anwendungsstädten	51
5.2.5	Erweiterung der Bedienoberfläche zur projektinternen Darstellung Schadens- und Gefährdungs- und Erdbeben relevanter georeferenzierter Daten	52
5.2.6	Erweiterung der Simulationsmodelle um Attribute zur Verwaltung von Material- und Verletzlichkeitsinformationen.....	53
5.2.7	Erweiterung der Bedienoberfläche um Interaktionsfunktionen, um Schadensereignisse, Maßnahmen zur Schadenseingrenzung und zur Netzrehabilitierung aufzuprägen	55
5.2.8	Erweiterungen der Bedienoberfläche um weitere spezialisierte Visualisierungsfunktionen	56
5.3	Online-Werkzeug zur Schadensanalyse und Planung von Maßnahmen.....	59
5.4	Bereitstellung von Datenebenen	61
5.5	Tools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung	61
6	Handlungsempfehlungen zur Schadensminderung (IAB, ifak, EDAC)	63
6.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	63
6.1.1	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts	63
6.1.2	Erdbebennormung	63
6.2	Datenerhebung und Schadensdiagnostik	64
6.2.1	Trinkwasser	64
6.2.2	Abwasser	65

6.3	Handlungsempfehlungen in Erdbebengebieten.....	67
6.3.1	Planung und Ausführung.....	67
6.3.2	Überprüfungsmaßnahmen im Erdbebenfall.....	69
6.3.3	Nutzung von Simulationsmodellen	71
7	Evaluation des Simulationstools (HCU, IAB, ifak, EDAC)	73
7.1	Anwenderworkshop.....	73
7.2	Vorlesung an der HCU	74
7.3	Meeting mit der Stadtverwaltung Albstadt am 15.05.2023.....	76
7.4	Fallbeispiel Egion	77
8	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	78
9	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit (alle Partner).....	80
10	Voraussichtlicher Nutzen.....	83
11	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	85
12	Veröffentlichung der Ergebnisse	86
13	Literatur- und Quellenverzeichnis	87
14	Anlagen.....	95
14.1	Anlage 1 Verflüssigungseffekte und Rohrleitungsschäden (IAB, EDAC)	96
14.2	Anlage 2 Verletzbarkeitsfunktionen (HCU)	100
	Inhaltsverzeichnis	100
	Abbildungsverzeichnis	101
	Tabellenverzeichnis	102
14.2.1	Stand der Technik bei empirischen Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen	103
14.2.2	Vorhandene Instrumente zur Analyse von Wassernetzen	107
14.2.3	Analytische Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen.....	109
14.2.3.1	Segmentierte Rohrleitungen	110
14.2.3.2	Kontinuierliche Rohrleitungen	113
	Literaturverzeichnis.....	127

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Ergebnisse der Gefährdungsanalysen für die Erdbebenbaunormung und das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8; dargestellt werden die Mittelwerte der Spektralbeschleunigung im Plateaubereich für den Fels (Quelle: Grünthal <i>et al.</i> , 2018a) 8	8
Bild 2:	Auswertung der italienischen Datenbank von Starkbebenregistrierungen ITACA zur Kennzeichnung des Zusammenhanges zwischen den maximalen horizontalen Bodenbewegungsgrößen von Geschwindigkeit (HPGV) und Verschiebung (HPGD)10	10
Bild 3:	P- und S-Wellengeschwindigkeiten von Erdbeben in den Testgebieten11	11
Bild 4:	Zeitsynchrone Darstellung der Erdbebenausbreitung und der von Schütterwirkungen unterschiedlicher Intensität betroffenen Gebiete (Option 3: Generierung von SHAKEMaps), hier am Beispiel des Erdbebenherdes des 2004 Waldkirch-Erdbebens; entnommen aus Schwarz <i>et al.</i> , (2020)13	13
Bild 5:	Aus verschiedenen Bodenbewegungsmodellen abgeleitete Szenarien mit vorgegebenen Zielkenngrößen; hier PGV = 40 cm/s, weicher Untergrund (soft soil); 84 %-Quantile ($\varepsilon = 1$); entnommen aus Schwarz <i>et al.</i> (2023a)14	14
Bild 6:	Dokumentierte Bodenverflüssigungseffekte während der Task-Force-Einsätze in Venezuela 1997 (a-c) und in der Türkei 1999 (d-f); entnommen aus Schwarz und Maiwald (2014)17	17
Bild 7:	Seismische Ereignisse für den Zeitraum von 800 bis 2013 nach Schwarz <i>et al.</i> (2019b); Kennzeichnung der in Teil C von EK DAG enthaltenen Erdbeben; gesonderte Kennzeichnung des stärksten tektonischen Ereignisses im Erdbebenkatalog: 1911 Ebingen mit einer Lokalbebenmagnitude M_L 6.1.....18	18
Bild 8:	Rezente Erdbebenaktivität von 2002 - 2019 (tektonische und induzierte Ereignisse, Lokalbebenmagnitude M_L) überlagert mit der Gefährdungskarte von DIN EN 1998-1/NA mit dem Spektralwert $S_{aP,R}$ als Referenzkenngröße der Erdbebengefährdung in der baupraktischen Anwendung (Quelle: EDAC, überarbeitet durch S. Beinersdorf, 2023)19	19
Bild 9:	Histogramm der rezenten Erdbebenaktivität (beschränkt auf tektonische Ereignisse) von 2002 bis 2019 geordnet nach der Lokalbebenmagnitude (M_L); (entnommen aus Beinersdorf <i>et al.</i> , 2021).....20	20
Bild 10:	Erdbeben in Europa im Zeitraum 2010 bis 03/2023 nach EMSC [entnommen aus Schwarz u. Fehling (2023); Karte: S. Beinersdorf, 2023]21	21
Bild 11:	Aufbereitung der Elemente der <i>World Stress Map</i> (Heidbach <i>et al.</i> , 2016) für deutsche und angrenzende Erdbebengebiete (aufbereitet: EDAC; S. Beinersdorf, 2023)22	22
Bild 12:	Einordnung der für das Testgebiet Albstadt aufbereiteten Rohrleitungsnetze (hier: Abwasser) in die erdbebenrelevanten Datenebenen im GIS-Format; entnommen aus Schwarz <i>et al.</i> (2023a).....22	22
Bild 13:	Rohrleitungsverformungen infolge Erdbebenwellen (Kuhlmann, 2004)23	23
Bild 14:	Für Rohrleitungsschäden im Erdbebenfall maßgebliche Einwirkungsmechanismen; [entnommen aus Abschlusspräsentation zum Projekt (Bearbeiter: G. Banushi, HCU)].....24	24
Bild 15:	Kategorien der Rohrleitungsattribute.....27	27
Bild 16:	Beam on Winkler Foundation Modell (BWFM)30	30
Bild 17:	Kontinuumsmodell im Programmsystem ABAQUS31	31

Bild 18:	Testrohre: a) Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) b) Polypropylen (PP)	32
Bild 19:	Blick auf den Versuchsaufbau mit Darstellung der Scherebene	33
Bild 20:	Schematische Darstellung der Positionierung der Dehnungsmessstreifen am IAB für: a) PE-Rohrleitung; b) PP-Rohrleitung.....	34
Bild 21:	Spannungs-Dehnungskurven für PE und PP	35
Bild 22:	Finite-Elemente-Simulation zur Analyse der Boden-Rohr-Wechselwirkung: a) 2D-Planardehnungsanalyse für die laterale und axiale Richtung; b) 3D-Kontinuumsanalyse für die axiale Richtung.....	36
Bild 23:	Axiale Bodenreaktion pro Längeneinheit der Rohrleitung, ermittelt aus der FE-Analyse und berechnet mit ASCE (1984) Guideline mit $\varphi=35^\circ$, PE (H/D=6,5) und PP (H/D=7,3)	37
Bild 24:	Laterale Bodenreaktion pro Längeneinheit der Rohrleitung, ermittelt aus der FE-Analyse und berechnet mit ASCE (1984) Guideline mit $\varphi=35^\circ$, PE (H/D=6,5) und PP (H/D=7,3)	37
Bild 25:	Verformung der PE-HD-Rohrleitung für eine Scherverschiebung von $\Delta f = 0,3$ m	38
Bild 26:	Maximale Längsdehnung als Funktion der Lateralverschiebung für die PE-HD-Rohrleitung	38
Bild 27:	Längsdehnungsverteilung der PE-HD-Rohrleitung.....	39
Bild 28:	Ovalisierung der PE-HD-Rohrleitung	39
Bild 29:	Verformung der PP-Rohrleitung bei einer Lateralverschiebung von $\Delta f = 0,3$ m	40
Bild 30:	Maximale Dehnung in Abhängigkeit von der Scherverschiebung für die PP-Rohrleitung	40
Bild 31:	Längsdehnungsverteilung der PP-Rohrleitung	41
Bild 32:	Ovalisierung der PP-Rohrleitung.....	41
Bild 33:	Verletzbarkeitsfunktionen von Rohrleitungssystemen (in Verbindung zu Tabelle 6).....	44
Bild 34:	Ergebnisse der Szenarien für das Abwassernetz von Albstadt und die zugeordneten Verletzbarkeitsklassen; jeweils dargestellt für die Reparaturrate und simulierten Schadensfälle (Schwarz <i>et al.</i> , 2023a)	47
Bild 35:	Modell eines Trinkwassernetzes	50
Bild 36:	Beispielkarten, links Erdbebengefährdung in Deutschland, rechts Bodenklassen in Albstadt.....	53
Bild 37:	Standardmaterialien	54
Bild 38:	Blockparameter für eine Trinkwasserleitung.....	54
Bild 39:	Blockparameter für eine Abwasserleitung	55
Bild 40:	Interaktionsoptionen.....	56
Bild 41:	Parameterdialoge zur Netzvisualisierung	56
Bild 42:	Neue Color-Maps.....	58
Bild 43:	Beispiel mit Animation der Drücke und Flüsse in einem Trinkwassernetz	58
Bild 44:	Konzept Onlinewerkzeug	59
Bild 45:	Tagesgangschätzer	60
Bild 46:	Internetangebot zur Abschätzung der Reparaturraten für erdverlegte Rohrleitungen in deutschen Erdbebengebieten; hier: Testgebiet Albstadt/Abwassernetz (Parameter der Einwirkung sind aufgeführt)	62
Bild 47:	Systemanalyse erdverlegter Infrastrukturnetze	69
Bild 48:	Einladung zum Workshop im Forschungsprojekt ZUVERSICHT	73
Bild 49:	Folienbeispiel aus der Vorlesung	75

Bild 50:	Fragebogen für das Programmsystem	75
Bild 51:	Beispielhafte Einzelantwort aus einem Fragebogen.....	76
Bild 52:	Gliederung und Aspekte der Projektpräsentation	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Tabellenauszug der Spezialfälle nicht existenter Kombinationen von Rohrleitungsattributen	28
Tabelle 2:	Tabellenauszug weiterer Spezialfälle	28
Tabelle 3:	Parameter des Rohr-Boden-Systems im Versuch	33
Tabelle 4:	Eingangsparameter für die Rohrmaterialien	35
Tabelle 5:	Bodenkennwerte	35
Tabelle 6:	Verletzbarkeitsklassen von Rohrleitungssystemen in Anlehnung an EMS-98; entnommen aus Schwarz <i>et al.</i> (2023a).....	43
Tabelle 7:	Animierbare Eigenschaften	57
Tabelle A 1:	Charakteristische Verflüssigungsphänomene und Beispiele (Schwarz & Maiwald, 2014)	96
Tabelle A 2:	Übersicht von Rohrleitungsschäden durch Erdbeben (Kuhlmann, 2004).....	97
Tabelle A 3:	Rohrleitungsschäden infolge seismischer Belastung.....	99

Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Asbest Concrete</i> (Asbestzement/Faserzement)
BWFM	<i>Beam on Winkler Foundation Modell</i>
CI	<i>Concrete Iron</i> (Stahlbeton)
DI	<i>Ductile Iron</i> (Duktileisen/Duktilguss)
DSGA	Deterministische Seismische Gefährdungsanalyse
EKDAG	Erdbebenkatalog für Deutschland und angrenzende Gebiete - erweiterter Ahorner-Katalog (2019)
EMS-98	<i>European Macroseismic Scale</i> (Europäische Makroseismische Skala) 1998
EMSC-Datenbank	Seismische Datenbank des <i>Euro-Mediterranean Seismological Centre</i>
GfK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HPGD	Maximalwert der horizontalen Komponente der Bodenverschiebung in m, cm
HPGV	Maximalwert der horizontalen Komponente der Bodengeschwindigkeit in m/s, cm/s
ITACA	<i>Italian ACcelerometric Archive</i> - italienische Datenbank für Starkbebenregistrierungen
L-Welle	Love-Welle
PE	Polyethylen
PE-HD/HDPE	Polyethylen hoher Dichte (<i>HD= High Density</i>)
PE-MD/MDPE	Polyethylen mittlerer Dichte (<i>MD= Medium Density</i>)
PGA	Maximalwert der Bodenbeschleunigung (<i>Peak Ground Acceleration</i>) in m/s ² , cm/s ² , g oder %g
PGD	Maximalwert der Bodenverschiebung (<i>Peak Ground Velocity</i>) in m, cm
PGV	Maximalwert der Bodengeschwindigkeit (<i>Peak Ground Displacement</i>) in m/s, cm/s
PP	Polypropylen
PSGA	Probabilistische Seismische Gefährdungsanalyse
PVC	Polyvinylchlorid
PVC-U	Polyvinylchlorid (<i>U=unplasticized/weichmacherfrei</i>)
P-Welle	Primär-Welle
QGIS	freies Open-Source-Geographisches-Informationssystem
RR	Reparaturrate
R-Welle	Rayleigh-Welle
S-Welle	Sekundär-Welle
SZGRF	Seismologisches Zentralobservatorium Gräfenberg

1 Gefährdung und Einwirkungskenngrößen (EDAC)

1.1 Gefährdungskarten

Im Vorhaben sollten die in Deutschland erdbebengefährdeten Regionen/Gebiete identifiziert und Einwirkungsgrößen für die Abschätzung des Risikopotenzials erdverlegter (ver- und ent-sorgungsrelevanter) Rohrleitungsnetze bereitgestellt werden. Hier boten Gefährdungskarten für die deutsche Erdbebenbaunormung den Bewertungs- und für die durchgeführten Gefährdungsanalysen überaus geeigneten Vergleichsmaßstab.

Mit den aktuellen probabilistischen Gefährdungsanalysen des GeoForschungsZentrums (Grünthal *et al.*, 2018a, b), die auch in das Nationale Anwendungsdokument zum EC 8 (DIN EN 1998-1/NA: 2021-07) Aufnahme gefunden haben, stehen spektrale und (daraus ableitbare) maximale Bodenbeschleunigungen für unterschiedliche Wiederkehrperioden zur Verfügung. Die Kenngröße der Gefährdung ist die Spektralbeschleunigung im Plateau, wobei der Referenzwert sich hier auf eine gemittelte Beschleunigung zwischen den Perioden 0.10, 0.15 und 0.20 s bezieht. Mit diesen Karten sind auch die in Deutschland gefährdeten Erdbebengebiete gekennzeichnet (vgl. Bild 1).

Die Ergebnisse der aktuellen probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen führen durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten zu zusätzlich erhöhten Gefährdungsprognosen. Wie die Karte für die 84 %-Fraktile (Bild 1b) bei Wiederkehrperiode von $T_R = 475$ Jahre zeigt, sind einerseits größere Gebiete als seismisch exponiert zu betrachten, andererseits müssen bei der Bewertung der Sicherheit erhöhte Einwirkungen berücksichtigt werden, die bei Vorgabe der Mittelwertbasis bereits Reserven höherer Wiederkehrperioden aufbrauchen (vgl. Bild 1c).

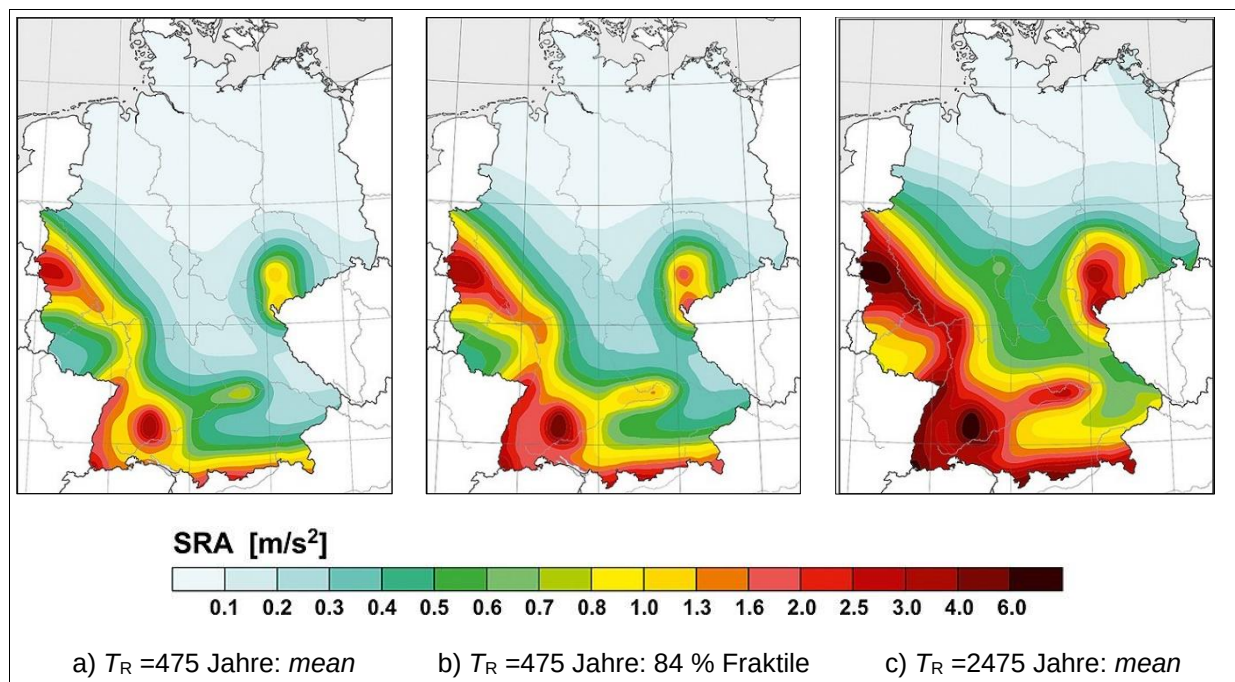


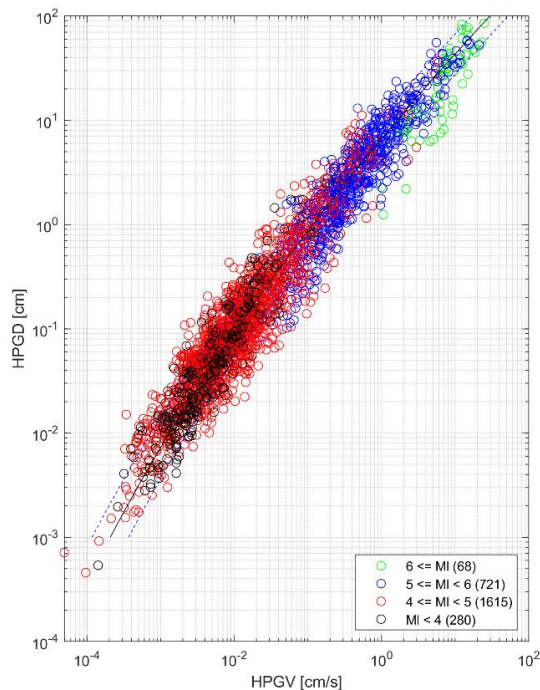
Bild 1: Ergebnisse der Gefährdungsanalysen für die Erdbebenbaunormung und das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8; dargestellt werden die Mittelwerte der Spektralbeschleunigung im Plateaubereich für den Fels (Quelle: Grünthal *et al.*, 2018a)

Die wesentliche Feststellung ist, dass die Gefährdungs- und damit auch die Reaktions- bzw. Beanspruchungsgrößen einerseits durch die Wiederkehrperiode T_R , andererseits durch die gewählte (bzw. als maßgeblich betrachtete) Fraktile gekennzeichnet sind. Die Wahl der Fraktile ermöglicht die Berücksichtigung von Unsicherheiten. Die Karten verdeutlichen, welche Einwirkungen als Erwartungswert zu betrachten und welche von geringerer Wahrscheinlichkeit, aber eben nicht auszuschließen sind. Diese Erkenntnisse zu Erdbebeneinwirkungen sind auch bei der Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur Charakterisierung von Schäden und bei der Ableitung von technischen Entscheidungshilfen zu berücksichtigen. Insofern wird vorgeschlagen, die Wiederkehrperiode aus den Nachweisen (Normen) abzuleiten und bei den Unsicherheiten grundsätzlich den Mittelwert (Mean), den Median (50 %-Fraktile) und den Streubereich (Standardabweichung, vorzugsweise 84 %-Fraktile) zu betrachten. Um auch extreme Szenarien mit sehr großen Wiederholungsperioden zu berücksichtigen und um überhaupt über die nachweisrelevanten Bodenbewegungen (PGV, PGD) verfügen zu können, wurden probabilistische seismische Gefährdungsanalysen (PSGA) mit dem Simulationsprogramm PSSAEL (Rosenhauer, 1999) für das gesamte Bundesgebiet neu durchgeführt. Dabei war es erforderlich, Ergebnisse in Form der makroseismischen Intensität vorzulegen. Sie gestattet nicht nur den Bezug zur historisch dokumentierten Erdbebentätigkeit und zu den beobachteten Erdbebenwirkungen (*severity of ground shaking on the basis of observed effects* nach EMS-98), sondern bietet vielmehr auch den Einstieg, um über sogenannte *Ground Motion Intensity Conversion Equations GMICE* die Bodenbewegungsparameter abzuschätzen, die für die Schädigung erdverlegter Rohrleitungen relevant sind, durch die (beschleunigungsfokussierte) Baunormung nicht bereitgestellt werden bzw. auch in den erforderlichen Bodenbewegungsmodellen nicht zur Verfügung stehen.

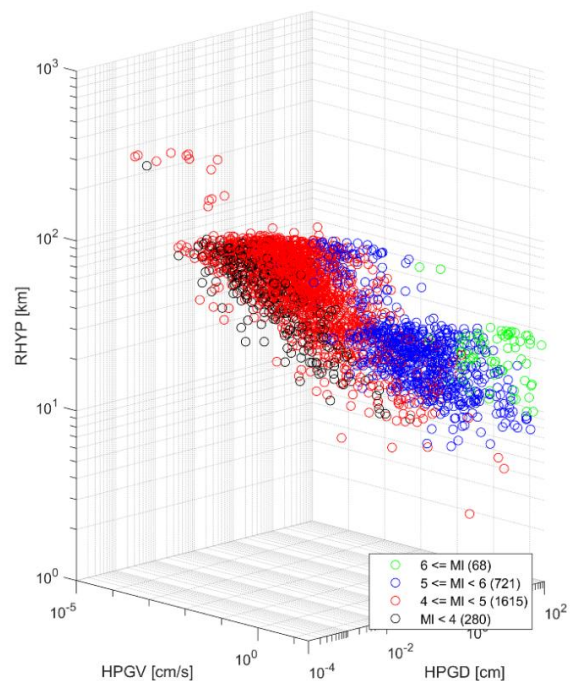
Zum Ende der Projektlaufzeit wurde deshalb entschieden, entsprechende Auswertungen auf Grundlage der italienischen Datenbank von Starkbebenregistrierungen ITACA (siehe u. a. Felicetta *et al.*, 2023) selbst vorzunehmen. Bild 2 vermittelt einen Eindruck vom Datenumfang (Anzahl in Klammern) und den zwischen den maximalen horizontalen Bodenbewegungsgrößen von Geschwindigkeit (HPGV) und Verschiebung (HPGD) bestehenden Zusammenhänge in Abhängigkeit von Erdbebenstärke (Magnitude) und Hypozentralentfernung. Die Einfärbung nach Magnitudenbereichen bestätigt einerseits plausibel, dass mit der Stärke auch die Bodenbewegung deutlich größer wird, andererseits standortnahe Ereignisse geringerer Magnitude schadensrelevante Ereignissenkenngrößen generiert werden können.

Die mit den probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen simulierten Erdbebenbibliotheken stehen für die Testgebiete (Albstadt, Köln) für unterschiedliche Wiederholungsperioden bzw. Intensitäten zur Verfügung. Sie beinhalten für jedes Beben die Koordinaten des Epizentrums und konkrete Erdbebenparameter (Magnitude, Herdtiefe, Entfernung zum Standort). Diese Parameter ermöglichen die Berechnung von Erdbebenkenngrößen (maximale Bodenbewegungsamplituden PGA, PGV) bzw. zugehörigen Spektren. Die Berechnungsgrundlagen können anhand der Publikationen des EDAC (u. a. Schwarz *et al.*, 2015; 2019a) und der kartenmäßigen Umsetzung bei Beinersdorf (2016) nachvollzogen werden.

Ergänzend dazu wurden die mit DIN EN 1998/NA: 2021-07 kompatiblen, untergrundspezifischen Zeitverläufe und Spektren (hier u. a. für die in den Testgebieten vorherrschenden Untergrundbedingungen) bereitgestellt. In diesem Kontext ist auch auf die Publikationen von Beinersdorf *et al.* (2021) und Schwarz *et al.* (2021a) in der *Bautechnik* hinzuweisen.



a) Einfluss der Magnitude mit Darstellung der Streubreiten



b) Spezifikation nach der Entfernung zum Erdbebenherd

Bild 2: Auswertung der italienischen Datenbank von Starkbebenregistrierungen ITACA zur Kennzeichnung des Zusammenhanges zwischen den maximalen horizontalen Bodenbewegungsgrößen von Geschwindigkeit (HPGV) und Verschiebung (HPGD)

1.2 Auswertung von Erdbebenregistrierungen und Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Von den für die deutschen Erdbebengebiete verfügbaren Stationen werden alle Erdbebenregistrierungen abgerufen, in digitaler Form transformiert und entsprechend ausgewertet. Die online verfügbaren Daten der deutschen und europäischen Messnetze wurden vorhabenkonform genutzt, um einerseits publizierte Bodenbewegungsmodelle in Abhängigkeit von den unterschiedlichen geologischen Untergrundverhältnissen zu validieren bzw. andererseits die regionalen Besonderheiten der Erdbebenausbreitung in verschiedenen Zielregionen herauszuarbeiten.

Die Überprüfung der Erdbeben und ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeiten ermöglicht datenbasierte Einschätzungen, inwieweit für die Rohrleitungen Maßnahmen des *Earthquake Early Warning*, des *Rapid Response Estimate* bzw. auch des *Rapid Loss Assessment* zur Anwendung gebracht werden können.

In einer umfangreichen Studie von Schwarz *et al.* (2020) wurde in vier großräumigen Testregionen überprüft, wie sich die Wellen und ihre Einsatzzeiten an den Stationen ausgehend vom Erdbebenherd in deutschen Erdbebengebieten darstellen. Es wurden unterschiedliche Datensätze ausgewertet sowie Ausbreitungsgeschwindigkeiten und damit auch belastbare Eintreffenszeiten der Primärwellen (kurz: P-Wellen) und Sekundärwellen (Scher- oder Transversalwellen; kurz: S-Wellen), die vornehmlich für die Schädigung der Bauwerke und Rohrleitungen verantwortlich sind, ermittelt (vgl. Bild 3).

Die *International Federation of Digital Seismograph Networks* gibt (FDSN, 2020) einen Überblick über Erdbeben-Datenzentren, welche für die interessierte Öffentlichkeit gemessene Erdbeben- und Daten auf Basis der von ObsPy (2020) beschriebenen Schnittstellen zur Verfügung stellen. Die Erdbeben-Datenzentren liefern aggregierte Mess- und Metadaten von Betreibern seismischer Messnetze.

Als Datenbasis für diesen Bericht dienen Erdbeben-Ereigniszeiten und Erdbebenwellen-Eintreffenszeiten mitteleuropäischer Erdbeben. Die Quellen, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes für Erdbebenwellen-Eintreffenszeiten für Europa zum Download über den „fdsnws-event“ Web-Service zur Verfügung stehen, sind in alphabetischer Reihenfolge:

- European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC, 2020);
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, 2020);
- International Seismological Centre (ISC, 2020);
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI, 2020).

Mit Hilfe der online verfügbaren aktuellen Erdbebenkataloge der genannten Datenzentren wurden die Erdbebenwellen-Eintreffenszeiten der letzten 20 Jahre im Gebiet Mitteleuropa ausgewertet. Da zum Teil mehr Erdbeben- und Daten zur Verfügung stehen, als über die Schnittstellen in einem Schritt heruntergeladen werden können, und die kleineren Beben weniger relevant sind, wurde sich für das Gesamtgebiet auf die größten Ereignisse der jeweiligen Erdbebenkataloge beschränkt.

Aus diesen Daten für 128.849 Erdbeben wurde eine Liste mit 921.283 Eintreffenszeiten von Erdbebenwellen an 2.664 Messgeräten von 27 Messnetzbetreibern erstellt.

Es stellte sich die Frage, wie die ausgewerteten Erdbeben-Ausbreitungsgeschwindigkeiten und somit auch die lokalen Eintreffenszeitpunkte (Wellenankunftszeiten) im Rahmen des Vorhabens genutzt werden können.

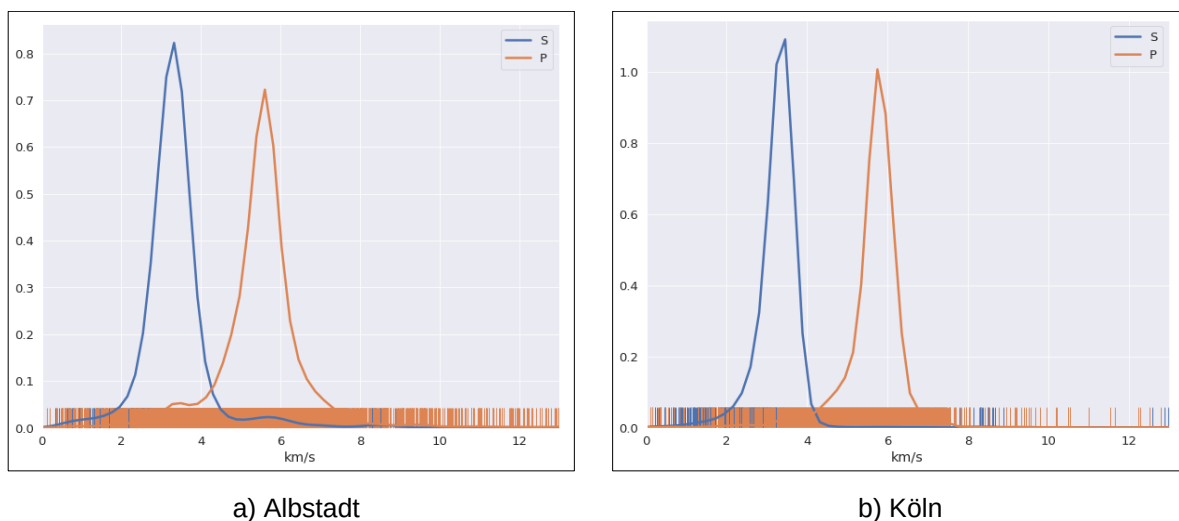


Bild 3: P- und S-Wellengeschwindigkeiten von Erdbeben in den Testgebieten

Im Bericht von Schwarz *et al.* (2020) werden folgende Optionen gesehen und erläutert:

Option 1: Zeitsynchrone Darstellung der Wellenausbreitung von P- und S-Wellen

Durch die zeitsynchrone Darstellung der Wellenausbreitung der P- und S-Wellen kann gezeigt werden, an welchen Zeitpunkten die Erdbeben von den verfügbaren seismischen Stationsnetzen und ihren einzelnen Stationen registriert werden.

Auf dieser Grundlage lässt sich veranschaulichen, welche Stationen von den Erdbeben ausgehend von einem vorgegebenen Szenarium plausible Messdaten liefern sollten.

Option 2: Ausbreitung der Erdbeben-Bodenbewegungskenngrößen

Anhand der Ausbreitung der Erdbebenwellen mit Angabe der konkreten Boden-Bewegungskenngrößen (PGA, PGV, PGD) kann gezeigt werden, zu welchen Zeitpunkten mit welchen Schädigungen an Bauwerken in der Infrastruktur zu rechnen ist.

Sofern es gelingt, für diese Infrastruktur (z. B. verschiedene Rohrleitungsnetze) die Datenebenen im GIS-Format aufzubereiten, lässt sich zeigen, zu welchen Zeitpunkten eines Bebens in Abhängigkeit von der Stärke und dem Erdbebenherd welche Bodenbewegungen die Rohrleitungen beanspruchen.

Im Ergebnis dieser Auswertungen kann für die maßgeblichen (oberen und unteren) Magnituden ermittelt werden, welche Vorwarnzeiten in Abhängigkeit von Entfernung zum Erdbebenherd theoretisch zur Verfügung stehen. Durch die in den entwickelten Tools implementierte zeitsynchrone Darstellung der Wellenausbreitung der P- und S-Wellen kann visualisiert werden, an welchen Zeitpunkten die Erdbeben von den verfügbaren seismischen Stationsnetzen und ihren einzelnen Stationen registriert werden.

Option 3: Generierung von Schüttergebietskarten (ShakeMaps)

Mit dem vorliegenden Bearbeitungsstand ist es nun möglich, zeitabhängig *ShakeMaps* zu generieren und darzustellen, zu welcher Zeit welche Schütterwirkung welche Rohrleitungsabstände bzw. Segmente beanspruchen. Für die verschiedenen Erdbebenszenarien lässt sich zeigen, welche Rohrleitungen maximalen bzw. in welcher Wiederholung kritischen Intensitäten ausgesetzt sein können.

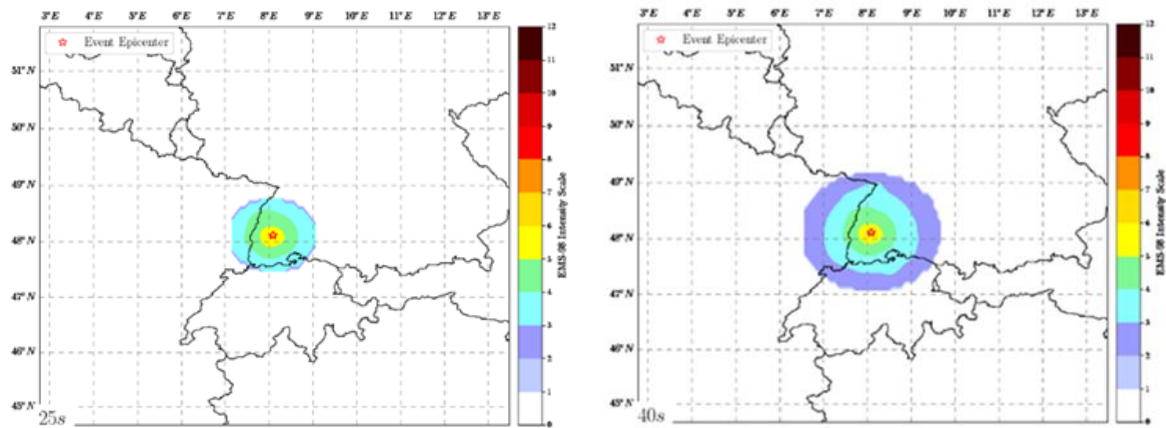
1.3 Schüttergebietskarten (SHAKEMaps)

Um den Einstieg in die Schadenspotenziale im Erdbebenfall (vgl. Abschnitt 4) flächendeckend herstellen zu können, wurde besonderes Augenmerk auf die Weiterentwicklung der methodischen Grundlagen und Tools zur Generierung von Schüttergebietskarten (SHAKEMaps) gelegt. Mit ihnen können die maximalen Bodenbewegungen bzw. zu erwartenden Intensitäten infolge unterschiedlicher Erdbebenszenarien gekennzeichnet werden.

Mit dem zum Vorhabensende erreichten Bearbeitungsstand ist es möglich, zeitabhängige SHAKEMaps zu generieren und somit darzustellen, zu welcher Zeit (nach Ereigniseintritt) welche Schütterwirkungen welche Rohrleitungsabstände bzw. Segmente beanspruchen.

Durch Einfärbung der sich ausbreitenden Erdbebenwellen mit konkreten Boden-Bewegungskenngrößen (PGA, PGV, PGD) kann gezeigt werden, an welchen Standorten mit welchem Schädigungsgrad der Infrastruktur zu rechnen ist (Bild 4).

Für die im GIS-Format aufbereitete Infrastruktur lässt sich zudem zeigen, zu welchen Zeitpunkten eines Bebens welche Bodenbewegungen die Rohrleitungen beanspruchen.



a) Zeitpunkt $t = 25$ s

b) Zeitpunkt $t = 40$ s

Bild 4: Zeitsynchrone Darstellung der Erdbebenausbreitung und der von Schütterwirkungen unterschiedlicher Intensität betroffenen Gebiete (Option 3: Generierung von SHAKEMaps), hier am Beispiel des Erdbebenherdes des 2004 Waldkirch-Erdbebens; entnommen aus Schwarz *et al.*, (2020)

Hinweis: Die Farbgebung der Intensitäten (als Kenngröße der Schütterwirkungen) wird vom USGS (Wald *et al.*, 1999) übernommen.

Mit den entwickelten Verletzbarkeitsfunktionen (siehe Abschnitt 4) können für die jeweiligen Typen der Rohrleitungen Schadensbewertungen prognostiziert bzw. das Erreichen (bzw. Ausbleiben) kritischer Schadenszustände begründet werden.

Eine wesentliche Zielstellung des Beitrages war, die im Vorhaben entwickelte Vorgehensweise auf weitere europäische Testgebiete (hier mit induzierter Seismizität) zu übertragen und im Rahmen der 3. ECEES-Tagung entsprechende Kontakte anzubahnen. Dies betraf insbesondere die Special Session zum Projekt TURNkey (Towards more Earthquake-resilient Urban Societies through a Multi-sensor-based Information System enabling Earthquake Forecasting, Early Warning and Rapid Response Actions, gefördert im Rahmen von EU Horizon 2020), in dem u. a. Groningen aber auch Aigion/Patras als Testgebiete ausgewählt wurden.

Zu der von Anfang an im Projektantrag geplanten Teilnahme an der Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (04.09 bis 09.09.2023 in Bukarest) wurde ein Beitrag zum Testgebiet mit induzierter Seismizität eingereicht und vorgetragen (Schwarz *et al.*, 2022).

1.4 Schadensrelevante Bodenbewegungen

Die Auswertung der Bodenbewegungsmodelle (in Abhängigkeit von Magnitude und Entfernung) ermöglicht, eine Vielfalt von Erdbebenszenarien zu antizipieren. Für jede Kombination von Magnitude und Entfernung ergibt sich ein charakteristischer Kennwert der Bodenbewegung, sodass es möglich ist, bei Vorgabe von Grenzwerten oder Zielkriterien zu überprüfen, bei welchen solcher Szenarien entsprechende kritische (schadensrelevante) Werte erreicht werden.

Anmerkung: Obwohl in dieser Form nicht gefordert, wurde zum Meilenstein M1.1 ein umfangreicher Zwischenbericht erstellt, um die Ergebnisse und darüber hinausgehende Arbeiten den Projektpartnern zugänglich zu machen und somit auch ihren Einstieg in die Arbeitspakete (hier AP 3: Detailsimulation und Experiment) zu gewährleisten (vgl. Schwarz *et al.*, 2020).

Ergebnispräsentationen erfolgten online zur 20. D-A-CH Tagung (Zürich, September 2021) in den Beiträgen von Kaufmann und Schwarz (2021) sowie Schwarz *et al.* (2021).

Die für die Nachweisführung maßgeblichen Bodenbewegungen in Form von Beschleunigungen und Geschwindigkeiten können vorzugsweise auf Grundlage von sog. Ground Motion Prediction Equations GMPEs (herkömmlich bezeichnet als Abnahmebeziehungen) ermittelt werden.

Die Auswertung der *Intensity Measures* (IM) im Magnituden-Entfernungsraum ermöglicht, eine Vielfalt von Erdbebenszenarien zu antizipieren, die sich in verschiedenen „Oberflächen“ abbilden lassen (vgl. Bild 5). Mit den Magnituden-Entfernungsparametern wird die fette rote Linie nachgezeichnet, die sich aus der durch die Wahl der (kritischen) PGV resultierenden horizontalen Schnittfläche mit den (drei) betrachteten Bodenbewegungsmodellen ergibt.

Wie sich zeigen lässt, stehen die ermittelten Magnitude-Entfernungskombinationen für Szenarien, die sich anhand von Gefährdungsanalysen für die deutschen Erdbebengebiete ableiten lassen. Zur Einordnung: Das Albstadt-Erdbeben vom 3. September 1978 wird in EK DAG (Schwarz *et al.*, 2019) mit Magnituden $M_W = 5,3$ bzw. $M_L = 5,7$ geführt. Die Projektion der Verwerfung ging quasi durch Tailfingen (vgl. Schwarz *et al.*, 2023a, Abb. 3) und kann mit einer Entfernung von 1 bis 2 km angenommen werden.

Als Kennwerte werden Spitzengeschwindigkeiten PGV von 10, 25 bzw. 40 cm/s für höhere Wiederkehrperioden und damit für seltene Starkbebenereignisse zugrunde gelegt. Die schadensrelevanten Bodenbewegungen wurden aus der Datenerhebung und Auswertung von Schadenserdbeben abgeleitet.

Dies wird im Beispiel von Bild 5 für PGV = 40 cm/s; weichen Untergrund (*soft soil*, EC 8, Baugrundklasse C, Scherwellengeschwindigkeit $v_{s,30} = 300$ m/s) erläutert. Auswertungen beziehen sich hier auf die Bodenbewegungsmodelle von Akkar und Bommer (2010) und Bindi *et al.* (2010; 2014).

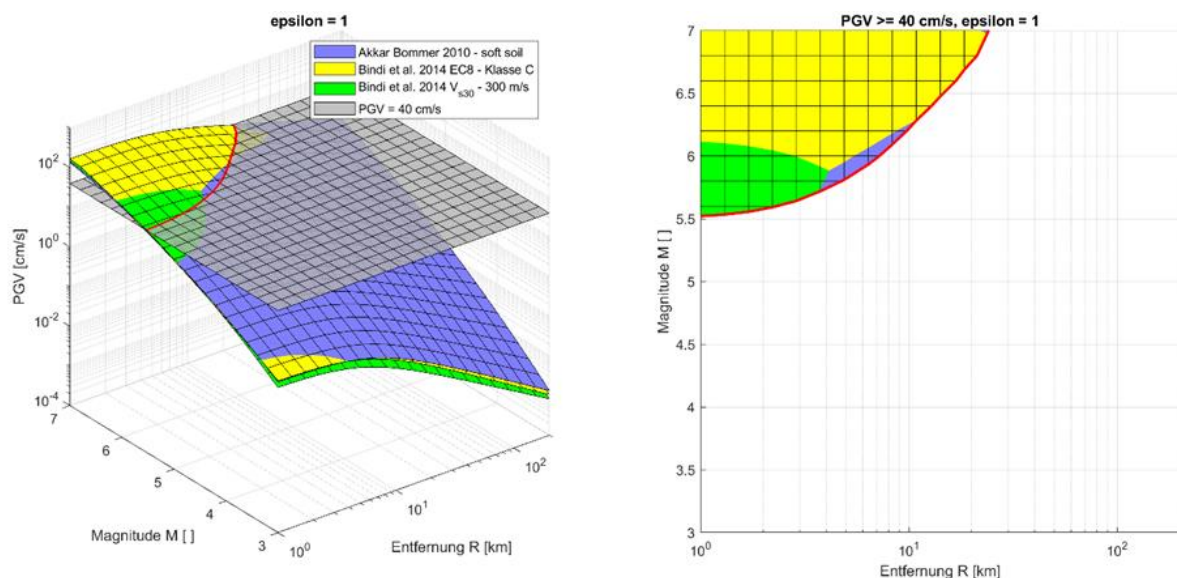


Bild 5: Aus verschiedenen Bodenbewegungsmodellen abgeleitete Szenarien mit vorgegebenen Zielkenngrößen; hier PGV = 40 cm/s, weicher Untergrund (*soft soil*); 84 %-Quantile ($\varepsilon = 1$); entnommen aus Schwarz *et al.* (2023a)

2 Datenerhebung und Datenstrukturierung (IAB, EDAC)

Die Rechercheergebnisse hinsichtlich der Schäden liefern das Bindeglied zwischen Prognose und Beobachtung. Die Bedeutung des Vorhabens besteht darin, dass ausgehend von den Ergebnissen der Recherche zu Ursachen und Auswirkungen von Bodenbewegungen die Planungen für numerische und experimentelle Untersuchungen erfolgen sowie Ansätze für die Entwicklung von Verletzbarkeitsfunktionen erarbeitet werden können. Zudem bieten die Rechercheergebnisse die Datenbasis für das zu entwickelnde Simulationstool.

2.1 Recherche

2.1.1 Seismische Einwirkungen

Erdbeben entstehen, wenn an einer Stelle im Erdinneren (Hypozentrum) mächtige Erdplatten brechen und sich gegeneinander verschieben. Im Extremfall können diese Verschiebungen als Verwerfung bis an die Erdoberflächen reichen. Das Epizentrum liegt direkt senkrecht über dem Hypozentrum an der Erdoberfläche. Die Stärke eines Erdbebens wird mit der Magnitude angegeben, welche aus den aufgezeichneten Amplituden eines Seismographen bestimmt wird. Die Auswirkung eines Erdbebens auf Menschen, Bauten und Umwelt wird als Intensität definiert und ist auch ohne Instrumente zu beobachten. Die Angabe der Intensität bezieht sich dabei immer auf einen bestimmten Ort, sodass ein Erdbeben, je nach Entfernung vom Epizentrum, an verschiedenen Orten unterschiedliche Intensitäten haben kann.

Die unmittelbarsten Auswirkungen von Erdbeben sind die Erdbebenwellen, die sich ausgehend vom Hypozentrum ausbreiten und schließlich die Erdoberfläche erreichen. Man unterscheidet zwischen den Raum- und den Oberflächenwellen, die sich gemäß ihrer Ausbreitungsform und -geschwindigkeit weiter in P-Wellen (Primär- oder Kompressionswellen) und S-Wellen (Sekundär- oder Scherwellen) bzw. in Rayleigh- und Love-Wellen untergliedern lassen (siehe auch 1.2 bzw. Schwarz *et al.*, 2021).

Im Allgemeinen werden die durch Erdbeben verursachten, unterschiedlichen Wellenbewegungen über das Fundament auf ein Bauwerk übertragen. Die sich vom Hypozentrum aus durch den Untergrund bis zum Bauwerksfundament ausbreitende Erschütterung erzeugt eine Beschleunigung des Baugrundes. Dadurch werden eigenfrequenzabhängige Antwortschwingungen im Bauwerk ausgelöst, woraus Beanspruchungen im Bauteil resultieren.

Für die unterirdische Infrastruktur scheint es zunächst sehr einfach, die aus Erdbeben erzeugte Belastung zu beschreiben, da sich Rohre im Vergleich zu Hochbauten als weniger komplex darstellen. Die Tatsache, dass erdverlegte Rohrleitungen allseitig vom Baugrund umgeben sind und somit im direkten Zusammenspiel mit dem Boden stehen, lässt sie bei einer erdbebeninduzierten Erregung nicht frei schwingen. Weiterhin sind unterirdische Bauwerke den verschiedenen Erdbebenwellentypen ausgesetzt.

2.1.2 Effekte der Bodenverflüssigung

2.1.2.1 Gefährdungspotenziale

Die Bodenverflüssigung gehört zu den Phänomenen, die beim Erdbeben Gebäude indirekt durch den Versatz des Baugrunds zur Schädigung bringen können und in der Regel auftreten, wenn starke Bodenbewegungen weichen, nichtbindigen Baugrund zyklisch beanspruchen.

Die Gefährdung resultiert aus dem Anstieg des Porenwasserdrucks und ist somit besonders bei sehr weichem, locker gelagertem Sediment ausgeprägt. Beispiele in Erdbebengebieten verdeutlichen, dass durch die Vernachlässigung der Verflüssigungsgefahr bei der Standortplanung erhebliche Folgeschäden zu verzeichnen sind. Insofern wird auch im Eurocode 8, Teil 5 (DIN EN 1998-5:2006-03) auf dieses Phänomen eingegangen. Dabei wird Wert darauf gelegt, dass Erfahrungswerte einfließen, um die Entscheidung bezüglich der Verflüssigungsgefährdung in grafischen Darstellungen zu vereinfachen.

Die dabei als Stärkeparameter angesetzten Grenzmagnituden lassen erwarten, dass in deutschen Erdbebengebieten nicht mit derartigen Verflüssigungsgefährdungen zu rechnen ist. Dem steht gegenüber, dass 1992 beim Roermond-Erdbeben im herdnahen Bereich Verflüssigungseffekte beobachtet wurden. Die vergleichsweise geringe Magnitude des Bebens war Anlass, die im Eurocode enthaltenen Kriterien kritisch zu überprüfen.

Schwarz und Maiwald (2014) widmen sich den Hintergrundinformationen, die zu den Festlegungen insbesondere in den Anlagen des Eurocodes 8, Teil 5 geführt haben. Wie herausgearbeitet werden kann, sind die aufgenommenen grafischen Darstellungen am Maßstab der Originalquellen vereinfacht wiedergegeben und anhand aktueller Erkenntnisse zu überprüfen. So kann gezeigt werden, dass das Verfahren in sich nicht vollständig konsistent ist, da Referenzkurven und Magnituden-Skalierungsfaktoren aus verschiedenen Auswertungen verwendet werden. Diese Modifikationen haben zur Folge, dass sich für die in Mitteleuropa zu erwartenden Magnituden von Bemessungsbeben – gegenüber den Originalstudien – tendenziell eher optimistische Abschätzungen ergeben und weitergehende Untersuchungen erforderlich sind, um eine Einordnung potenziell betroffener Standorte zu ermöglichen und die Gefährdung realistisch einschätzen zu können.

2.1.2.2 Mechanismen und Phänomene

Unter Bodenverflüssigung ist der Verlust der Tragfähigkeit eines grundwasserführenden Baugrunds unter einer Erschütterungswirkung wie z. B. bei Erdbeben zu verstehen. Dabei wird das Korngerüst kurzzeitig vom Porenwasserdruck getragen, wenn das Porenwasser nicht entweichen kann. Das Korngerüst verliert seine Scherfestigkeit und verdichtet sich. Insbesondere kohäsionslose Lockergesteine, wie gleichförmige feine Sande, neigen zur Verflüssigung unter Erdbebeneinwirkung. Das Verflüssigungsrisiko ist dabei umso größer, je höher der Grundwasserstand ist. Tabelle A 1 in 14.1 (Seite 96) gibt einen Überblick über die charakteristischen Verflüssigungsphänomene und bezieht sich auf die Übersicht von Schwarz und Maiwald (2014).

2.1.2.3 Beispiele aus Task-Force-Einsätzen

Im Rahmen der Einsätze der Deutschen Task-Force Erdbeben konnten verschiedene Verflüssigungseffekte dokumentiert werden. So z. B. nach dem Cariaco (Venezuela)-Erdbeben 1997 (Raschke *et al.*, 1997) direkt in Cariaco (Bild 6a) aber auch in anderen herdfurtheren Regionen, wie z. B. der Stadt Mariguitar an der Südküste des Golfs von Cariaco (Bild 6b). In der Nähe von Chiguana konnte dabei auch ein Lateral spreading beobachtet werden (Bild 6c).



a) Sand boils in Cariaco



b) Vent fractures in Mariguitar



c) Lateral spreading in der Nähe von Chiguana



d) Innenstadt von Adapazeri/Sakaya



e) Verlust der Tragfähigkeit des Bodens in der Innenstadt von Adapazeri/Sakaya



f) Absenkung des Uferbereichs in Gölçük

Bild 6: Dokumentierte Bodenverflüssigungseffekte während der Task-Force-Einsätze in Venezuela 1997 (a-c) und in der Türkei 1999 (d-f); entnommen aus Schwarz und Maiwald (2014)

2.1.3 Erdbeben­­tätigkeit in Deutschland und Europa

2.1.3.1 Erdbebenkatalog für Deutschland und angrenzende Gebiete

Der Katalog EK­­DAG beinhaltet tektonische Erdbeben aus Deutschland und angrenzenden Gebieten. Unter „angrenzend“ ist ein 50 km breiter Gebietsstreifen jenseits der Landesgrenze zu verstehen. Bergbauliche Ereignisse, Sprengungen o. ä. sind nicht erfasst. Entsprechende induzierte Ereignisse werden jedoch in der vom Zentrum für die Ingenieur­­analyse von Erdbebens­­chäden (EDAC) an der Bauhaus-Universität Weimar gepflegten Datenbank geführt (vgl. Bild 7). Der Katalog EK­­DAG stellt den Ausgangspunkt für viele deterministische (DSGA) und probabilistischen seismische Gefährdungsanalysen (PSGA). Für die auf dieser Basis durchgeführten Gefährdungsrechnungen ist die Vollständigkeit hinsichtlich der Lokalmagnituden M_L sowie der im Zuge der Aktualisierung hinzugekommenen Momenten­­magnituden M_W , der konkrete Bezug zu ihrer Bestimmung sowie die Angaben zu den Streubreiten qualitätsbestimmend (vgl. auch Schwarz *et al.*, 2021b).

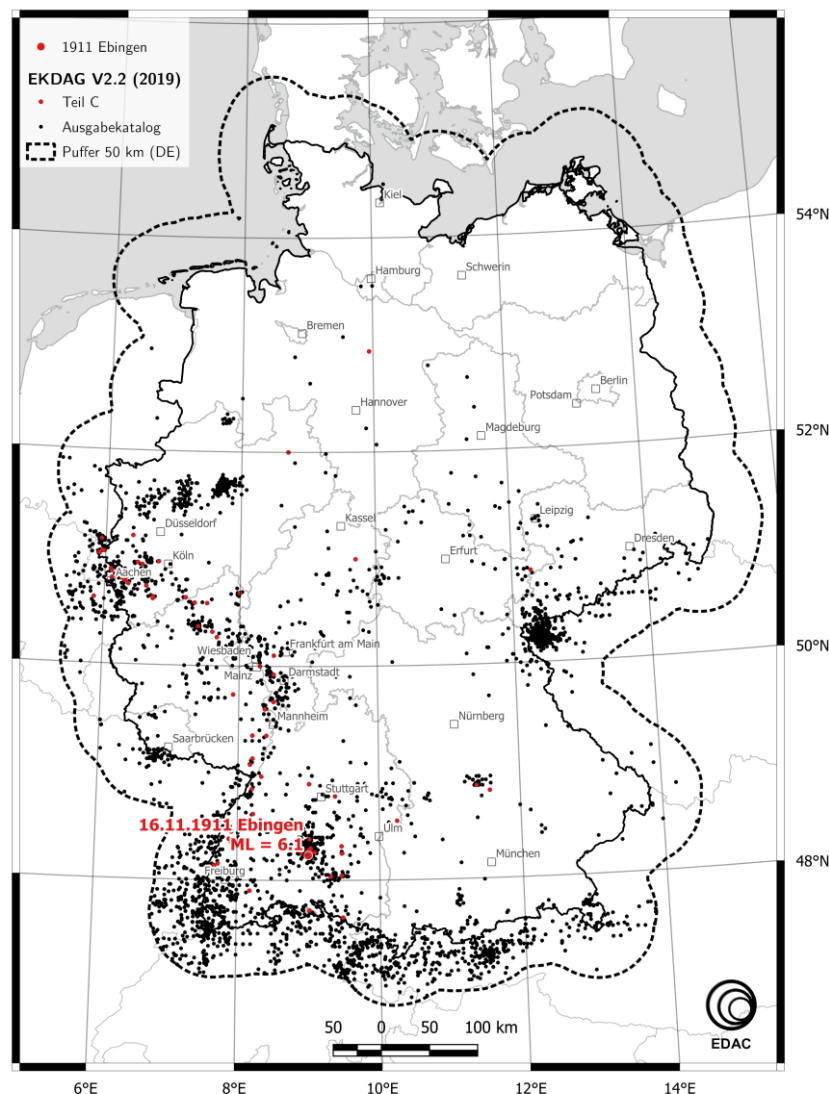


Bild 7: Seismische Ereignisse für den Zeitraum von 800 bis 2013 nach Schwarz *et al.* (2019b); Kennzeichnung der in Teil C von EK­­DAG enthaltenen Erdbeben; gesonderte Kennzeichnung des stärksten tektonischen Ereignisses im Erdbebenkatalog: 1911 Ebingen mit einer Lokalmagnituden M_L 6.1

Im Rahmen des Themenheftes zur Einführung des Nationalen Anhanges zum Eurocode 8 (Bautechnik 11/2021) wird durch Beinersdorf *et al.* (2021) die rezente Erdbeben­­tätigkeit in Deutschland beleuchtet. Bild 8 übernimmt daraus die Karte zur rezenten Erdbeben­­tätigkeit (tektonische und induzierte Ereignisse mit Lokalbeben­­magnituden $M_L \geq 2,0$) auf dem Gebiet Deutschlands der letzten Jahre (beginnend mit 2002 bis einschließlich 2019).

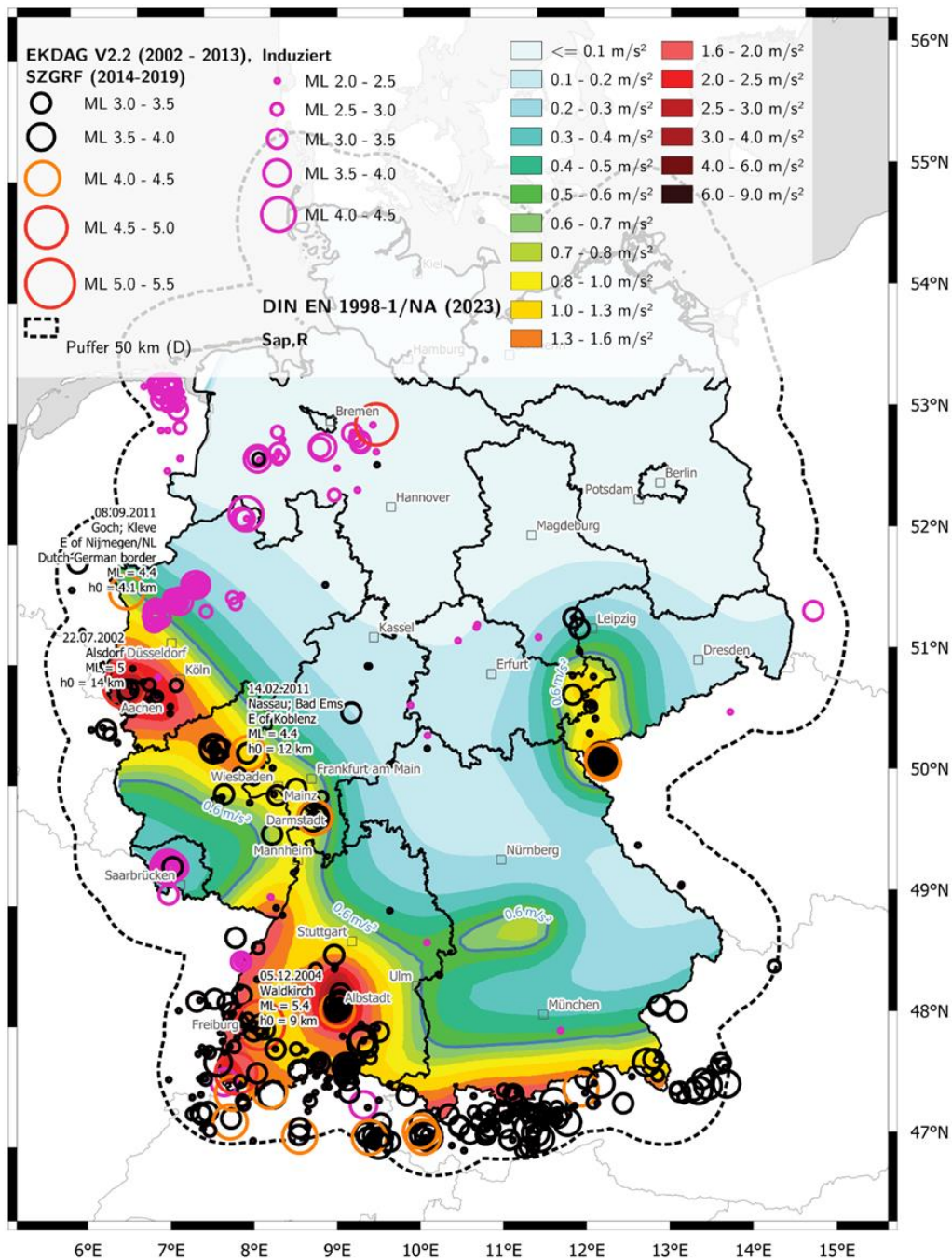


Bild 8: Rezente Erdbeben­­tätigkeit von 2002 - 2019 (tektonische und induzierte Ereignisse, Lokalbeben­­magnitude M_L) überlagert mit der Gefährdungskarte von DIN EN 1998-1/NA mit dem Spektralwert $S_{aP,R}$ als Referenz­­kenng­­röße der Erdbeben­­gefährdung in der baupraktischen Anwendung (Quelle: EDAC, überarbeitet durch S. Beinersdorf, 2023)

Diese werden in Bezug zur DIN EN 1998-1/NA [1] und dem Eingangsparameter der spektralen Antwortbeschleunigung im Plateaubereich $S_{aP,R}$ für felsigen Untergrund (A-R) gesetzt, wobei diese Werte für eine Wiederholungsperiode von 475 Jahre stehen, die mit einer 10 % Überschreitenswahrscheinlichkeit der Kenngröße in 50 Jahren korrespondiert (vgl. auch Bild 1a). Es handelt sich um gemittelte Werte im Plateau des Antwortspektrums und den Mittelwert der streuenden Berechnungsergebnisse (Realisationen) für die Antwortbeschleunigung als interessierender Kenngröße (Mean).

Bild 8 bestätigt zunächst die Seismizität in den Haupterdbebenzonen der Schwäbischen Alb, im Grenzgebiet zur Schweiz und Österreich, dem Rheingraben folgend in nördlicher Richtung bis zur Niederrheinischen Bucht sowie weiter östlich im Vogtland. Seismische Aktivität ist auch außerhalb dieser Gebiete zu verzeichnen. Nicht zuletzt zeigt die Häufung der Erdbeben entlang der Alpen, dass die Erdbebenauslegung in Deutschland Wirkungen aus den Nachbarstaaten zu berücksichtigen hat (vgl. Schwarz und Fehling, 2023).

Anzumerken ist ebenso, dass die (z. B. durch Bergbau) induzierte Erdbebentätigkeit durch DIN EN 1998-1/NA nicht abzudecken ist, und gerade in der jüngeren Vergangenheit wiederholt durch Geotechnologien verursachte Ereignisse zu erheblichen Schäden geführt haben.

In den vergangenen 20 Jahren ist eine eher geringe bis moderate Erdbebentätigkeit zu beobachten. Wie Bild 9 zu entnehmen ist, erreichen nur vier Ereignisse eine Magnitude M_L von 5,0 bzw. 5,5 sowie weitere 26 Ereignisse Magnituden $M_L \geq 4,0$. Am Maßstab der vormaligen Zone 3 als normenrelevant einzuschätzende Ereignisse sind nach dem Albstadt-Erdbeben 1978 bisher nicht mehr aufgetreten.

Bild 9 spiegelt die rezente Erdbebentätigkeit im Zeitraum von 2002 bis 2019 am Histogramm der historischen Erdbebentätigkeit nach Erdbebenkatalog EKDAG (Schwarz *et al.*, 2019b) bzw. Angaben des SZGRF (2019). Hinweise zur Vollständigkeit der schwächeren Erdbeben sind dem zitierten Beitrag von Beinersdorf *et al.* (2021) zu entnehmen.

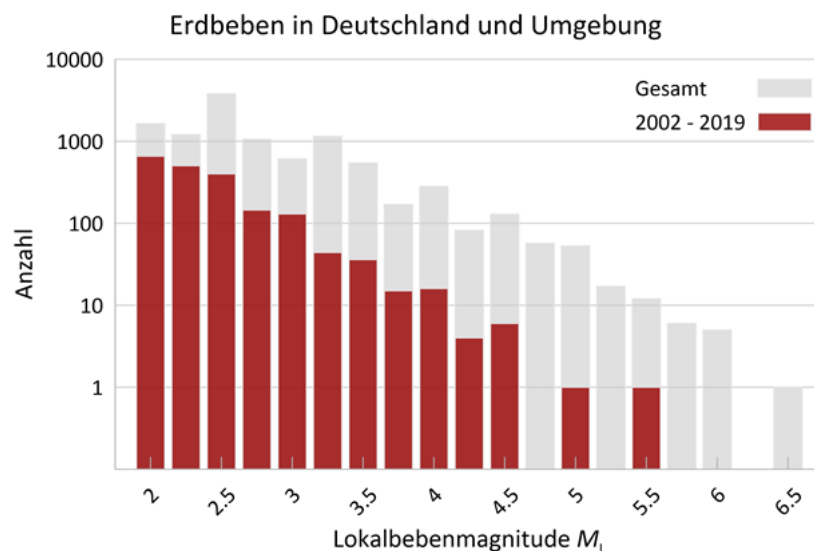


Bild 9: Histogramm der rezenten Erdbebentätigkeit (beschränkt auf tektonische Ereignisse) von 2002 bis 2019 geordnet nach der Lokalbebenmagnitude (M_L); (entnommen aus Beinersdorf *et al.*, 2021)

2.1.3.2 Erdbeben in Europa

Auf Basis der in der EMSC-Datenbank verfügbaren Informationen wurde die Karte von Bild 10 erstellt. Die grafische Darstellung unterscheidet zunächst Erdbeben mit Magnituden von 4,5 bis 4,9 und stärkere Erdbeben mit Magnituden $M \geq 5,0$. Sofern von den Erdbeben makroseismische Karten zu Beobachtungen (*felt oder SHAKEmaps*) vorliegen, werden die Magnituden farblich und durch die Symbolgröße gekennzeichnet.

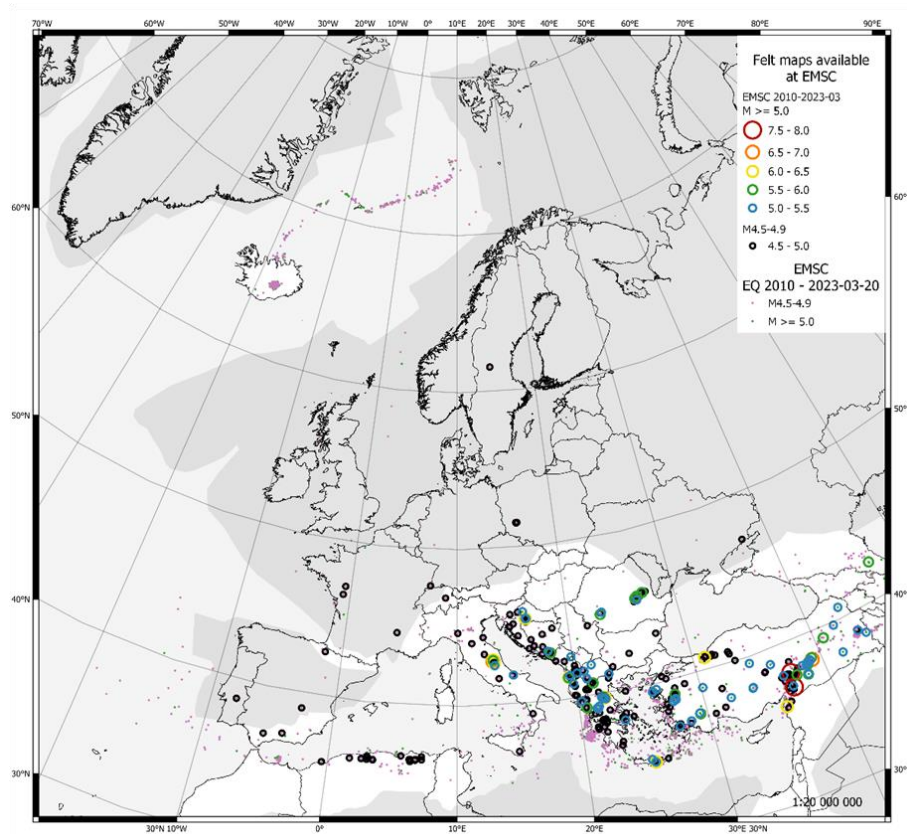


Bild 10: Erdbeben in Europa im Zeitraum 2010 bis 03/2023 nach EMSC [entnommen aus Schwarz u. Fehling (2023); Karte: S. Beinersdorf, 2023]

2.1.4 Zusammenführung der Daten für die Schadensprognose und Risikobewertung

Die Begründung standortkonkreter Szenarien erfordert die Aufbereitung relevanter Datenebenen. Sie beinhalten neben der historischen Erdbebentätigkeit (z. B. nach Katalog EKDAG, Schwarz *et al.*, 2019b), die rezente seismische Aktivität und ebenso die zur Generierung von Erdbeben erforderliche Spannungssituation, die sich aus der *World Stress Map* (Heidbach *et al.*, 2016) für das jeweilige Untersuchungsgebiet übernehmen lassen (vgl. Bild 11).

Im Vorgriff auf die Szenarien in Abschnitt 4.5 und die Hinweise der zu ihrer Festlegung erforderlichen Zusammenschau und Interpretation der relevanten Datenebenen zeigt Bild 12, wie diese Informationen im GIS-Format aufbereitet, mit den Karten der erdverlegten Rohrleitungsnetze überlagert und letztlich Szenarien deterministisch begründet werden können.

2.1.5 Rohrleitungsschäden

2.1.5.1 Verformung der Rohrleitung infolge der Erdbebenwellen

Die durch ein Erdbebenereignis freigesetzte Energie breitet sich in Form von Wellen aus und führt dadurch zu Bodenbewegungen. Treffen diese Bodenbewegungen auf eine eingeeerdete Rohrleitung wird sie mit Verformungen beansprucht, die Spannungen erzeugen.

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die Wellenbewegungen des Bodens ohne Schlupf auf die Rohrleitung übertragen wird, d. h. die Boden- und Rohrbewegung gleich groß sind, wobei die Rohrleitung sich flexibler verhält. In der Realität ist allerdings davon auszugehen, dass die Reibung zwischen dem Boden und der Rohrleitung nicht ausreichend ist, die Bodenbewegung vollständig zu übertragen und daher tatsächlich eine geringere Belastung als unter der obigen Annahme auftritt (Kuhlmann, 2004).

Die hervorgerufenen Verformungen sind abhängig von der Wellenart, und somit Ausbreitungsrichtung, dem Welleneinfallswinkel und der Wellenenergie. P-Wellen verursachen in axialer Richtung zum Rohr Dehnungen und Stauchungen (Zug- und Druckspannungen). Eine in Rohrlängsrichtung fortschreitende S-Welle erzeugt in normaler Richtung zum Rohr Biegungen. Hat sie eine andere Ausbreitungsrichtung zum Rohr, so führt das zu Schubbeanspruchungen mit einer Ovalisierung des Rohrquerschnittes. Bild 13 zeigt verschiedene Rohrleitungsverformungen infolge Erdbebenwellen.

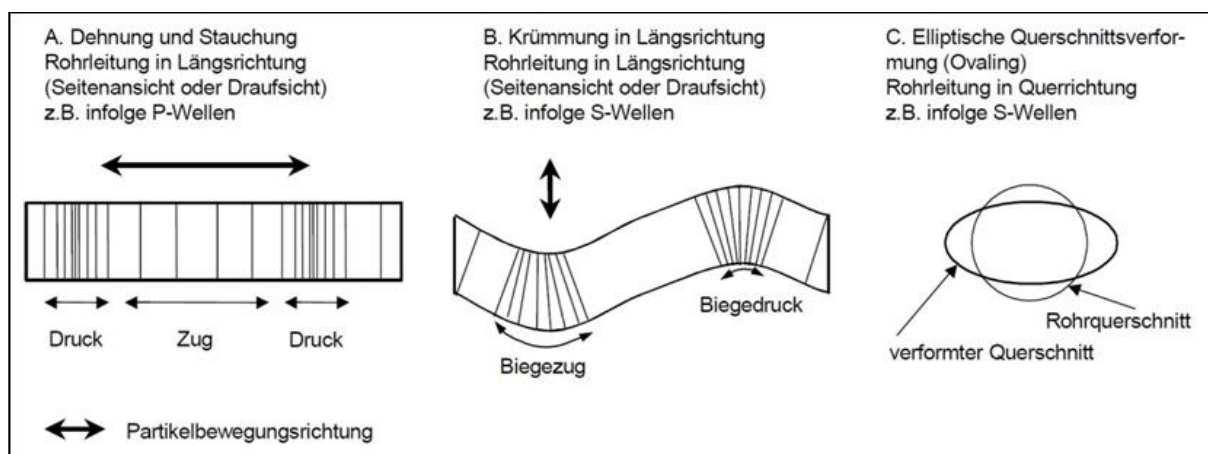


Bild 13: Rohrleitungsverformungen infolge Erdbebenwellen (Kuhlmann, 2004)

2.1.5.2 Bleibende Verformungen infolge Scherung (*fault crossing*)

Wie letztlich auch in den Handlungsempfehlungen (Abschnitt 6) hervorgehoben wird, sind besonders kritische Beanspruchungen im Fall mit Verwerfungslinien kreuzenden Trassen zu erwarten. Neben den Erdbebenwellen (*seismic wave propagation*) und den in Abschnitt 2.1.2 ausführlich behandelten Verflüssigungseffekten verdienen *fault crossing* besondere Aufmerksamkeit.

Die dadurch verursachten bleibenden Verformungen werden in den Detailsimulationen und experimentellen Untersuchungen im Projekt ZUVERSICHT besonders gewürdigt (vgl. Abschnitt 3).

Die für die Rohrleitungsschäden im Erdbebenfall maßgeblichen Wirkungsmechanismen werden in Bild 14 nochmals schematisch vereinfacht veranschaulicht.

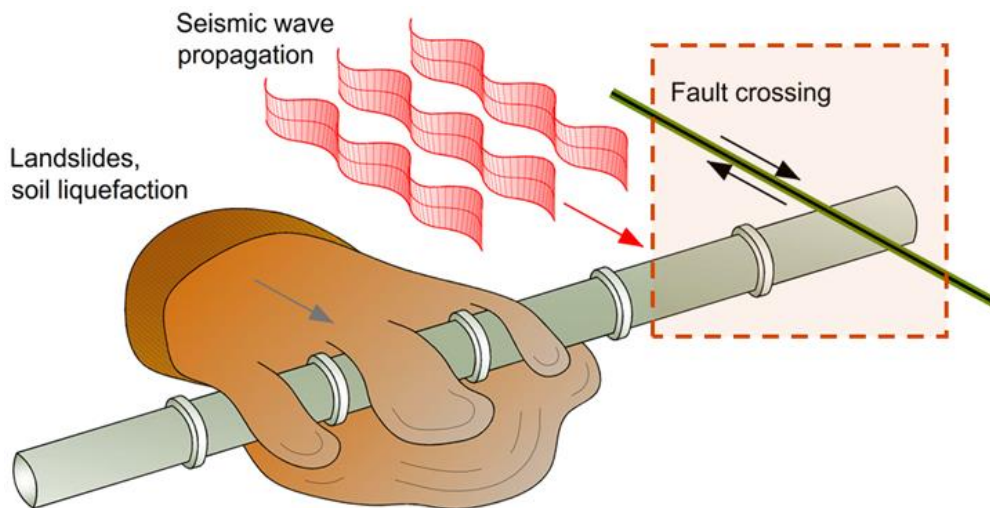


Bild 14: Für Rohrleitungsschäden im Erdbebenfall maßgebliche Einwirkungsmechanismen; [entnommen aus Abschlusspräsentation zum Projekt (Bearbeiter: G. Banushi, HCU)]

2.1.5.3 Schadensarten an Rohrleitungen

Die beschriebenen Einwirkungen führen zu verschiedenen Schadensarten an der unterirdischen Infrastruktur, welche grundsätzlich in Primär- (Brüche, Einstürze, usw.) und Sekundärschäden (Versorgungsausfall, Betriebsunterbrechungen, usw.) eingeteilt werden können. Bei den erdbebeninduzierten Schäden an Rohrleitungen sind hauptsächlich zu nennen:

- Undichtigkeiten
 - an Rohrverbindungen: dadurch Exfiltration von Abwasser oder Trinkwasser bzw. Infiltration von Grundwasser, dadurch mögliche Boden- und Grundwasserverschmutzung durch verunreinigte Abwässer bzw. erhöhte Aus- und folglich Überlastung der Rohrleitung oder Verunreinigung von Trinkwasser
 - durch Risse oder Scherbenbildung (siehe Rohrverbindungen); dadurch Bildung von Abflusshindernissen oder Einbruch der Rohrleitung
- Lageabweichungen
 - in Vertikal- oder Horizontalrichtung: dadurch Abreißen von Anschlussleitungen oder Bauwerksanbindungen, Bildung von Abflusshindernissen, Gegengefälle, Undichtigkeiten, Risse, Rohrbrüche
- Verformungen
 - Veränderungen des Rohrquerschnittes: dadurch Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit, Erzeugung von Verstopfungen, weiterführend zu Rissen und Beulen bis zum Rohrbruch oder Einsturz der Rohrleitung

Die an den Rohrleitungen auftretenden Schäden sind weiterhin vom Rohrmaterial und vom Rohrleitungstyp abhängig. Beim Rohrleitungsmaterial unterscheidet man in biegesteife Rohre, wie Beton, Stahlbeton und Steinzeug, in semisteife Rohre, wie Guss und GfK, und in biege-weiche Rohre, wozu die thermoplastischen Kunststoffe wie PP, PE und PVC sowie Stahl gezählt werden. Beim Rohrleitungstyp erfolgt die Einteilung in kontinuierliche Rohrleitungen, wie verschweißte Stahlrohre oder PE-Rohre, und in segmentierte Rohrleitungen, welche mit Steckmuffen-Systemen verbunden werden, wie beispielsweise bei Beton- oder Steinzeugrohren (Kuhlmann, 2004).

2.1.5.4 Beispiele für Rohrleitungsschäden

Tabelle A 2 in 14.1 (Seite 97) zeigt eine Übersicht von wesentlichen Erdbebenereignissen, bei denen die unterirdische Infrastruktur Schaden genommen hat. Das Ausmaß der Schäden sowie die Schadensursache sind mit aufgeführt.

Tabelle A 3 in 14.1 (Seite 99) vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt möglicher Schäden und Versagensmechanismen.

2.2 Datenerhebung

Die Daten gilt es zu klassifizieren und hinsichtlich der Leitungsnetze analog zur Vorgehensweise gemäß EMS-98 (Grünthal *et al.*, 1998) zu typisieren. Die Gefährdungspotenziale verschiedener Leitungsarten sind abhängig von der seismischen Einwirkung, vom Medium, Leitungsmaterial, Leitungsalter und dem Rohr-Boden-System. Neben den Primärschäden an Ver- und Entsorgungsleitungen können Sekundärschäden z. B. durch Bodenverflüssigung zum Ausfall der Leitungsnetze führen. Methoden zur Zustandsbewertung, Schadensprognose und Schadensbewertung sind für den kommunalen Anwendungsfall zu entwickeln.

Im Vordergrund steht die Entwicklung einer generalisierten Methodik zur Bewertung des Risikopotenzials erdverlegter Infrastruktur (Rohrleitungen) in Abhängigkeit von Detaillierungsgrad (Netztiefe) und verfügbarer Datengrundlage. Gleichzeitig wird mit der Einbindung assoziierter Partner und konkreter Anwendungsfälle das Ziel verfolgt, das Simulationstool benutzerorientiert und in Spiegelung der bereits vorliegenden Hilfsmittel, lokalen Expertise und Instrumentarien zu entwickeln.

Die Schadensszenarien in den Testgebieten stehen im Vorhaben für den konkreten Anwendungs- und Risikobezug. Neben den eigenen Datenerhebungen waren deshalb die von den assoziierten Partnern bereitgestellten Daten zusammenzustellen und für die Implementierung in das Simulationstool aufzubereiten.

Mit Hinweis auf die Szenarien in Abschnitt 4.5 (Bild 34) Seite 47 ist anzumerken, dass für das Erdbeben 1978 in Albstadt keine Schäden an erdverlegten Rohrleitungen dokumentiert vorliegen bzw. anhand Archivrecherche (Schwarz *et al.*, 2005) erhoben werden konnten.

Um die Boden-Bewegungsmodelle im Einzelnen mit der Schadensprognose der Infrastruktur zu koppeln, war und bleibt es weiterhin erforderlich, Erfahrungswerte aus weltweiten Starkbebengebieten aufzubereiten, d. h. zu klären, bei welchen Bodenbewegungen tatsächlich Schäden an Rohrleitungen im Nachgang erhoben werden konnten (vgl. Abschnitt 1.4).

Entsprechende Berichte liegen vom Magnitude $M_w = 7,4$ Erdbeben in der Türkei aus Adapazarı 1999 (Kurtulus, 2011), dem Magnitude $M_w = 6,3$ Erdbeben in Italien aus L'Aquila (Esposito *et al.*, 2013) und dem Magnitude $M_w = 6,2$ Erdbeben in Neuseeland aus Christchurch (Christchurch City Council, 2021a, b) vor.

In den Schadensauswertungen werden die beobachteten Schäden - soweit möglich - mit den Bodenbewegungen PGV und den Untergrundbedingungen ($v_{s,30}$) korreliert. Es zeigt sich hier ein Bereich erhöhter Schadenserwartungen im Bereich von PGV = 20 bis 40 cm/s.

Ein Schwerpunkt des Vorhabens bestand in der expliziten Berücksichtigung der Untergrundbedingungen (hier im Hinblick auf Einwirkungseffekte) und der Bettung selbst (hier im Hinblick auf die Schädigungseffekte infolge von Verflüssigung).

Je nach verfügbarer Datenlage sollen zusätzliche Vor-Ort-Recherchen und ergänzende punktuelle Standortuntersuchungen zur Klassifizierung der geologischen Untergründe (mittels H/V-Methode durchgeführt werden.

In diesem Zusammenhang ist auf Abschnitt 4.2 und den zum Projektende erstellten Bericht von Schwarz *et al.* (2023b) zu verweisen, der auf Grundlage von geotechnischen Standortuntersuchungen im Testgebiet Albstadt, welche im April 2023 zur Ausführung kamen, erstellt wurde.

2.3 Datenstrukturierung

Vorgesehen war die Einführung einer Schadensskala auf der Grundlage vereinheitlichter Schadensbeschreibungen und Klassifikationskriterien in Anlehnung an die European Macro-seismic Scale EMS-98 (Grünthal *et al.*, 1998).

Dem konzeptionellen Grundansatz für allgemeine Hochbauten folgend (Maiwald und Schwarz, 2018) sollten auf der Grundlage der beobachteten Schäden und Klassifikation der erdverlegten Infrastruktur eine möglichst mehrstufige Differenzierung von Schadensgraden eingeführt werden. Anhand der recherchierbaren Datenbasis war frühzeitig zu schlussfolgern, dass die Skalen bzw., darauf basierende Bewertungssysteme für die Verletzbarkeit von typisierten Bestandshochbauten unter dem Einfluss extremer Naturgefahren (Schwarz *et al.*, 2018) nicht auf die erdverlegten Rohrleitungsnetze zu übertragen sind (vgl. Abschnitt 4).

Das im Vorhaben zu entwickelnde Bewertungssystem für die Verletzbarkeit erdverlegter Rohrleitungen (s. Abschnitt 4.1) musste sich aber auf die verfügbaren (empirischen) Schadensauswertungen beschränken. Eine fünfstufige Differenzierung - wie für allgemeine Hochbauten durch Beiträge des EDAC eingeführt - konnte nicht begründet werden und erwies sich auch für die Beschreibung der Verhaltenszustände als nicht erforderlich.

Auch die Implementation in das Simulationstool verdeutlichte, dass hier in der Regel eine dreistufige (Ampel; grün: kein Schaden; gelb: Leckage; rot: Versagen) oder zweistufige Einteilung (Leckage ja/nein) für die Darstellung der Ablauf- und Fließprozesse bzw. Kennzeichnung der Betriebsfähigkeit ausreichend ist. Die diskutierten Detaillierungsebenen waren somit unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit eher zu vereinfachen.

Durch die Bereitstellung von Kanalnetzdaten des assoziierten Partners Köln, speziell der Stadtentwässerungsbetriebe Köln, konnten in der ersten Phase Informationen zu erdverlegter Infrastruktur im Bereich Abwasser aufgearbeitet werden. Daraus erfolgte, mit Hilfe der Office-Software Excel, das Aufstellen einer Verletzlichkeitsmatrix zur Wertung der Kombinationen von Rohrleitungsattributen, welche eine erdverlegte Abwasserrohrleitung besonders anfällig auf Erdbebeneinwirkungen machen und somit ihre Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen. Die Anwendung der Methodik auf Abwassernetzdaten der Partnergemeinde Köln sollte erste Erkenntnisse zur Verteilung des Gefährdungspotenzials liefern. Als Eingangsparameter wurden die folgenden Rohrleitungsattribute gewählt:

- Steifigkeit
- Material
- Alter
- Segmentierung
- Nennweite
- Betriebsart
- Verlegung
- Schadensart
- Geometrie

Aus diesen Rohrleitungsattributen konnten neun Kategorien erzeugt werden, die durch weitere Beschreibungen spezifiziert wurden (Bild 15).

Steifigkeit	3	norm	Material	8	norm	Alter	3	norm
biegesteif	1,2	1,20	Guss	1,2	1,14	jung	0,8	0,77
semisteif	1	1,00	Steinzeug	1,3	1,24	mittel	1	0,97
biegeweich	0,8	0,80	Beton	1,1	1,05	alt	1,3	1,26
			Bewehrter Beton	1	0,95			
			Faserbeton	1	0,95			
			Mauerwerk	1,3	1,24			
			Kunststoff	0,8	0,76			
			Faserverstärkter Kunststoff	0,7	0,67			
	1	1		1,05	1		1,033	1
Segmentierung	2	norm	Nennweite	3	norm	Betriebsart	2	norm
kontinuierlich	0,8	0,76	DN<400	0,9	0,82	Druck	0,8	0,76
gemufft	1,3	1,24	400<DN<800	1,1	1,00	Freispiegel	1,3	1,24
			800<DN	1,3	1,18			
	1,05	1		1,1	1		1,05	1
Verlegung	3	norm	Schadensart	6	norm	Geometrie	3	norm
Offener Graben	0,9	0,96	Aufschwimmen	1,3	1,04	gerade Leitung	0,9	0,79
Flüssigboden	0,8	0,86	Scherben	1,3	1,04	Biegung	1,2	1,06
Grabenlos	1,1	1,18	Risse	1,3	1,04	Schacht	1,3	1,15
			Lageveränderung	1	0,80	...		
			Unzulässige Verfo	1,2	0,96			
			Abriss	1,4	1,12			
	0,933	1		1,25	1		1,1333	1

Bild 15: Kategorien der Rohrleitungsattribute

Für diese Eingangsparameter wurden je Kategorie Faktoren aufgestellt, welche die Verletzlichkeit innerhalb der Kategorie noch einmal hervorheben. Die Faktoren wurden auf der Grundlage von Materialkennwerten, Betriebseigenschaften und Anwendungserfahrungen gebildet. In Verknüpfung der einzelnen Eingangsparameter und der zugeordneten Faktoren ergeben sich 46.656 Ausprägungen, von denen jedoch nicht alle erzeugten Kombinationen für eine Abwasserrohrleitung existent sind. Somit wurde ein Filtern der Ausprägungen erforderlich was durch die Bildung von Spezialfällen realisiert werden konnte.

Die Spezialfälle beschreiben die Eigenschaften einer Rohrleitung deren Kombinationen in der Realität nicht vorkommen. Dabei sind zwei nicht kompatible Eigenschaften ausreichend, um den Matrixpfad zu unterbrechen. Um diese Kombinationen auszuschalten werden sie mit dem Korrekturfaktor 0 belegt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Tabellenauszug der Spezialfälle nicht existenter Kombinationen von Rohrleitungsattributen

	Eigenschaft 1	Eigenschaft 2	Korrekturfaktor
1	biegesteif	Kunststoff	0
2	biegesteif	Faserverstärkter Kunststoff	0
3	semisteif	Guss	0
4	semisteif	Steinzeug	0
5	semisteif	Beton	0
6	semisteif	Bewehrter Beton	0
7	semisteif	Faserbeton	0
8	semisteif	Mauerwerk	0
9	semisteif	Kunststoff	0
10	biegeweich	Guss	0
11	biegeweich	Steinzeug	0
12	biegeweich	Beton	0
13	biegeweich	Bewehrter Beton	0

Durch die Verknüpfung der Eingangsparameter entstehen weiterhin Relationen, die das Potenzial der Rohrleitungsverletzlichkeit weiter anheben (Tabelle 2). Diese werden ebenfalls mit einem Korrekturfaktor belegt. Alle weiteren Kombinationen erhielten aus rechentechnischen Gründen den Faktor 1.

Tabelle 2: Tabellenauszug weiterer Spezialfälle

	Eigenschaft 1	Eigenschaft 2	Korrekturfaktor
61	Guss	alt	1,2
62	Guss	Scherben	1,2
63	Guss	Risse	1,2
64	Guss	Abriss	1,3
65	Steinzeug	alt	1,3
66	Steinzeug	Scherben	1,3
67	Steinzeug	Risse	1,3
68	Steinzeug	Abriss	1,3
69	Mauerwerk	alt	1,2
70	Mauerwerk	Risse	1,2
71	Mauerwerk	Abriss	1,3

Durch die Zuordnung der Korrekturfaktoren reduziert sich die Matrix auf 1.746 Kombinationen mit einer numerischen Wertung.

Zur Zustandsbewertung von Abwasserrohrleitungen werden Einzelzustände/ Schäden, sogenannte Schadstutzen, mit genormten Codes nach Merkblatt DWA-M 149-2 belegt. Beispiele für diese Codes sind BAA-Verformung, BAB-Rissbildung oder BAC-Rohrbruch/ Einsturz. Diese Schadstutzen werden nach ihrer Auswertung in Zustandsklassen überführt. Dies erfolgt nach Merkblatt DWA-M 149-3. Die Verknüpfung der einzelnen Zustandsklassen der Schadstutzen ermöglicht die Zustandsbewertung einer Abwasserrohrleitung im Gesamten.

Zur Modellierung der Verletzlichkeitsmatrix wurden als Eingangsparameter die Rohrleitungsattribute aufgestellt. Diese sind in ihrer Beschreibung mit den Codes nach DWA-M 149-2 vergleichbar. Die Verknüpfung der Kodierung der durch den Stadtentwässerungsbetrieb Köln bereitgestellten Kanalnetzdaten mit den Attributen einer Abwasserrohrleitung bildete den Ansatz, um die Kanalnetzdaten mit der Verletzlichkeitswertung abzugleichen und somit sensible Bereiche in der Abwasserleitungsnetzstruktur zu detektieren.

Die detaillierte Aufstellung und Verknüpfung der Rohrleitungsattribute mit Einbindung von Korrekturfaktoren reduzierte die Betrachtung auf 1.746 Kombinationen. Zur Implementierung in das Simulationstool besteht die Herausforderung jedoch darin, ein Schema zu identifizieren, mit dem die Verletzbarkeit der verschiedenen Typen möglichst vereinfacht werden kann. Nach Diskussion im Projektverbund verfestigte sich die Meinung, dass die hohe Anzahl von Kombinationen ohne Gruppenbildung im weiteren Verlauf des Projektes nicht handhabbar sein wird, woraufhin diese Methodik im weiteren Projektverlauf angepasst werden musste.

3 Detailsimulation und Experiment (HCU, IAB)

3.1 Experimentelle Untersuchungen

Nachfolgend werden die experimentellen Untersuchungen, welche am IAB Weimar gGmbH im AP 3 durchgeführt wurden zusammenfassend vorgestellt. Die Versuche dienten der Untersuchung des Rohr-Boden-Interaktionsverhaltens unter extremen Versagenszuständen im Erdbebenfall. Es wurde davon ausgegangen, dass eine Rohrleitung dann unter extremer Belastung steht, wenn sich im Erdbebenfall eine Gleitfuge infolge von Böschungs- oder Geländebruch ausbildet und die Scherfuge die Rohrleitung orthogonal schneidet. Versuchstechnisch wurde dies durch einen Sandkasten nachgebildet, in dem ein eingebettetes Rohr einer kontrollierten Scherbelastung ausgesetzt werden konnte. Die Wahl der Abmessungen des Versuchsstandes und der Versuchsablauf wurde seitens der HCU durch umfangreiche Literaturrecherchen und numerische Voruntersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode gestützt. Die Reaktion der Rohrleitung auf die aufgebrachten Belastungen wurde ausgewertet und mit analytischen und numerischen Berechnungen verglichen. Durch die Abstimmung des numerischen Modells mit den experimentellen Daten konnte das Modell kalibriert werden, sodass Einblicke in die Spannungszustände im Rohr-Boden-Bereich möglich wurden. Auf diese Weise konnte ein besseres Verständnis um die Zusammenhänge zwischen Erdlast im Erdbebenfall und Verformungsantwort der Rohrleitung entwickelt werden.

3.1.1 Numerische Modellbildung des Rohr-Boden-Systems

3.1.1.1 Das diskrete Beam on Winkler Foundation Modell (BWFM)

Das Verhalten der getesteten Rohrleitungen wurde mit dem diskreten Beam on Winkler Foundation Modell (BWFM) untersucht. Bild 16 zeigt das Modell schematisch. Die Finite-Elemente-Analysen wurden mit der Finite-Elemente-Software ABAQUS durchgeführt. Die Rohrleitung wurde mit dem Balkenelementtyp PIPE21 modelliert. Darüber hinaus sorgt die Software für eine gleichmäßige Querschnittsflächenänderung aufgrund der hohen axialen Dehnung des Rohrs, indem sie dem Benutzer die Möglichkeit gibt, eine effektive Poissonzahl für den Querschnitt anzugeben.

The diagram illustrates the modeling of a pipeline crossing a strike-slip fault. The top part shows a plan view of the fault (3.0 m long) and the initial pipeline route. The fault is characterized by a strike-slip displacement Δx , a vertical displacement Δy , and a fault angle β . The bottom part shows a 3D view of the pipeline with axial, lateral, and vertical soil springs, and applied ground displacement Δf .

3.1.1.2 Das Kontinuumsmodell

Die Rohrleitungen wurden als zylindrische Schalen modelliert, wobei in ABAQUS (2022) verfügbare Vier-Knoten-Schalenelemente (S4) verwendet werden können, die endliche Membrandehnungen und beliebig große Rotationen berücksichtigen und sich daher für die Analyse großer Dehnungen eignen. Der Boden, der die Rohrleitung umgibt, wird mit linearen Ziegel-Kontinuums-elementen (C3D8) mit acht Knoten in der Nähe der Verwerfung und um die Rohrleitung herum diskretisiert, während der Rest des Bodenblocks mit Kontinuums-elementen mit reduzierter Integration (C3D8R) modelliert wird.

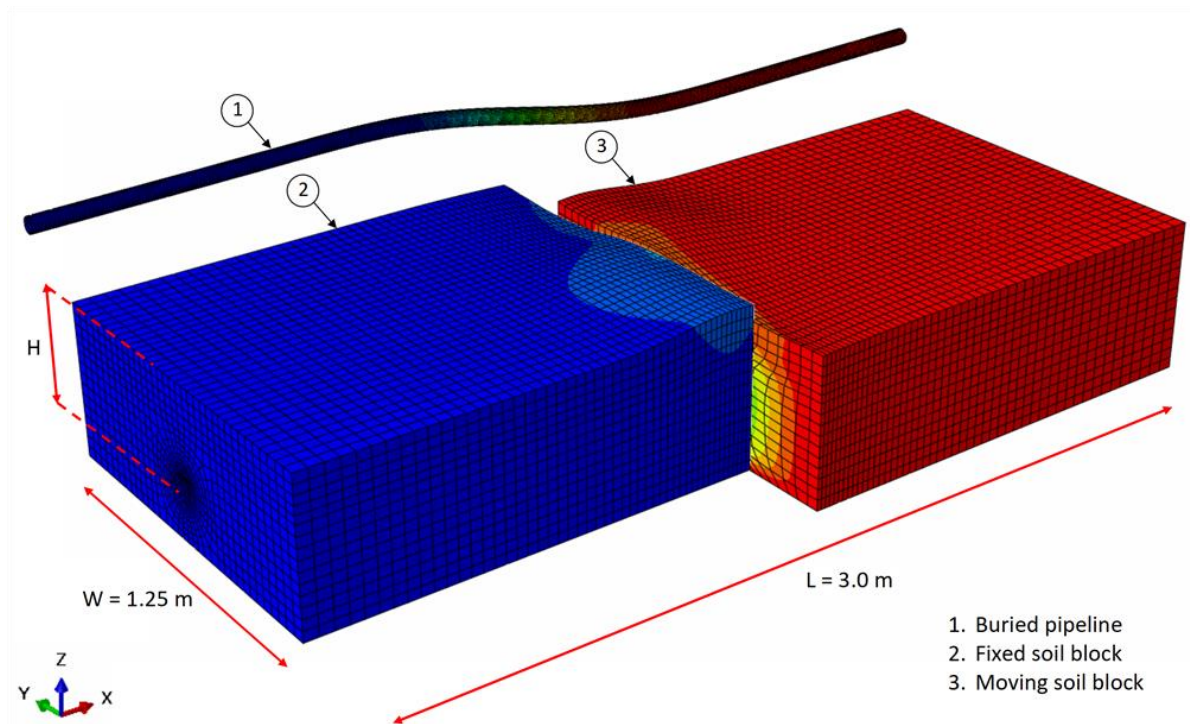


Bild 17: Kontinuumsmodell im Programmsystem ABAQUS

Das Rohrmaterialmodell wird im Rahmen der von Mises-Plastizitätstheorie mit nichtlinearer Verfestigung definiert. Das Bodenmaterial wurde mit dem konstitutiven Mohr-Coulomb-Modell beschrieben, das durch verschiedene Parameter, wie die Kohäsion, den Reibungs- und Dilatationswinkel, den Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν charakterisiert ist. Die Interaktion zwischen der Rohrleitung und dem Boden wurde als Reibungskontakt mit einem Reibungskoeffizienten modelliert, der ein endliches Gleiten und eine Trennung zwischen den beiden Grenzflächen ermöglicht. Die Diskontinuität an der Schnittstelle der Verwerfungsspur wurde in geeigneter Weise als Kontaktwechselwirkung modelliert, die durch ein Reibungsverhalten für die nicht kohäsiven Bodenbedingungen (Sand) gekennzeichnet ist.

Das Netz, sowohl der Boden- als auch der Rohrleitungskomponenten, wurde im zentralen Bereich in der Nähe der Verwerfungsspur verfeinert, um das große Verformungsverhalten des Systems besser zu erfassen. Um die Robustheit des Kontaktalgorithmus und damit die Genauigkeit der resultierenden Interaktionskräfte zu gewährleisten, wurden sowohl die Boden- als auch die Rohrkontaktflächen mit einer vergleichbaren Maschenweite versehen, was die Konvergenz der Lösung garantiert. Dieses Verfahren ermöglicht die korrekte Bewertung der großen Rohrwandverformungen, einschließlich der Ovalisierung des Querschnitts. Wenn die Rohrleitung jedoch einer Kompression ausgesetzt ist, knickt sie lokal ein, und es ist ein feineres Netz für das Rohr und den umgebenden Boden erforderlich, um die Entwicklung des Faltenmusters genau zu erfassen.

Die numerischen Simulationen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Pipeline unter dem Einfluss von Verwerfungsbewegungen werden in der Regel in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wird eine geostatische Analyse durchgeführt, um den anfänglichen Spannungs- und Dehnungszustand des Systems Boden-Rohrleitung zu bestimmen, der die Schwerkraftbelastung ausgleicht und die Randbedingungen erfüllt. Im zweiten Schritt wird eine gleichmäßige horizontale Verschiebung an den seitlichen Außenflächen des beweglichen Bodenteils aufgebracht, während die seitlichen Außenflächen des anderen Bodenteils in horizontaler Richtung eingespannt bleiben. Derweil werden die Bodenflächen der beiden Bodenteile in vertikaler Richtung eingespannt, um das Gleichgewicht zu gewährleisten. Bei jedem Belastungsschritt werden die globalen Gleichgewichtsgleichungen iterativ mit dem Newton-Raphson-Verfahren gelöst, sodass der Verformungszustand von Rohr und Boden bei jedem Schritt ermittelt werden kann.

3.1.2 Rohr-Boden-System

Es wurden 3,00 m lange Rohrleitungen aus Polypropylen (PP) und Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), mit dem Durchmesser D und der Wanddicke t untersucht. Die Rohrleitungen wurden unter typischen Verlegebedingungen mit einem typischen H/D -Verhältnis erdverlegt (H =Verlegetiefe, D =Durchmesser). Beide Rohrleitungen sind in Bild 18 dargestellt. Tabelle 3 gibt die Systemparameter des Rohr-Boden-Systems wieder.



a)



b)

Bild 18: Testrohre: a) Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) b) Polypropylen (PP)

Tabelle 3: Parameter des Rohr-Boden-Systems im Versuch

Rohrmaterial	PE-HD, Polyethylen hoher Dichte	PP, Polypropylen
Verlegetiefe, H (m)	0,325	0,805
Überdeckung, h (m)	0,30	0,75
Rohrlänge, l (m)	3,00	3,00
Rohrdurchmesser, D (mm)	50	110
Wanddicke, t (mm)	4,6	3,8
D/t	10,87	28,95
H/D	6,5	7,3
Boden Wichte, γ_{soil} (N/m ³)	17160,9	16917,1
Innerer Reibungswinkel, φ (°)	35	35
Dilatanzwinkel (°)	5	5
Erdruhedruckbeiwert K_0	0,426	0,426
Rohrmantelfaktor, f	0,6	0,6
Reibungsbeiwert Rohr-Boden, μ	0,384	0,384

Für jeden Rohrleitungstyp wurden vier Versuche durchgeführt, bei denen die orthogonal zur Verwerfungsspur ausgerichtete Rohrleitung der auferlegten Bodenverschiebung ausgesetzt wurde. Bild 19 vermittelt einen Überblick über den Versuchsaufbau, der aus zwei identischen Kästen besteht, von denen einer fixiert bleibt und der andere auf Lagern und Schienen durch den hydraulischen Lastrahmen mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s verschoben wurde. Bild 20 veranschaulicht die Positionierung der Dehnungsmessstreifen entlang der Rohrleitungsproben, wobei die Längsdehnung des Rohrs jede Zehntelsekunde gemessen wurde.

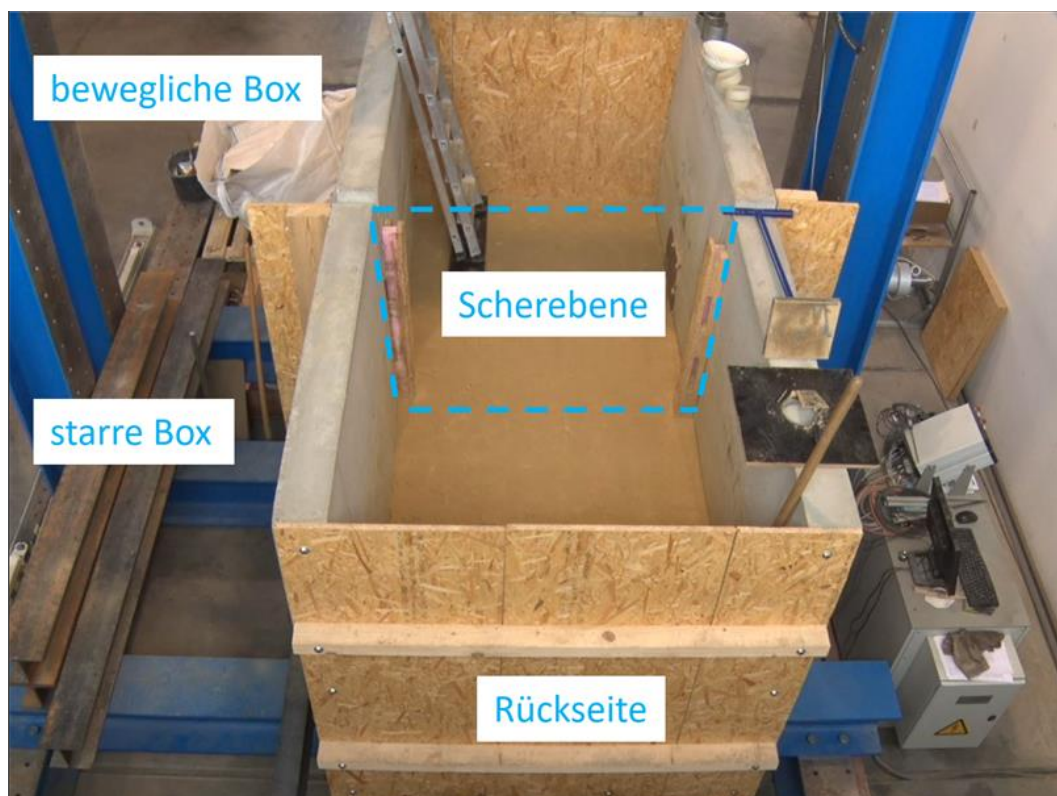
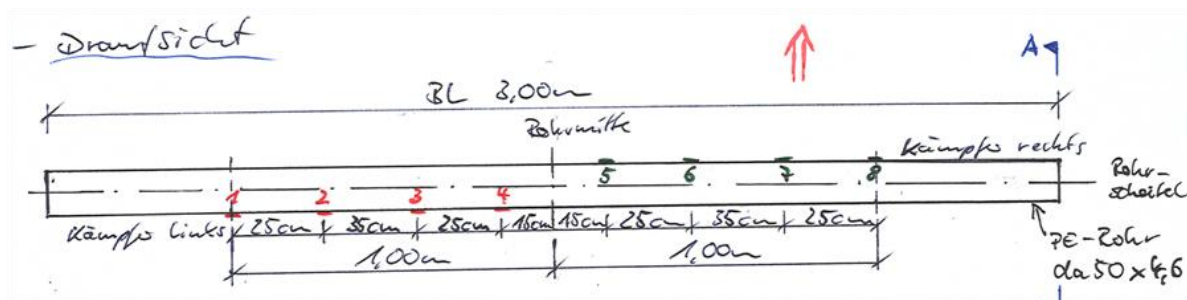
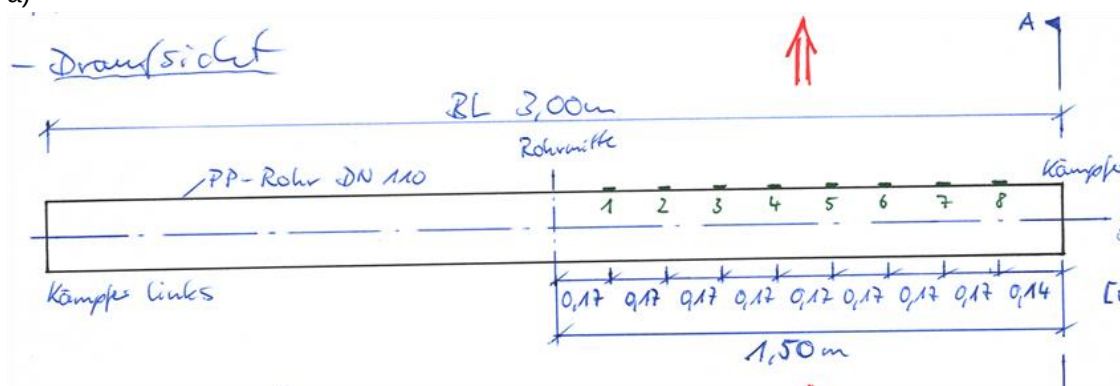


Bild 19: Blick auf den Versuchsaufbau mit Darstellung der Scherebene



a)



b)

Bild 20: Schematische Darstellung der Positionierung der Dehnungsmessstreifen am IAB für: a) PE-Rohrleitung; b) PP-Rohrleitung

3.2 Numerische Analysen

Die numerischen Analysen wurden mit der Finite-Elemente-Software ABAQUS (2022) unter Verwendung des diskreten (BWFM) und des Kontinuums-Modellierungsansatzes durchgeführt, wobei die materiellen Nichtlinearitäten des Systems sowie die Rohr-Boden-Interaktion berücksichtigt werden. Der vorliegende Abschnitt beschreibt den gewählten Finite-Elemente-Modellierungsansatz und den anschließenden Vergleich zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen, der es ermöglicht, die wichtigsten Faktoren zu bewerten, die das Systemverhalten beeinflussen.

3.2.1 Modellbildung

Dieser Abschnitt beschreibt das verwendete Rohr- und Bodenmaterialmodell sowie die Definition der Rohr-Boden-Interaktion im Rahmen des diskreten (BWFM) und des Kontinuums-Modellierungsverfahrens.

3.2.1.1 Numerische Modellbildung des Rohrmaterials

Das Materialmodell für Kunststoffrohre wird im Rahmen der von Mises'schen Plastizitätstheorie mit nichtlinearer Verfestigung entwickelt. Der Elastizitätsmodul von Polyethylen hoher Dichte und Polypropylen wird mit 750 MPa bzw. 1656,2 MPa angenommen, während die Poissonzahl ν für beide Rohrmaterialien 0,45 beträgt (vgl. Tabelle 4). Bild 21 zeigt die angenommene Spannungs-Dehnungs-Kurve für beide Rohrmaterialien, die aus Zugversuchen, die an der HafenCity Universität durchgeführt wurden, und Literaturdaten abgeleitet wurden (Ha et al., 2008; Kunststoffrohrverband e.V. KRV).

Tabelle 4: Eingangsparameter für die Rohrmaterialien

	PE-HD	PP
Elastizitätsmodul, E (MPa)	750	1656,2
Poissonzahl, ν	0,45	0,45

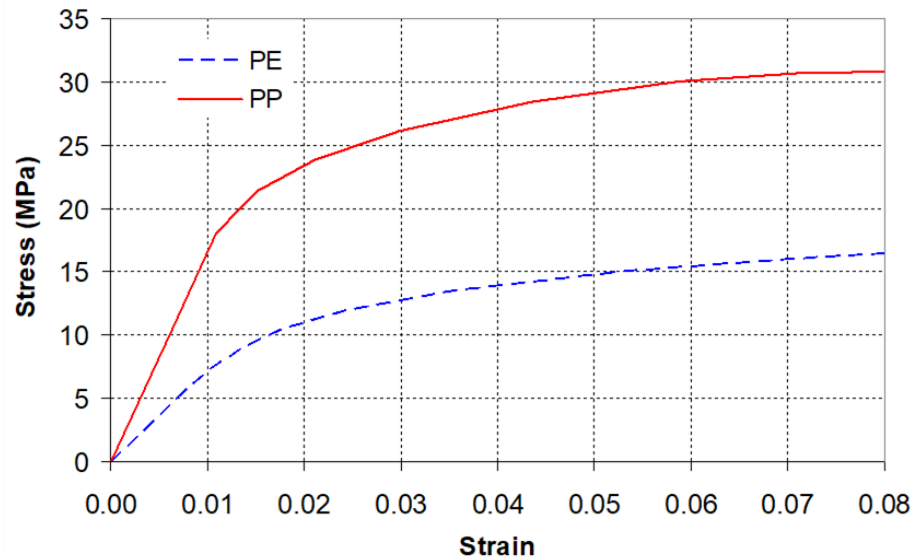


Bild 21: Spannungs-Dehnungskurven für PE und PP

3.2.1.2 Modellbildung für den Boden und die Rohr-Boden Interaktion

Im Rahmen des Kontinuums-Modellierungsansatzes wird das Bodenmaterial mit Hilfe des in ABAQUS/Standard implementierten Mohr-Coulomb-Modells definiert, das durch verschiedene Parameter charakterisiert ist, wie die Kohäsion, den Reibungs- und Dilatationswinkel, den Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν . Darüber hinaus wird die Rohr-Boden-Interaktion als Reibungskontakt mit dem Reibungskoeffizienten μ modelliert. In Tabelle 5 sind die verwendeten Werte wiedergegeben.

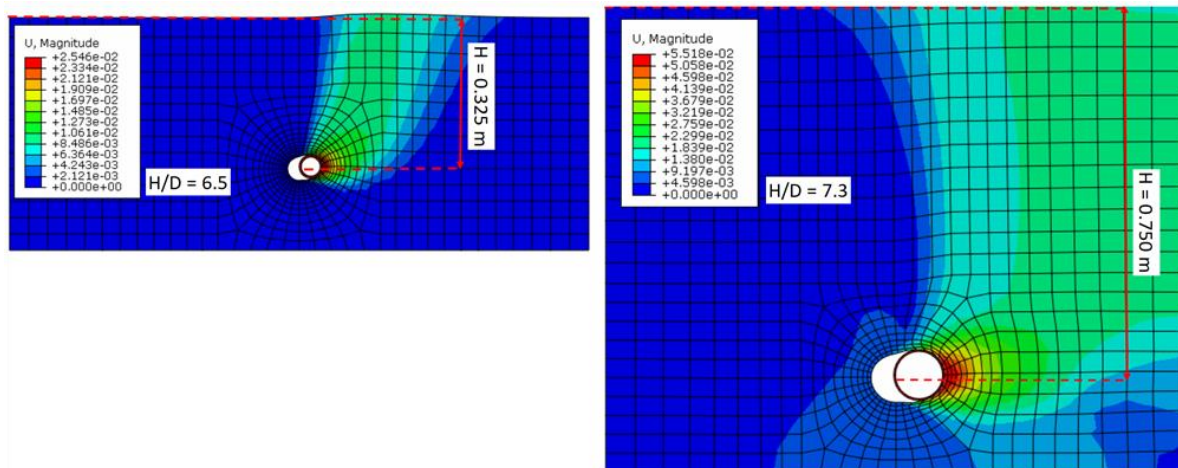
Tabelle 5: Bodenkennwerte

	PE-HD, Polyethylen hoher Dichte	PP, Polypropylen
Elastizitätsmodul, E (MPa)	14,941	12,262
Poissonzahl, ν	0,3	0,3
Innerer Reibungswinkel, φ (°)	35	35
Dilatanzwinkel (°)	5	5
Boden Wichte, γ_{soil} (N/m ³)	17160,9	16917,1
Erdruchedruckbeiwert K_0	0,426	0,426
Rohrmantelfaktor, f	0,6	0,6
Reibungsbeiwert Rohr-Boden, μ	0,384	0,384

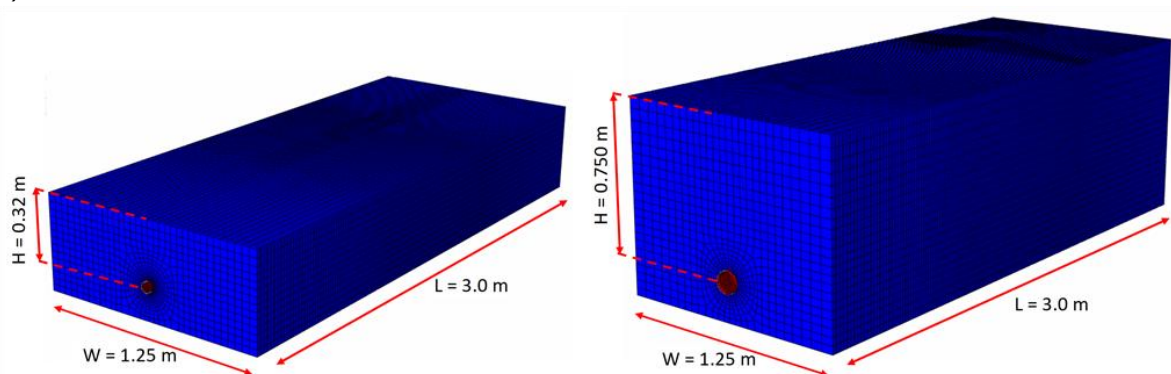
Im Gegensatz dazu wird im diskreten Modell (BWFM) die Rohr-Boden-Interaktion mit nichtlinearen Federelementen modelliert. Die Rohrleitung wird als Polygonzug simuliert, welcher an

jedem Knoten Federn angeschlossen hat, welche die Bodenreaktion auf die Rohrleitungsbe-
wegung in axialer und lateraler Richtung simulieren. Dabei wird die vertikale Bodenreaktion
nicht berücksichtigt, da die Rohrleitungsverschiebung im Wesentlichen in der horizontalen
Ebene erfolgt. Die Bodenfedern wurden anhand des Kontinuumsmodells kalibriert, indem das
Rohr einer monotonen Verschiebung in jeder orthogonalen Richtung unterworfen wurde und
die resultierende Bodenreaktion bewertet wurde. Um den Rechenaufwand zu optimieren,
wurde die Bodenreaktion in der lateralen Richtung mit Hilfe einer zweidimensionalen (2D) ebe-
nen Dehnungsanalyse berechnet, während die axiale Bodenreaktion durch dreidimensionale
(3D) Kontinuumsimulationen ermittelt wurde, wie in Bild 22 schematisch dargestellt ist.

In der ebenen Dehnungsanalyse wurden sowohl die Rohrleitung als auch der umgebende Bo-
den mit bilinearen Kontinuumsselementen (ABAQUS-Elementnummer: CPE4) mit vier Knoten
modelliert. In den 3D-Kontinuumsimulationen wurde die Rohrleitung stattdessen mit Vier-
Knoten-Schalenelementen (S4) modelliert, die endliche Membrandehnungen und beliebig
große Rotationen berücksichtigen können. Der Boden, der die Rohrleitung umgibt, wird mit
linearen Brick-Kontinuumsselementen (ABAQUS-Elementnummer: C3D8) mit acht Knoten dis-
kretisiert, während der Rest des Bodenblocks mit Kontinuumsselementen mit reduzierter In-
tegration (ABAQUS-Elementnummer: C3D8R) modelliert wird.



a)



b)

Bild 22: Finite-Elemente-Simulation zur Analyse der Boden-Rohr-Wechselwirkung: a) 2D-Planardehnungsanalyse für die laterale und axiale Richtung; b) 3D-Kontinuumsanalyse für die axiale Richtung

Die numerischen Simulationen zur Bewertung der Bodenreaktion auf die Rohrleitungsbewegung pro Längeneinheit wurden dann in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wurde eine geostatische Analyse durchgeführt, um den anfänglichen Spannungs- und Dehnungszustand im Rohr-Boden-System zu ermitteln, der die Schwerkraftbelastung ausgleicht und die Randbedingungen erfüllt. Im zweiten Schritt wurde die Rohrleitung statisch lateral verschoben, indem der gleiche Verschiebungsvektor auf alle Knoten angewendet wird, wie in Bild 21 schematisch dargestellt. Die erhaltenen axialen und lateralen Bodenreaktionen pro Längeneinheit der Rohrleitung für alle betrachteten Bodenbedingungen sind in Bild 23 bzw. Bild 24 dargestellt.

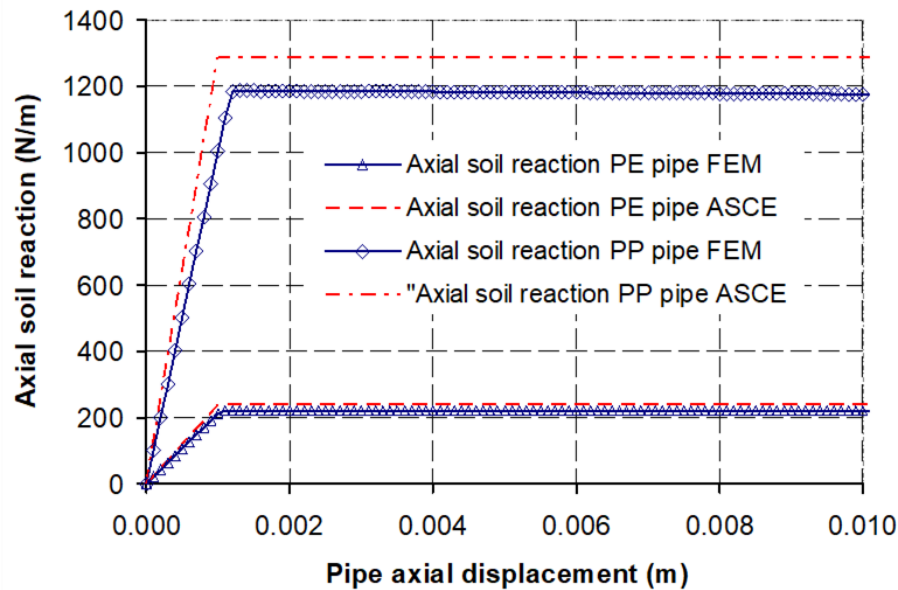


Bild 23: Axiale Bodenreaktion pro Längeneinheit der Rohrleitung, ermittelt aus der FE-Analyse und berechnet mit ASCE (1984) Guideline mit $\varphi = 35^\circ$, PE (H/D=6,5) und PP (H/D=7,3)

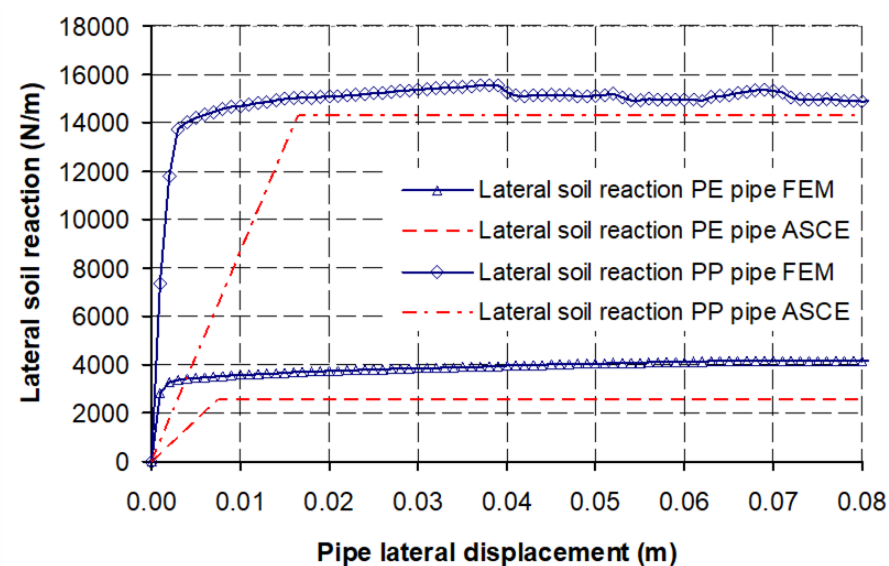


Bild 24: Laterale Bodenreaktion pro Längeneinheit der Rohrleitung, ermittelt aus der FE-Analyse und berechnet mit ASCE (1984) Guideline mit $\varphi = 35^\circ$, PE (H/D=6,5) und PP (H/D=7,3)

3.2.2 Vergleich experimenteller und numerischer Ergebnisse

3.2.2.1 Verformungsantwort der PE-HD-Rohrleitung

Nach den Versuchen wurden die Prüfkörper freigelegt und vermessen. Bild 25 zeigt den Prüfling im Sandbett und vergleichend die numerischen Berechnungen. In Bild 26 bis Bild 28 sind die Ergebnisse für Längsdehnung und Ovalisierung gegenübergestellt.

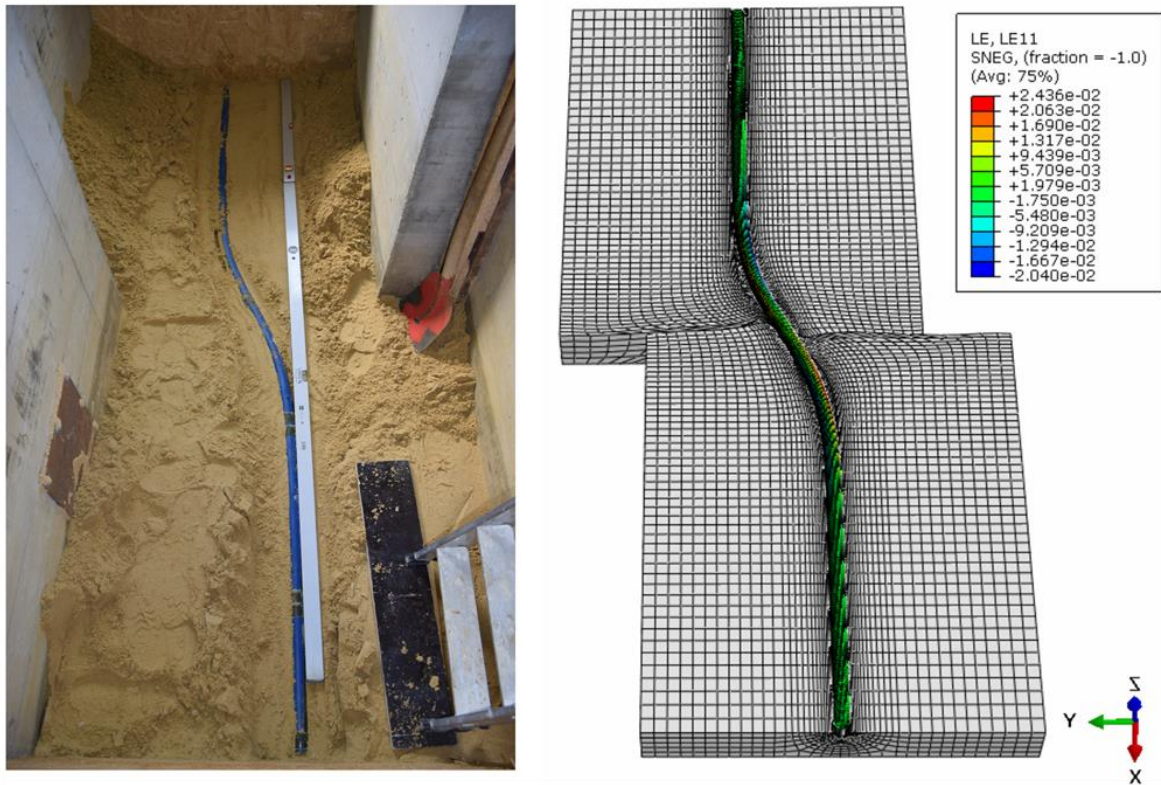


Bild 25: Verformung der PE-HD-Rohrleitung für eine Scherverschiebung von $\Delta f = 0,3 \text{ m}$

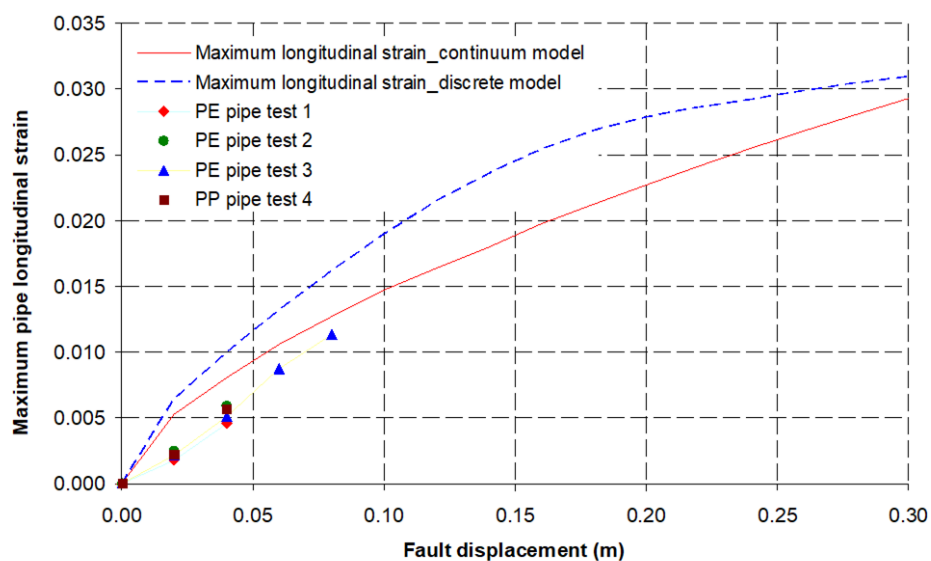


Bild 26: Maximale Längsdehnung als Funktion der Lateralverschiebung für die PE-HD-Rohrleitung

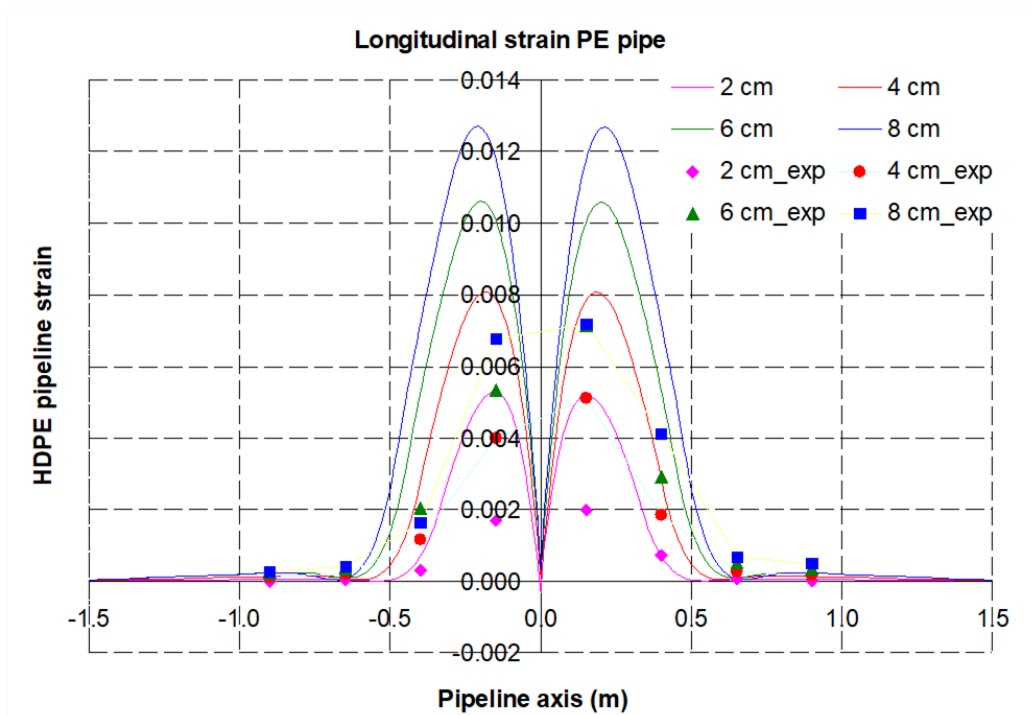


Bild 27: Längsdehnungsverteilung der PE-HD-Rohrleitung

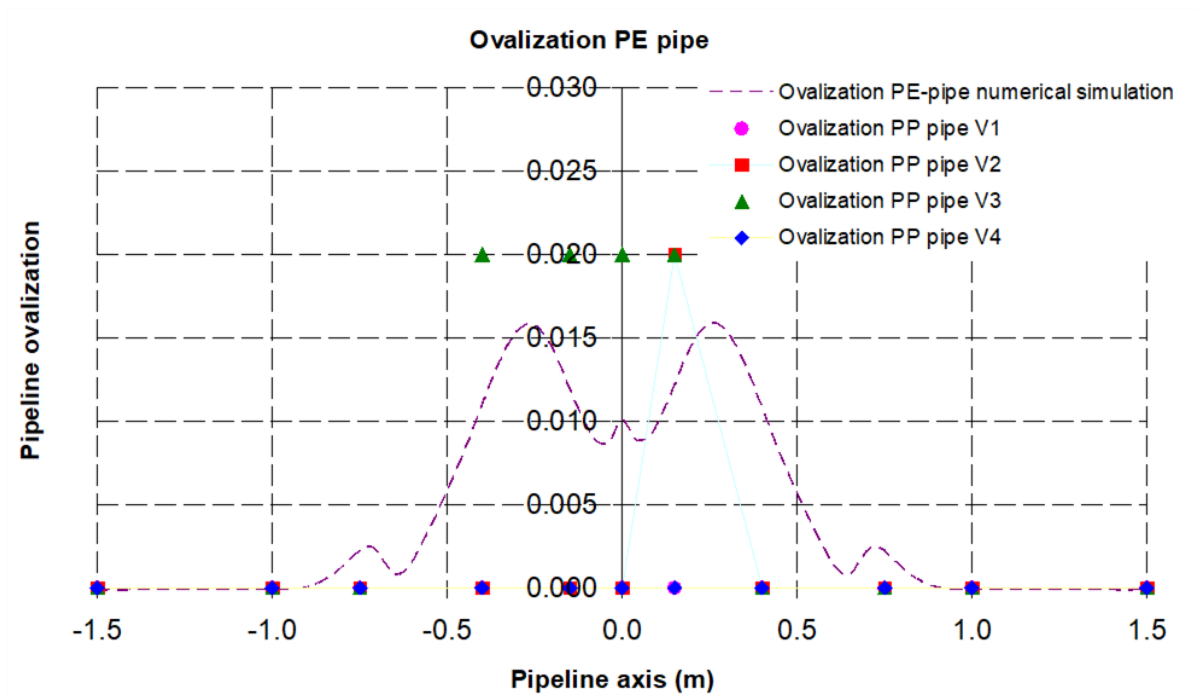


Bild 28: Ovalisierung der PE-HD-Rohrleitung

3.2.2.2 Verformungsantwort der PP-Rohrleitung

Nach den Versuchen wurden die Prüfkörper freigelegt und vermessen. Bild 29 zeigt den Prüfling im Sandbett und vergleichend die numerischen Berechnungen. In Bild 30 sind die Ergebnisse aus den verschiedenen numerischen Modellen den Versuchsergebnissen gegenübergestellt.

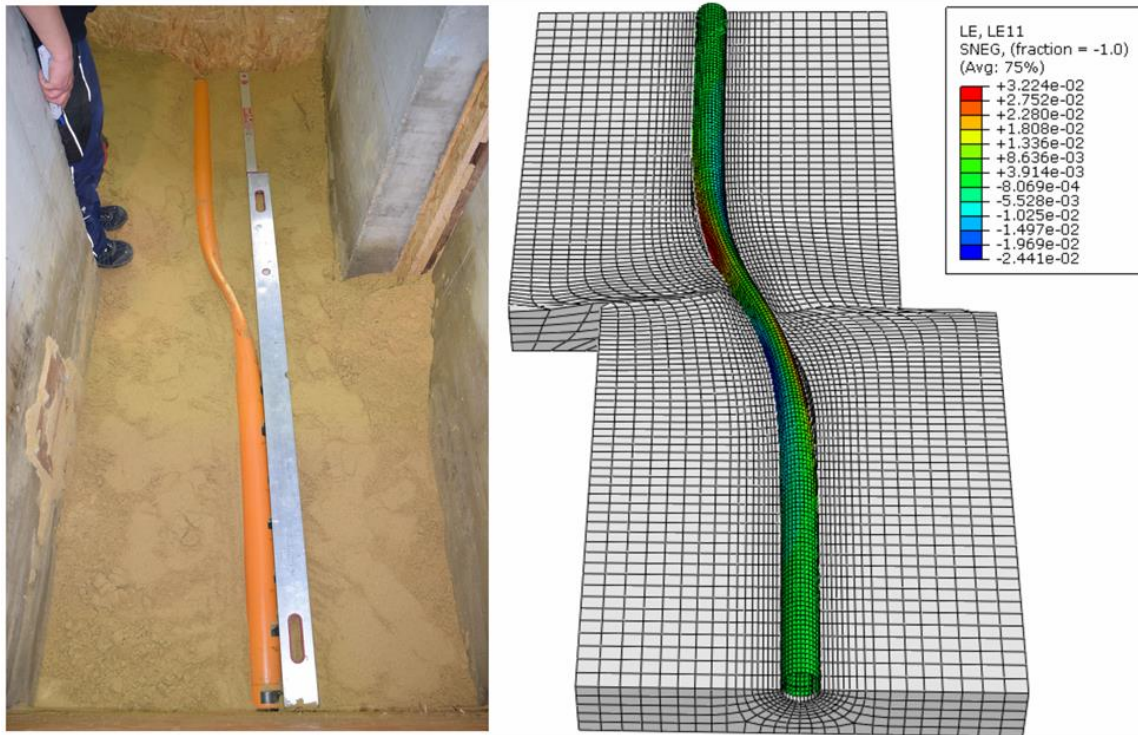


Bild 29: Verformung der PP-Rohrleitung bei einer Lateralverschiebung von $\Delta f = 0,3$ m

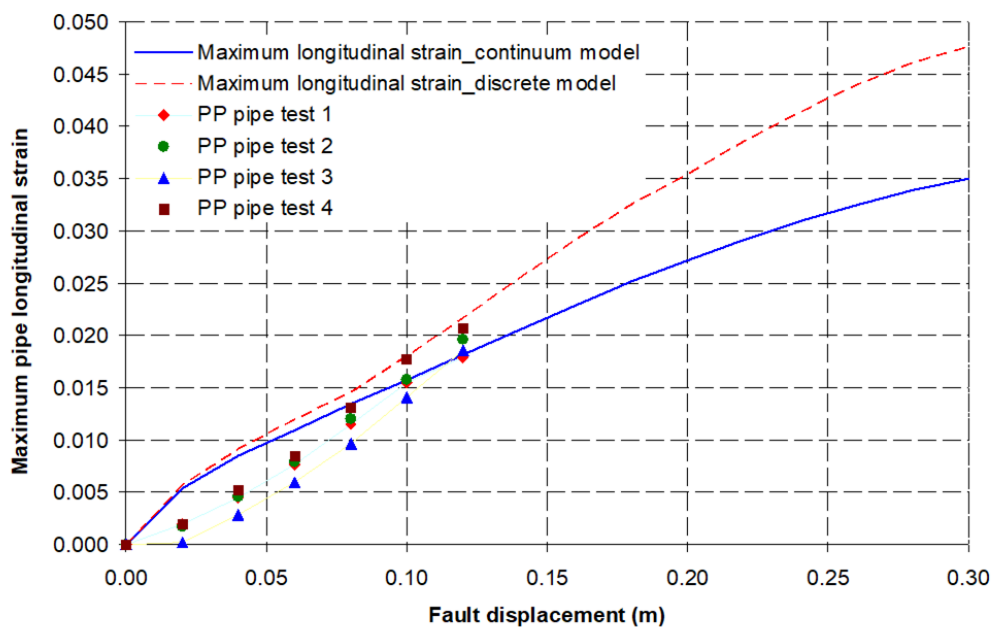


Bild 30: Maximale Dehnung in Abhängigkeit von der Scherverschiebung für die PP-Rohrleitung

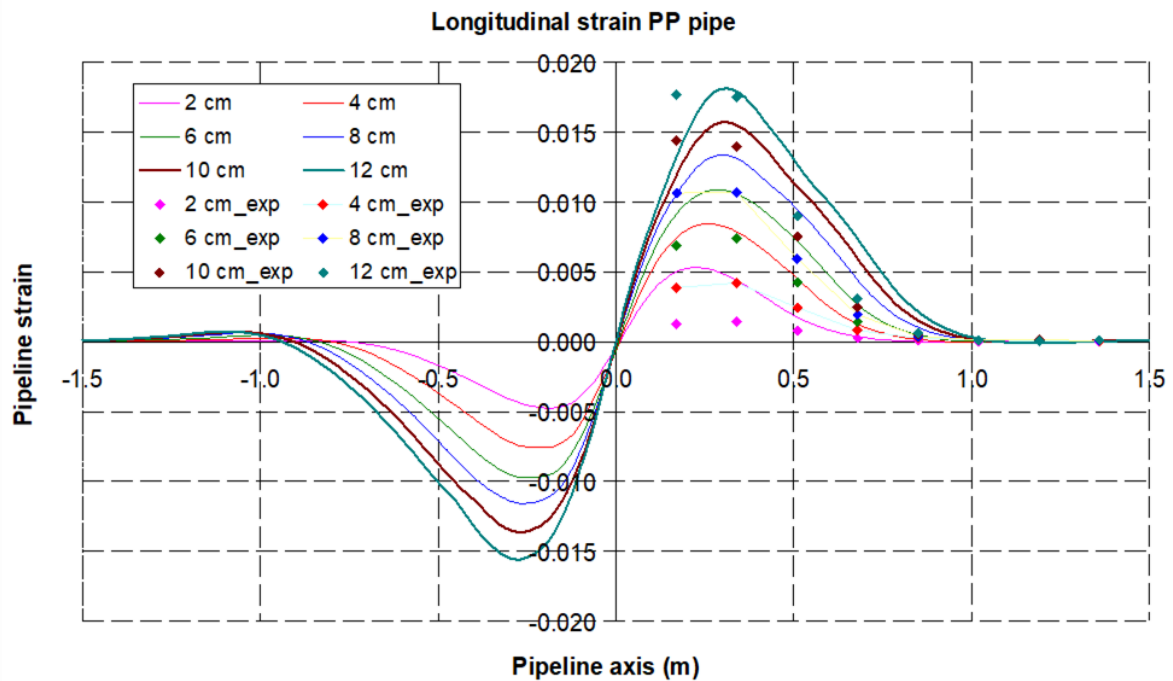


Bild 31: Längsdehnungsverteilung der PP-Rohrleitung

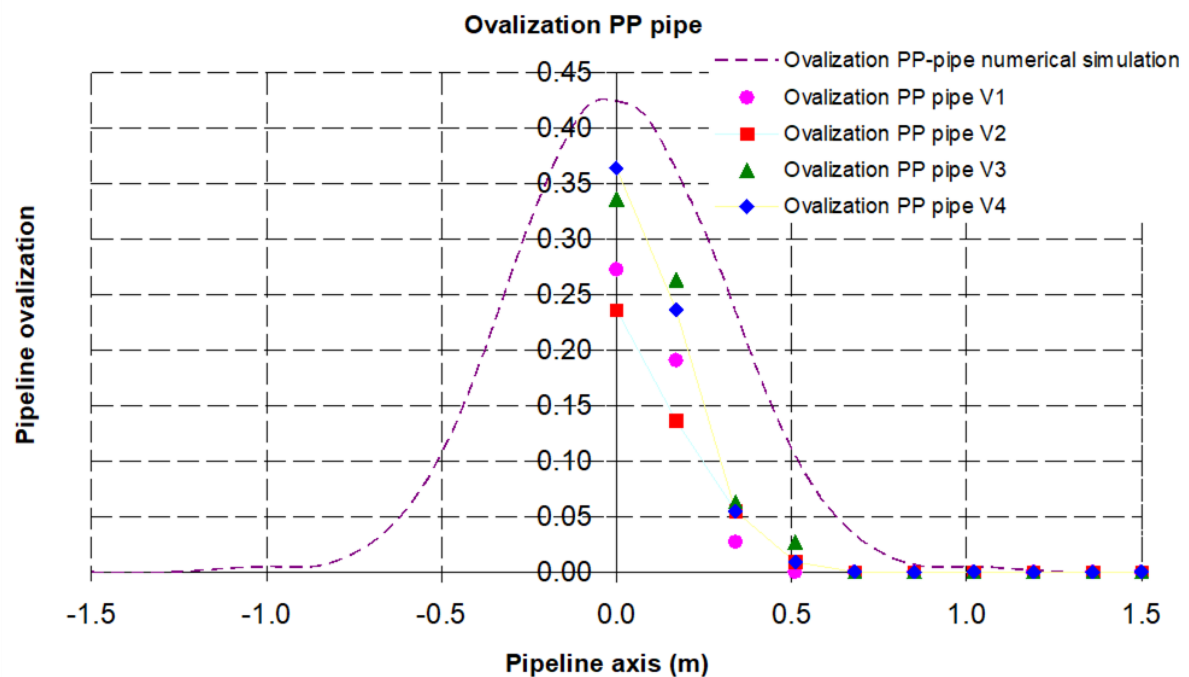


Bild 32: Ovalisierung der PP-Rohrleitung

Im Gegensatz dazu wird in Bild 31 die Veränderung der Längsdehnung entlang des am stärksten beanspruchten Bereiches des Rohrs auf der Zugseite für verschiedene Werte der aufgezungenen Verschiebung Δf dargestellt. Bild 32 zeigt die Variation der Ovalisierung entlang der Rohrleitung, die numerisch und experimentell für die maximale auferlegte Verschiebung von 0,3 m ausgewertet wurde.

4 Verletzbarkeit und Schadenspotenziale (EDAC)

4.1 Typisierung und Ableitung von Verletzbarkeitsklassen

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Datenerhebungen und Simulationen (Analyse, Experiment) sollten im Vorhaben die Verletzbarkeit für die Typen von erdverlegter Infrastruktur (mit Fokus auf die Netze in Deutschland aber auch im internationalen Umfeld) untersucht und gekennzeichnet werden. Hierfür wird der in der Bewertung von Hochbauten weitverbreitete Ansatz der Verletzbarkeitsfunktionen (*Fragility Functions*) gewählt.

Es war ein wesentliches Ziel des Projektes, erdverlegte Rohrleitungsnetze einer (zunächst auf Testgebiete beschränkten) Bestandsanalyse zu unterziehen und einer für die Erdbebenszenarien tauglichen Typisierung (unter Beschränkung auf das Wesentliche) zuzuführen. Insofern kam es darauf an, die Schadensbeobachtungen nach den material- und ausführungsspezifischen Merkmalen (der unterschiedlichen Rohrleitungen) in Relation zu ihrer Verletzbarkeit bei vergleichbaren Einwirkungsparametern (*Intensity Measure IM*) zu setzen.

Es wurde entschieden, auf dieser Grundlage ein dem Vorbild der EMS-98 (Grünthal *et al.*, 1998) folgendes Klassifikationsschema zu entwickeln. Die Verletzbarkeitsklassen wurden für die wesentlichen Rohrleitungstypen festgelegt (vgl. Tabelle 6).

Die Tabelle der Verletzbarkeitsklassen deckt die wesentlichen Rohrleitungstypen (in Material, Durchmesser, Alter) ab und kennzeichnet Streubereiche. Ausgehend von der Basiseinstufung (*most likely VC*) ist in Abhängigkeit von Material, Alter, Durchmesser und Leitungstyp (Freispiegel, Druckleitung) die Verletzbarkeitsklasse (innerhalb der Streubereiche) festzulegen.

Bei PE/PP (rigid) wäre im Falle einer Druckleitung statt C die Verletzbarkeitsklasse D oder F anzusetzen, verbunden mit einer geringeren Schadenserwartung (vgl. Bild 33).

Die Abstufung der Verletzbarkeit stützt sich auf die vergleichende Auswertung beobachteter Schadensfälle und die daraus erfahrungsbasiert abgeleiteten (für die Breite des Einwirkungsbereichs letztlich unterstellten) Schadensfunktionen.

[Anmerkung: Die erste exemplarische Anwendung auf die Bestandsdaten des Testgebietes Albstadt (hier Abwasser) konnte zum 2. Statustreffen (09.11.2021) vorgelegt werden; siehe Präsentation des Projektes ZUVERSICHT.]

Damit liegen erstmals (in dieser Form und Vorgehensweise) die Voraussetzungen für intensitätsbasierte Szenarien von erdverlegten Infrastrukturnetzen und -komponenten vor.

Die auf den Auswertungen von Erdbebenschäden basierenden *Fragility Functions* wurden aufbereitet und daraus konsistent Funktionen für die Verletzbarkeitsklassen abgeleitet.

Tabelle 6: Verletzbarkeitsklassen von Rohrleitungssystemen in Anlehnung an EMS-98; entnommen aus Schwarz *et al.* (2023a)

Pipe Structure			Vulnerability Class (VC)					
Material		Joints	A	B	C	D	E	F
Non-ductile	AC	rigid	○-----					
	AC	flexible	-----○-----					
	Concrete	rigid	---○---					
	Concrete	flexible	-----○-----					
	Reinforced Concrete	rigid	---○---					
	Reinforced Concrete	flexible	-----○-----					
	Ceramic	rigid	---○---					
	Ceramic	flexible	-----○-----					
	Masonry	-	○					
Ductile	PVC	rigid	---○--- -----					
	PVC	flexible	-----○-----					
	PE/PP	rigid	---○--- -----					
	PE/PP	flexible	-----○-----					
	GFK Polymer	rigid	---○--- -----					
	GFK Polymer	flexible	-----○-----					
	Cast Iron	rigid	---○--- -----					
	Cast Iron	flexible	-----○-----					
	Ductile Iron	rigid	---○--- -----					
	Ductile Iron	flexible	-----○-----					
	Steel (arc welded)	rigid	---○--- -----					
	Steel (arc welded)	flexible	-----○-----					
○ Most Likely Vulnerability Class — use as pressure pipe ----- age of use < 10 / > 30 years								

4.2 Verletzbarkeitsfunktionen

Die Erläuterungen zur Entwicklung der Verletzbarkeitsfunktionen sind Abschnitt 14.2 zu entnehmen.

4.3 Reparaturraten

Anhand der Auswertungen zu den Verletzbarkeitsfunktionen in Abschnitt 4.2 ist festzustellen, dass die vorhandenen Fallstudien (Beispiele) letztlich die Schäden vornehmlich nur großmaßstäblich in empirischen Zusammenhängen zwischen *Intensity Measure* (PGV, seltener PGD, Intensität) und der Reparaturrate (als dem für Szenarien bestgeeigneten Parameter auf der Widerstandseite) abbilden. Die große Streubreite der vorgelegten Beziehungen und Auswertungen (s. Abschnitt 4.2) ist auch durch die begrenzte Datenbasis und z. T. nicht datenhinterlegte Einwirkungsbereiche zu erklären.

Bild 33 zeigt die aus der Datenanalyse entwickelten Verletzbarkeitsfunktionen. Mit ihnen kann für die Typen der Rohrleitungen gezeigt werden, welche Schadenserwartungen bzw. kritische Schadenszustände erreicht werden. Die auf den Auswertungen von Erdbebenschäden basierenden *Vulnerability Functions* wurden aufbereitet und mit den Funktionen für die Verletzbarkeitsklassen abgeglichen. Die Funktionen geben in der vorliegenden Form die Reparaturrate (RR) bezogen auf eine jeweils vereinheitlichte Länge der Rohrleitung (z. B. 1 km) in Abhängigkeit von den durch die Gefährdungsanalysen berechneten bzw. aus Konversionsbeziehungen abgeleiteten Kenngrößen (PGV, Intensität) an. Damit ist letztlich auch die Verbindung zwischen den intensitätsbasierten Gefährdungsanalysen und der probabilistischen Simulation von Erdbebenbibliotheken gegeben.

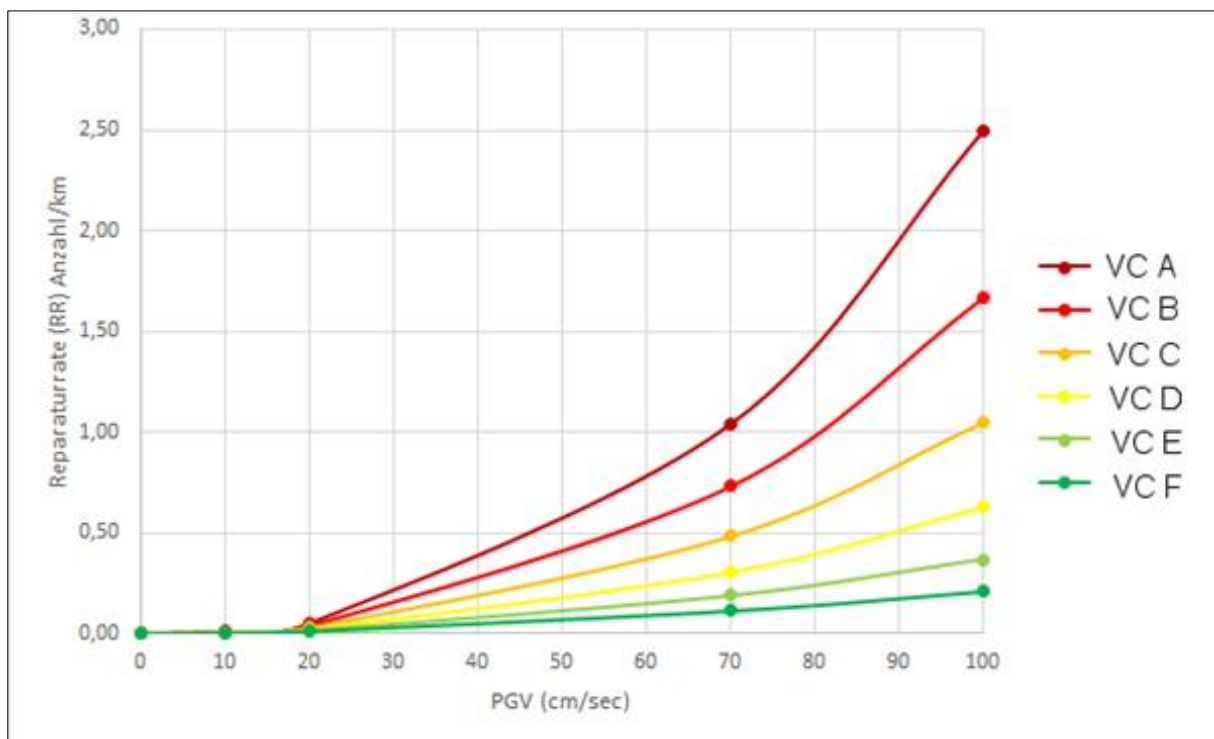


Bild 33: Verletzbarkeitsfunktionen von Rohrleitungssystemen (in Verbindung zu Tabelle 6)

4.4 Aufbereitung der relevanten Datenebenen im Testgebiet

4.4.1 Historische Erdbeben und potentielle Erdbebenherde

Die Begründung standortkonkreter Szenarien erfordert die Aufbereitung relevanter Datenebenen. Sie beinhalten, wie bereits in Abschnitt 2.1.4 dargestellt, die tektonischen Störungen bzw. besonders „seismogen“ einzustufende Verwerfungen und die rezente seismische Aktivität, die anhand der vom SZGRF bereitgestellten Bulletins nachvollzogen werden. Die zur Generierung von Erdbeben erforderliche Spannungssituation lässt sich anhand der *World Stress Map* (Heidbach *et al.*, 2016) oder anderer regionaler Informationsquellen (Landeserdbebedienste) nur im globalen Kontext einordnen und gewinnt an Bedeutung, wenn sich ein Zusammenhang zur Erdbebentätigkeit herstellen lässt (vgl. Bild 11).

4.4.2 Lokale Untergrundeffekte

Aufbereitet wurden die geologischen Basisdaten. Mittels instrumenteller Standortuntersuchungen wurden die mit DIN EN 1998-1/NA: 2021-07 konformen Untergrundklassen festgelegt. In Kombination der Informationen konnte eine Art Mikrozonierung des Albstädter Stadtgebietes vorgenommen werden, mit der die standortspezifische Variation der Einwirkungen bei den Szenarien berücksichtigt und in den Konsequenzen dargestellt werden kann.

Grundlage bildeten im Rahmen des Vorhabens (erst zum Ende) durchgeführte Messungen und ihre Zusammenführung mit den bereits in der Vergangenheit in anderem Kontext durchgeführten Untersuchungen. Dem Bericht von Schwarz *et al.* (2023) sind die Auswertungen verschiedener Messkampagnen, beginnend mit den ersten Auswertungen nach dem Erdbeben 1978 (Schwarz *et al.*, 2005) bis zu den im April 2023 durchgeführten Messungen, zu entnehmen.

4.4.3 Transformation der Rohrleitungsnetze in Verletzbarkeitsklassen

Der Praxis- und Anwendungsbezug der Untersuchungen wurde durch die Einbindung von Kooperationspartnern und die Übernahme von Daten zu den vorhandenen Abwasser-, Trinkwasser- und Gasnetzen gewährleistet. Sie wurden aufbereitet und mit verschiedenen GIS-Datenebenen überlagert. Die exemplarische Anwendung von Tabelle 6 auf die Bestandsdaten der Testgebiete Albstadt und Köln ist erfolgt. Bild 34 beschränkt sich auf die Wiedergabe der Zuordnungen für das Abwassernetz in Albstadt.

Nach dem Treffen in Albstadt (9. November 2021) mit dem Leiter der Abteilung Bauordnung des Stadtplanungsamtes zum Zustand des Abwassernetzes wurden nach den Abwasserleitungen, später auch die Daten zum Wasser- und Gasnetz (zur projektbezogenen internen Verwendung) übergeben. Diese wurden ebenfalls aufbereitet und in Bezug auf die Verletzbarkeit bewertet. In den Szenarien können Schäden nach einem Erdbeben in den Netzen für Gas, Wasser und Abwasser nun getrennt und synoptisch angegeben werden.

Ebenso wurden die vom assoziierten Kooperationspartner übergebenen Daten für das Abwassernetz in Köln aufbereitet. Mit modelltauglich aufbereiteten Rohrleitungsnetzen können nun in der am höchsten seismisch gefährdeten Erdbebenregion Deutschlands Szenarien für unterschiedliche Wiederholungsperioden bzw. fiktiv unterstellte Erdbebenherde und Ereignisstärken zur Anwendung kommen.

4.5 Szenarien

4.5.1 Übersicht zur Vielfalt der Vorgehensweisen

Die Szenarien für die Testgebiete sollten einerseits durch die historische Erdbeben­tätigkeit begründet, rein methodisch aber durch Magnituden-Entfernungs-Kombinationen beschrieben sein, die sich aus deterministischen und probabilistischen Gefährdungsanalysen ableiten. Im Prinzip kann mit Bezug auf Bild 5 (Seite 14) und für eine vorgegebene Gefährdungskenngröße die „Schnittlinie“ durch eine gleichrangige Szenarium-Liste beschrieben bzw. in einem entsprechenden Anwendungstool implementiert werden.

Von Schwarz *et al.* (2023a; hier: Abb. 4) wird in einer grafischen Übersicht der Datenströme und möglichen Verzweigungen gezeigt, wie letztlich durch Eingangsgrößen von Gefährdung/Einwirkungen und Verletzbarkeit Szenarien durchgespielt und die Schäden im mesoskaligen Bereich der Rohrleistungssegmente prognostiziert werden können.

Die in Bild 34 zitierten Beispiele beziehen sich auf eine Bearbeitungslinie aus dem im Vorhaben herausgearbeiteten Satz von möglichen Vorgehensweisen.

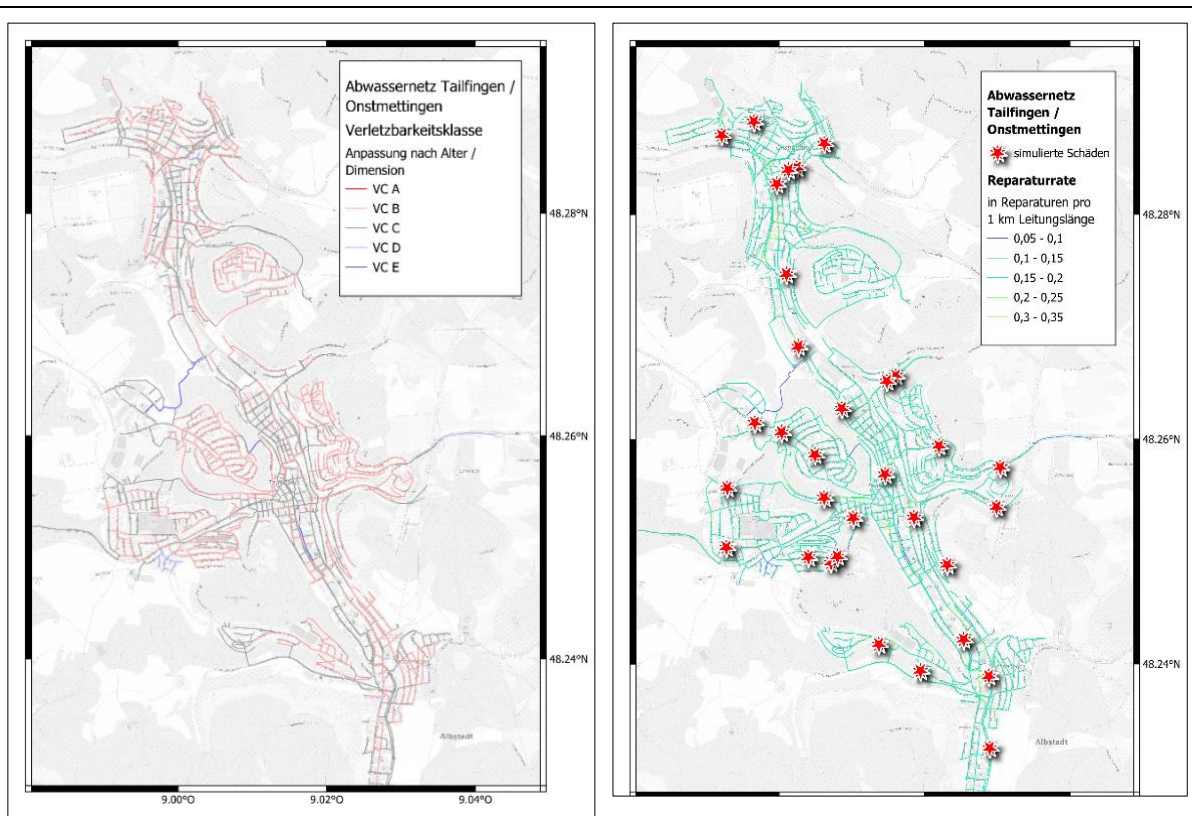
4.5.2 Ergebnisse für das Testgebiet Albstadt

Auf der Grundlage von simulativen probabilistischen Gefährdungsanalysen (vgl. Schwarz *et al.*, 2015, 2019a) werden seismische Kenngrößen für standortkonkrete Risikoszenarien unterschiedlicher Wiederkehrperioden bereitgestellt. In den Szenarien werden die (wahrscheinlichen) Schäden nach einem Erdbeben in den Netzen für Gas, Wasser und Abwasser getrennt und synoptisch (in der Gesamtschau) angegeben. Beispiele beziehen sich nachfolgend auf das Abwassernetz von Albstadt, dessen Gesamtlänge anhand der aufsummierten Haltungslängen ca. 380 km beträgt.).

Mit den bereitgestellten Datenebenen und Verknüpfungen (Konversions- und Abnahmebeziehungen) können Szenarien für vorgegebene Intensitäten oder Bodenbewegungen flächendeckend konstant oder unter Berücksichtigung der Erdbeben-Ausbreitungseffekte ausgehend von konkreten Herdlagen simuliert werden. Bild 34 illustriert drei Szenarien, die ausgehend von den zugeordneten Verletzbarkeitsklassen für das Abwassernetz (Bild 34a) durchgespielt werden (Schwarz *et al.*, 2023a):

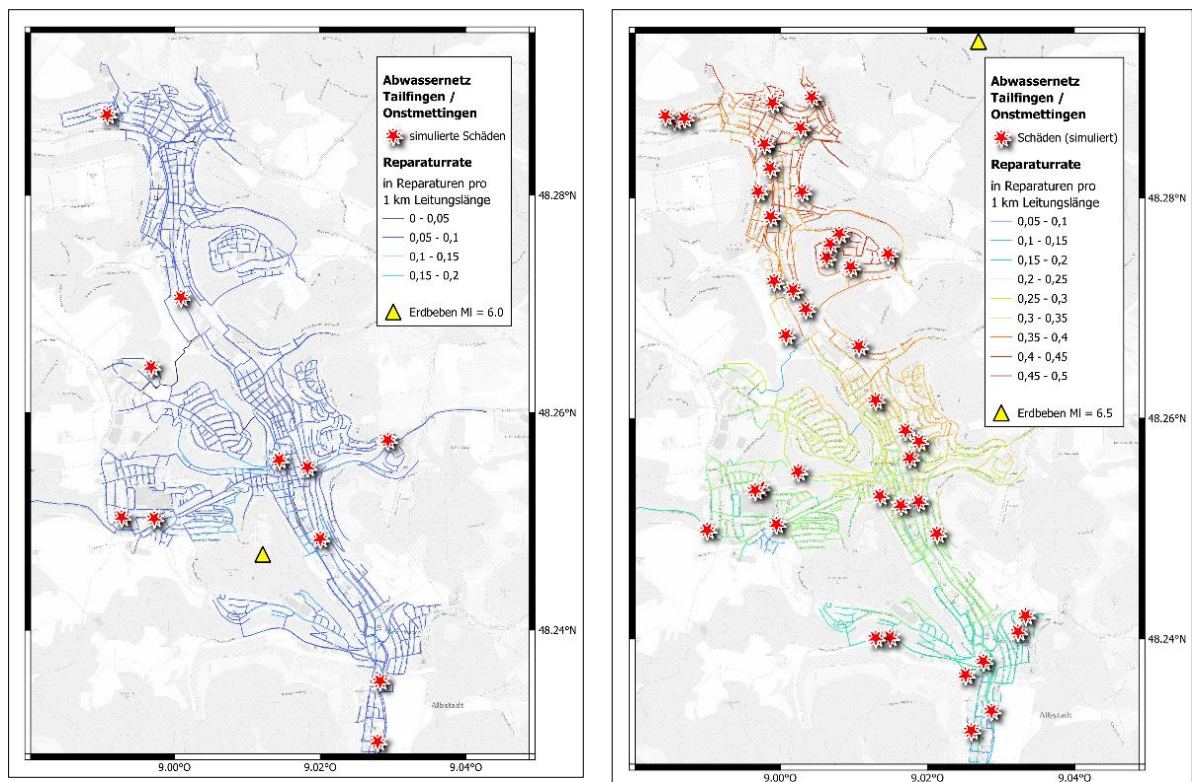
- Szenarium 1: Im Testgebiet wird eine konstante horizontale PGV von 40 cm/s unterstellt (vgl. auch Bild 5). Untergrundeffekte werden nicht differenziert berücksichtigt. Es treten 64 Schäden im gesamten Netz (nicht alle im Kartenausschnitt sichtbar) auf (s. Bild 34b).
- Szenarium 2: Es wird quasi die Stärke des Erdbebens von 1978 mit $M_L = 6,0$ mit Herdtiefe 7 km angesetzt und der Herd in Nähe der Stadtmitte gelegt. Die Ermittlung der PGV erfolgt entfernungsabhängig für die Untergrundbedingungen ($v_{s,30}$) nach GMPE von Bindi *et al.* (2014) und 50 %-Quantile. Es werden 21 Schäden im Netz (nicht alle sichtbar) prognostiziert (s. Bild 34c).
- Szenarium 3: Mit dem Magnitude $M_L = 6,5$ Erdbeben (Herdtiefe 6 km, nordöstlich bei der Hauptverwerfung gelegen; vgl. Bild 11) werden nun 69 Schäden im gesamten Netz (nicht alle sichtbar) simuliert (s. Bild 34d).

Mit den erhobenen Angaben zu den verschiedenen Rohrleitungsnetzen können auch *Worst-Case*-Szenarien ausgewertet werden.



a) Verletzbarkeitsklassen

b) Szenarium 1



c) Szenarium 2

d) Szenarium 3

Bild 34: Ergebnisse der Szenarien für das Abwassernetz von Albstadt und die zugeordneten Verletzbarkeitsklassen; jeweils dargestellt für die Reparaturrate und simulierten Schadensfälle (Schwarz *et al.*, 2023a)

5 Simulationstools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung (ifak, EDAC)

5.1 Anforderungen und Lastenheft

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei unterschiedliche Anwendungsszenarien identifiziert, die jeweils spezifische Anforderungen an die entwickelte Software stellen:

Anwendungsszenario 1: Offline Planung und Netzanalysen zur Verbesserung der Resilienz

In diesem ersten Szenario steht die Offline Planung im Vordergrund. Die Software soll es den Anwendern ermöglichen, im Vorfeld Erdbebenszenarien zu analysieren und Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von erdverlegter Infrastruktur zu planen. Zu den Hauptanforderungen gehören:

- Benutzerfreundliche Oberfläche: Die Software muss eine intuitive Benutzeroberfläche bieten, die es den Planern ermöglicht, geografische Daten und Infrastrukturdetails einzugeben.
- Erdbebendatenintegration: Sie sollte in der Lage sein, aktuelle Erdbebendaten aus verlässlichen Quellen zu importieren und zu verarbeiten. Dies ermöglicht es, präzise Planungen auf Grundlage aktueller Informationen durchzuführen.
- Simulation von Abwassernetzen (Freispiegel-Abfluss) und Trinkwassernetzen (Drucknetze) unter Normalbedingungen und beim Auftreten von Schäden (Blockaden, Leckagen, ...).
- Analysefunktionen: Die Software muss umfassende Analysefunktionen bieten, darunter die Berechnung der Auswirkung von Strukturschäden in Folge eines Erdbebens.
- Ergebnisdarstellung: Die Ergebnisse der Netzanalysen sollten grafisch aufbereitet werden, um den Planern eine klare Vorstellung von den Auswirkungen zu vermitteln. Berichtsgenerierungsfunktionen sind ebenfalls wichtig.

Anwendungsszenario 2: Online Überwachung während eines Erdbebens und Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen

Im zweiten Szenario liegt der Schwerpunkt auf der Online Überwachung während eines tatsächlichen Erdbebens und der schnellen Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen. Dabei müssen die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- Echtzeitdatenintegration: Die Software muss in der Lage sein, während eines Erdbebens Echtzeitdaten zu erfassen und zu verarbeiten. Dies erfordert eine nahtlose Integration in vorhandene IT-Systeme und SCADA-Systeme zur kontinuierlichen Datenüberwachung.
- Online-Netzanalysen: Während des Erdbebens sollte die Software in der Lage sein, Netzanalysen in Echtzeit durchzuführen, um Art und Ort der Schäden zu identifizieren. Dies ermöglicht eine sofortige Reaktion.
- Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen: Basierend auf den während des Erdbebens gesammelten Daten sollte die Software die Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen unterstützen. Dies könnte die Bereitstellung von Ressourcen, das Priorisieren von Reparaturen und die Koordination von Maßnahmen umfassen.
- Online-Datenanbindung: Die Software muss in der Lage sein, sich nahtlos an vorhandene IT-Systeme und SCADA-Systeme anzubinden, um relevante Daten in Echtzeit zu erhalten.

Beide Anwendungsszenarien erfordern eine robuste, leistungsfähige Softwarelösung, die die Sicherheit und Integrität der Daten gewährleistet. Darüber hinaus sollten sie flexibel genug sein, um den spezifischen Anforderungen und Herausforderungen im Zusammenhang mit Erdbebenanalysen und Infrastruktur-Resilienz gerecht zu werden. Die genaue Umsetzung dieser Anforderungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Entwicklern und Fachexperten aus den relevanten Bereichen.

In diesem Arbeitspaket wurde auf Basis des beim Antragsteller ifak vorliegenden Simulationssystems SIMBA# ein Simulationstool zur Gefährdungsbeurteilung prototypisch entwickelt. Mit dem Simulationswerkzeug können erdverlegte Leitungsnetze (Trinkwasser, Abwasser, Fernwärme) abgebildet werden und die grundlegende Funktion simuliert werden. Im Prinzip werden Wasserstände und Durchflüsse (Abwasser im Freispiegelabfluss) bzw. Drücke und Durchflüsse (Trinkwasser, Abwasser in Druckrohrleitungen, Fernwärme) simuliert.

Methodisch müssen in den Simulationsmodellen neben den für die Simulation der Funktion benötigten Eigenschaften (Durchmesser, Längen, Einbauten) auch weitere Attribute verwaltet werden, die den Zustand der Leitungen, Materialien und Bauarten und letztlich die Erdbebengefährdung beschreiben.

5.2 Offline-Werkzeug zur Verletzbarkeitsanalyse und Maßnahmenplan Erstellung

5.2.1 Simulationsansätze zur Auswirkung von Erdbebenschäden auf Netze - Abwasser

Für die Planung des Simulationstools zur Gefährdungsbeurteilung wurden für die beiden wichtigen Teilnetze Abwasser und Trinkwasser unterschiedliche Modellierungsansätze betrachtet. Für die Simulation der Funktion des Abwassernetzes (Freispiegelabfluss) wurden die zwei prinzipiellen Ansätze hydrologisches Modell und hydrodynamisches Modell betrachtet. Die ursprüngliche Idee, mit vereinfachten hydrologischen Modellen zu arbeiten, wurde verworfen.

Um die Auswirkung von Schadenseffekten auf die Funktion und den hydraulischen Zustand des Kanalnetzes bewerten zu können, wird ein hydrodynamisches Modell benötigt. Berücksichtigt werden sollten Verluste oder Infiltration durch Leckagen, die Verringerung der hydraulischen Kapazität durch Querschnittsverengungen, die Veränderung der Höhenlagen von Schächten und Kanalabschnitten und komplette Unterbrechungen (Verlust und Einstau). Mit einem hydrologischen Ansatz ist allenfalls der Aspekt Verluste und erhöhte Infiltration abbildbar.

Nur ein hydrodynamischer Ansatz erlaubt eine Systembeschreibung der Auswirkungen der anderen Schadenswirkungen (Einstau, gedrosselte Durchflüsse). Zu diesem Zweck wurde das Simulationswerkzeug SIMBA# um diese Funktionalität erweitert. Es wurde eine neue Blockbibliothek zur hydrodynamischen Abbildung von Abwassernetzen implementiert. Als Berechnungsansatz wurde der in SWMM implementierte Ansatz übernommen.

Diese neuen Blöcke stellen Grundelemente (Schächte, Haltungen, Becken, Drosseln, etc.) zur Verfügung, mit denen GIS-basiert Kanalnetze nativ in SIMBA# modelliert werden können. Für ein so beschriebenes Netz muss dann ein SWMM-Solver Block in das Modell eingefügt werden, der dann zentral dieses Teilnetz simuliert. Die neuen Teilblöcke und der neue SWMM-Solver Block sind neue in C# programmierte SIMBA# Blöcke, die Modellgleichungen und den Saint-Venant Solver aus der Open-Source SWMM nachempfinden. Auf diese Weise ist das Modell eines Kanalnetzes komplett und vollständig in SIMBA# integriert. In dieser Variante kann der Stofftransport im Netz entweder mit einem CSTR-Ansatz (wie auch original in SWMM) oder aber mit einem Lagrange Ansatz gerechnet werden.

Umwandlungsprozesse werden mit einem SIMBA# ASM-Modell definiert. Der Solver erlaubt auch die Berechnung von Druckabfluss in Netzabschnitten.

5.2.2 Simulationsansätze zur Auswirkung von Erdbebenschäden auf Netze – Abwasser und Trinkwasser in Druckrohrleitungen

Hier wird ein physikalischer Modellierungsansatz, der Drücke und Durchflüsse abbildet, benötigt. Insbesondere die Auswirkungen des Schadenfalls Leckage auf Druck und Durchflüsse erfordert diesen Ansatz. Im Ergebnis dieser Vorbetrachtungen wurde festgelegt, für vollgefüllte Rohrleitungen einen algebraischen Ansatz zur Druck- und Durchflussberechnung zu nutzen. Auch hier wurde eine neue Blockbibliothek für SIMBA# implementiert, mit der sich vollgefüllte Rohrleitungsnetze simulieren lassen (siehe Bild 35). Als Berechnungsansatz wurde der in EPANET als open Source, public domain beschriebene Solver in SIMBA# implementiert. Die Blöcke wurden auf die Abbildung von Schadensszenarios vorbereitet. Wasserverluste werden Netzknoten zugeordnet, und es wurden drei Wasserverlust-Modelle implementiert. Mit dem PDD - *Pressure Driven Demand* Ansatz wird die Abbildung von normaler Wasserentnahme unter Auswirkung von Leckagen (Druckverlust) abgebildet. Sogenannte Emitter-Modelle beschreiben einen Wasserverlust in Knoten proportional zu Netzdruck, ein Kv-Wert wird zur Beschreibung genutzt. Sehr ähnlich zum Emitter-Ansatz wird ein Wasserverlust durch eine Leckage modelliert, hier wird aber als Parameter die Fläche der Leckage-Öffnung vorgegeben.

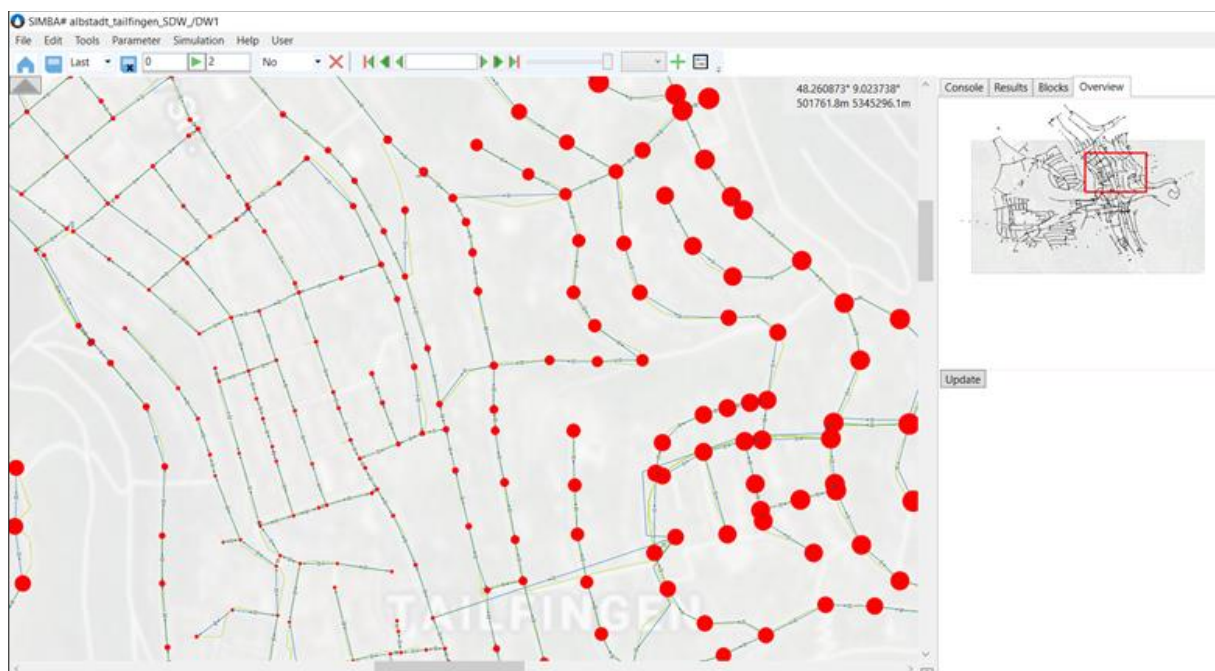


Bild 35: Modell eines Trinkwassernetzes

5.2.3 GIS basierte Arbeit

Zum Umgang mit georeferenzierten Netzen wurde zum einen der Datenaustausch mit GIS Systemen betrachtet aber zum andern auch analysiert, wie ein GIS basiertes Arbeiten im Simulationswerkzeug SIMBA# ermöglicht werden kann. Um diese Funktionalität zu erreichen, wurde das Simulationswerkzeug um wichtige Aspekte georeferenzierter Arbeit erweitert:

- Unterstützung von Projektionen: Für Kartenbasierte Modelle werden zwei Standardprojektionen (WGS84 Easting and Northing coordinates (approx. ETRF89) und Mercatorprojektion) unterstützt. Die Georeferenzierung kann alternativ auch immer in Kugelkoordinaten (Länge, Breite) vorgenommen werden.
- Unterstützung von Shape-Dateien: Für die Hinterlegung von in GIS verfügbaren Informationen können im Simulationssystem direkt ESRI-Shape-Datei basierte Karten eingefügt werden. Punkt, Linien und Polygonobjekte werden unterstützt und vielfältige Visualisierungsoptionen angeboten.
- Unterstützung georeferenzierter Bitmaps: Mit einem weiteren Element können Bilddateien georeferenziert hinterlegt werden. So lassen sich zum Beispiel OpenStreetMap-Karten hinterlegen.
- Digitale Geländemodelle: Simulationsprojekte können ein DGM beinhalten. Die Höhen Daten werden aus einer Datei im XYZ Format gelesen. Die Netzwerkblöcke können auf das DGM zurückgreifen.
- Der Export von Netzmodellen und Simulationsergebnissen in ESRI-Shape-Dateien ist geplant.

5.2.4 Vorbereitung und Unterstützung zur Arbeit mit realen Anwendungsstädten

Für eine aufwandsarme Anwendbarkeit der Simulationstools für konkrete Fallstudien (Städte) ist die automatisierte Datenübertragung aus existierenden Management-Systemen in das Erdbebenbewertungstool nützlich. Netzdaten werden typischerweise in GIS-Systemen verwaltet, wobei leider keine herstellerübergreifenden Standards existieren. Als ein kleinster gemeinsamer Nenner kann die Nutzung von ESRI Shape-Files angesehen werden. Damit kann die Position von Punkten, Linien und Polygonobjekten auf einer Karte geografisch referenziert werden. Objektattribute werden im DBase-Format verwaltet. Typ, Namen und Umfang der Attribute sind nicht standardisiert. Es wird ein generischer Importmechanismus angestrebt.

Diese Aufgabe ist mittlerweile weit fortgeschritten. Es wurden spezielle Importfilter für eine Reihe von Beispiel-GIS Katastern von Kanalnetzen und Trinkwassernetzen implementiert und Erfahrungen gesammelt und typischerweise vorhandene Datenattribute analysiert. Insgesamt wurden folgende Importfilter implementiert:

- Kanalnetzdaten Albstadt (GIS, ESRI-Shape: Schächte, Haltungen, Sonderbauwerke)
- Kanalnetzdaten Bystřice nad Pernštejnem, Tschechien (GIS, ESRI Shape: Schächte Haltungen, Pumpwerke, CSOs)
- Kanalnetzdaten Tišnov, Tschechien (GIS, ESRI Shape: Schächte Haltungen, Pumpwerke, CSOs)
- Trinkwassernetzdaten Albstadt (GIS, ESRI-Shape: Knoten, Leitungen, Grundstücke)
- Trinkwassernetzdaten Berlin (EPANET- INP-Datei: Knoten, Leitungen, Pumpen)

Bei der Auswertung dieser Daten und dem Importergebnis sind folgende, nicht unerwartete Herausforderungen sichtbar geworden:

- Namensgebung: GIS Elemente sind durch eine geografische Position und Attribute gekennzeichnet. Typischerweise wird eine Bauwerks-ID als ein Attribut definiert. Namensgebung und Datentyp (Integer/String) sind sehr unterschiedlich. Es mussten fallweise Umbenennungs-Algorithmen implementiert werden. Besonders fatal sind Beispiel-Datensätze, bei denen keine eindeutige ID vom Editor-System erzwungen wird. In einigen Fällen wurden Namen doppelt vergeben mit dem Ergebnis, dass namensbasierte Verknüpfungen nicht mehr eindeutig zuordenbar sind.
- Verknüpfung: ESRI Shape-Dateien definieren in jeweils eigenen Dateien Punktdaten, Liniendaten, Flächendaten. Für Netze sind Netzknoten in der Regel als Punkt, Verbindungen zwischen Knoten als Linien-Element definiert. Durch Shape-Files werden aber keine Beziehungen zwischen Punkt und Liniendaten formuliert. Das heißt, die wichtige Information, welche Linien an einem Knoten verbunden sind, ist nicht explizit darstellbar. In den meisten aber nicht allen Fällen werden zu den Linienelementen als Attribut die IDs von Start- und Endknoten angegeben. Aber hier wurde vom eingesetzten Katastersystem keine Prüfung vorgenommen. Alle möglichen Fälle von Fehleingaben treten auf (Doppelte IDs, nicht existente IDs, fehlerhafte Verknüpfungen). Als Lösung wurde ein Algorithmus entwickelt, der jeweils Raumkoordinaten, eventuell vorhandene IDs etc. verknüpft und damit eine sinnvolle Netzstruktur versucht zu erstellen. Problemfälle werden in einer Logdatei protokolliert (Basis für händische Korrekturen).
- Plausibilität Attribute: Die importierten Daten stammen aus Kataster-Anwendungen zur Verwaltung der Assets. Diese Systeme nutzen die Daten nicht, um irgendwelche technische Funktionen des Systems nachzubilden. Dementsprechend sind keine oder nur sehr rudimentäre Funktionen zur Plausibilisierung von Einträgen vorhanden bzw. offensichtlich falsche Einträge fallen nicht auf. Bei der Parametrierung eines Simulationsmodells mit den Daten werden die Werte wichtig. Das Modell muss bereinigt werden, automatische Plausibilisierung wird in Teilen möglich. Dementsprechend wurde eine Reihe von Skripten zur Datenanalyse implementiert. Zum Beispiel werden Kanalnetze auf Sohlspürungen analysiert und Artefakte protokolliert.

Zur Erzeugung von typischen Belastungsszenarien (Trinkwasserbedarf und Abwasseranfall) für den Normalfall wurde eine sehr aufwandsarme Methode entwickelt und implementiert. Es wurde ein neuer Einzugsgebiet-Block entwickelt, der für ein Teilgebiet aus Kopernikus-Daten Versiegelungsgrade ermittelt, und über diese Information den Gesamt-Trinkwasserbedarf oder Abwasseranfall plausibel über das Stadtgebiet verteilt. Mit diesem Ansatz lassen sich wichtige Modellparameter sehr aufwandsarm einstellen.

5.2.5 Erweiterung der Bedienoberfläche zur projektinternen Darstellung Schadens- und Gefährdungs- und Erdbeben relevanter georeferenzierter Daten

Durch die Projektpartner wurden beispielhaft Karten in unterschiedlichen Formaten mit relevanten Informationen zur Gefährdungsanalyse für den Beispielstandort Albstadt bereitgestellt. Für diese Beispieldaten wurden Funktionen zur Präsentation dieser Daten in SIMBA# ergänzt bzw. getestet. In Bild 36 sind beispielhaft zwei Karten dargestellt (Screenshot aus SIMBA#). Die linke Karte (Darstellung Erdbeben gefährdeter Zonen) wurde als TIF Datei bereitgestellt, die Bodenklassen (rechts) wurden als ESRI Shape-Dateien zur Verfügung gestellt.

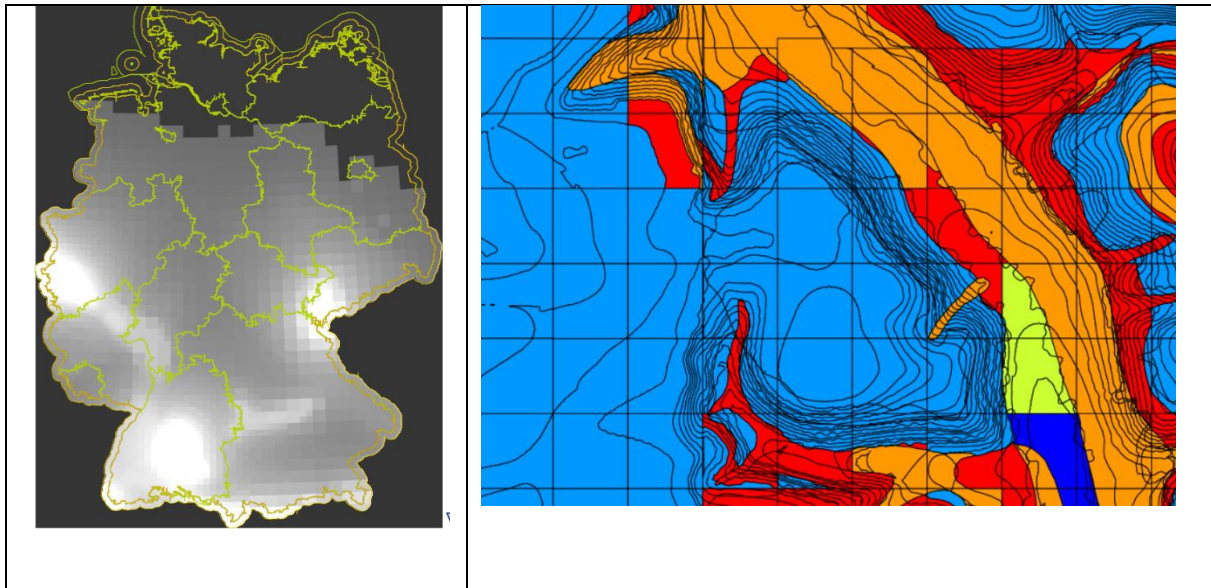


Bild 36: Beispielkarten, links Erdbebengefährdung in Deutschland, rechts Bodenklassen in Albstadt

Bei der den ersten Anwendungserfahrungen wurde beobachtet, dass die Performance der Nutzung der kartenbasierten Bedienoberfläche nicht immer als komfortabel empfunden wird (zu geringe Aktualisierungsrate, zähes Zoomen und Verschieben der Karte). Zur Verbesserung der Benutzbarkeit wurde der Visualisierungscode von SIMBA# grundlegend überarbeitet und an die Herausforderungen angepasst. Das Ergebnis wird als deutliche Komfortverbesserung empfunden.

5.2.6 Erweiterung der Simulationsmodelle um Attribute zur Verwaltung von Material- und Verletzlichkeitsinformationen

Zur Abschätzung der Verletzbarkeit von Rohrleitungen wurde sich auf die Eigenschaften Material, Verbindungstyp (segmentiert, kontinuierlich), Durchmesser und Baujahr geeinigt. Für die Materialien wurden die Vorgaben aus dem Standard ISYBAU verwendet (siehe Bild 37). Für diese Materialien wurde durch die Projektpartner eine Basis-Verletzbarkeit in den Klassen A bis F definiert (in Abhängigkeit vom Verbindungstyp).

```

public static string[,] ISYBAU_G102_Material_descr = new string[,] {
    {"AZ", "Asbestzement", "", "A", "B"},
    {"B", "Beton", "", "AB", "BC"},
    {"BS", "Betonsegmente", "", "B", "C"},
    {"CNS", "Edelstahl", "", "D", "E"},
    {"EIS", "Nichtidentifiziertes Eisen und Stahl", "", "NN", "NN"},
    {"FZ", "Faserzement", "", "C", "D"},
    {"GEFK", "Glasfaserverstärkter Kunststoff", "", "E", "EF"},
    {"GG", "Grauguss", "", "B", "C"},
    {"GGG", "Duktiles Gusseisen", "", "C", "D"},
    {"KST", "Nichtidentifizierter Kunststoff", "", "NN", "NN"},
    {"MA", "Mauerwerk", "", "A", "A"},
    {"OB", "Ortbeton", "", "AB", "BC"},
    {"P", "Dränbeton", "", "B", "C"},
    {"PC", "Polymerbeton", "", "AB", "BC"},
    {"PCC", "Polymermodifizierter Zementbeton", "", "B", "C"},
    {"PE", "Polyethylen", "", "C", "D"},
    {"PEHD", "Polyethylen hoher Dichte", "", "D", "DE"},
    {"PH", "Polyesterharz", "", "C", "D"},
    {"PHB", "Polyesterharzbeton", "", "C", "D"},
    {"PP", "Polypropylen", "", "C", "D"},
    {"PVC", "Polyvinylchlorid", "", "B", "C"},
    {"PVCU", "Polyvinylchlorid hart", "", "C", "D"},
    {"SFB", "Stahlfaserbeton", "", "C", "D"},
    {"SPB", "Spannbeton", "", "C", "D"},
    {"SB", "Stahlbeton", "", "B", "C"},
    {"ST", "Stahl", "", "C", "D"},
    {"STZ", "Steinzeug", "", "AB", "BC"},
    {"SZB", "Spritzbeton", "", "B", "C"},
    {"W", "Nichtidentifizierter Werkstoff", "", "NN", "NN"},
    {"ZG", "Ziegelwerk", "", "NN", "NN"},
    {"MIX", "unterschiedliche Werkstoffe", "", "NN", "NN"},
    {"BOD", "unbefestigt, anstehender Boden, nur für Rinnen und Gerinne", "", "NN", "NN"},
    {"RAS", "Rasen, nur für Rinnen und Gerinne", "", "NN", "NN"},
    {"PFL", "Pflaster, nur für Rinnen und Gerinne", "", "NN", "NN"},
    {"NN", "nicht benannt", "", "NN", "NN"};
}

```

Bild 37: Standardmaterialien

In Bild 38 und Bild 39 sind die Parameterdialoge für die Eigenschaften von Trink- und Abwasserleitungen dargestellt. Im Reiter Extra werden die relevanten Eigenschaften eingegeben.

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Parameter block EP P9' dialog box. The left screenshot displays the 'General' tab, which includes fields for 'Model type' (dw1), 'Diameter' (0.2 m), 'Length' (402.74113073493339 m), 'Absolute roughness' (0.2 mm), and checkboxes for 'Use check valve', 'Pipe is open', and 'Display pipe length'. It also has input fields for head loss coefficients and a 'Block style' dropdown set to 'Map'. The right screenshot displays the 'Extra' tab, featuring a 'Notes' field, a 'Material' dropdown set to 'B Beton', checkboxes for 'Rigid connections' and 'Automatic calculation of vulnerability', a 'Year of construction' field (1980), a 'Vulnerability to damage' dropdown (AB), and a 'Resulting vulnerability' field (1.2720023555123687). Both windows have 'Help', 'Defaults', 'Cancel', 'Ok', and '>' buttons at the bottom.

Bild 38: Blockparameter für eine Trinkwasserleitung

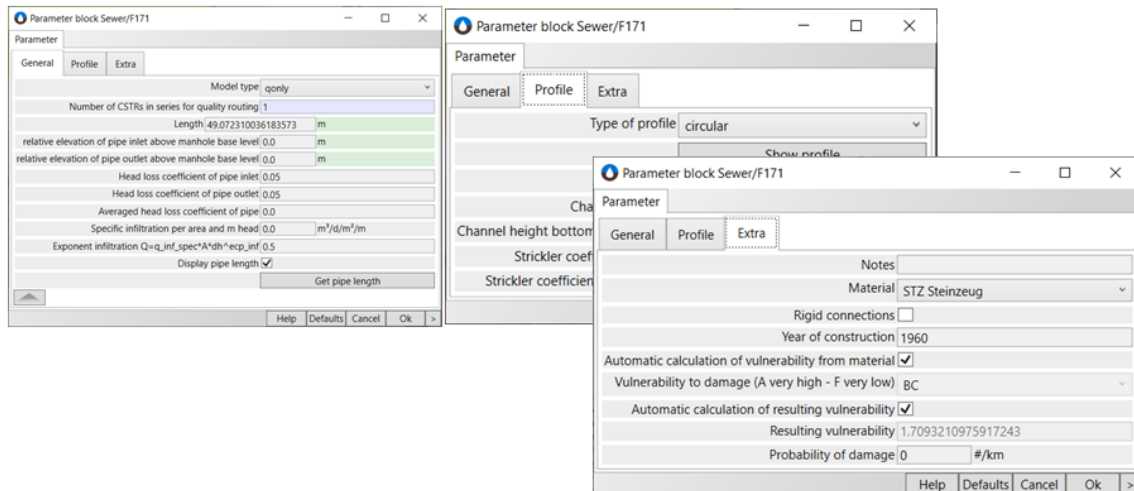


Bild 39: Blockparameter für eine Abwasserleitung

Wird die Option „Automatische Berechnung der Verletzlichkeit“ gewählt, wird die Verletzlichkeitsklasse aus der Tabelle 6 bestimmt. Aus dieser Basis-Verletzlichkeit wird über Durchmesser und Alter der Leitung eine resultierende Verletzbarkeit und eine Reparaturrate berechnet. Der entsprechende Algorithmus wurde vom Partner EDAC entwickelt.

5.2.7 Erweiterung der Bedienoberfläche um Interaktionsfunktionen, um Schadensereignisse, Maßnahmen zur Schadenseingrenzung und zur Netzrehabilitierung aufzuprägen

Für die interaktive Netzanalyse wurden die Kontextmenüs von Knoten und Rohrleitungselementen für Trink- und Abwassernetze in SIMBA# erweitert (siehe Bild 40). Mit diesen Kontextmenü-Einträgen lassen sich:

- Abwasserleitungen komplett verstopfen
- In Abwasserleitungen Strömungshindernisse erzeugen
- Abwasserleitungen reparieren
- Trinkwasserleitungen schließen und öffnen
- Trinkwasserleitungen zerstören
- Schwerwiegende Leckagen in Trinkwasserleitungen erzeugen
- Trinkwasserleitungen reparieren



Bild 40: Interaktionsoptionen

Nach Auswahl des Menüeintrages wird die ausgewählte Aktion durchgeführt und der Netzzustand neu berechnet. Auswirkungen des Schadens bzw. der Maßnahme werden damit interaktiv und unmittelbar sichtbar.

5.2.8 Erweiterungen der Bedienoberfläche um weitere spezialisierte Visualisierungsfunktionen

Für die sinnvolle Anwendung des Offline-Analysewerkzeuges ist eine sehr komfortable Visualisierung der Netzzustände essentiell. Auf Basis erster Probeanwendungen wurden eine Reihe von Verbesserungen implementiert. Die Auswahl dieser Optionen wurde in einen separaten Reiter des Berechnungsblocks für die beiden Netzformen (Trinkwassernetz und Abwassernetz) integriert (siehe Bild 41).

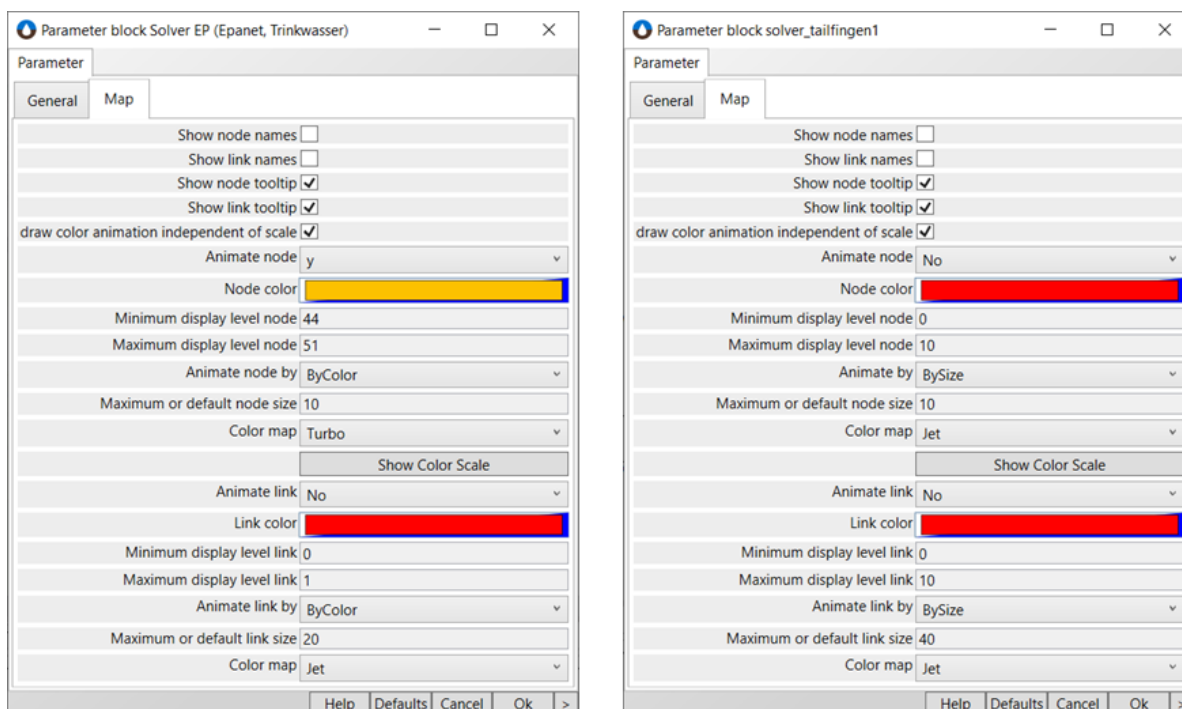


Bild 41: Parameterdialoge zur Netzvisualisierung

Die Dialoge sind weitgehend identisch, sie unterscheiden sich in den angebotenen Eigenschaften, die visualisiert werden können. In den Dialogen kann eingestellt werden, ob Elementnamen und Tooltips über den Netzelementen angezeigt werden. Dann können unabhängig voneinander Knoten- und Verbindungselement (Leitung)-Informationen visualisiert werden. Jede Information kann entweder durch die Größe eines Kreises oder Farbe eines Kreises ausgedrückt werden. Die in Tabelle 7 aufgelisteten Eigenschaften können animiert werden.

Tabelle 7: Animierbare Eigenschaften

Abwasser Knoten (Schacht)	Abwasser Haltung	Trinkwasser Knoten	Trinkwasser Leitung
relativer Wasserstand	Fließgeschwindigkeit	Relativer Druck	Fließgeschwindigkeit
absoluter Wasserstand (NN)	Volumenstrom	Absoluter Druck	Volumenstrom
absolute Höhe des Schachtbodens	Durchmesser	Geografische Höhe des Knotens	Durchmesser
Überflutungsvolumen	Profil Type	Wasserbedarf	Gefälle
Qualitätsparameter	Gefälle	Service Level (Bedarfsdeckung)	Widerstandsbeiwerte
	Sohlsprünge	Qualitätsparameter	Baujahr
	Widerstandsbeiwerte		Basis Verletzlichkeit
	Material		Resultierende Verletzlichkeit
	Baujahr		Schadenswahrscheinlichkeit
	Basis Verletzlichkeit		
	Resultierende Verletzlichkeit		
	Schadenswahrscheinlichkeit		

Für die farbliche Animation werden sogenannte Color-Maps verwendet. Die Liste dieser Color-Maps wurde für dieses Projekt erweitert. Es wurden die in Bild 42 dargestellten Color-Maps ergänzt.

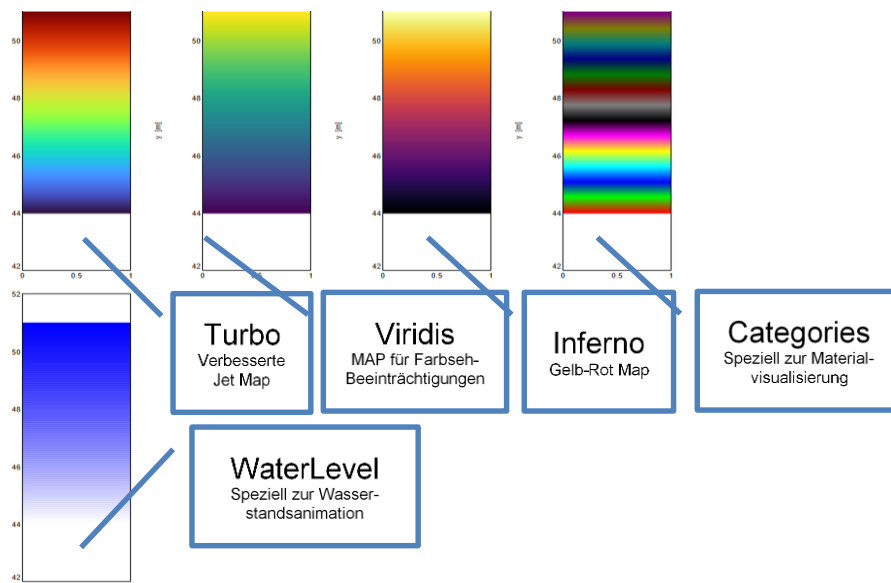


Bild 42: Neue Color-Maps

Die in Bild 41 dargestellten Dialoge sind jetzt andockbar und erlauben eine schnelle Anpassung der zu visualisierenden Funktionen. Für ein im Projekt entwickeltes sehr einfaches Beispielnetz (geeignet zur Schulung) ergibt sich folgenden Screenshot (Bild 43).

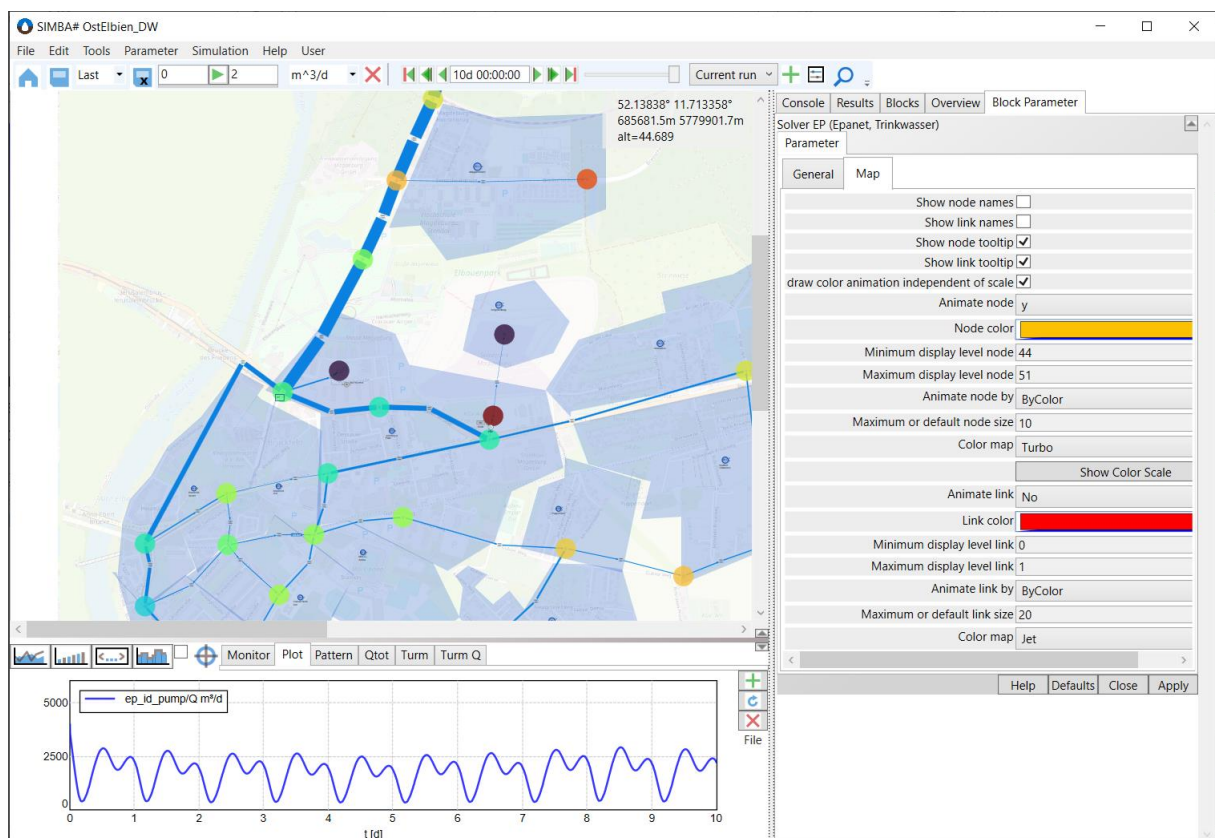


Bild 43: Beispiel mit Animation der Drücke und Flüsse in einem Trinkwassernetz

Dieses Planungswerkzeug befindet sich nun in der Erprobungsphase.

5.3 Online-Werkzeug zur Schadensanalyse und Planung von Maßnahmen

Im AP 5.3 wird ausgehend von dem Planungswerkzeug (AP 5.2) ein System konzipiert, das Netzbetreiber im Schadensfall mit weitergehenden Informationen versorgen kann und zur Planung von Maßnahmen zur Eingrenzung von Funktionsausfällen und Schadensminimierung dienen kann. Für dieses Werkzeug wird das Simulationssystem SIMBA# mit der vorhandenen Open-Source Anwendung ifakFAST verbunden (siehe Bild 44).

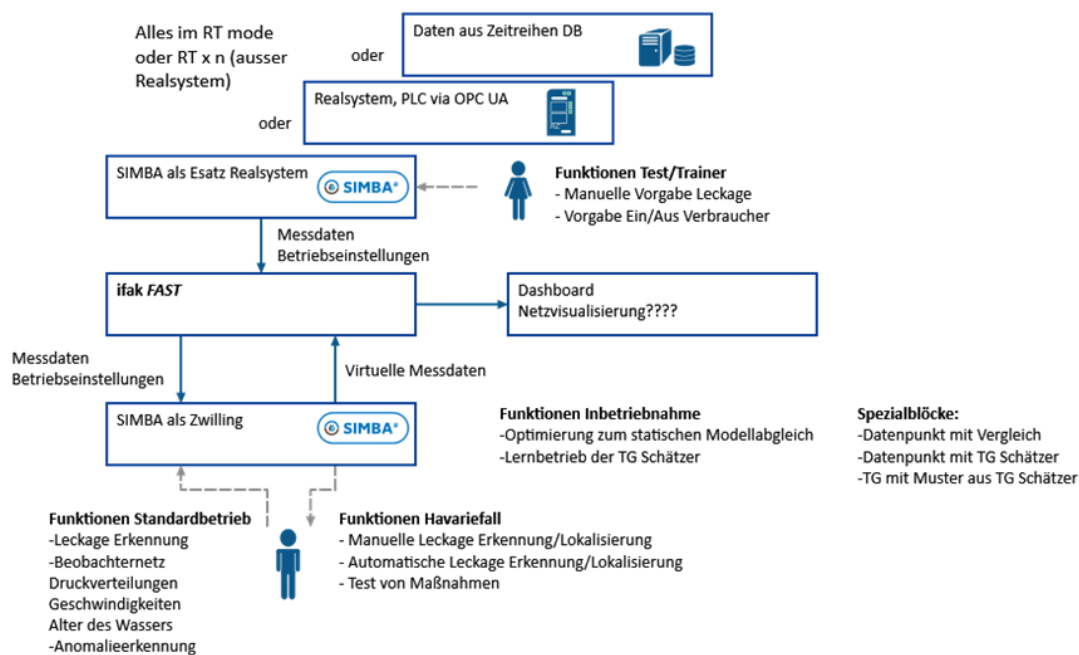


Bild 44: Konzept Onlinewerkzeug

Die Software ifakFAST stellt folgende wichtige Funktionalitäten bereit:

Prozessanbindung an Automatisierungssysteme (OPC, OPC UA, Modbus, Datenbankanbindung, etc.)

- WEB-Dashboard zur Visualisierung und Bedienung
- Alarmmanagementsystem
- Zugriffsrechteverwaltung
- Echtzeitausführung von SIMBA-Modellen

Für die Entwicklung, Erprobung und Demonstration des Systems wird ein virtuelles Entwicklungssystem vorgesehen. In diesem Entwicklungssystem wird das reale Netz mit seinem Automatisierungssystem durch eine weitere SIMBA Instanz ersetzt. Diese SIMBA Instanz repräsentiert das reale System und erlaubt die Simulation aller potentiell vorhandenen Messungen und kann zu Testzwecken mit Schadensszenarien beauftragt werden. Parallel zum realen System (bzw. dem SIMBA Modell, das das Real-System repräsentiert) wird ein sogenannter Digitaler Zwilling bzw. ein Beobachtermodell simuliert. Dieser Zwilling lernt in der Inbetriebnahme-Phase die typischen täglichen Verbrauchsmuster und wird so eingestellt, dass sich für die Messungen aus dem Real-Prozess äquivalente Werte in der Simulation des Beobachtermodells einstellen.

Dieser Zwilling liefert dann bereits im ungestörten Nominalbetrieb wertvolle Informationen. Diese Eigenschaft ist eine Grundvoraussetzung, um Betreiber von Netzen in erdbebengefährdeten Regionen zum proaktiven Aufsetzen eines entsprechenden Systems zu bewegen. Eine wichtige Teilfunktion für ein entsprechendes Beobachtermodell sind Funktionen zum Erlernen der täglichen Verbrauchsmuster. Mit der Entwicklung eines entsprechenden SIMBA# Blockes wurde begonnen. Der entwickelte Block lernt zyklische Verbrauchsmuster und schätzt Standardabweichungen (siehe Bild 45).

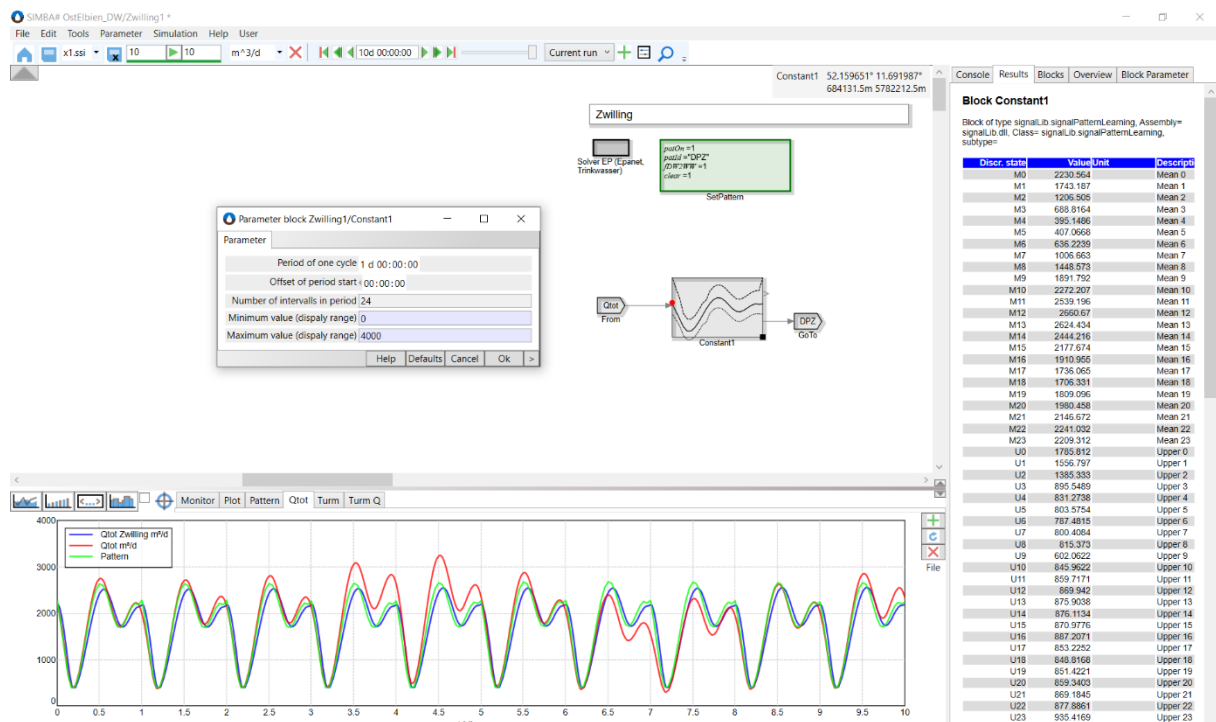


Bild 45: Tagesgangschätzer

Das ermittelte typische Muster wird für die Verbrauchsmodellierung im digitalen Zwilling genutzt.

5.4 Bereitstellung von Datenebenen

Die Kennzeichnung der Rohrleistungstypen nach Verletzbarkeitsklassen (A bis F; vgl. Tabelle 6 Seite 43) wurde für das Simulationsprogramm SIMBA# als taugliche Grundlage getestet und in dessen modulare Struktur aufgenommen. Implementiert wurden neben den Versorgungsnetzen u. a. die Zonierung der Untergrundklassen in Albstadt (Tailfingen und Onstmettingen) sowie die Zuordnung der einwirkungserhöhenden Bodenfaktoren sowie Rasterdaten (Geo-TIFF) für PGV und PGA für Deutschland mit Wiederkehrperioden von 1000 und 2500 Jahren (Daten und QGIS-Arbeitsbereich). Weitere Datenebenen zur Kennzeichnung der tektonischen Situation und Herdlagen in der Umgebung der Testgebiete bzw. standortspezifischen Variation der Einwirkungen können interaktiv integriert und zur Situationsbeurteilung herangezogen werden.

Die Netzdaten für das Testgebiet Albstadt (s. Abschnitt 4.4.3) wurden passfähig aufbereitet und an den Kooperationspartner (ifak) übergeben.

Im Beitrag von Schwarz *et al.* (2023a) zur D-A-CH Tagung 2023 werden die für das Programm SIMBA# vorbereiteten Datenebenen vorgestellt.

5.5 Tools zur Gefährdungsbeurteilung und Entscheidungsunterstützung

Über den Rahmen des Projektes hinausgehend wurde ein Internetangebot zur Risikoabschätzung, d. h. zur Angabe der standortkonkreten relevanten Erdbebenkenngrößen und zu erwartenden Schadensraten entwickelt. Die konkrete Umsetzung basiert (in erster Version) auf einem MatLab-Tool zur Visualisierung der Datenbasis und Berechnungsergebnisse. Dies gewährleistet, dass die vorliegenden Gefährdungsanalysen deutschlandweit zur Verfügung stehen bzw. im Hinblick auf die Bewertung der Rohrleitungsnetzte abgefragt werden können. (Ohne dies im Detail weiter auszuführen sei angemerkt, dass im Tool letztlich die in Bild 46 skizzierten Vorgehensweisen - in den Hauptlinien - umgesetzt sind.)

Durch den Nutzer können selbst gewählte Szenarien (Erdbebenstärken, Koordinaten von Erdbebenherden) und Ergebnisse probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen, die eine Auswahl der Kenngrößen nach der Wiederholungsperiode (zwischen 500 bis 5000 Jahren) ermöglichen, überprüft werden (vgl. Bild 46). Die entwickelten Prognose-Tools sind letztlich für eine bundesweit einheitliche Anwendung geeignet. Die Querverbindung zu aktuellen Gefährdungsanalysen (Grünthal *et al.*, 2018a) kann durch Wahl der Eingangsgrößen und mittels der beliebig ansteuerbaren Standortkoordinaten hergestellt werden.

Die für die Modellregionen/Testgebiete gewählte Vorgehensweise der Datenaufbereitung bzw. Systematisierung und das mit Tabelle 6 nun zur Verfügung stehende Bewertungsschema (zur Transformation der erdverlegten Infrastruktur in Verletzbarkeitsklassen) erweisen sich als übertragbar auf andere Zielgebiete.

Bauhaus-Universität
Weimar

Earthquake Damage Analysis Center

Berechnung der Reparaturrate für erdverlegte Rohrleitungen im Erdbebenfall (Version 0.9)

Modus der Auswertung

☐ Szenario
 ☒ probabilistisch

Koordinaten

Koordinaten für die Leitung
 °E °N

Parameter Rohrleitung

Material der Rohrleitung

☒ Asbestzement
 ☐ Beton
 ☐ Edelstahl
 ☐ glasfaserverst. Kunststoff
 ☐ duktiles Gusseisen
 ☐ Ortbeton
 ☐ Polymerbeton
 ☐ Polyethylen
 ☐ Polyesterharz
 ☐ Polypropylen
 ☐ Polyvinylchlorid hart
 ☐ Spannbeton
 ☐ Stahl
 ☐ Spritzbeton

transportiertes Medium

☐ Trinkwasser
 ☒ Abwasser
 ☐ Gas
 ☐ andere

Leitungskupplungen

☐ fest
 ☒ flexibel

Druckleitung

☐ ja
 ☒ nein

Basis - Verletzbarkeitsklasse: B

Anpassungen der Verletzbarkeitsklasse
 Alter: 20 Jahre
 Dimension / Durchmesser: 200 mm
 angepasste Verletzbarkeitsklasse: B (2.07)

Parameter der Einwirkung

Wiederkehrperiode

☐ 100 y
 ☐ 475 y
 ☐ 1000 y
 ☒ 2500 y
 ☐ 5000 y

Intensität = 8.3
PGA = 3.82 m/s²
PGV = 23.74 cm/s

Bodenverflüssigung berücksichtigen?
☐ nein
 ☒ ja

Berechnung von PGD mit

☒ Aptikaev82 (I --> hPGD)
 ☐ ITACA PGV-PGD-Relation (hPGV --> hPGD)

PGD = 8.18 cm

Ergebnis

Reparaturrate infolge Bodenbewegung: 0.0625655

Reparaturrate infolge Bodenverflüssigung: 1

Kombination aus Verflüssigung und Bodenbewegung
☐ nur Verflüssigung
 ☒ Maximum
 ☐ Addition
 ☐ Mittelwert

Reparaturrate gesamt: 0.999999999999998.

Auf einer Rohrleitungsstrecke von 1 km Länge ist genau eine Beschädigung zu erwarten.

Bild 46: Internetangebot zur Abschätzung der Reparaturraten für erdverlegte Rohrleitungen in deutschen Erdbebengebieten; hier: Testgebiet Albstadt/Abwassernetz (Parameter der Einwirkung sind aufgeführt)

ZUVERSICHT Schlussbericht Teil II

Förderkennzeichen: 03G0886A-D

62

6 Handlungsempfehlungen zur Schadensminderung (IAB, ifak, EDAC)

6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Erdverlegte Leitungssysteme sind ein wesentlicher Bestandteil der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur, deren Funktionalität auch nach einem Erdbeben sichergestellt sein muss.

Es ist die Entwicklung und Bewertung präventiver Maßnahmen zum Schutz erdverlegter Leitungsnetze zur Schadensminimierung im Erdbebenfall oder deren Sekundärfolgen durchzuführen.

Ausgangspunkt für das Aufstellen der Handlungsempfehlungen für Abwasser- und Trinkwasserleitungssysteme bildet das Wasserhaushaltsgesetz-WHG.

6.1.1 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts Wasserhaushaltsgesetz – WHG

Das Wasserhaushaltsgesetz bildet den Hauptteil des deutschen Wasserrechts.

Mit seiner Neufassung vom 31. Juli 2009 ist erstmals der Zweck des WHG direkt in einem Gesetzestext formuliert worden.

„Zweck dieses Gesetzes ist es, durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen (WHG §1).“

Das Kapitel 3 widmet sich den besonderen wasserwirtschaftlichen Bestimmungen.

Hier sind im Abschnitt 1 § 50 die Bestimmungen zur „Öffentlichen Wasserversorgung“ aufgeführt und es werden unter anderem folgende Aspekte angesprochen (WHG § 50).

- die Träger wirken auf einen sorgsamen Umgang mit Wasser hin
- sie halten die Wasserverluste gering
- die Anlagen dürfen nur nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik errichtet, unterhalten und betrieben werden

Abschnitt 2 § 61 behandelt die „Selbstüberwachung bei Abwassereinleitungen und Abwasseranlagen“ mit Augenmerk auf folgende Punkte (WHG § 61).

- der Betreiber einer Abwasseranlage ist verpflichtet, ihren Zustand, ihre Funktionsfähigkeit, ihre Unterhaltung und ihren Betrieb sowie ... selbst zu überwachen
- er hat hierüber Aufzeichnungen anzufertigen, aufzubewahren und auf Verlangen vorzulegen

6.1.2 Erdbebennormung DIN EN 1998-4 (Eurocode 8)

Die Normen zum Eurocode 8 gelten für die Bemessung und Konstruktion von Bauwerken des Hoch- und Ingenieurbaus in Erdbebengebieten. Für die Auslegung von erdverlegten Rohrleitungen ist Teil 4 maßgebend.

Auf Basis der finalen englischen Fassung von EN 1998-4: 2006 (E) - vom Mai 2006 - wurde die deutsche Übersetzung erstellt, die als DIN EN 1998-4: 2007-1 eingeführt ist. (Ein Nationaler Anhang bzw. seine Veröffentlichung steht aus.)

Hinweis: Die Norm der 1. Generation wird in den nächsten Jahren durch die überarbeitete Fassung der 2. Generation ersetzt. Ein entsprechender Entwurf liegt seitens CEN/TC 250 mit Stand 2023-03 vor und geht als Eurocode 8 - Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen, Türme, Maste und Schornsteine in die Phase der finalen Nationalen Abstimmung (*Enquiry*), um 2024 mit der endgültigen Abstimmung (*Formal Vote FV*) verabschiedet zu werden. Die deutsche Entwurfsfassung liegt Stand September 2023 vor.

Im (informativen) Annexe C werden grundsätzliche Entwurfsregeln für erdverlegte Rohrleitungen (*General design consideration for buried pipelines*) gegeben. Einen Schwerpunkt bilden Regeln zur Verlegung im Falle (bekannter) die Trasse kreuzender Verwerfungslinien.

Sie sind wie folgt widerzugeben:

- Eine Rohrleitung, die eine Verwerfung kreuzt, sollte so ausgerichtet werden, dass vorwiegend Zugspannungen statt Druckspannungen aufgebracht werden.
- Rohrleitungen, die eine Verwerfung kreuzen, sollten über eine Mindestlänge von 50 m zu beiden Seiten der Verwerfung ohne Bögen geführt werden.
- In Verwerfungsbereichen sollte die Verlegetiefe von erdverlegten Rohrleitungen auf ein Mindestmaß begrenzt werden, um die Behinderung der Bewegungsfähigkeit der Rohrleitung durch den Boden während einer Verwerfungsbewegung zu minimieren.
- Innerhalb einer Länge von 50 m zu beiden Seiten der Verwerfung sollten Rohrleitungen mit verhältnismäßig großer Wanddicke und einer Beschichtung, welche die kleinstmögliche Reibung mit dem umgebenden Boden ermöglicht, verwendet werden.
- Das Ersetzen des umgebenden Bodens durch eine spezielle Verfüllung mit geringer Reibung und hoher Zusammendrückbarkeit darf in Betracht gezogen werden.

6.2 Datenerhebung und Schadensdiagnostik

6.2.1 Trinkwasser

Arbeitsblatt DVGW W 402 (2010-09)

Netz- und Schadenstatistik; Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen

Beiblatt 1: Unternehmensübergreifende Datenerhebung

Die Wasserverteilung dient dem Transport des Trinkwassers vom Wasserwerk zum Verbraucher. Bei der Verteilung darf die Qualität des Wassers nicht beeinträchtigt werden. Zu den Wasserverteilungsanlagen gehören:

- Wasserspeicher für die Bevorratung, den Ausgleich des Spitzenverbrauchs, die Vorhaltung von Wasser für Feuerlöschzwecke, die Wassersicherstellung bei Betriebsausfällen und die Einregulierung eines stabilen Druckes im Versorgungsgebiet
- Leitungen für den Wassertransport von den Wassergewinnungsanlagen bis zu den Hausanschlüssen der Verbraucher
- Pumpwerke zur Erhöhung des Drucks in höher gelegenen Teilen des Leitungsnetzes beziehungsweise Drosselstationen zur Senkung des Drucks in den tiefer gelegenen Wasserleitungen.

Förderanlagen, Transportleitungen, Behälter und Versorgungsnetz bilden ein komplexes Betriebssystem, dessen Bestandteile in ihrer Leistungsfähigkeit sorgfältig aufeinander abgestimmt sein müssen und deren Dimensionierung sich an den Verbrauchsspitzen orientieren muss.

Das Trinkwasserversorgungsnetz steht in der Regel unter Innendruck. Der Druck soll so hoch sein, dass es zu keinen Verkeimungen kommt. Durch Druckmessstationen kann das Netz überwacht werden. Sollte der Druck abfallen, so kam es zu einer Havarie. Im Zuge des Leitungsnetzes sind Schieber, Rückschlagklappen, Rückflussverhinderer, Druckbegrenzer, Entleerungseinrichtungen, Hydranten, Entnahmeventile, Druckmessgeräte und Hausanschlüsse mit Wasserhauseinführung und Wasserzähler nach Notwendigkeit erforderlich.

Alle diese Bauteile können zu Schadstellen werden. Deshalb sollte das Hauptaugenmerk auf der Überwachung dieser Bauteile liegen.

In Deutschland sind Trinkwasserrohre im Bestand aus den Werkstoffen Grauguss, Duktulguss mit hochwertigem kathodischen Korrosionsschutz, Duktulguss ohne hochwertigen kathodischen Korrosionsschutz, Stahl mit hochwertigem kathodischen Korrosionsschutz, Stahl ohne hochwertigen kathodischen Korrosionsschutz, Polyethylen bis 1980, Polyethylen ab 1981, PVC-U, Faserzement und sonstige Materialien. Auf ganz Deutschland bezogen sind ca. 48 % der Versorgungsleitungen aus metallischen Werkstoffen (Stahl- oder Gussleitungen), ca. 43 % sind aus Kunststoffen (davon 21 % PE, 22 % PVC), 7 % aus Faserzement und die verbleibenden 2 % sind sonstige Werkstoffe (DVGW-Schadenstatistik-Wasser 2016/2017).

Die Grundlage zur Erfassung der notwendigen Rohrnetzdaten bildet das DVGW-Arbeitsblatt W 402 (2010-09) „Netz- und Schadenstatistik - Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen“ sowie das zugehörige Beiblatt B1 „Unternehmensübergreifende Datenerhebung“ in der Neuausgabe von 2019-07.

Erfasst werden strukturelle Unternehmensdaten wie Wasserabgaben, Wasserverluste und mittleres Alter des Leitungsnetzes sowie Bestands- und Schadensdaten von Rohrleitungen und Bauteilen.

Die daraus ermittelten Schadensraten für Versorgungs- und Anschlussleitungen werden mit den im DVGW-Regelwerk festgelegten Grenzwerten verglichen. Die Grenzwerte für Schadensraten in Rohrnetzen sind im DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 (2006-09) „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen - Teil 3: Betrieb und Instandsetzung“ definiert. Die Schadensraten bilden Zustandsindikatoren des Rohrleitungsnetzes.

6.2.2 Abwasser

DIN EN 752 (07/2017)

Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement

Normenreihe DIN EN 13508

Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden

Merkblattreihe DWA-M 149

Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden

Die DIN EN 752 beschreibt das integrale Kanalmanagement, sie stellt einen Rahmen für Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb und Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden dar. Gemeinsam mit verschiedenen Regelwerken und Normen ergibt sich ein Standard für die Erfassung, Speicherung und Beurteilung der Daten im Bereich des Kanalnetzmanagements.

Neben der DIN EN 13508 „Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ gilt die DWA-M 149-1 „Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden“ Teil 1: Grundlagen.

Das Tragwerkssystem Rohr-Boden wird wesentlich bestimmt aus dem Zusammenwirken und den Eigenschaften von Bauteilen sowie der künstlich geschaffenen oder natürlich vorhandenen Umgebung wie Bettung, Seiten- und Hauptverfüllung, Verdichtungsgrad, Bodenarten, Grundwasser, Bodentragfähigkeit und anstehender Boden. Es beeinflusst maßgeblich die Funktion und Nutzungsdauer der Rohrleitung (DWA-A 139).

Die Zustandserfassung und -beurteilung ist Teil des Gesamtprozesses zum integralen Kanalmanagement, ein koordiniertes Management von Planung, Bemessung, Bau, Sanierung, Betrieb und Unterhaltung aller Systeme aus Abwasserkanälen und -leitungen in einem Einzugsgebiet unter Berücksichtigung Ihrer gesamten Leistungsfaktoren (DWA-M 149-1).

Die Aufgabe des integralen Kanalmanagements ist es, ein iteratives und dauerhaft gültiges Konzept für die Reinigung, Wartung und Sanierung der Kanalisation zu erstellen. Dies geschieht durch eine ganzheitliche Betrachtung der Anforderungen an Abwasserableitung und Gewässerschutz, die umfangreiche Prüfung der Abwasserkanäle sowie die Analyse vorliegender Daten über Rückstau oder Überflutungen (hydraulische Betrachtung). Diese Prozesse spezifizieren alle Reinigungs- sowie Sanierungsprogramme, damit immer die passende Maßnahme gefunden werden kann. Das integrale Kanalmanagement bildet also die Grundlage für den effizienten Betrieb und die Instandhaltung des Entwässerungssystems. Das wichtigste Kriterium hierbei ist die Machbarkeit unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit.

Der Zweck der Zustandserfassung und -beurteilung ergibt sich aus den zu betrachtenden Komponenten eines Entwässerungssystems und deren Lebenszyklen und umfasst die Bereiche Planung, Bau, Betrieb und Sanierung. Die zu berücksichtigenden Anforderungen können baulicher, betrieblicher, umweltrelevanter oder hydraulischer Natur sein.

Die Zustandserfassung und -beurteilung müssen die notwendigen Informationen liefern, um darauf aufbauend zielgerichtete Maßnahmen planen und ausführen zu können.

Im Rahmen der Selbstüberwachung ist der Zustand der Kanalisation festzustellen und darauf aufbauend in festen Zeitintervallen Wiederholungsuntersuchungen durchzuführen. Somit wird ein Abgleich mit vorangegangenen Untersuchungen ermöglicht, woraus sich Rückschlüsse auf die bauliche Zustandsentwicklung der Kanalisation ziehen lassen. Das Basisverfahren für Untersuchungen ist in der Regel eine optische Inspektion der Kanäle und Leitungen. Diese kann bei Bedarf durch weitere Verfahren wie z. B. eine Dichtheitsprüfung ergänzt werden.

Im Ergebnis der Zustandsbeurteilung von Abwasserkanalisationen werden Einzelzustände/Schäden, sogenannte Schadstutzen, mit genormten Codes nach Merkblatt DWA-M 149-2 belegt. Beispiele für diese Codes sind BAA-Verformung, BAB-Rissbildung oder BAC-Rohrbruch/Einsturz. Diese Schadstutzen werden nach ihrer Auswertung in Zustandsklassen überführt. Dies erfolgt nach Merkblatt DWA-M 149-3. Die Verknüpfung der einzelnen Zustandsklassen der Schadstutzen ermöglicht die Zustandsbeurteilung einer Abwasserkanalisation im Gesamten.

6.3 Handlungsempfehlungen in Erdbebengebieten

6.3.1 Planung und Ausführung

Aufgrund der Bedeutung des Wassers für den Menschen, besonders im Hinblick auf die Trinkwasserversorgung, sind die Grund- und Oberflächengewässer vor Verunreinigungen zu schützen. Ein unkontrolliertes Abfließen von Schmutzwasser in die Umwelt ist zu vermeiden. Nach einem Erdbeben ist davon auszugehen, dass gewisse Schäden und Einschränkungen der Funktionstüchtigkeit erdverlegter Infrastruktursysteme eintreten. Dabei ist es wichtig zu definieren, bei welchen Anlagenteilen die volle Funktionstüchtigkeit aufrechterhalten werden muss und bei welchen Anlagenteilen Einschränkungen bzw. Schädigungen während einer bestimmten Zeitdauer zugelassen werden können, um die Betriebs- und Schutzziele zu erreichen. Bestehende Infrastruktursysteme der Ver- und Entsorgung besitzen grundsätzlich dieselben Aufgaben, bzw. Betriebsziele wie Neubauanlagen. Für bestehende Anlagen sind jedoch noch weitere Überlegungen von Bedeutung und eine differenzierte Betrachtung sinnvoll. Eine vollumfängliche Ertüchtigung eines bestehenden Infrastruktursystems ist finanziell kaum realisierbar, sodass zumindest die wichtigsten Funktionen nach einem Erdbeben aufrechterhalten bleiben sollen. Der Mehraufwand eines erdbebensicheren Entwurfs ist bei Neubauanlagen sehr gering. Bei bestehenden erdverlegten Infrastrukturanlagen können bei Umbau- und Sanierungsmaßnahmen relativ hohe Baukosten bezüglich Erdbebensicherheit entstehen. Bestehende Anlagen werden dadurch unwirtschaftlich. Zeigt sich, dass die Ertüchtigungskosten bezüglich Erdbebensicherheit unverhältnismäßig sind, ist jedoch ein minimales Betriebsziel nach Erdbebeneinwirkung einzuhalten.

Als wesentliche Betriebsziele nach einer Erdbebeneinwirkung können, z. B. für ein Abwassernetz, das Sicherstellen der hydraulischen Funktionsfähigkeit und das Ableiten des Abwassers aus den Siedlungsgebieten genannt werden. Bei bestehenden kommunalen Kläranlagen lässt sich vor allem das Aufrechterhalten der mechanischen Reinigung als Betriebsziel nach einem Erdbebenereignis benennen. Bei Trinkwasserversorgungsanlagen ist das vorrangige Betriebsziel die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser, aber auch die Bereitstellung von Löschwasser zur Bekämpfung von Bränden.

Zu den durch Erdbeben gefährdeten Anlagenteilen der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur gehören prinzipiell alle Komponenten, von Rohrleitungen, Schachtbauwerken, Pumpstationen, Wassergewinnungs- und -aufbereitungsanlagen, Gasregel- und -druckerhöhungsstationen, Kläranlagen bis hin zur Schlammbehandlung. Allgemein lässt sich aber sagen, dass die robusten Konstruktionen der Ver- und Entsorgungsleitungen wenig anfällig gegenüber Erdbeben sind, da sie meist unterirdisch verlegt oder ebenerdig ausgeführt sind.

Schäden an erdverlegten Abwasserfreispiegelleitungen sind oft kaum zu erkennen und das Abwasser tritt im Schadensfall nicht an die Geländeoberfläche. Abwasserleitungen behalten bei leichten Beschädigungen zum großen Teil ihre Funktionstüchtigkeit bei, da der Abfluss durch ein natürliches Gefälle stattfindet und nur durch Verstopfung oder bei totaler Zerstörung blockiert wird. Bei Schädigungen der Rohrleitungen kann es aber zu einem allmählichen Verstopfen der Leitungen an den Schadstellen kommen, welches sich erst Monate später bemerkbar macht. Schäden an der Kanalisation sind im Allgemeinen nur durch optische Inspektion zu erkennen. Diese optische Inspektion ist jedoch recht aufwendig und dementsprechend sind Schäden an Abwasserleitungen nach Erdbebeneinwirkungen auch relativ wenig dokumentiert. Schäden an erdverlegten Trinkwasser- oder Gasleitungen sind hingegen schneller zu erkennen, da das zu transportierende Medium unter Druck steht und somit bei Beschädigung der Rohrleitung an die Geländeoberfläche aufsteigt.

Als wichtigste Einflussfaktoren bei der Entstehung der einzelnen Schäden sind lokale Baugrundeigenschaften, die Topographie der Geländeoberfläche und die Duktilität der betroffenen Elemente zu nennen. Die Hauptursachen für Schäden an erdverlegter Infrastruktur sind im Allgemeinen starke Deformationen des Untergrundes. Diese werden durch die lokalen Baugrundeigenschaften und die lokale Topographie beeinflusst. Bei feinsandigen, locker gelagerten Böden kann es bei Wassersättigung unterhalb des Grundwasserspiegels zu Bodenverflüssigung kommen. Große Deformationen entstehen auch durch Bodenverschiebungen wie z. B. Hangrutschung bei geneigtem Gelände oder durch Verformung von Stützwänden. Eine Möglichkeit, solche erdbebensensiblen Baugrundbereiche zu umgehen, kann durch eine Neuordnung der Infrastrukturtrassenführung umgesetzt werden, soweit dies topografisch möglich und wirtschaftlich vertretbar ist. Weiterhin sind Maßnahmen zur Baugrundertüchtigung in Form von Rütteldruck- oder Rüttelstopfverdichtungen anwendbar. Dabei wird der Baugrund mit Tiefenrüttlern verdichtet bzw. Säulen aus Kies oder Schotter mit einem Rüttler hergestellt, wodurch sich das Bodenverflüssigungspotenzial reduzieren lässt sowie zur Hang- und Böschungsstabilisierung beigetragen wird.

Die Duktilität eines Materials oder eines gesamten Systems spielt bei Erdbebenereignissen eine größere Rolle als dessen Festigkeit. Im Gegensatz zu statischen Lasten, deren Aufnahme durch die Festigkeit des Materials begrenzt ist, wird bei zyklischen Lasten, wie Erdbebenereignissen, die Duktilität eines Systems zum entscheidenden Faktor. Eine Erhöhung der Systemflexibilität kann durch eine geänderte Netzstruktur oder den Einsatz duktiler Rohrmaterialien erreicht werden. Besondere Aufmerksamkeit ist den Ausführungen der Anschlüsse von Leitungen in feste Bauwerke zu widmen. Allgemein zeigen flexible Leitungsverbindungen ein robustes Verhalten. Rohrleitungen sollten aus bewehrtem Beton, Steinzeug, Stahl, duktilem Gusseisen, Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE) mit flexiblen duktilen Rohranschlüssen mit Gummidichtung ausgeführt werden. Ungünstige starre Anschlüsse von Rohrleitungen an massive Bauwerke, wie Schächte, Becken, Pumpengebäude oder Hochbehälter besitzen eine große Verletzbarkeit und sind ebenfalls flexible und duktil auszulegen, um mögliche Deformationen auszugleichen bzw. aufnehmen zu können. Sanierungsmaßnahmen von bestehenden Rohrleitungen können mittels Rohrlinier, Innenmanschetten, Innenbeschichtungen oder Rohrauskleidungen realisiert werden. Ebenfalls sind Erneuerungsmaßnahmen in vorhandenen Leitungstrassen in Form von Berstlining, Rohrvortriebs- oder Rohreinzugsverfahren möglich.

Günstig ist auch der Einbau von Redundanzen im System. Bei Abwasserleitungen kann dies in Abhängigkeit von der Topographie durch ein Netz von Rohrleitungen realisiert werden, sodass im Schadensfall eines Leitungsabschnittes Abwasser in andere Leitungsstränge umgeleitet werden kann. Dazu gehören auch Pumpwerke mit mehreren, parallel arbeitenden Pumpen. Sinnvoll ist auch das Anordnen von Absperrventilen in Zonen erhöhter Erdrutschgefahr, um geschädigte Rohrleitungen abzuriegeln und vom Netz zu entkoppeln. Diese Maßnahme ist bei Ver- und Entsorgungsnetzen möglich, erfordert jedoch auch alternative Leitungswege im Netz.

Die Überprüfung von bestehenden erdverlegten Infrastrukturnetzen bezüglich ihrer Verletzbarkeit im Erdbebenfall sollte in mehreren aufeinander aufbauenden Phasen erfolgen, sodass die grundsätzliche Funktion des Systems definiert wird, die Substanz des Systems erfasst wird und daraufhin Maßnahmen zur Ertüchtigung des Systems erarbeitet und umgesetzt werden können. Diese Systemanalyse (Bild 47) kann in folgenden Phasen durchgeführt werden.

- Funktionsbeurteilung: Wie sind die Betriebsziele des Systems definiert? Welche Funktionstüchtigkeit muss bei einem bestimmten Erdbebenereignis erhalten bleiben? Welche Schutzziele müssen erreicht werden?

- **Bedeutungsbeurteilung:** Untersuchung der Bedeutung einzelner Systemkomponenten hinsichtlich des Erreichens der Betriebs- und Schutzziele
- **Grobbeurteilung:** Aufstellen von Checklisten und Einstufen von bedeutenden Systemkomponenten nach ihrer Verletzbarkeit
- **Detailbeurteilung:** Detaillierte Analyse bedeutender und potentiell gefährdeter Systemkomponenten
- **Maßnahmenplan:** Ausarbeitung eines Ertüchtigungsplans für bedeutende und gefährdete Systemkomponenten

Die Aufgabe dieser Systemanalyse besteht darin, strukturiert und effizient die Problematik der Erdbebensicherheit von bestehenden erdverlegten Infrastrukturnetzen anzugehen und aufzuarbeiten. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Systemkomponenten ist es wichtig, sich eine Übersicht zu verschaffen, und eine Priorisierung der Teilaufgaben vorzunehmen. Diese Teilaufgaben können dann nacheinander abgearbeitet werden. Es zeigt sich auch, welche Verbesserungsmaßnahmen dringend, welche weniger dringend und welche Maßnahmen nicht erforderlich sind.

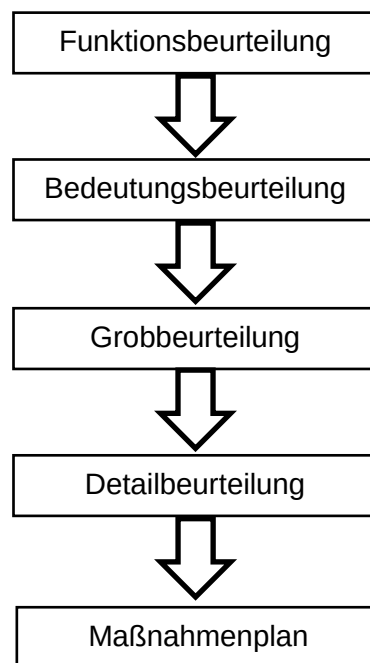


Bild 47: Systemanalyse erdverlegter Infrastrukturnetze

6.3.2 Überprüfungsmaßnahmen im Erdbebenfall

Grundsätzlich ist zwischen den Maßnahmen vor, während und nach einem Erdbeben zu unterscheiden.

Die Bewertung der Gefährdung eines Standortes ist der Einstieg in die Maßnahmen **vor einem Erdbeben**. Da das Auftreten eines Starkbebens auch in hochseismischen Regionen mit aktiven Verwerfungen nicht (zeitgenau) prognostiziert werden kann, gilt auch für moderat bis gering seismische Erdbebengebiete wie Deutschland, dass wesentliche Überprüfungen und Entscheidungen zur Bewertung des bestehenden Risikos auf Grundlage der seismischen Gefährdung aus den zur Verfügung stehenden Karten der aktuellen Baunormung (im Ausnahmefall aus separaten Studien) abzuleiten sind.

Mit den Erdbebenkatalogen wie z. B. EK DAG, die am Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden *on-line* [<https://edac.biz/projekte/erdbebenkatalog/> → Download] oder als Printfassung (Schwarz *et al.*, 2019b) zur Verfügung stehen, gepflegt und in der Weiterentwicklung durch unterschiedliche Versionen (vgl. Schwarz *et al.*, 2021b) gekennzeichnet werden, können historische Erfahrungswerte übernommen und Schütterwirkungen im Standortbereich nachvollzogen werden.

Zur Einordnung der Standortgefährdung und zur Prognose möglicher Effekte auf die erdverlegten Rohrleitungen bietet das Internetangebot [<https://zuversicht-rr.edac.biz/>] zur Risikoabschätzung, d. h. zur Angabe der standortkonkreten relevanten Erdbebenkenngrößen und zu erwartenden Schäden eine aussagefähige Bewertungsgrundlage (vgl. Abschnitt 5.5). Der Nutzer kann die in seinem Netz vorhandenen Rohrleitungstypen eingeben und interaktiv Ereignisse unterschiedlicher Herdlagen und Stärke durchspielen (Bild 46 Seite 62).

Es wird empfohlen, zur Einschätzung der Situation mit der Wiederholungsperiode von 2.500 Jahren zu orientieren und im Fall versorgungsrelevanter Infrastruktur auch Folgen von *Worst-Case*-Szenarien zu überprüfen. Zusammenhänge zwischen Verletzbarkeit, Bodenbewegung und Reparaturrate werden gemäß der im Vorhaben entwickelten Vorgehensweise (Abschnitt 4.1) visualisiert. Voraussetzungen für die Anwendung des Tools sind die Kenntnis des Netzzustandes und die Einordnung der Verletzbarkeit seiner Komponenten (nach Material, Baualter usw.). Die Datenaufbereitung ist proaktiv **vor einem Erdbeben** vorzunehmen.

Bei Planungsentscheidungen ist der Einhaltung der Entwurfsregeln nach EN 1998-4 sicherzustellen, die in Abschnitt 6.1.2 zitiert sind. Besondere Aufmerksamkeit ist der Bodenverflüssigung zu widmen. Diese setzt jedoch bestimmte Erdbebenstärken und versagensanfällige Baugrundbedingungen (vgl. Abschnitt 2.1.2) voraus.

Während eines Erdbebens sind angesichts des eher geringen Risikopotenzials von Trinkwasser- und Abwasserleitungen keine Abschaltvorrichtungen zu fordern. Diese würden zudem eine seismische Instrumentierung voraussetzen.

Überprüfungsmaßnahmen **nach einem Erdbeben** ließen sich aus dem kerntechnischen Bereich (KTA 2201.6) oder den Normen für Talsperren bzw. Staubauwerke (DIN 19700) ableiten. Sie sind in der Regel gekoppelt an die Messungen eines seismischen Monitoringsystems. Von Relevanz sind zwei *Level*:

Level I bezieht sich auf maximale Bodenbewegung einer Komponente. Ein Wert von 0.4 BmE (BmE - Bemessungserdbeben) in der Amplitude der Messung (oder innerhalb des Spektrums) darf als kritischer Wert betrachtet werden. Wird dieser erreicht oder überschritten, sollten erste Maßnahmen gemäß einem Kontrollplan der kritischen Netzkomponenten erfolgen.

Level II bezieht sich auf den Fall, dass die Intensität oder die spektrale bzw. Spitzenbodenbewegung des Bemessungserdbebens erreicht oder überschritten wird. Eine Kontrolle ist in diesem Fall erforderlich und lässt sich an möglichen Verlustraten im Netz lokalisiert vorgeben.

Fehlen Messdaten, darf als anerkannt gelten, dass Kontrollmaßnahmen anhand der beobachteten Schäden an der Bestandsbebauung differenziert werden sollten. Ausgangspunkt bildet die Annahme, dass erst im Falle von moderaten Schäden an allgemeinen Hochbauten mit Schäden an der erdverlegten Rohrleitung zu rechnen ist.

Sofern Messdaten aus dem Stationsbetrieb (z. B. eines Landeserdbebendienstes) zur Verfügung stehen, wird die Umrechnung der Messreihen in Geschwindigkeits-Zeitverläufe empfohlen. Wie aus den Korrelationen zwischen Bodenbewegung und beobachteten Schäden geschlossen werden darf, sind kritische Kenngrößen bei Spitzen-Bodengeschwindigkeiten PGV von 20 cm/s bzw. 40 cm/s (vgl. Abschnitt 1.4, Bild 5) zu setzen.

Mit Bezug zur aktuellen Baunormung und den durch DIN EN 1998-1/NA: 2021-07 bereitgestellten Karten ist die maßgebliche Kenngröße des Bemessungserdbebens (B_mE) mit dem Spektralwert $S_{aP,R}$ gegeben (vgl. Bild 1 Seite 8 und Bild 8 Seite 19). Sofern der aus Messungen abgeleitete Spektralwert im Plateau den Wert $S_{aP,R} = 2,0 \text{ m/s}^2$ erreicht bzw. überschreitet, sind für deutsche Erdbebengebiete (unabhängig von der konkreten Standortlage) Kontrollmaßnahmen zu empfehlen bzw. in einem Kontrollplan festzuschreiben.

Ein (weiterhin nur in Ausnahmefällen verfügbares) seismisches Monitoring ermöglicht, anhand einer Ereignischronologie (Erdbebenstärke, Beobachtungen im Netz) Erfahrungswerte zu dokumentieren und zugleich infolge wiederholter Schüttereffekte (sich möglicherweise entwickelnde) Vorschädigungen abzuschätzen. Zugleich können die Messungen selbst als Warnsystem (*quick alert system*) die Grundlage für schnelle Handlungsempfehlungen bieten und Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt werden.

6.3.3 Nutzung von Simulationsmodellen

Die Nutzung von Simulationsmodellen zur Planung unterschiedlichster Prozesse hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht und ist damit zum Stand der Technik geworden. Insbesondere im Bereich der Planung von Abwassernetzen und Trinkwasserversorgungssystemen sind Simulationsmodelle zu einem unverzichtbaren Werkzeug geworden.

Die Nutzung von Simulationsmodellen geht weit über die bloße Planung hinaus und erstreckt sich über alle Lebensphasen der Anlagen. Dabei hat sich der Begriff des „Digitalen Zwillings“ als Schlüsselkonzept etabliert. Dies bedeutet, dass Simulationsmodelle nicht nur in der Neubauplanung, sondern auch bei der Erweiterungsplanung, der Planung von Reparatur und Erneuerung, der Instandhaltungsplanung sowie der Planung von verbesserter Betriebsführung und Automatisierung zum Einsatz kommen.

Die Anwendung von Simulationsmodellen erstreckt sich über alle Phasen des Lebenszyklus. Dies umfasst:

Neubauplanung: Simulationsmodelle können dazu verwendet werden, um vor Baubeginn verschiedene Erdbebenszenarien zu analysieren. Dies ermöglicht die Planung von Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz der neuen Infrastruktur von Anfang an.

Erweiterungsplanung: Bei der Erweiterung bestehender Anlagen können Simulationsmodelle verwendet werden, um die Auswirkungen von Erweiterungen auf die Gesamtleistung des Systems zu bewerten und sicherzustellen, dass die Erdbebensicherheit gewährleistet ist.

Planung von Reparatur und Erneuerung: Für die Instandhaltungsplanung ist es entscheidend, den Zustand der bestehenden Infrastruktur zu verstehen und die Auswirkungen von Reparaturen oder Erneuerungen auf die Gesamtleistung zu simulieren.

Instandhaltungsplanung: Simulationsmodelle können bei der Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen helfen, indem sie den besten Zeitpunkt für Wartungsarbeiten und Reparaturen ermitteln. Abschnitte mit der größten Verletzbarkeit bzw. einem schlechten Zustand können identifiziert werden.

Planung von verbesserter Betriebsführung und Automatisierung: Durch integrierte Planung von Automatisierungssystemen können Betreiber die Effizienz und die Reaktion auf Notfälle verbessern.

Optimierung des Betriebs bestehender Anlagen: Durch kontinuierliche Simulationen können Betreiber Schwachstellen in der Betriebsführung identifizieren und geeignete Maßnahmen zur Verbesserung ergreifen.

Virtuelle Inbetriebnahme von Automatisierung: Eine wichtige Anwendung von Simulationsmodellen liegt in der virtuellen Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen. Dies ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit der Automatisierung im Vorfeld zu testen und zu optimieren, um im Ernstfall effizient reagieren zu können.

Im Projekt wurden zwei Aspekte genauer betrachtet:

Anwendungsszenario 1: Offline Planung und Netzanalysen zur Verbesserung der Resilienz: In diesem Anwendungsszenario liegt der Fokus auf der Offline Planung. Die Software ermöglicht es Anwendern, vorab Erdbebenszenarien zu analysieren und Strategien zur Erhöhung der Resilienz von erdverlegter Infrastruktur zu entwickeln. Hierbei können Simulationsmodelle verwendet werden, um potenzielle Schwachstellen zu identifizieren und präventive Maßnahmen zu planen.

Anwendungsszenario 2: Online Überwachung während eines Erdbebens und Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen: Im zweiten Szenario steht die Online Überwachung während eines tatsächlichen Erdbebens im Vordergrund. Die entwickelte Software ermöglicht die schnelle Erfassung von Schäden und die umgehende Planung von Rehabilitierungsmaßnahmen, um den Betrieb der Infrastruktur aufrechtzuerhalten oder schnellstmöglich wiederherzustellen.

Die Software SIMBA# wurde so erweitert, dass Anwender Erdbebenszenarien analysieren können, um Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz von erdverlegter Infrastruktur zu planen. Mit den entwickelten Methoden und der Software können nun:

- die Funktion von Abwassernetzen und Trinkwassernetzen in der Sollfunktion (ohne Schäden) analysiert werden
- die Auswirkungen von Schäden funktional simuliert werden, einschließlich Blockaden bei Abwassernetzen mit Freispiegelabfluss und Leckagen sowie Druckabfall bei Trinkwassernetzen
- Netzwerke so geplant werden, dass Schäden sich weniger gravierend auswirken, akute Schäden isoliert werden können und Teile der Funktion schnell wiederhergestellt werden können
- Schwachstellen identifiziert und behoben werden, um die Resilienz der Infrastruktur zu erhöhen
- Sanierungsmaßnahmen entwickelt werden, um das Schadensrisiko zu minimieren

Insgesamt bieten Simulationsmodelle und die darauf basierende Software eine leistungsstarke Grundlage zur Entwicklung von effektiven Handlungsempfehlungen zur Schadensminimierung in erdverlegten Infrastrukturbereichen bei Erdbebenereignissen. Sie unterstützen die Planung, den Betrieb und die Instandhaltung dieser Anlagen und tragen dazu bei, die Resilienz gegenüber Erdbeben zu erhöhen.

7 Evaluation des Simulationstools (HCU, IAB, ifak, EDAC)

7.1 Anwenderworkshop

Ziel des Arbeitspaketes 7 war es, das entwickelte Simulationstool hinsichtlich der Beschreibungsgenauigkeit und Datenintegration zu erproben und zu evaluieren. Dabei sollten virtuelle und reale Netze untersucht werden. Hierfür war ein Anwenderworkshop im 3. Jahr des Projektes vorgesehen. Weiterhin sollte bewertet werden, ob ein Transferpotenzial auf europäische und internationale Anwender gegeben ist.

Der Anwenderworkshop wurde wie folgt konzeptioniert: Im Rahmen von Impulsvorträgen sollten in einer ersten Sektion die Forschungspartner ihre jeweiligen Ergebnisse vorstellen und auf diese Weise der Fachwelt für den wissenschaftlichen Diskurs präsentieren. Hierdurch sollte erreicht werden, dass sich die Workshop-Teilnehmer ein näherungsweise gleiches Niveau an technischem Hintergrundwissen zur Problematik aneignen und somit für eigene Problemstellungen gerüstet sind. In einer zweiten Sektion wurde ein interaktiver Workshop mit dem Programmsystem vorgesehen. Hier war geplant, dass die Workshop-Teilnehmer direkt Eingaben in der Software machen und hierdurch den Umgang mit der Software erlernen können. Durch eine nachgelagerte Evaluationsaktivität sollte das Softwaresystem durch die Teilnehmer bewertet werden.

Bild 48 zeigt die Einladung zum Workshop für den 20.04.2023.

VERANSTALTUNGSORT

IAB Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar

PROJEKTPARTNER

Bauhaus-Universität Weimar
Earthquake Damage Analysis Center
Bauhaus-Universität Weimar
Earthquake DAC
Geschwister-Scholl-Straße 8
99423 Weimar
www.uni-weimar.de

ifak
ifak - Institut für Automation und Kommunikation e. V.
Werner-Heisenberg-Straße 1
39106 Magdeburg
www.ifak.eu

hcu
HafenCity Universität Hamburg
Henning-Voscherau-Platz 1
20457 Hamburg
www.huc-hamburg.de

IAB
IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1
99423 Weimar
www.iab-weimar.de

ANSPRECHPARTNER

Dipl.-Ing. Ralf Weber
Telefon: +49 3643 8684-152
E-Mail: r.weber@iab-weimar.de

ANMELDUNG (bis spätestens 31.03.2023)
www.iab-weimar.de/zuersicht2023

EINLADUNG ZUM ABSCHLUSSWORKSHOP

Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen

20. April 2023
Weimar

GEFÖRDERT VOM **Bundesministerium für Bildung und Forschung**

Ein Projekt im Rahmen des Förderprogramms „Früherkennung von Erdbeben und ihren Folgen“

Bild 48: Einladung zum Workshop im Forschungsprojekt ZUVERSICHT

Das Konzept der Veranstaltung lässt sich folgendermaßen skizzieren:

Anmeldung und Begrüßung:

- 9.30 - 10.00Uhr, Dr. Ulrich Palzer (IAB Weimar gGmbH)

Impulsvorträge:

- 10.30 Uhr Projektvorstellung ZUVERSICHT, Ralf Weber (IAB Weimar gGmbH)
- 11.00 Uhr Gefährdungskonsistente Risikoszenarien für erdverlegte Infrastruktur-
netze: Anspruch und Wirklichkeit, Dr. Jochen Schwarz (EDAC)
- 11.30 Uhr Untersuchung der seismischen Antwort erdverlegter Infrastrukturen durch
numerische und experimentelle Untersuchungen, Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich (HCU)
- 12.00 Uhr Simulationstools für Abwasser- und Trinkwassernetze zur Gefährdungsbe-
urteilung und Entscheidungsunterstützung, Dr. Jens Alex (ifak e.V.)

Anwenderworkshop:

- 13.30 Uhr Interaktiver Workshop mit SIMBA, Dr. Jens Alex (ifak e.V.)

Für den Workshop sollte allen Teilnehmern eine Software Lizenz zur Verfügung gestellt werden. Für optimale Lernergebnisse wurden hierfür die Hardware-Anforderungen im Vorfeld kommuniziert. Durch ein gemeinsames Mittagessen und einen Ausklang der Veranstaltung sollte der fachliche Austausch und die Diskussion um die Anwendung des Softwaresystems weiter gefördert werden.

Nach umfangreicher Bewerbung der Veranstaltung in der „Erdbeben-Community“ durch das EDAC und in der „Rohrbau-Community“ durch das IAB musste am 12.04.2023 festgestellt werden, dass trotz verlängerter Anmeldefrist keine Anmeldungen vorlagen. Vor dem Hintergrund jüngerer Erdbebenereignisse und dem Wissen, dass Erdbeben immer wiederkehren, war diese Situation den Forschungspartnern unerklärlich. Es wurde letztlich beschlossen, die Veranstaltung dennoch durchzuführen, damit sich auch die Gelegenheit ergibt nach den schwierigen Jahren in der Corona-Pandemie sich zwischen den Projektpartnern erneut intensiv auszutauschen. Gleichmaßen sollten die Projektpartner die Gelegenheit erhalten das Programmsystem selbst zu testen.

7.2 Vorlesung an der HCU

Der intensive Austausch am 20.04.2023 führte zu der Idee, die bereits vorbereiteten Workshophinhalte in die Vorlesung „Siedlungswasserwirtschaft“ von Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich im Bauingenieurwesen an der HafenCity Universität zu integrieren. Hierfür konnte der Termin 22.06.2023 abgestimmt werden. Herr Dr. Alex (ifak) stellte rund 50 Studierenden die Simulationstheorien, das Programmsystem SIMBA# ausführlich dar und erläuterte die Arbeitsweise und die zu erwartenden Ergebnisse des Systems. Insgesamt wurden 2x90 Minuten bestritten und es standen über 200 Folien zur Verfügung, die Herr Dr. Alex nicht alle vorstellen konnte. Ausführlich wurde auch auf die im Forschungsprojekt neu entwickelten Module eingegangen. Bild 49 zeigt beispielhaft eine Folie aus der Vorlesung, welche das Programmsystem SIMBA# mit der Erdbebenerweiterung zeigt.

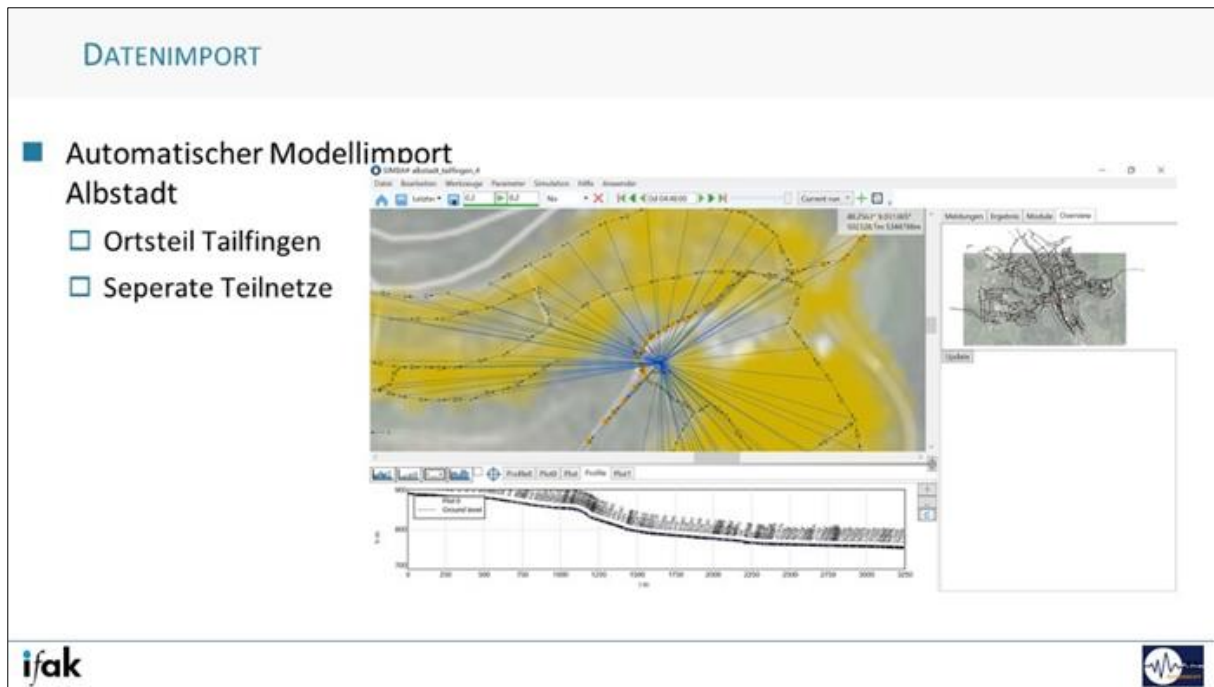


Bild 49: Folienbeispiel aus der Vorlesung

Es wurde ein sehr guter Überblick vermittelt und kurz vor Ende der Vorlesung wurden die Studierenden gebeten eine Evaluation des Softwaresystems durch das Ausfüllen eines Fragebogens vorzunehmen.

Die Teilnahme an der Fragebogenaktion war für die Studierenden freiwillig und anonym. Insgesamt wurden 13 Fragebögen ausgefüllt, die jeweils 18 Fragen enthielten. Bild 50 zeigt den Fragebogen im Überblick.

The screenshot shows the 'SIMBA' evaluation questionnaire form. The form is titled 'Fragebogen SIMBA' and includes a header with the 'hcu' logo and the text 'SIMBA ist ein Simulationssystem für innovative modellgestützte Lösungskonzepte für vielfältige Anwendungen im Wasser-, Abwasser- und Energiebereich. Die gestellten Fragen beziehen sich auf die verschiedenen Funktionen des Programms, insbesondere auf den Einfluss von Erdbeben auf Rohrleitungen.' The form is divided into three sections: 1. Personalien, 2. Richtlinien, and 3. Fragen zu xyz. Section 1 includes fields for Name and Datum. Section 2 includes a legend for the evaluation scale (1 = Stimme überhaupt nicht zu, 2 = Stimme nicht zu, 3 = Teils/Teils, 4 = Stimme zu, 5 = Stimme sehr zu). Section 3 includes a table of 18 questions with corresponding evaluation scales. The form is labeled 'Seite 1 von 3'.

Bild 50: Fragebogen für das Programmsystem

In den ersten sieben Fragen wurden Fragen zur Übersichtlichkeit und Verständlichkeit verschiedener Menüpunkte gestellt. Die Antworten lagen vorrangig im Bereich „stimme zu“ bis „stimme voll zu“. Weitere Fragen zu der Praxis zur Erstellung von verschiedenen Ergebnis-Diagrammen wurden ebenfalls sehr positiv eingeschätzt. In den Freitextbereichen wurden weitere Hinweise durch die Studierenden gegeben. Darunter wurde auch angegeben, dass weitere Hinweise gegeben werden könnten, wenn das Programmsystem selbst bedient werden könnte. Dies war im Rahmen der Vorlesung nicht möglich. Einzelne Hinweise waren sehr hilfreich und können weiterverfolgt werden. Bild 51 zeigt einen Hinweis zur möglichen Erweiterung einer Schnittstelle zu BIM (Building Information Modelling).

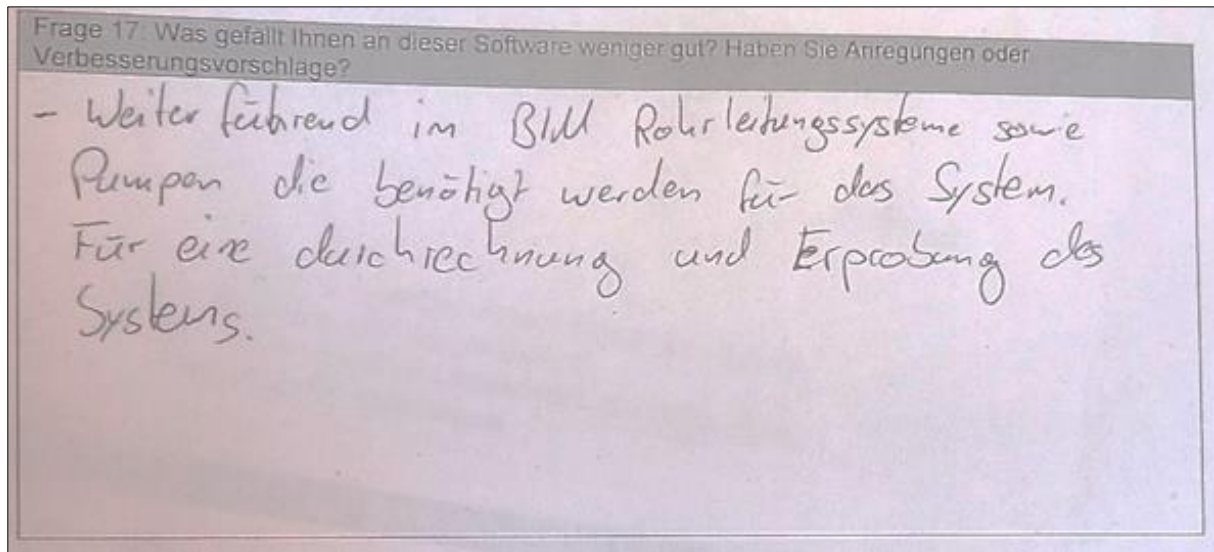


Bild 51: Beispielhafte Einzelantwort aus einem Fragebogen

Durch die Evaluation mit den Studierenden konnten wertvolle Eindrücke gewonnen werden. Insgesamt stellt die Diskussion mit den Studierenden in Aussicht, dass die Anwendbarkeit mit unterschiedlichen Datenquellen und -mengen sowie die Anwendbarkeit für internationale Anwendungen gegeben ist.

7.3 Meeting mit der Stadtverwaltung Albstadt am 15.05.2023

Bei einem Treffen in Albstadt am 15.03.2023 wurden die erreichten Projektergebnisse der Stadtverwaltung und Verantwortlichen für die Abwasser- und Trinkwassernetze vorgestellt. Durch den Partner ifak (Dr. Alex) wurden insbesondere die Ergebnisse des Teilprojektes „Simulationsmodelle und -werkzeuge für die Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur“ vorgestellt (siehe Bild 52).

PROJEKT ZUVERSICHT Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen - Kurztitel: ZUVERSICHT - Zeitraum: 01.02.2020 – 31.01.2023 - Koordination: IAB Weimar gGmbH gefördert von Bundesministerium für Bildung und Forschung i/fak	GLIEDERUNG - Kurzvorstellung Gesamtprojekt - Teilprojekt Planungswerkzeug - Offline Werkzeug - Online Werkzeug - Netze Albstadt - Abwasser - Trinkwasser i/fak
TEILPROJEKT PLANUNGSWERKZEUG AP5 - Teilprojekt Planungswerkzeug - Offline Werkzeug Ziele - Analyse von Netzen (Abwasser, Trinkwasser, Fernwärme, Gas) - Nominalfunktion - Auswertung des Verhaltens bei Schäden (Erdbeben, ...) - Unterstützung von Planungen zur Erhöhung der Resilienz i/fak	TEILPROJEKT PLANUNGSWERKZEUG - Teilprojekt Planungswerkzeug - Online Werkzeug Ziele - Einsatz im Schadensfall (Erdbeben) - Detektion von Abweichungen vom Nominalbetrieb - Unterstützung bei Schadenslokalisierung und Einschätzung - Schnelle Analyse von Maßnahmen zur Schadensbegrenzung i/fak
DATENIMPORT - Automatischer Modellimport Albstadt - Ortsteil Tailfingen - Seperate Teilnetze  i/fak	DATENIMPORT Automatischer Modellimport Albstadt Ortsteil Tailfingen  i/fak

Bild 52: Gliederung und Aspekte der Projektpräsentation

Die entwickelten Werkzeuge zur Funktions- und Schadenssimulation von Abwasser- und Trinkwassernetzen fanden Interesse. Für beide Aspekte ist bereits Software zur Funktionssimulation in Albstadt im Einsatz. Eine Migration auf die in ZUVERSICHT entwickelten Systeme wurde in der Diskussion nicht befürwortet. Neben dem entstehenden Aufwand wurde die Notwendigkeit der Schadenssimulation hinterfragt. Die zu erwartenden Erdbebenintensitäten in Albstadt und daraus möglicherweise entstehenden Netzschäden rechtfertigen aus Sicht der Netzbetreiber nicht die aufwendigen präventiven Simulationsstudien zur Netzresilienz, wie sie mit den ZUVERSICHT-Produkten möglich wäre.

7.4 Fallbeispiel Egion

Gemäß Antrag sollten die entwickelten Simulationstools an virtuellen und realen Netzen hinsichtlich der Beschreibungsgenauigkeit und Datenintegration erprobt und qualifiziert werden. Hierfür wurden zwei deutsche und mit der Küstenstadt Egion (Griechenland) ein europäisches, im Rahmen bisheriger Forschungsarbeiten von EDAC seit 1995 wiederholt vor Ort untersuchtes Fallbeispiel, ausgewählt.

Der aktuelle Bezug war durch die Auswahl der Region Patras-Egion als *Testbed 4* im Rahmen des EU-Projektes *TURNkey Towards more Earthquake-resilient Urban Societies through a Multi-sensor-based Information System enabling Earthquake Forecasting, Early Warning and Rapid Response actions* (<https://edac.biz/projekte/turnkey>) gegeben.

Synergien zwischen den Projekten sind pandemiebedingt jedoch nicht zum Tragen gekommen. Die geplanten Vor-Ort-Aufnahmen und -absprachen ließen sich nicht realisieren. Es wurde letztlich entschieden als weiteres europäisches Testgebiet die Region Groningen unter dem Aspekt der induzierten Seismizität aufzunehmen.

Die Untersuchung beider Regionen steht im Hinblick auf Datenbeschaffung und Anwendung der im Vorhaben bereitgestellten Bewertungsmethoden (siehe 4) bzw. Tools (siehe 5) auf der wissenschaftlichen Agenda. Das Transferpotenzial auf europäische und internationale Anwender wird in den Formen der akademisch-universitären Zusammenarbeit überprüft. (Dafür stehen auch die bereits zu Projektbeginn initiierten Masterarbeiten.)

8 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

IAB-Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH

Die finanziellen Aufwendungen im Forschungsprojekt/Teilvorhaben des IAB Weimar gGmbH setzten sich aus den folgenden Positionen zusammen:

- 0824 Personal
- 0835 Vergabe von Aufträgen
- 0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben
- 0846 Dienstreisen
- 0850 Gegenstände > 800/410/400 €

Der maßgebliche Anteil betrifft Personalkosten. Die geplanten und aufgewendeten Personenmonate waren für die umfassende Bearbeitung und den wissenschaftlichen Aufschluss notwendig.

Die Ausgaben für Gegenstände und die Vergabe von Aufträgen an Dritte wurden erforderlich, um funktionstüchtige Versuchsstände aufzubauen, um relevante Parameter zu erfassen und zu bewerten sowie um Projekttreffen und den Anwenderworkshop im April 2023 durchzuführen.

Der zahlenmäßige Nachweis zum FuE-Projekt/Teilvorhaben des IAB Weimar gGmbH wird als gesonderte Anlage bereitgestellt.

Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC)

Die finanziellen Aufwendungen im Forschungsprojekt/Teilvorhaben der Bauhaus-Universität setzten sich aus den folgenden Positionen zusammen:

- 0812 Personal E12-E15
- 0822 Beschäftigte (HK)
- 0835 Vergabe von Aufträgen
- 0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben
- 0846 Dienstreisen

Der maßgebliche Anteil betrifft Personalkosten. Die geplanten und aufgewendeten Personenmonate waren für die umfassende Bearbeitung und den wissenschaftlichen Aufschluss notwendig. Da die in den Arbeitspaketen zu übernehmenden Teilaufgaben unterschiedliche Spezialkenntnisse und Fachkompetenz erforderten wurden im Personal erfahrene (promovierte) Mitarbeiter (Senior Researcher) und auch Nachwuchswissenschaftler beschäftigt. Mit den Umwidmungsanträgen wurden die erforderliche Verlagerung der Aufgaben und ihre zeitlichen Umsetzungserfordernisse quasi dynamisch (hier in Stufen einschließlich der Mittelvorrat für die frühzeitig als notwendig erkennbare (kostenneutrale) Laufzeitverlängerung) angepasst. Die Dienstreisen für Datenerhebungen und instrumentelle Standortortuntersuchungen konnten erst nach Aufhebung der Kontaktbeschränkungen bzw. im Rahmen der Laufzeitverlängerung durchgeführt werden.

Der zahlenmäßige Nachweis zum FuE-Projekt/Teilvorhaben der Bauhaus-Universität Weimar wird durch das Referat Drittmittel vorgelegt. Über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung wurde in den jährlichen Zwischenberichten informiert.

HafenCity Universität Hamburg, Professur Technisches Infrastrukturmanagement (HCU)

Die finanziellen Aufwendungen im Forschungsprojekt/Teilvorhaben der HafenCity Universität setzten sich aus den folgenden Positionen zusammen.

- 0812 Personal E12-E15
- 0822 Beschäftigte (HK)
- 0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben
- 0846 Dienstreisen
- 0850 Gegenstände (Softwarelizenzen)

Der maßgebliche Anteil betrifft Personalkosten. Die geplanten und aufgewendeten Personenmonate waren in Kombination mit der erforderlichen Expertise des Fachpersonals mit besonderer wissenschaftlicher Ausbildung für die Bearbeitung notwendig. Die Ausgaben für Dienstreisen war für die Abstimmung im Projekt, die Begleitung der experimentellen Untersuchungen in Weimar und die Spiegelung der Ergebnisse gegenüber der Fachwelt auf Veranstaltungen erforderlich. Weitere Ausgaben im Projektverlauf betrafen vorwiegend Lizenzgebühren für das zum Einsatz gekommene Programmsystem ABAQUS.

Der zahlenmäßige Nachweis zum FuE-Projekt/Teilvorhaben der HafenCity Universität wurde bereits als gesonderte Anlage bereitgestellt.

Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak)

Die finanziellen Aufwendungen im Forschungsprojekt/Teilvorhaben des ifak setzten sich aus den folgenden Positionen zusammen.

- F0831 Personal E13
- F0832 Beschäftigte (HK)
- F0838 Dienstreisen
- F0850 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (Softwarelizenzen)

Der maßgebliche Anteil betrifft Personalkosten. Die geplanten und aufgewendeten Personenmonate waren in Kombination mit der erforderlichen Expertise des Fachpersonals mit besonderer wissenschaftlicher Ausbildung für die Bearbeitung notwendig. Die Ausgaben für Dienstreisen war für die Abstimmung im Projekt erforderlich. Weitere Ausgaben im Projektverlauf betrafen vorwiegend Lizenzgebühren für das zum Einsatz gekommene Programmsystem.

Der zahlenmäßige Nachweis zum FuE-Projekt/Teilvorhaben des ifak wurde bereits als gesonderte Anlage bereitgestellt.

9 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit (alle Partner)

IAB:

Das IAB Weimar gGmbH war im Forschungsvorhaben neben der Projektarbeit auch mit der Aufgabe des Verbundkoordinators betraut. Das Projekt- und Konsortienmanagement umfasste dabei während der gesamten Projektlaufzeit die Aufgaben Management und Überwachung des Projektfortschrittes, Qualitätssicherung und -kontrolle, Sicherung des Ergebnistransfers, Organisation von Verbundtreffen und des Anwenderworkshops sowie die Kommunikation mit dem Projektträger. Weiterhin war der Projektkoordinator für die Erstellung des gemeinsamen Abschlussberichtes verantwortlich.

Aufgrund der vorliegenden Fachkompetenzen der einzelnen Verbundpartner wurde von Projektbeginn an ein interdisziplinärer Bearbeitungsansatz verfolgt. Die Projektarbeit der IAB Weimar gGmbH bestand zum einen in der Untersuchung von Schäden an erdverlegter Infrastruktur sowie in der Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Schadensminderung an Leitungsnetzen im Erdbebenfall und zum anderen in der Planung und Durchführung der experimentellen Versuche zu Spannungszuständen im Rohr-Boden-System zur Kalibrierung der FEM-Simulationen vom Verbundpartner HCU. Diese Versuche wurden in den Technika des IAB in Weimar durchgeführt, wo diverse Basisversuchsstände zur Verfügung stehen, die durch Erweiterungsumbauten für die jeweilige Versuchsanforderung modifiziert werden konnten. In enger Abstimmung mit der HCU wurden verschiedene Varianten möglicher zu untersuchender Rohr-Boden-Systeme zur Abbildung im Versuchsmaßstab aufgestellt. Aus den erzielten Versuchsergebnissen konnten umfangreiche Erkenntnisse zu den Spannungszuständen in realen erdverlegten Rohrleitungen gewonnen werden.

Die Untersuchung von Schäden an unterirdischer Infrastruktur im Erdbebenfall erfolgte mittels einer breiten Literaturrecherche, bei der nationale und internationale Schadensbeobachtungen aufgearbeitet wurden. Die Projektarbeit konnte an dieser Stelle auch von der umfangreichen Expertise des Verbundpartners EDAC profitieren. Das aufbereitete Wissen floss in die Planung der im Projekt durchzuführenden experimentellen und numerischen Untersuchungen ein. Weiterhin wurden daraus Ansätze für das zu entwickelnde Bewertungssystem für die Verletzbarkeit erdverlegter Rohrleitungen abgeleitet.

Die erarbeiteten Handlungsempfehlungen dienen dem Verständnis sowie der Systemanalyse von bestehenden erdverlegten Infrastrukturnetzen bezüglich ihrer Verletzbarkeit im Erdbebenfall. Sie zeigen Infrastrukturnetzbetreibern Möglichkeiten auf, die Funktion sowie Substanz ihres Systems zu bestimmen und daraufhin Maßnahmen zur Ertüchtigung des Systems zu erarbeiten und umzusetzen.

EDAC:

Das Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (EDAC) war in mehreren Arbeitspaketen des Projektes involviert und hat als in der Problemstellung Erdbeben ausgewiesene Forschungseinrichtung seine Aufgabe auch darin gesehen, den Datenfluss konzeptionell und in den fachlich realisierbaren Zielsetzungen teilprojektübergreifend zu gewährleisten bzw. die erforderlichen Schnittstellen zu definieren bzw. antragskonform selbst herzustellen.

Der wesentliche Beitrag besteht in der Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung von potentiellen Schäden im Erdbebenfall für bestehende erdverlegte Rohrleitungsnetze ausgehend von der Bereitstellung der für die Erdbebenanalyse relevanten Einwirkungen bzw. der Intensität bis hin zu den zu erwartenden Schäden.

In diesem Kontext ist die Entwicklung eines Klassifikationsschemas der Rohrleistungstypen nach Verletzbarkeitsklassen hervorzuheben, das dem Vorbild der European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98) konzeptionell und in den Elementen zur Kennzeichnung der Streubreiche folgt. Die Tabelle der Verletzbarkeitsklassen wird für die wesentlichen Rohrleistungstypen (Material, Durchmesser) aus weltweiten Schadensanalysen abgeleitet. Die auf den Auswertungen von Erdbebenschäden basierenden Fragility Functions wurden aufbereitet und mit den Funktionen für die Verletzbarkeitsklassen abgeglichen. Die Funktionen geben in der vorliegenden Form die Reparaturrate (RR) bezogen auf eine jeweils vereinheitlichte Länge der Rohrleitung (z.B. 1 km) in Abhängigkeit von den durch die Gefährdungsanalysen berechneten bzw. aus Konversionsbeziehungen abgeleiteten Kenngrößen (PGV, Intensität) an. Mit den im Vorhaben entwickelten Verletzbarkeitsfunktionen können Schadenserwartungen quantifiziert bzw. kritische Schadenszustände prognostiziert werden.

Die im Vorhaben durchgeführten (intensitätsbezogenen) Gefährdungsanalysen und die Aufnahme von Messdaten zur Kennzeichnung der Erdbebenausbreitung sind unikal; dies gilt auch für die entwickelten Routinen zur zeitabhängigen Visualisierung der (von unterschiedlicher Intensität) betroffenen Schüttergebiete (SHAKEMaps).

HCU:

Aufgabe der HafenCity Universität war es vorrangig, mittels numerischer Untersuchungen die Planung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen beim Projektpartner IAB zu begleiten und danach numerische Modelle zu kalibrieren, um die Grundlage für eine Einschätzung der Verletzbarkeit des Rohr-Boden-Systems und Extrapolationen zu legen. Durch umfangreiche Recherchen der vorhandenen Fachliteratur konnte der wissenschaftliche Anspruch an die experimentellen Untersuchungen definiert und abgesichert werden. Die Notwendigkeit der vorbereitenden wissenschaftlichen Untersuchung für die Planung der Versuche ergab sich aus der Einzigartigkeit des Versuchsstandes beim IAB in Deutschland, während die kalibrierten Modelle erforderlich waren um die zutreffenden Werte für die Einschätzung der Spannungszustände im Rohr und im Boden zu erhalten. Der Aufwand für Großversuche und auch der Aufwand für Finite-Elemente-Berechnungen mit komplexen Aufgabenstellungen ist relativ hoch. Die Visualisierung von Spannungszuständen und Verformungen im Boden und im Rohr, welche die Grundlage für die Bewertung des Tragsystems Rohr-Boden im Erdbebenfall lieferte, ist nach Einschätzung des Projektpartners auf andere Weise für die vorliegende Aufgabenstellung mit geringerem Aufwand nicht möglich.

ifak:

Für den Partner ifak liegt der Schwerpunkt der Arbeit im Projekt in der Bereitstellung eines Simulationswerkzeuges, mit dem die Auswirkungen von Schäden (insbesondere durch Erdbeben) auf erdverlegte Infrastruktur (insbesondere Abwasser- und Trinkwassernetze) analysiert werden können. Eine wichtige Anwendung dieses Werkzeuges ist die Verbesserung der Resilienz dieser Systeme bei eintretenden Schäden.

Im Antrag des Projektes wurde ursprünglich geplant, die beim Antragsteller vorhandenen, vereinfachten Ansätze zur Abwassernetzsimulation (hydrologische Modelle) und zur Trinkwassernetzsimulation (Stoffstromsimulation mit den Blöcken der Supply-Bibliothek) zu erweitern um Resilienz-Untersuchungen und im Erdbebenfall zur Maßnahmenplanung zu erweitern. Im Rahmen der Bearbeitung musste von diesem einfachen Ansatz Abstand genommen werden. Für die Simulation von Netzen im Schadensfall werden detailliertere physikalische Modelle benötigt, um Auswirkungen von Blockaden (Abwasser) und Leckagen (Trinkwasser) simulieren zu können. Dazu wurden entsprechende ursprünglich nicht geplante Modellbibliotheken in der Software SIMBA# (Software des Antragstellers) entwickelt.

Für die Simulation von Abwassernetzen erlaubt nur ein hydrodynamischer Ansatz eine Systembeschreibung der Auswirkungen der Schadenswirkungen (Einstau, gedrosselte Durchflüsse). Als Berechnungsansatz wurde der in SWMM (Public Domain-Referenz-Solver) implementierte Ansatz übernommen. Für vollgefüllte Rohrleitungen (Trinkwasser) wurde ein algebraischer Ansatz zur Druck- und Durchflussberechnung genutzt. Auch hier wurde eine neue Blockbibliothek für SIMBA# implementiert, mit der sich vollgefüllte Rohrleitungsnetze simulieren lassen. Als Berechnungsansatz wurde der in EPANET als open Source, public domain beschriebene Solver in SIMBA# implementiert.

Diese Ergebnisse stellen aus Sicht des Projektes Nebenergebnisse dar, die aber die beim Partner ifak entwickelte Simulationssoftware SIMBA# signifikant erweitert und eine noch weitergehende gesamtheitliche Simulation von Abwasser- und Wassersystemen ermöglicht. Aufbauend auf diesen Ansätzen zur Funktionssimulation wurden dann die benötigten Schadensmodelle implementiert. Mit diesen Modellen lassen sich nun die Resilienz von Abwasser und Trinkwassernetzen untersuchen, wie geplant für Erdbebenereignisse, aber auch für andere im Einzelfall wichtigere Schadensszenarien (Alterung, Havarien, Kriegsschäden) betrachten.

10 Voraussichtlicher Nutzen

IAB:

Die Zustandsbewertung von erdverlegter Infrastruktur sowie die Entwicklung von Verfahren zur Inspektion und Sanierung von Rohrleitungen zur Ver- und Entsorgung gehören zu den Kernkompetenzen der IAB Weimar gGmbH. Durch die geleistete Projektarbeit konnte ein umfangreicher Zugewinn an Erkenntnissen sowie anwendbarer Methoden zur Einstufung der Verletzbarkeit von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur im Erdbebenfall erworben werden. Dazu hat in besonderem Maß die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit den Projektpartnern beigetragen. Die Erkenntnisse und Methoden lassen sich auch auf Forschungsfelder anderer Naturrisiken übertragen, sodass hiermit der Ansatz für den Aufbau eines Kompetenzfeldes zur Einwirkung von Naturkatastrophen auf urbane Strukturen gegeben ist. Vor allem die immer häufiger auftretenden Starkregenereignisse und damit einhergehenden Überflutungen von Siedlungsgebieten zeigen, dass im Sektor der Naturrisiken ein erheblicher Forschungsbedarf steckt.

EDAC:

Mit der Einbindung der Kooperationspartner, durch die Übernahme der (realen) Netzdaten und ihre Berücksichtigung in den Simulationen konnte der konkrete Anwendungsbezug und somit ein wesentliches Projektziel erreicht werden. Die exemplarische Anwendung der Verletzbarkeitstabelle auf die Bestandsdaten (Abwasser, Wasser, Gas) des Testgebietes Albstadt ist erfolgt. Insofern kann in den Szenarien auch eine synoptische Betrachtung vorgenommen werden. Ergebnisse stehen aber dem Kooperationspartner zur Verfügung bzw. können durch die Internet-Abfrage abgeschätzt werden. Mit den im Projekt erhobenen Angaben zu den verschiedenen Rohrleitungsnetzen können in seismisch gefährdeten Erdbebenregionen Deutschlands auch Worst-Case-Szenarien durchgespielt werden. Die für die Modellregionen/Testgebiete gewählte Vorgehensweise der Datenerhebung, Systematisierung und Übertragung des Bewertungskonzeptes (der Verletzbarkeitsklassen für die erdverlegte Infrastruktur) erweist sich als übertragbar auf andere Zielgebiete. Die entwickelten Prognose-Tools sind letztlich für eine bundesweit einheitliche Übernahme geeignet.

Die Kennzeichnung der Rohrleitungstypen nach Verletzbarkeitsklassen wurde für das Simulationsprogramm SIMBA# als taugliche Grundlage getestet und in dessen modulare Struktur aufgenommen. Die durchgeführten instrumentellen Standortuntersuchungen und ihre Zusammenführung mit bisherigen Studien ermöglichten die Zonierung der Untergrundklassen und die Zuordnung der einwirkungserhöhenden Bodenfaktoren; diese konnten neben den Versorgungsnetzen auch als zusätzliche Datenebene in das Programm implementiert werden. Für das gesamte Bundesgebiet wurden in Auswertung der probabilistischen Seismischen Gefährdungsanalysen Rasterdaten für die nachweisrelevanten Erdbebenkenngrößen (PGV, PGA, Intensität) mit Wiederkehrperioden von 1000 und 2500 Jahren (Daten und QGIS-Arbeitsbereich) übergeben und in SIMBA# implementiert. Weitere Datenebenen zur Kennzeichnung der tektonischen Situation und Herdlagen in der Umgebung der Testgebiete bzw. standortspezifischen Variation der Einwirkungen können interaktiv integriert und zur Situationsbeurteilung herangezogen werden.

Die wissenschaftliche Verwertung in der Lehre an der Bauhaus-Universität Weimar (und somit auch ein Transfer in die Praxis) ist durch die Integration und den internationalen Zuschnitt von Teilaspekten im Rahmen des Masterstudienganges Natural Hazards and Risks in Structural Engineering (NHRE) eingeleitet worden. Ergebnisse des Vorhabens sollen zudem den Einstieg in ein erweitertes Wahlpflichtangebot bilden.

Angestrebt wird, die Zusammenarbeit zwischen den universitären Projektpartnern nach Ende des Vorhabens in Lehre und speziell mit Zuschnitt auf die internationalen Studienangebote und ihrer Vernetzungsmöglichkeiten fortzuführen bzw. auszubauen und dabei auch vorhandene Qualitätsmerkmale (eher kleiner Universitäten mit ihrem anerkannt guten Betreuungsangebot) bei Antragstellungen (z. B. DATIpilot) hervorzuheben. Das Transferpotenzial auf europäische und internationale Anwender wird in den Formen der akademisch-universitären Zusammenarbeit überprüft.

HCU:

Durch die umfangreiche Auseinandersetzung mit den besonderen Belastungsereignissen eines Erdbebens auf das Tragsystem Rohrleitung-Boden konnte im Forschungsgebiet der Professur Technisches Infrastrukturmanagement der HafenCity Universität der Erkenntnisraum um die Versagensmechanismen an Rohrleitungen erweitert werden. Insbesondere die bewältigten Herausforderungen numerische Modelle zu entwickeln, die an Großversuchen kalibriert werden, um dann Einblicke in die Spannungszustände von Rohrleitungen und umgebenden Bettungsmaterial zu erhalten, führten zu einem tieferen Verständnis der Zusammenhänge und zur Verfügung stehenden Methoden. Die numerischen Modelle liegen nun vor und können für weitere Untersuchungen verwendet werden. Ein weiterer Nutzen liegt in der Möglichkeit die gewonnenen Erkenntnisse in die Lehre an der HCU einfließen lassen zu können. Dies gilt einerseits für das Wissen um das Tragverhalten von Rohrleitungen im Erdbebenfall als auch für die Anwendung der vorhandenen und neu entwickelten Berechnungswerkzeuge.

ifak:

Für den Projektpartner ifak ergibt sich als unmittelbarer Nutzen, dass die im Projekt entwickelten Erweiterungen der Blockbibliotheken von SIMBA# für die Modellierung von erdverlegter Infrastruktur den Anwendungsbereich für die Simulationssoftware SIMBA# erweitert hat und damit dessen Wettbewerbsfähigkeit stärkt. Der Teil Funktionssimulation ist in der aktuellen Version von SIMBA# 5.0 enthalten und wurde auf der letzten IFAT präsentiert. U. a. mit diesen Erweiterungen gelingt es dem ifak, weiterhin Lizenzeinnahmen aus der Vermarktung (durch Dritte) von SIMBA zu generieren und damit einen wichtigen Anteil der für Forschungsvorhaben benötigten Eigenmittel zu generieren.

Als Nutzen für die Allgemeinheit ist hervorzuheben, dass mit der Erweiterung der Simulationssoftware SIMBA# ein Werkzeug entsteht, das verschiedenste Aspekte von Wasser- und Abwassersystemen holistisch in einem Simulationsmodell berechnen kann. Für jeden betrachteten Teilaspekt können unterschiedliche Detailtiefen gewählt werden und in jeder Detailtiefe stehen jeweils effiziente Lösungsalgorithmen zu Verfügung. Diese unterschiedlichen Solver können parallel verwendet werden, um ein Projekt zu simulieren. Diese Funktionalität geht über den bisherigen Stand der Technik weit hinaus. Eine weitere Besonderheit der entwickelten Lösung, ist die Möglichkeit der Simulation von Schadensauswirkungen und die damit verbundene Resilienz-Analyse von Netzen. Diese Funktionalität ist in dieser Form in den marktverfügbaren Simulationswerkzeugen nicht enthalten (insbesondere nicht für Abwassernetze) und stellt einen wichtigen erzielten Nutzen des Projektes dar. Diese Funktion kann für erdbebengefährdete Netze genutzt werden ist aber auch auf andere Schadensursachen übertragbar und damit auch für eine deutlich größere Anzahl von Anwendungen nutzbringend einsetzbar.

11 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

IAB:

Im Zuge der Projektarbeit ist von Seiten Dritter kein neuer Fortschritt veröffentlicht worden, der mit der Forschung auf dem Gebiet des Vorhabens vergleichbar ist.

EDAC:

Im Zeitfenster der Projektbearbeitung sind keine projektspezifischen bzw. für die Bearbeitung relevanten Vorhaben oder Ergebnisse bekannt geworden.

(National haben sich keine Schadenserdbeben ereignet und international liegen keine das Projektthema betreffenden Erfahrungsberichte von vergangenen Erdbeben vor, anhand derer die Modellansätze am Beispiel der beobachteten Schäden verifiziert werden können.)

HCU:

Während der Laufzeit der Projektbearbeitung sind von dritter Seite keine neuen Ergebnisse bekannt geworden, die in direktem Zusammenhang mit der durchgeführten Forschungsarbeit stehen.

ifak:

Bezüglich der Entwicklung von Simulationswerkzeugen zur Simulation von Abwasser- und Trinkwassernetzen im Schadensfall sind in der Laufzeit der Projektbearbeitung keine weiteren Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden.

12 Veröffentlichung der Ergebnisse

Berichte und Publikationen mit Projektbezug

Banushi G., Wham B., (2020) "Deformation capacity of buried hybrid-segmented pipelines under longitudinal permanent ground deformation", Canadian Geotechnical Journal, doi.org/10.1139/cgj-2020-0049, September 2020, Editors choice award 2021.

Beinersdorf, S., Kaufmann, C., Schwarz, J., Knapmeyer-Endrun, B. (2021):
Rezente Erdbebentätigkeit in Deutschland: Bodenbewegungen und Schütterwirkungen. Bau-
technik, 98, 11, 826–837.

Interseiten zum Projekt ZUVERSICHT:

EDAC <https://edac.biz/projekte/zuversicht> sowie BMBF <https://www.projektfoerderung-geo-meeresforschung.de/geowissenschaften/details?action=ShowForm&id=2751>

Kaufmann, Ch., Schwarz, J. (2021):

Zum Einfluss evolutionär entwickelter Bodenbewegungsmodelle auf Gefährdungs- und Risikoanalysen. 19. D-A-CH-Tagung 2021 (online), Beitrag 11.1, 95-96

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Golbs, Ch., Kaufmann, Ch. (2020):

ZUVERSICHT – Zustandsbewertung von erdverlegter system-relevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen. Konzept zur Bestimmung der Bodenbewegung und der zeitabhängigen Ausbreitung für beliebige Epizentren und Bereitstellung konkreter Kenngrößen der Schütterwirkungen. Meilensteinbericht M1.1 (intern); 33 S, 5 Anlagen; EDAC Weimar, Juli 2020.

Schwarz, J., Beinersdorf, S.; Golbs, Ch., Hasan, P.L. (2021):

Zeitabhängige SHAKEMaps für die Risikobewertung von Bestandsbebauung und Infrastruktur im Ereignisfall. 19. D-A-CH-Tagung 2021 (online) Beitrag 11.2, 97-98.

Schwarz, J., Beinersdorf, S. Hasan, P. L.; Kaufmann, Ch., Golbs, Ch. (2022):

Application of SHAKemap procedures for induced seismic events: Case study of Groningen. 3rd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology will be organized in Bucharest, Romania 4-9 September, 2022,

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Kaufmann, Ch., Langhammer, T., Golbs, Ch., Abrahamczyk, L., Alex, J. (2023a):

Gefährdungskonsistente Risikoszenarien für erdverlegte Infrastrukturnetze und -komponenten. DGEB-Publikation 19. Tagungsband der 18. D-A-CH-Tagung 2023 Kiel. Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (Hrsg. Frank Wuttke, Hendrawan D.B. Aji, und Aycen Özarmut), 43 – 52

Schwarz, J., Kaufmann, Ch., Beinersdorf, S., Golbs, Ch. (2023b):

Standortmessungen im Zielgebiet Albstadt zur Präzisierung der Erdbebenkenngrößen in Verbindung mit dem Forschungsvorhaben ZUVERSICHT. im Auftrag des Instituts für Angewandte Bauforschung Weimar Forschungsbereich Technische Systeme, Fachbereich Infrastruktur und Bionik. Earthquake Damage Analysis Center (in Zusammenarbeit mit seismotec GmbH), 71 Seiten (inklusive 3 Anlagen)

13 Literatur- und Quellenverzeichnis

Akkar, S., Bommer, J.J. (2010):

Empirical Equations for the prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2, 195–206.

Aptikaev, F. F. (1982):

On the correlation of MM Intensity with parameters of ground shaking. 7th ECEE, Athens.

Banushi, G. (2017):

Seismic design of buried steel pipelines. Dissertation.

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:084-17031313102>

Beinersdorf S. (2016):

Intensitätsbasierte Bewertung der Verletzbarkeit allgemeiner Hochbauten in deutschen Erdbebengebieten. Weimar, Bauhaus-Universität, Univ.-Verl. Schriftenreihe des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 029.

Beinersdorf, S., Kaufmann, C., Langhammer, T., Schwarz, J. (2017):

Automatisierte Schüttergebietskarten zur Reinterpretation und Prognose von Erdbebenschäden. DGE-B Publikation Nr. 17. Vortragsband zur 15. D-A-CH-Tagung: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik 2017 (Hrsg. V. Zabel & S. Beinersdorf), 21.-22. September 2017 Weimar, 70–81.

Beinersdorf, S., Kaufmann, C., Schwarz, J., Knapmeyer-Endrun, B. (2021):

Rezente Erdbebetätigkeit in Deutschland: Bodenbewegungen und Schütterwirkungen. *Bautechnik*, 98, 11, 826–837.

Beinersdorf, S., Schwarz, J. (2014):

Shakemaps for Central Europe implementing macroseismic observations. In: 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEEES), Aug. 24-29, 2014, Istanbul. Istanbul, Paper #238.

Bindi, D., Massa, M., Luzi, L., Ameri, G., Pacor, F., Puglia, R., Augliera, P. (2014):

Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5 %-damped PSA at spectral periods up to 3.0 s using the RESORCE dataset. *Bull. Earthq. Eng.*, 12, 1, .391–430. Erratum in: 12, 1, 431–448.

Bindi, D., Pacor, F., Luzi, L., Puglia, R., Massa, M., Ameri, G., Paolucci, R. (2011):

Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull. Earthq. Eng.* 9, 6, 1899–1920.

Bormann, P., Engdahl, B., Kind, R. (2009 online):

Seismic Wave Propagation and Earth models. - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-70. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP_r1_ch2

Butenweg, Ch., Schmitt, T., Rosen, B. (2014):
Seismische Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungssysteme. *Bauingenieur* 89, Juli/August, 316-3244

Davenport, C. A., Lap, J. M. J., Maurenbrecher, P. M., Price, D. G. (1994):
Liquefaction potential and dewatering injection structures at Herkenbosch: field investigations of the effect of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 2-4, 365–374.

Eidinger, J (1998):
Lifelines, water distribution system in the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989, performance of the build environment-lifelines. In: Schiff A (ed) US geological survey professional paper 1552-A, pp A63–A80.

Ende, C., Schwarz, J. (2004):
Einfluss von Analysemethoden auf spektrale Abnahmebeziehungen der Bodenbewegung. Schriftenreihe der Bauhaus-Universität Weimar 116: Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung. Erdbebenzentrum am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Weimar, 105–115.

Esposito, S., Giovinazzi, S., Elefante, L.; Iervolino, I. (2013):
Performance of the L'Aquila (central Italy) gas distribution network in the 2009 (Mw 6.3) earthquake. *Bull. Earthquake Eng.*, 11, 2447–2466.

Felicetta C., Russo E., D'Amico M., Sgobba S., Lanzano G., Mascandola C., Pacor F., Luzi L. (2023):
Italian Accelerometric Archive v4.0 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. doi: 10.13127/itaca.4.0; https://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_40/#!/about/citations

Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts - Wasserhaushaltsgesetz-WHG vom 31. Juli 2009

Grantz, A.G., Plafker, G., Kachadoorian, R. (1964):
Alaska's Good Friday Earthquake, March 27, 1964: A Preliminary Geologic Evaluation. U.S. Geological Survey Circ. 491, 35 pp

Grünthal, G., Musson, R., Schwarz, J., Stucchi, M. (1998):
European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg 1998.

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018a):
Neueinschätzung der Erdbebengefährdung Deutschlands - Version 2016 - für DIN EN 1998-1/NA. *Bautechnik* 95, 5, 371-384.

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., Bindi, D. (2018b):
The probabilistic seismic hazard assessment of Germany-version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bull. Earthquake Eng.* 16, 4339-4395.

Ha, D., Abdoun, T. H., O'Rourke, M. J., Symans, M. D., O'Rourke, T. D., Palmer, M. C., Stewart, H. E. (2008):

Centrifuge modeling of earthquake effects on buried high-density polyethylene (HDPE) pipelines crossing fault zones. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134, 10, 1501-1515.

Kaufmann, Ch., Schwarz, J. (2011):

DIN 4149- konforme spektrale Abnahmebeziehungen für Deutsche Erdbebengebiete. In Proceedings D-A-CH -Tagung 2011: Erdbeben und Baudynamik, 15. - 16. September 2011, Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik DGEB (Ed.), 49-60.

Kuhlmann, W. (2004):

Gesamtkonzept zur Ermittlung der seismischen Vulnerabilität von Bauwerken am Beispiel unterirdischer Rohrleitungen, Dissertation Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen

Kurtulus, A. (2011):

Pipeline Vulnerability of Adapazari during the 1999 Kocaeli, Turkey, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 27, 1, 45–66.

Maiwald, H., Schwarz, J. (2017):

Vulnerability assessment of Multi Hazard exposed building types - development of an EMS-98 based empirical-statistical methodology. Proceedings 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2017, Paper No. 2134.

Maiwald, H.; Schwarz, J. (2018):

Vereinheitlichte Schadensbeschreibung und Risikobewertung von Bauwerken unter extremen Naturgefahren. *Bautechnik* **95**, 10, 743-755.

Merkblatt DWA-M 149-2: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion | Dezember 2013

Merkblatt DWA-M 149-3: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Zustandsklassifizierung und -bewertung | April 2015

Nieuwenhuis, J. D. (1994):

Liquefaction and the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 2-4, 357-364.

NRC (1985):

National Research Council (U.S.) Committee on Earthquake Engineering: Liquefaction of Soils during Earthquakes. National Academy Press Washington D.C.

O'Rourke M.J., Ayala G (1993):

Pipeline damage due to wave propagation. *J Geotec Eng*, 119 (9): 1490–1498.

O'Rourke, M.J., Liu X. (2012):

Seismic design of buried and offshore pipelines. Monograph MCEER-12-MN04, pp. 380,

Pitilakis, K., Alexoudi, M., Argyroudis, S., Monge, O., Martin, C. (2006):
Earthquake risk assessment of lifelines. *Bull Earthquake Eng*, 4, 365–390.

Psyrras, N.K.; Sextos, A. (2018):
Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: a review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 106, 254-277.

Raschke, M., Lang, D.H., Habenberger, J., Schwarz, J. (1997):
Das Cariaco (Nordvenezuela) Erdbeben vom 09. Juli 1997. *D-A-CH Mitteilungsblatt* 16, 2, November 1997. Spezialbericht, 7 S.

Rosenhauer, W. (1999):
Benutzungs-Anleitung für das Programm PSSAEL zur probabilistischen seismischen Standort-Analyse. Bericht im Auftrag des VGB, Rösrath, August 1999.

Schwarz, J., Maiwald, H. (2014):
Standortgefährdung infolge seismisch induzierter Bodenverflüssigung und Nachweise in DIN EN 1998-5. *Bautechnik* 91 (2014) 7, 481-494

Schwarz, J., Fehling, E. (2023):
Eurocode 8 fixiert ein gesellschaftlich akzeptiertes Risiko und die sichere Unsicherheit im Umgang mit Naturgefahren. *Der Prüferingenieur*, 63, November 2023, 9 S.

Schwarz, J., Lang, D.H.; Raschke, M. (2000):
Die Erdbeben in der Türkei am 17.08.1999 und 12.11.1999. Ein Beitrag zur Ingenieuranalyse der Schäden. *Bautechnik* 77 (2000), 5, 301-324.

Schwarz, J., Kaufmann, C., Maiwald, H. (2017):
Seismische Einwirkungen für die neue Generation von Erdbebenbaunormen: Gefährdungskonsistente und untergrundspezifische Spektren für die aktualisierte Erdbebenzonenkarte. Abschlussbericht. Bauforschungsvorhaben im bauaufsichtlichen Bereich. Im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik. Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden. Scientific Technical Report 01-17, Februar 2017; überarbeitete Fassung, Februar 2018, *Scientific Technical Report* 01-18.

Schwarz, J., Maiwald, H., Kaufmann, Ch. (2021a):
Untergrundspezifische und einwirkungsabhängige Spektren in DIN EN 1998-1/NA-2021. *Bautechnik* 98, 11, 838-851.

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Meidow, H. (2021b):
Intensitäts- und magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EK DAG – erweiterter Ahorner-Katalog (Version 2.2 – Druckfassung). *Bauingenieur* 80, 04. D-A-CH Mitteilungsblatt/Fachteil, S11 -S15.

Schwarz, J., Lang, D.H., Kaufmann, Ch., Ende, C. (2007):
Empirical ground-motion relations for Californian strong-motion data based on instrumental subsoil classification. 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Paper 1359, 2007.

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Golbs, C., Kaufmann, C. (2015):
Simulation von Erdbebenbibliotheken für risikoorientierte und verhaltensbasierte Bemessungskonzepte. *SIA D 0255*, Erdbeben und bestehende Bauten, 31–38.

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Kaufmann, Ch., Langhammer, T (2016):
SHAKEMaps – effiziente Tools für die Reinterpretation und Prognose von Erdbebenschäden. *Bautechnik* 93, 4, 230-242.

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Golbs, C., Kaufmann, Ch. (2019a):
Zum Einfluss der Stärkeparameter historischer Schlüsselerdbeben auf die Ergebnisse seismischer Gefährdungsanalysen und bauwerkskonkreter Schadensprognosen. In: Adam, C., chs, G. und Furtmüller T. Hrsg. Vortragsband 16. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik Innsbruck, Paper ID 1504

Schwarz, J.; Maiwald, H.; Kaufmann, C.; Langhammer, T.; Beinersdorf, S. (2018):
Konzeptionelle Grundlagen und Tools zur Bewertung der Multi Hazard Verletzbarkeit von Bestandsbauten. *Bautechnik* 95, 9, 639-652.

Seed, B. H., Idriss, M. I. (1967): Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, SM3, 83-108.

Studer (2012): Erdbeben und Infrastrukturen - Abwassersysteme". Studer Engineering GmbH, Juli 2012. <https://www.bafu.admin.ch>

Normen

American Society of Civil Engineers ASCE) (1984):
Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, ASCE

CEN (2018):
Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Final Document EN1998-1 NEN SC8 PT1. Chapters 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Rev 30-00. April 30th 2018. CEN/TC 250/SC 8 N 706. Im DIN geführt unter: NA 005-51-06 AA N 1038 bzw. NA 005-51 FBR N 1813.

DIN 4149 (2005):
Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Vorgesehen als Ersatz für DIN 4149-1:1981-04 und DIN 4149-1/A1:1992-12. Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., April 2005, Berlin.

E DIN EN 1998-1/NA/A1:2023-02:
Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, Änderung A1.

DIN EN 1998-1/NA: 2021-07:

Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, mit CD-ROM. Ersatz für DIN EN 1998-1/NA: 2011-01.

E DIN EN 1998-1/NA: 2018-10:

Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau. Ersatz für DIN EN 1998-1:2010-12 und DIN EN 1998-5:2010-12 Ersatz für die 2010-12 zurückgezogene Norm DIN 4149: 2005. Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin (mit Erscheinungsdatum 2018-09-21)

DIN EN 13508: Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden (08/2011)

DIN EN 1998-4: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 4: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen; Deutsche Fassung EN 1998-4:2006

DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden – Kanalmanagement (07/2017)

DVGW: Netz- und Schadenstatistik Wasser - Ergebnisse aus den Jahren 2016 und 2017.

DVGW W 400-3 (2006-09): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen - Teil 3: Betrieb und Instandsetzung.

DVGW W 402-B1 (2019-07): Netz- und Schadenstatistik; Erfassung und Auswertung von Daten zur Instandhaltung von Wasserrohrnetzen - Beiblatt 1: Unternehmensübergreifende Datenerhebung.

DWA-A 139: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“ (03/2019).

DWA-M 149-1: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 1: Grundlagen“ (05/2018)

DWA-M 149-2: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion (12/2013)

DWA-M 149-3: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Zustandsklassifizierung und -bewertung (04/2015)

Datenzentren

Christchurch City Council (2021a):

Pipe materials, type of joint and damage data after the Christchurch earthquake, 2011, Feb. 22nd. <http://www.ccc.govt.nz>.

Christchurch City Council (2021b):

Pipe data (including bio gas). <https://opendata-christchurchcity.hub.arcgis.com/>. (open data).

EMSC (2020): European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC), SeismicPortal. (visited on 04/16/2020).

EMSC (2023):

LASTQUAKE. European-Mediterranean Seismological Centre.

<https://www.emsc-csem.org/Earthquake/europe/>, last access 22.3.2023.

Heidbach, O., Rajabi, M., Reiter, K., Ziegler, M., WSM Team (2016):

World Stress Map Database Release 2016. <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>.

ISC (2020):

International Seismological Centre, Seismological Dataset Repository.

(visited on 04/16/2020).

FDSN (2020): International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN) [Internet].

<http://www.fdsn.org/> (visited on 12-08-20).

KNMI (2020):

The Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI DataCentre.(visited on 04/16/2020).

ObsPy (2020):

ObsPy an open-source project dedicated providing a Python framework for processing seismological data (visited on 05/03/2020)

SZGRF (2019):

Bulletins des Seismologischen Zentralobservatoriums Gräfenberg 1998-2019.
<http://www.szgrf.bgr.de/>

Sonstiges

Kunststoffrohrverband e.V. KRV. Elastizitätsmodul (E-Modul).

<https://www.krv.de/artikel/elastizitaetsmodul-e-modul> [accessed 12.01.2020]

Kataloge

Schwarz, J., Beinersdorf, S., Meidow, H. (2019b):

Magnitudenorientierter Erdbebenkatalog für deutsche und angrenzende Gebiete EKDAG V2.2 – erweiterter Ahorner-Katalog. (Version Dezember 2018). Bauhaus-Universität Weimar,

Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum). Bauhaus-Universitätsverlag als Imprint von arts + science weimar GmbH, 570 Seiten

ISBN: 978-3-95773-276-7; <http://www.edac.biz/erdbebenkatalog.html>.

14 Anlagen

- 14.1 Anlage 1: Verflüssigungseffekte und Rohrleitungsschäden (IAB, EDAC)
- 14.2 Anlage 2: Verletzbarkeitsfunktionen (HCU)

14.1 Anlage 1 Verflüssigungseffekte und Rohrleitungsschäden (IAB, EDAC)

Tabelle A 1: Charakteristische Verflüssigungsphänomene und Beispiele (Schwarz & Maiwald, 2014)

Phänomen [1]	Beschreibung	Beispiele	
<i>Sand boils</i>	Wasser strömt aus Zonen hohen Wasserdrucks zur Oberfläche und führt Material mit sich	Cariaco-Erdbeben (1997): Cariaco (Bild 6a)	Roermond-Erdbeben (1992): bei Herkenbosch; vgl. Nieuwenhuis (1994) Davenport <i>et al.</i> (1994)
<i>Sand volcanos</i>	z.T. schlagartiges Aufsteigen wassergesättigter Sande (auch aus Sandlinsen) entlang eines zentralen Kanals mit Bildung von Sandkegeln an der Erdoberfläche		
<i>Vent fractures</i>	Aufreißen bindiger Böden über der verflüssigten Bodenschicht, Ablagerung des verflüssigten Materials an der Oberfläche	Cariaco-Erdbeben (1997), Mariguitar (Bild 6b)	
Verlust der Tragfähigkeit	(temporärer) Verlust der Tragfähigkeit infolge der Verflüssigung des Baugrunds	Niigata (Japan), 1964; vgl. Seed & Idriss (1967)	
Aufschwimmen unterirdischer Bauwerke	Aufschwimmen von unterirdischen Bauwerken, welche leichter sind als der umgebende Baugrund	Kocaeli-Erdbeben (1999): Adapazeri; vgl. Kurtulus (2011); Schwarz <i>et al.</i> (2000)	
Setzungen	Lokale zusätzliche Sedimentverdichtungen, in der Regel mit Bodenverflüssigungen verbunden und dadurch verstärkt.	Alaska (1964): Landzunge <i>Homer Spit</i> und <i>Portage area</i> ; vgl. Grantz <i>et al.</i> (1964) Kocaeli-Erdbeben (1999): Gölcük, Seymen (Bild 6f)	
<i>Flow Liquefaction</i>	Transport großer Bodenmassen auf verflüssigtem Material (wassergesättigte lockere Sande oder Schluffe) mit hoher Geschwindigkeit über große Entfernungen, Ursache ist die Überschreitung der Scherfestigkeit im Lockergestein [9] im geneigten Gelände (Neigung > 3°).	Versagen der Flutseite des San Fernando Staudammes während des San Fernando Erdbebens (1971); vgl. NRC (1985)	
<i>Lateral Spreading</i>	Bodenspreizung infolge der Verflüssigung einer tieferliegenden Bodenschicht. Horizontale Materialbewegung an wenig geneigten Hängen (i. a. zwischen 0.3° und 3°)	Cariaco-Erdbeben (1997): Chiguana (Bild 6c).	
<i>Ground Oscillation</i>	Oszillieren einer entkoppelten Bodenschicht auf verflüssigtem Material in flachem Gelände ohne horizontale Verschiebung, Chaotische Bodenbewegung ohne umfangreiche Materialumlagerungen.	Loma Prieta Erdbeben 1989]	

Tabelle A 2: Übersicht von Rohrleitungsschäden durch Erdbeben (Kuhlmann, 2004)

Erdbeben	M_s	Schadensart und Schadensausmaß	Schadensursache (falls bekannt)
Prince William Sound, Alaska 28.03.1964	9,2	- mehr als 200 Brüche in Gasleitungen - ca. 100 Brüche in Wasserversorgungsleitungen [*]	- Erdrutsche - Verwerfungen
San Francisco, USA 18.04.1906	8,3	- starke Schäden an Frisch- und Abwasserleitungen - Zerstörung einer Hauptversorgungsleitung San Franciscos, dadurch starke und schnelle Ausbreitung der Feuer [*] - 80 % des Gesamterdbebenschadens wurde durch diese Feuer hervorgerufen [*]	- ca. 50 % durch PGD - ca. 50 % durch Wellenausbreitung [*] - Brüche durch Verwerfungen und Bodenklaffungen
Michoacan, Mexiko 19.09.1985	7,9	- schwerste Schäden an der unterirdischen Infrastruktur - ca. 30 % der 18 Millionen Einwohner von Mexiko City unmittelbar nach dem Erdbeben ohne Frischwasser - manuelle Zerstörung verbleibender Leitungen durch die Wasser suchende Bevölkerung [*]	- ausschließlich Wellenausbreitung [*]
Tokachi-Oki, Japan 16.05.1968	7,9	- schwere Schäden an dem Wasserversorgungssystem der Stadt Hachinoche, hauptsächlich an Anschlüssen - 3 Brüche in der Hauptversorgungsleitung aus Gusseisen (D = 800 mm) bzw. Stahl (D = 200 bis 250 mm) - 32 Brüche im Nebenleitungssystem (D = 75 bis 600 mm) - insgesamt 947 Undichtigkeiten im Versorgungsnetz [*]	
Miyage Ken Oki, Japan 12.06.1978	7,4	- Wasserversorgungssysteme in 54 Städten beschädigt - in Sendai City mehr als 200 Fehlstellen an Rohren (D > 50 mm) - Damage Ratio bei Stahlrohren mit „Turnbuckle-Joint“ (Spannschloss-Anschluss) höher als bei Asbestzement-Rohren - geringer Schaden an Abwassersystemen	- lokale Setzungen sowie horizontale Verschiebungen zwischen gewachsenem Boden und künstlichen Aufschüttungen [*]
Chi-Chi, Taiwan 21.09.1999	7,3	- ca. 50 % der unterirdischen Rohrleitungen beschädigt - Totalausfall der Frischwasserversorgung in Ballungszentren nahe des Epizentrums [*]	- Verwerfungen - Wellenausbreitung - Bodenverflüssigung
Haicheng, China 04.02.1975	7,3	- schwere Schäden an Systemen der Wasserversorgung und der Abwasserentsorgung [*]	
Kobe, Japan 17.01.1995	6,8	- ca. 2000 Brüche in Wasserversorgungsleitungen - Totalausfall der Frischwasserversorgung für mehrere Wochen - Löscharbeiten wurden verhindert, dies führte zu verheerenden Folgeschäden [*]	- hauptsächlich Setzungen
Northridge, USA 17.01.1994	6,7	- erhebliche Schäden an Frisch- und Abwasserleitungen, vor allem an Anschlüssen und an Abzweigungen [*]	- Setzungen - Horizontalverschiebungen - Bodenverflüssigung

Tabelle A 2 (Fortsetzung)

Erdbeben	M_s	Schadensart und Schadensausmaß	Schadensursache (falls bekannt)
Kocaeli, Türkei 17.08.1999	7,4	- schwere Schäden an städtischen Ab- und Frischwasserleitungen - lokale Ausfälle der Wasserversorgung - Entleerung der Frischwasserreservoirs infolge der Schäden an Hauptleitungen [*] - etwa 1 Mio. Menschen ohne Frischwasser für 1-3 Wochen [*] - eine die Bruchzone kreuzende Leitung (D = 2,2 m) wurde um ca. 2 m senkrecht verschoben, blieb jedoch unbeschädigt [*]	- hauptsächlich Setzungen
Loma Prieta, USA 17.10.1989	7,1	- geringe Schäden, Wasserleitungen lediglich in lokalen Bereichen beschädigt - in Los Gatos waren hauptsächlich alte Gusseisenrohre vom Erdbeben betroffen - eine Frischwasserleitung aus Stahl (D = 80 cm) wurde komplett zerstört [*] - die Anzahl der Schäden pro km Rohrleitung war antiproportional zum Rohrdurchmesser [*]	- starke Abhängigkeit zwischen Schadensausmaß und der Stärke der Setzungen - Bodenverflüssigung
San Fernando, USA 09.02.1971	6,7	- 1400 Brüche in verschiedenen Leitungssystemen - Ausfall der Wasser- und Gasversorgung sowie der Abwasserentsorgung [*] - ein Bruch alle 2,5 km in Bereichen starker Gebäudebeschädigung [*]	- Bodenverflüssigung - Horizontalverschiebungen [*,*]
Ecuador 06.03.1987	7,0	- 850 Millionen Dollar Verlust durch Zerstörung der 660 mm trans-ecuadorianischen Ölpipeline [*]	- Erdrutsche - Verwerfungen
Changureh, Iran 22.06.2002	6,4	- sehr schwere Schäden an Frisch- und Abwasserleitungen - 9 Dörfer verloren 100 % der Frischwasserversorgungssysteme [*]	

[*] Hinweis:

Die zitierten Quellen sind Kuhlmann (2004) zu entnehmen; die Schadensbeschreibungen werden ohne Prüfung der Primärquellen übernommen.

Tabelle A 3: Rohrleitungsschäden infolge seismischer Belastung

Bild	Beschreibung	Auswirkung	Quelle *)
	Einsturz einer Abwasserleitung	Risse und Scherbenbildung führen zum Verlust der Ringsteifigkeit, Lastaufnahme nicht mehr möglich	Niigata Ken, Japan 2004 (Studer, 2012)
	Aufschwimmen einer Abwasserleitung inkl. Schachtbauwerk	Verlust der Tragfähigkeit des Baugrundes durch Bodenverflüssigung, Lageabweichungen	Niigata Ken, Japan 2004 (Studer, 2012)
	Faltung einer Stahlrohrleitung	Verformung durch Druck- und Zugbelastung, Risse, Undichtigkeiten	Palm Springs, Kalifornien (Butenweg et al., 2014)
	Bruch einer Trinkwasserleitung	Biegebeanspruchung, Risse, Undichtigkeiten, Scherbenbildung	Kobe, Japan 1995 (Kuhlmann, 2004)
	Verformung im Bereich eines Rohranschlusses	Verformung durch Druck- und Zugbelastung, Risse, Undichtigkeiten	Niigata, Japan 1964 (Kuhlmann 2004)

*) Hinweis:

Die Fotos wurden aus den genannten Quellen entnommen. Kuhlmann (2004) bzw. Butenweg *et al.* (2014) zitieren Quellen, die im Original nicht vorliegen bzw. nachvollzogen werden konnten.

14.2 Anlage 2 Verletzbarkeitsfunktionen (HCU)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	100
Abbildungsverzeichnis.....	101
Tabellenverzeichnis.....	102
14.2.1 Stand der Technik bei empirischen Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen.....	103
14.2.2 Vorhandene Instrumente zur Analyse von Wassernetzen	107
14.2.3 Analytische Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen.....	109
14.2.3.1 Segmentierte Rohrleitungen.....	110
14.2.3.2 Kontinuierliche Rohrleitungen.....	113
14.2.3.2.1 Transiente Bodenverformung (TGD)	113
14.2.3.2.2 Permanente Bodenverformung (PGD)	119

Abbildungsverzeichnis

Bild A 1:	Anschauliches Beispiel für die bewertete (a) Kontrollintensität $\Theta=C$ -PGV-L; (b) Leckwahrscheinlichkeit; (c) Bruchwahrscheinlichkeit; und (d) Schadenszustände für das in Mazumder <i>et al.</i> (2020) beschriebene Wasserverteilungssystem	109
Bild A 2:	Mechanisches Modell für segmentierte Rohre, die einer axialen Bodenbelastung ausgesetzt sind	111
Bild A 3:	Von O'Rourke und Vargas-Londono (2016) vorgeschlagenes Modell mit starren Rohrsegmenten, die einer gleichmäßigen Bodenbelastung ausgesetzt sind: a) Rohrleitungsmodell mit identischen Verbindungseigenschaften; b) Rohrleitungsmodell mit flexibler Verbindung am Ursprung	111
Bild A 4:	a) Ablaufdiagramm für geringe Bodenbelastung. b) Ablaufdiagramm für hohe Bodenbelastung (O'Rourke und Vargas-Londono, 2018)	112
Bild A 5:	Vergleich zwischen empirischen und analytischen Fragilitätsbeziehungen für verschiedene CI-Rohrdurchmesser	112
Bild A 6:	Berücksichtigung von S-Welle und R-Welle bei der Rohrleitungsplanung (IITK-GSDMA, 2007)	113
Bild A 7:	Schematische Darstellung der scheinbaren seismischen Wellenausbreitung von a) S-Welle und b) R-Welle (IITK-GSDMA, 2007)	115
Bild A 8:	Normalisierte Ausbreitungskurve für eine einzelne Schicht über einen halben Raum (Chen und Scawthorn, 2002)	117
Bild A 9:	Reibungsdehnungsmodell für Wellenausbreitungseffekte auf erdverlegte Rohrleitungen (Chen und Scawthorn, 2002)	118
Bild A 10:	Permanente Bodenverformung: a) schräge Kreuzung, b) Längskreuzung, c) senkrechte Kreuzung (IITK-GSDMA, 2007)	119
Bild A 11:	Reaktion des Rohrs auf PGD: a) in Rohrlängsrichtung und b) in normaler Rohrrichtung	120
Bild A 12:	Unelastisches Modell für die longitudinale PGD a) Fall 1; b) Fall 2 (O'Rourke und Liu, 2012)	121
Bild A 13:	Analytisches Modell für eine Rohrleitung, die einer räumlich verteilten, transversalen PGD ausgesetzt wurden (O'Rourke und Liu, 1999)	121
Bild A 14:	Resultierende Auftriebskraft auf das Rohr (IITK-GSDMA, 2007; ASCE, 2001)	123
Bild A 15:	Klassifizierung von Störungsbewegungen: a) normal, b) Scherbruch, c) umgekehrt (Calvi und Nascimbene, 2011)	124
Bild A 16:	Kreuzung von Pipelines: a) Scherbruch und b) normaler Schlupfbruch (IITK-GSDMA, 2007)	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle A 4: Übersicht über die empirischen Fragilitätsfunktionen für erdverlegte Rohrleitungen, die seismischen Bodenverformungen ausgesetzt sind	106
Tabelle A 5: Instrumente zur Analyse von Wassernetzwerken (Mazumder <i>et al.</i> , 2020)	107
Tabelle A 6: Überblick über die wichtigsten Analyseverfahren zur Bewertung der seismischen Leistungsfähigkeit.....	110
Tabelle A 7: Wichtigkeitsfaktor für verschiedene Klassen von Rohrleitung I_p (Calvi und Nascimbene, 2011).....	114

14.2.1 Stand der Technik bei empirischen Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen

Für die Entwicklung von Fragilitätskurven für erdverlegte Rohrleitungen können verschiedene Ansätze verwendet werden, die in empirische (Stufe 1) und analytische (Stufe 2 und 3) eingeteilt werden können. Die Definition der strukturellen Grenzzustände sollte auf einem adäquaten Engineering Demand Parameter (EDP) basieren, der die strukturelle Leistung der Rohrleitung auf Komponentenebene beschreibt.

Die meisten empirischen Beziehungen gelten für segmentierte Rohrleitungen, da diese häufiger vorkommen und viel anfälliger für Erdbeben sind als durchgehende Rohrleitungen, selbst wenn nur die Gefahr der Wellenausbreitung berücksichtigt wird (O'Rourke und Liu, 2012).

Die empirischen Vulnerabilitätsfunktionen basieren auf gemeldeten Schäden an erdverlegten Rohrleitungen durch historische Erdbeben der letzten 40 Jahre. Diese Beziehungen liefern Korrelationen zwischen der Schädigungsrate an Rohrleitungen und verschiedenen Stufen der seismischen Intensität. Die Schädigungsrate wird in der Regel als Reparaturrate (RR) ausgedrückt, definiert als die Anzahl der Rohrreparaturen pro Längeneinheit der Rohrleitung, die einer bestimmten seismischen Intensität (IM) ausgesetzt ist. Die seismische Intensität (IM) wird definiert durch eine Gruppe repräsentativer Bodenbewegungsparameter. Diese Fragilitätsfunktionen werden entweder linear oder als Potenzgesetz ausgedrückt (ALA, 2001), d. h.:

$$RR \text{ (keine Reparaturen/km)} = a \times IM, \text{ oder } RR \text{ (keine Reparaturen/km)} = b \times IM^c \quad (1)$$

Die Parameter a , b und c werden auf der Grundlage einer Regressionsanalyse der nach dem Erdbeben gemeldeten Schadensdaten für erdverlegte Rohrleitungen definiert.

Nach der Schätzung der RR wird die Wahrscheinlichkeit für eine Gesamtzahl von n Schäden (d. h. Lecks oder Brüche) und Reparaturen für eine Rohrleitungsstrecke der Länge L wie folgt über eine Poisson-Verteilung angegeben (Gehl *et al.*, 2014):

$$P(N = n) = \frac{(RR \cdot L)^n}{n!} \cdot e^{-RR \cdot L} \quad (2)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines Rohrbruchs kann dann wie folgt berechnet werden:

$$P_f = 1 - P(N = 0) = 1 - e^{-RR \cdot L} \quad (3)$$

Tabelle A 4 enthält eine Zusammenfassung der häufig verwendeten empirischen Fragilitätsbeziehungen für erdverlegte Rohrleitungen, die erdbebenbedingten Bodenverformungen ausgesetzt sind, zusammen mit dem Maß für die seismische Intensität, den Rohrleitungseigenschaften und der Anzahl der Erdbeben, für die Daten gewonnen wurden.

Katayama *et al.* (1975) stellten die ersten Fragilitätsbeziehungen für seismisch verursachte Schäden an erdverlegten Rohren aus Gusseisen (CI) und Asbestzement (AC) in Form von PGA vor. Dabei verwendeten sie, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenbedingungen, Daten von sechs Erdbeben, vier in Japan, einem in Nicaragua und einem in den Vereinigten Staaten.

Isoyama und Katayama (1982) stellten eine Fragilitätsbeziehung in Form von PGA vor, die auf den gemeldeten Schäden an gusseisernen Rohrleitungen während des San-Fernando-Erdbebens 1971 basierte. Eguchi (1983, 1991) entwickelte Fragilitätsfunktionen in Form von MMI (Modified Mercalli Intensity), getrennt für Wellenausbreitung und permanente Bodenverformung (PGD), für AC-, CI-, Beton-, geschweißte Stahl-, duktile Eisen- (DI) und Polyvinylchlorid (PVC)-Rohre.

Der Autor kam zu dem Schluss, dass AC- und Betonrohre anfälliger sind als PVC-Rohre, die wiederum anfälliger sind als CI-Rohre und geschweißte Stahlrohre mit abgedichteten Verbindungen. Bei DI-Rohren wurden im Durchschnitt etwa zehnmal weniger Reparaturen pro Längeneinheit durchgeführt als bei den am schlechtesten abschneidenden Rohren. Schließlich war die Reparaturrate von Stahlrohren der Güteklasse X mit lichtbogengeschweißten Verbindungen etwa zehnmal geringer als die von DI-Rohren. Barenberg (1988) schlug eine auf PGV basierende Fragilitätsfunktion für erdverlegte CI-Rohrleitungen vor, die der Ausbreitung seismischer Wellen ausgesetzt sind, und stützte sich dabei auf gemeldete Schadensdaten aus drei US-Erdbeben. Diese Fragilitätsbeziehung wurde von Ballantyne *et al.* (1990) unter Verwendung von Rohrschadensdaten aus drei weiteren US-Erdbeben, ausgedrückt als MMI, weiter ausgebaut.

Unter Einbeziehung weiterer Daten aus einem weiteren US-amerikanischen und zwei mexikanischen Erdbeben schlugen O'Rourke und Ayala (1993) eine PGV-basierte Fragilitätsbeziehung für gängige segmentierte Wasserrohrmaterialien wie Gusseisen, Betonrohre, Spannbetonrohre und Asbestzementrohre vor. Die vorgeschlagene Fragilitätsbeziehung wurde in die nationale Schadensabschätzungsmethodik in den USA, HAZUS (FEMA, 1999), für die Bewertung der seismischen Anfälligkeit von Rohrleitungen unter seismisch bedingten instationären Bodenverformungen aufgenommen. Für duktile Rohrleitungen (Stahl, DI und PVC) wird die ursprüngliche Fragilitätsbeziehung, basierend auf Daten von spröden Rohren, mit 0,3 multipliziert. Das HAZUS-Handbuch berücksichtigt zwei Schadenszustände von Rohrleitungen, nämlich Lecks und Brüche, wobei davon ausgegangen wird, dass Schäden durch seismische Wellen zu 80 % aus Leckagen und zu 20 % aus Brüchen bestehen, während Schäden durch permanente Bodenverformungen zu 20 % aus Leckagen und zu 80 % aus Brüchen bestehen. Diese Methode berücksichtigt jedoch nicht die Auswirkungen des Rohrdurchmessers auf seine seismische Anfälligkeit.

Eidinger *et al.* (1995) und Eidinger (1998) analysierten die Daten über Rohrleitungsschäden unter Berücksichtigung der Datenpunkte des Loma-Prieta-Erdbebens von 1989 neu und schlugen eine Reihe von Fragilitätsbeziehungen in Form von PGV vor, die wichtigen Faktoren wie Rohrlitungsdurchmesser, Material, Verbindungsart, Beschichtungsbodenkorrosivität, Graben-Verfüllungsbedingungen und das Datum der Installation berücksichtigen. Die Autoren geben einen Modifikationsfaktor K_1 an, um verschiedene Kombinationen von Rohrmaterial, Verbindungsart und Bodenbedingungen zu berücksichtigen. T. D. O'Rourke *et al.* (1998) setzten eine GIS-basierte Methodik ein, um die Faktoren zu untersuchen, die die seismische Leistungsfähigkeit des Wasserversorgungssystems von Los Angeles beeinflussen und berücksichtigten dabei die gemeldeten Schäden, die durch das Northridge-Erdbeben von 1994 verursacht wurden. Die Autoren bewerteten die Rohrleitungsschäden, ausgedrückt als Reparaturen pro Längeneinheit, anhand von sieben seismischen Parametern: MMI, PGA, PGV, PGD, AI, SA und SI. Sie kamen zu dem Schluss, dass PGV am besten mit den Rohrleitungsschäden korreliert im Vergleich zu den anderen untersuchten Parametern. Darüber hinaus wurden Konturen für die Reparaturrate von Rohrleitungen für CI-Rohre berechnet, die etwa 76 % des Verteilungsnetzes ausmachen.

Die Konturen für die Reparaturrate wurden entwickelt, indem das Northridge-Gebiet in ein Raster von 2 x 2 km großen Quadraten eingeteilt und die Länge der CI-Rohre sowie die Anzahl der CI-Rohrreparaturen in jedem Quadrat bestimmt wurde. Anschließend schlugen O'Rourke und Jeon (1999) eine neue Fragilitätsrelation für die skalierte Geschwindigkeit vor, die auf der durch den Rohrdurchmesser normalisierten PGV basiert und eine bessere Korrelation mit der Reparaturrate der Rohrleitungen zeigt als der nicht skalierte Parameter. Isoyama *et al.* (2000) berechneten Fragilitätsbeziehungen in Form von PGA und PGV durch die Analyse von Rohrleitungsschäden, die durch das Hyogoken-Nanbu-Erdbeben 1995 verursacht wurden. Es wurde eine multivariate Analyse durchgeführt, um empirische Korrekturfaktoren zu ermitteln, die Rohrmaterial, Rohrdurchmesser, Bodentopographie und Verflüssigung auf die seismische Fragilitätsbeziehung berücksichtigen.

Im Jahr 2001 veröffentlichte die American Lifeline Alliance (ALA) eine Reihe von detaillierten Verfahren zur Bewertung der Wahrscheinlichkeit von Schäden durch Erdbeben für verschiedene Komponenten von Wasserversorgungssystemen (ALA, 2001). Für erdverlegte Rohrleitungen wurden die PGV-basierten Fragilitätsbeziehungen anhand von 81 Datenpunkten aus 12 Erdbeben bewertet, wobei die Auswirkungen der instationären und der permanenten Bodenverformungseffekte getrennt berücksichtigt wurden. Ähnlich wie die Fragilitätsrelationen von Eidinger *et al.* (1995) und Eidinger (1998) liefert die ALA-Formulierung Modifikationsfaktoren für die Fragilitätskurve, um das Rohrmaterial, den Verbindungstyp und die Bodenkorrosivität zu berücksichtigen.

Pineda-Porras und Ordaz (2003) entwickelten PGV-basierte Fragilitätsfunktionen für CI- und AC-Wasserleitungen basierend auf den gemeldeten Schäden am Wasserversorgungssystem von Mexiko-Stadt während des Erdbebens von 1985. Anschließend analysierten Pineda und Ordaz (2007) erneut das seismische Verhalten des spröden Wasserversorgungssystems während des Michoacan-Erdbebens von 1985 und kamen zu dem Schluss, dass bei weichen Böden der Parameter PGV^2 / PGA besser mit den beobachteten Rohrleitungsschäden in Verbindung steht als nur PGV.

O'Rourke und Deyoe (2004) analysierten die Unterschiede zwischen den von M. J. O'Rourke und Ayala (1993) und T. D. O'Rourke und Jeon (1999) vorgeschlagenen Fragilitätsrelationen und identifizierten die kritischen Parameter, darunter den vorherrschenden seismischen Wellentyp, das Vorhandensein von Korrosion in einigen Rohren und die geringe statistische Zuverlässigkeit einiger Datenpunkte.

Unter der Annahme, dass Schäden an segmentierten Pipelines eine Funktion der Bodenverformung sind, entwickelten O'Rourke und Deyoe (2004) eine Fragilitätsrelation für Rohrleitungen in Bezug auf die Spitzenverformung des Bodens ϵ_g , wobei sowohl die Wellenausbreitung als auch die PGD-Datenpunkte auf demselben Diagramm berücksichtigt wurden. Zur Bewertung der durch die Wellenausbreitung verursachten Bodenverformung nahmen sie an, dass sich R-Wellen mit einer scheinbaren horizontalen Ausbreitungsgeschwindigkeit von 500 m/s innerhalb eines epizentralen Abstands von der fünffachen Schwerpunkttiefe ausbreiten, und darüber hinaus S-Wellen mit einer scheinbaren Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3000 m/s. Anschließend verwendet O'Rourke (2009) eine scheinbare Wellengeschwindigkeit von 1000 m/s für S-Wellen unter Berücksichtigung der Studie von Paolucci und Smerzini (2008). O'Rourke *et al.* (2014) verwendeten eine GIS-basierte Methode, um die Leistung des Gas-, Wasser- und Abwassernetzes während der Canterbury-Erdbebensequenz 2011 in Christchurch, Neuseeland, zu untersuchen. In den Gebieten, die nicht von Verflüssigung betroffen waren, wurden die Fragilitätsfunktionen der Rohrleitungen anhand der PGV bewertet, die als geometrischer Mittelwert der maximalen Bodengeschwindigkeit der beiden orthogonalen Aufzeichnungen definiert ist.

Für Gebiete, die von Verflüssigung betroffen waren, wurden die Reparaturraten im Verhältnis zu den differentiellen Bewegungen der Bodenoberfläche und der lateralen Dehnung der Bodenoberfläche unter Verwendung von LiDAR-Daten bewertet, die vor und nach jedem seismischen Hauptereignis erfasst wurden.

O'Rourke *et al.* (2015) entwickelten überarbeitete Bodenverformungsbeziehungen unter Berücksichtigung von vier zusätzlichen PGD-Datenpunkten aus dem Izmit-Erdbeben 1999 in der Türkei und unter Verwendung einer überarbeiteten S-Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit aus Paolucci und Smerzini (2008) und Zerva und Harda (1997).

Tabelle A 4: Übersicht über die empirischen Fragilitätsfunktionen für erdverlegte Rohrleitungen, die seismischen Bodenverformungen ausgesetzt sind

Referenz	Merkmale des Rohrleitungs-Boden-Systems	Intensity Measure	Anzahl der Erdbeben
Katayama <i>et al.</i> , 1975	hauptsächlich CI-Rohre (Wasser- und Gasverteilung) schlechte, durchschnittliche oder gute Bodenverhältnisse	PGA	6
Isoyama und Katayama, 1982	hauptsächlich CI-Rohre	PGA	
Eguchi, 1983, 1991	AC, CI (geschweißte Stahl-Gas-Schweißverbindungen, geschweißte Stahl-Lichtbogen-Schweißverbindungen, geschweißte Stahl-Dichtverbindungen)	MMI	4
Barenberg, 1988	hauptsächlich CI-Rohre	PGV	3
Ballantyne, 1990	-	MMI	6
O'Rourke und Ayala, 1993 NIBS, 2004	spröde segmentierte oder flexible durchgehende Rohrleitungen	PGV	6
Eidinger <i>et al.</i> , 1995 Eidinger, 1998	Materialart, Gelenktyp, Durchmesser oder Bodenart	PGV	7
O'Rourke <i>et al.</i> , 1998	hauptsächlich CI-Rohre	MMI, PGA, PGV, PGD, AI, SA, SI	1
O'Rourke und Jeon, 1999	hauptsächlich CI-Rohre und Durchmesser	PGV	1
Isoyama <i>et al.</i> , 2000	DI, CI, PVC, AC, Stahl	PGA, PGV	1
ALA, 2001	Material, Gelenktyp, Bodenart -durchmesser	PGV	12
Pineda und Ordaz, 2003	CI, AC	PGV	1
O'Rourke und Deyoe, 2004	hauptsächlich CI-Rohre	g	5
Pineda und Ordaz, 2007	CI, AC	PGV ² / PGA	1
O'Rourke, 2009	segmentierte Rohre	g	5
O'Rourke <i>et al.</i> , 2014	AC, CI, PVC, MPVC, UPVC, EW, RCRR, CONC, HDPE, MDPE	g	1
O'Rourke <i>et al.</i> , 2015	segmentierte Rohre	g	6

Lanzano *et al.* (2013) stellten empirische Fragilitätskurven für die Schwachstellenbewertung von kontinuierlichen stahlgeschweißten Erdgasleitungen vor, die seismisch bedingten Bodenverformungen ausgesetzt sind, und berechneten Wahrscheinlichkeiten für die Überschreitung bestimmter Leistungsniveaus bei einer bestimmten seismischen Intensität. Die Autoren schlugen drei Stufen struktureller Schadenszustände (DS) von Pipelines vor (DS0: leichte Schäden, DS1: erhebliche Schäden, DS2: schwere Schäden), die mit entsprechenden Indikatoren für Risikostufen (RS) verbunden sind (RS0: keine Verluste - keine Gefahr, RS1: begrenzte Verluste - geringe Gefahr, RS2: nicht vernachlässigbare Verluste - hohe Gefahr). Schließlich wurden PGV-basierte Fragilitätsrelationen bestimmt, die die gemeldeten seismischen Schadensdaten von durchgehenden Stahlrohrleitungen durch eine kumulative Lognormalverteilungsfunktion anpassten, die durch den Median μ und den Formparameter σ der bestangepassten Verteilung definiert ist, wie in Gleichung 4 angegeben. Die Liste der Erkundungsberichte nach dem Erdbeben, die zur Entwicklung der Fragilitätsfunktionen verwendet wurden, wurde in Lanzano *et al.* (2014, 2015) ausführlich dargestellt.

$$P(DS \geq DS_i \text{ or } RS \geq RS_i) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln IM - \ln \mu}{\beta \sqrt{2}} \right) \right] \quad (4)$$

14.2.2 Vorhandene Instrumente zur Analyse von Wassernetzen

In den letzten zwanzig Jahren wurden mehrere Instrumente zur Bewertung seismischer Schäden an Pipelinenetzen entwickelt, wie aus Tabelle A 5 hervorgeht.

Tabelle A 5: Instrumente zur Analyse von Wassernetzwerken (Mazumder *et al.*, 2020)

Name	Beschreibung	Hauptmerkmale	Referenzen
HAZUS-MH	Das GIS-basierte Tool schätzt die Schäden an Infrastrukturen in Bezug auf soziale und wirtschaftliche Werte.	Nützlich für die Ermittlung der unmittelbaren Folgenabschätzung. Schätzt nicht die Systemleistung.	FEMA (2012)
WNTR	Ein auf Python basierendes Tool, das zur Durchführung von hydraulischen Simulationen, seismischen Schäden und Belastbarkeitsanalysen von Wassernetzen entwickelt wurde.	Ein umfassendes Werkzeug, das von der USEPA und den Sandia National Laboratories entwickelt wurde. WNTR ist ein EPANET-orientiertes Python-Tool, mit dem druckgesteuerte hydraulische Simulationen von WDS unter Störungsszenarien durchgeführt werden können. Dieses Tool führt keine Simulationen durch, um verschiedene Sanierungsstrategien für beschädigte Netze zu vergleichen und zu analysieren.	Klise <i>et al.</i> (2017)
MAEviz	Vom Mid-America Earthquake Center entwickeltes Open-Source-Tool zur Bewertung des Erdbebenrisikos von Infrastrukturen.	Führt eine Bewertung der seismischen Auswirkungen durch, beinhaltet jedoch keine Sanierungsmaßnahmen oder Simulation der Systemleistung.	Navarro <i>et al.</i> (2008)

Tabelle A 5 (Fortsetzung)

Name	Beschreibung	Hauptmerkmale	Referenzen
INCORE Version 1.0	INCORE Version 1.0	Open-Source-Multihazard-Bewertungs-, Reaktions- und Planungstool für die risikobasierte Resilienzplanung von Gemeinden. Dieses Tool wurde auf der Grundlage von ERGO (früher bekannt als MAEviz) entwickelt.	Gardoni <i>et al.</i> (2018)
GIRAFFE	Hydraulisches Netzmodell zur Erdbebensimulation des Wasserversorgungssystems.	Die Annahme einer reibungslosen hydraulischen Funktionalität im Katastrophenszenario kann zu einem unrealistischen hydraulischen Zustand führen.	Shi <i>et al.</i> (2006)
REVAS.NET	Abschätzung der Systemzuverlässigkeit gegenüber seismischen Schäden, um den detaillierten Wiederherstellungsprozess nach einem Erdbeben zu simulieren.	Dieses Modell quantifiziert die Faktoren, die sich auf die seismische Leistung auswirken, basierend auf Ito <i>et al.</i> (2000), die den Korrekturfaktor für Korrosion nicht berücksichtigten.	Yoo <i>et al.</i> (2015)
SeismoPi	Ein auf Python basierendes Open-Source-Tool, das eine szenariobasierte Analyse seismischer Schäden durchführt, die kritischen Komponenten identifiziert und die Kosten für die Erneuerung eines erdverlegten Pipelinenetzes schätzt.	Dieses Tool quantifiziert die wahrscheinlichen seismischen Schäden an erdverlegten Rohrleitungen unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Korrosionsschäden an den Rohrleitungswänden und schätzt die späteren Kosten für die Erneuerung von WDS. Die Struktur der Eingabedaten ist sehr einfach und leicht zu erstellen. Als Eingabedateien werden kommagetrennte Wertedateien verwendet, die die Merkmale der Netzkomponenten enthalten. Der Benutzer muss keine hydraulische Analyse durchführen und identifiziert das kritische Segment des Rohrleitungsnetzes mit Hilfe der komplexen Netztheorie (z. B. Bild A 1).	Mazumder <i>et al.</i> (2020)

Einige dieser Instrumente weisen jedoch eine Reihe von Einschränkungen auf, darunter die Unfähigkeit, kritische Segmente der komplexen Systeme zu identifizieren, die Auswirkung von Korrosion auf das seismische Verhalten nicht explizit zu quantifizieren, während sie gleichzeitig rechenintensiv sind.

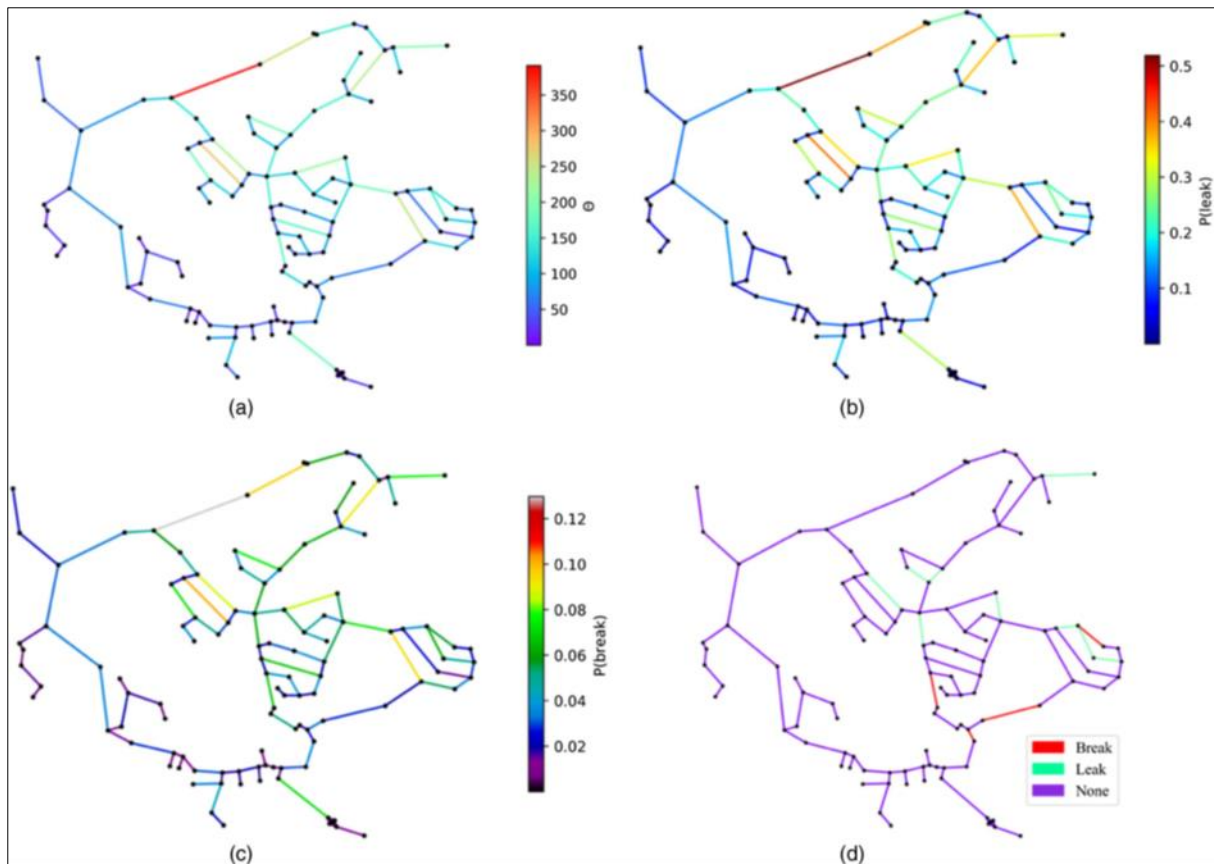


Bild A 1: Anschauliches Beispiel für die bewertete (a) Kontrollintensität $\Theta=C\text{-PGV-L}$; (b) Leckwahrscheinlichkeit; (c) Bruchwahrscheinlichkeit; und (d) Schadenszustände für das in Mazumder *et al.* (2020) beschriebene Wasserverteilungssystem

14.2.3 Analytische Verletzbarkeitsfunktionen für unterirdische Rohrleitungen

Das Problem der Bewertung der Leistungsfähigkeit eines erdverlegten Rohrleitungssystems bei seismisch bedingten Bodenverformungen wurde in den letzten 60 Jahren in zahlreichen Forschungsarbeiten mit Hilfe einfacher analytischer oder komplexerer numerischer Verfahren untersucht. Diese Verfahren ermöglichen die Bewertung der strukturellen Reaktion von Rohrleitungen in Form von Dehnungen, Spannungen und Verformungen der Verbindungen.

Tabelle A 6 fasst die wichtigsten analytischen Ansätze zur Bewertung des seismischen Verhaltens von kontinuierlichen und segmentierten Rohrleitungen zusammen, die seismischer Wellenausbreitung und permanenten Bodenbewegungen ausgesetzt sind, die entweder abrupt (z. B. Verwerfungen) oder verteilt (z. B. Erdbeben, seitliche Ausbreitung aufgrund von Verflüssigung) in Längs- und Querrichtung auftreten.

Tabelle A 6: Überblick über die wichtigsten Analyseverfahren zur Bewertung der seismischen Leistungsfähigkeit

Bodenbewegung	Rohrleitungstyp	Analytischer Ansatz	Wellenart	
			S-Welle	R-Welle
TGD	Kontinuierlich	Newmark, 1967	x	
		Shinozuka und Koike, 1979	x	
		M. J. O'Rourke und El Hmadi 1988	x	x
	Segmentiert	Wang, 1994	x	x
		O'Rourke, und Vargas-Londono, 2016; 2018	x	x
		O'Rourke und Liu, 2012	x	x
PGD	Kontinuierlich	Newmark, 1975	Störung	
		Kennedy, 1979		
		O'Rourke, und Nordberg, 1992	Längsrichtung	
		O'Rourke, und Nordberg, 1991	Querrichtung	
	Segmentiert	T. D. O'Rourke und Trautmann, 1981	Störung	
		O'Rourke, M. und Nordberg, G. 1991	Längs- und Querrichtung	
		O'Rourke, und Vargas-Londono, 2016; 2018	Längsrichtung	

14.2.3.1 Segmentierte Rohrleitungen

Die meisten der Datenpunkte, die die empirischen Fragilitätsbeziehungen bestimmen, basieren auf beobachteten Schäden an C.I.-Rohrleitungen mit einem Durchmesser von 6 Zoll und Bleidichtungsfugen nach dem Northridge-Erdbeben von 1994. O'Rourke und Vargas-Londono (2016) haben die Ergebnisse eines analytischen Modells vorgestellt, die in bemerkenswerter Weise mit den berichteten Schäden an C.I.-Rohren mit kleinem Durchmesser übereinstimmen, die durch seismische Wellenausbreitung (Bodenverformung im Allgemeinen kleiner als 0,002) und PGD (Bodenverformung typischerweise größer als 0,002) verursacht wurden. Die resultierenden Beziehungen beruhen auf dem Gleichgewicht und der Kompatibilität der Rohrleitungssegmente in Längsrichtung, wie in Bild A 2 schematisch dargestellt. Die Autoren wiesen darauf hin, wie wichtig es ist, variable Verbindungseigenschaften zu berücksichtigen, da das Verhalten des mechanistischen Modells, bei dem alle Verbindungen „durchschnittliche“ Eigenschaften aufweisen (Bild A 3a), nicht mit den empirischen Beobachtungen übereinstimmt. Es ist offensichtlich, dass einige wenige Fugen mit der größten Reaktion (d. h. schwache, flexible Fugen) den Schaden kontrollieren, im Gegensatz zu den vielen Fugen mit durchschnittlicher Reaktion. Im Jahr 2018 verwendeten die Autoren das vorgeschlagene analytische Modell, um den Einfluss des Durchmessers auf das seismische Verhalten von Gusseisenrohren zu bestimmen, die das am häufigsten verwendete Rohrmaterial in den Vereinigten Staaten darstellen (Vargas-Londono, 2018). Ein analytischer Ansatz zur Bestimmung des Verhaltens von Rohren mit großem Durchmesser ist besonders nützlich, da statistisch valide Beobachtungen von Schäden an Übertragungsrohren wesentlich schwieriger zu erhalten sind als statistisch valide Beobachtungen von Rohrschäden im Verteilungsnetz. Bild A 4 veranschaulicht das vorgeschlagene Verfahren zur Bewertung der Rohrschadensrate für geringe Bodenbeanspruchung (Bild A 4a) und hohe Bodenbeanspruchung.

Nach dieser Methodik wurden die Fragilitätsbeziehungen für verschiedene Rohrleitungsdurchmesser bewertet, wie in Bild A 5 dargestellt. Die analytisch ermittelten Schadensraten für Rohre mit einem Durchmesser von 6 Zoll stimmen im Allgemeinen mit den bestehenden empirischen Fragilitätsbeziehungen überein, vermutlich weil Rohre mit kleinem Durchmesser typischerweise die am häufigsten verwendeten Rohrdurchmesser sind.

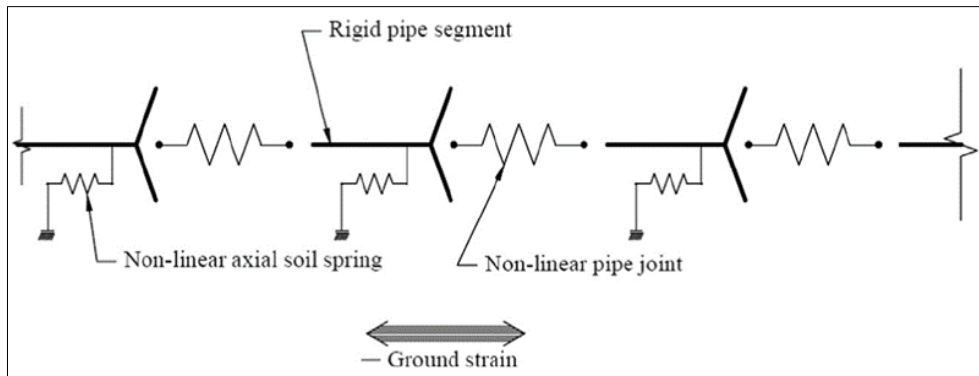


Bild A 2: Mechanisches Modell für segmentierte Rohre, die einer axialen Bodenbelastung ausgesetzt sind

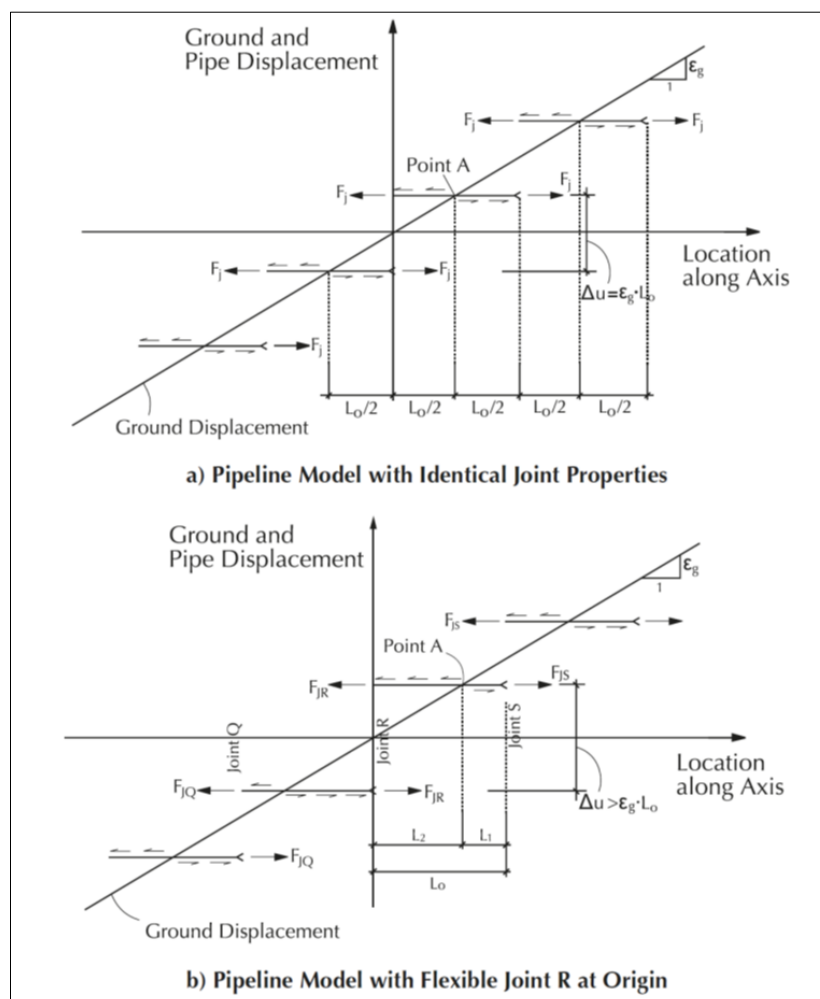


Bild A 3: Von O'Rourke und Vargas-Londono (2016) vorgeschlagenes Modell mit starren Rohrsegmenten, die einer gleichmäßigen Bodenbelastung ausgesetzt sind: a) Rohrleitungsmodell mit identischen Verbindungseigenschaften; b) Rohrleitungsmodell mit flexibler Verbindung am Ursprung

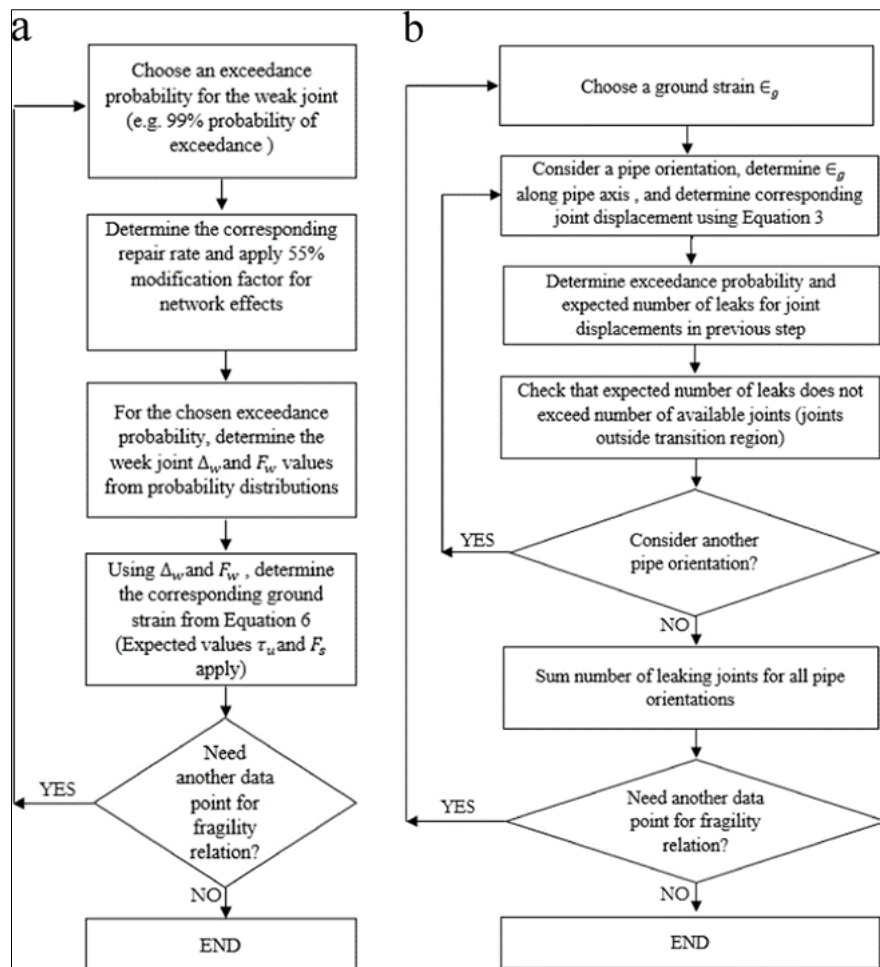


Bild A 4: a) Ablaufdiagramm für geringe Bodenbelastung. b) Ablaufdiagramm für hohe Bodenbelastung (O'Rourke und Vargis-Londono, 2018)

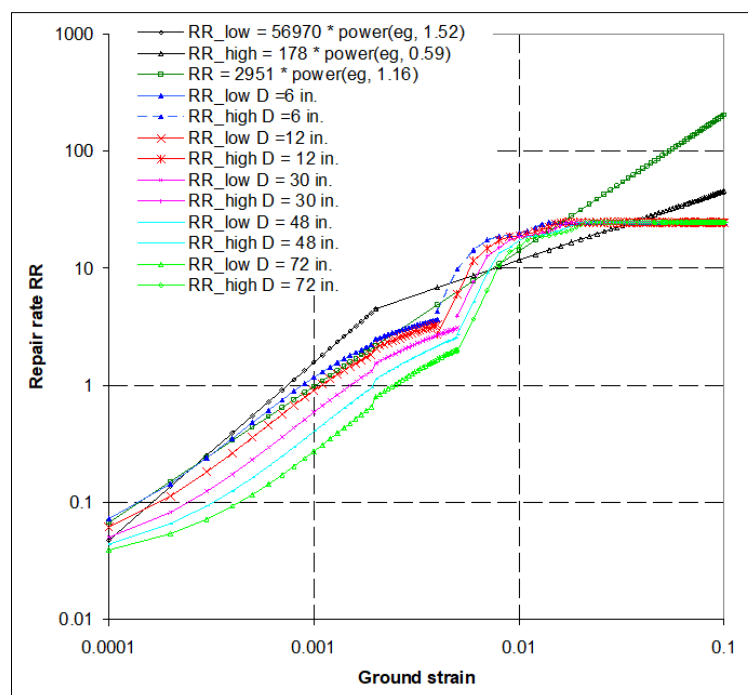


Bild A 5: Vergleich zwischen empirischen und analytischen Fragilitätsbeziehungen für verschiedene CI-Rohrdurchmesser

14.2.3.2 Kontinuierliche Rohrleitungen

Der folgende Abschnitt beschreibt die bestehenden analytischen Verfahren zur Bewertung des seismischen Verhaltens von durchgehenden Rohrleitungen, wie in Banushi (2017) berichtet.

14.2.3.2.1 Transiente Bodenverformung (TGD)

Die transiente Bodenverformung (TGD) resultiert aus der Ausbreitung seismischer Wellen, die im Allgemeinen Körperwellen und Oberflächenwellen umfassen. Körperwellen werden durch seismische Verwerfungen erzeugt und breiten sich durch die Erde aus, während Oberflächenwellen im einfachsten Fall durch die Reflexion und Brechung von Körperwellen an der Bodenoberfläche erzeugt werden.

Zu den Körperwellen gehören die Kompressionswellen (P-Wellen) und die Scherwellen (S-Wellen). Die P-Wellen sind die schnellsten Körperwellen und erzeugen parallel zur Ausbreitungsrichtung abwechselnd Druck- und Zugspannungen im Boden. Die S-Wellen bringen die Materialteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zum Schwingen. Für Körperwellen werden nur die S-Wellen berücksichtigt, da sie mehr Energie transportieren und tendenziell größere Bodenbewegungen erzeugen als P-Wellen.

Die Situation der Oberflächenwellen ist komplexer. Rayleigh- und Love-Wellen sind zwei Haupttypen von Oberflächenwellen, die durch Erdbeben erzeugt werden. Die Love-Wellen (L-Wellen) bewirken eine horizontale Bewegung des Bodens entlang einer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufenden, horizontalen Linie. Die Rayleigh-Wellen (R-Wellen) verursachen Bodenpartikel zu einer elliptischen Bahn in der vertikalen Ebene entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle zu schwingen. Es ist zu beachten, dass die R-Wellen, wenn sie vorhanden sind, nach dem Eintreffen der Körperwellen auftreten. Für Oberflächenwellen werden nur R-Wellen berücksichtigt, da sie eine axiale Dehnung in der Rohrleitung verursachen, die deutlich höher ist als die durch L-Wellen verursachte Biegedehnung (O'Rourke und Liu, 2012; IITK-GSDMA, 2007).

Da die Rohrleitungen in der Regel horizontal in geringer Tiefe (1-3 m) unter der Bodenoberfläche verlegt werden, ist es wichtig, die scheinbare Ausbreitungsgeschwindigkeit von Körper- und Oberflächenwellen zu bewerten. Da sich die Körperwellen im Vergleich zu den Oberflächenwellen mit der Entfernung schneller abschwächen, wird in den Bemessungsnormen die Geschwindigkeit der S-Wellen für Standorte mit einer epizentralen Entfernung von 5-mal der Schwerpunkttiefe berücksichtigt, während die Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle (R-Welle) für Standorte mit einer epizentralen Entfernung von mehr als 5-mal der Schwerpunkttiefe berücksichtigt wird, wie in Bild A 6 schematisch dargestellt.

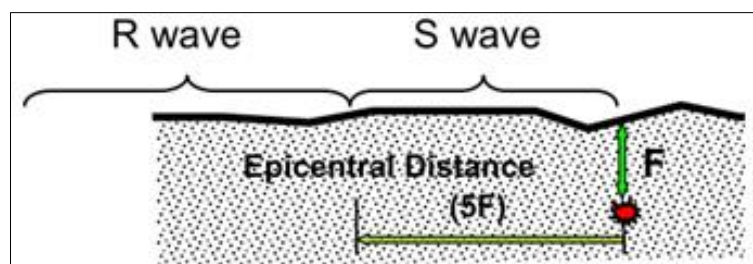


Bild A 6: Berücksichtigung von S-Welle und R-Welle bei der Rohrleitungsplanung (IITK-GSDMA, 2007)

Wenn das Rohr in Bezug auf den umgebenden Boden ausreichend flexibel ist, interagiert es nicht signifikant mit dem Boden und erfährt daher die gleichen Verformungen, die nach dem Newmark-Modell in Längs- und Querrichtung auftreten (Newmark, 1967; CEN, 2006). Um die Bodenverformung und -krümmung abzuschätzen, entwickelte Newmark ein vereinfachtes Verfahren, das auf einer sinusförmigen Welle basiert, die sich mit einer scheinbaren Geschwindigkeit C_{apparent} in x-Richtung ausbreitet:

$$U_g(x, t) = D_{\text{max}} \sin \omega \left(t - \frac{x}{C_{\text{apparent}}} \right) \quad (5)$$

wobei D_{max} die maximale Bodenverschiebung und ω die Frequenz der Schwingung ist. Daher ist die Bodendehnung, die die Ableitung der Längsverschiebung in Bezug auf die Entfernung ist, gegeben durch:

$$\varepsilon_g(x, t) = \frac{\partial U_g}{\partial x} = -\frac{\omega D_{\text{max}}}{C_{\text{apparent}}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{C_{\text{apparent}}} \right) \quad (6)$$

deren Maximalwert ist:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{V_{\text{max}}}{C_{\text{apparent}}} \quad (7)$$

wobei $V_{\text{max}} = D_{\text{max}}$ die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Auslegungswelle darstellt, die wie folgt berechnet werden kann:

$$V_{\text{max}} = PGV \times I_p \quad (8)$$

wobei PGV die am Standort erwartete maximale Bodengeschwindigkeit und I_p der Wichtigkeitsfaktor auf der Grundlage der Rohrleitungsklasse und der seismischen Gefährdung ist, wie in Tabelle A 7 angegeben:

Tabelle A 7: Wichtigkeitsfaktor für verschiedene Klassen von Rohrleitung I_p (Calvi und Nascimbene, 2011)

Klasse der Rohrleitung	Wellenausbreitung	Störung	Erdrutsch
I	0,8	0,8	0,8
II	1,0	1,0	1,0
III	1,2÷1,25	1,2÷1,5	1,2÷1,35
IV	1,5÷1,6	2,3	1,5÷1,6

wo,

Klasse I bezieht sich auf Situationen, in denen das Risiko für Menschenleben gering ist und die wirtschaftlichen und sozialen Folgen eines Versagens gering oder vernachlässigbar sind;

Klasse II bezieht sich auf Situationen mit mittlerem Risiko für Menschenleben und lokalen wirtschaftlichen oder sozialen Folgen eines Versagens;

Klasse III bezieht sich auf Situationen mit hoher Lebensgefahr und großen wirtschaftlichen und sozialen Folgen eines Scheiterns;

Klasse IV bezieht sich auf Situationen mit außergewöhnlicher Lebensgefahr und extremen wirtschaftlichen und sozialen Folgen eines Scheiterns.

In ähnlicher Weise ist die Bodenkrümmung, die die zweite Ableitung der Längsverschiebung in Bezug auf die Entfernung ist, gegeben durch:

$$\chi_g(x,t) = \frac{\partial^2 U_g}{\partial x^2} = -\frac{\omega^2 D_{\max}}{C_{\text{apparent}}^2} \sin \omega \left(t - \frac{x}{C_{\text{apparent}}} \right) \quad (9)$$

deren Höchstwert ist:

$$\chi_{\max} = \frac{A_{\max}}{C_{\text{apparent}}^2} \quad (10)$$

wobei $A_{\max} = \omega^2 D_{\max}$ die maximale Bodenbeschleunigung senkrecht zur Richtung der Wellenausbreitung ist.

Da die Biegedehnung in einem Rohr aufgrund der Wellenausbreitung in der Regel ein Effekt zweiter Ordnung ist, werden nur die axialen Längsdehnungen berücksichtigt, um die Integrität der Rohrleitung gegenüber seismischer Wellenausbreitung zu bewerten.

Aus den Ausdrücken (7) und (10) geht hervor, dass die scheinbare Wellenausbreitungsgeschwindigkeit für die Berechnung der durch seismische Wellen verursachten Dehnung im Rohr ausschlaggebend ist. Die scheinbare Wellengeschwindigkeit ist definiert als die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit in Bezug auf die Bodenoberfläche, wie in Bild A 7 dargestellt.

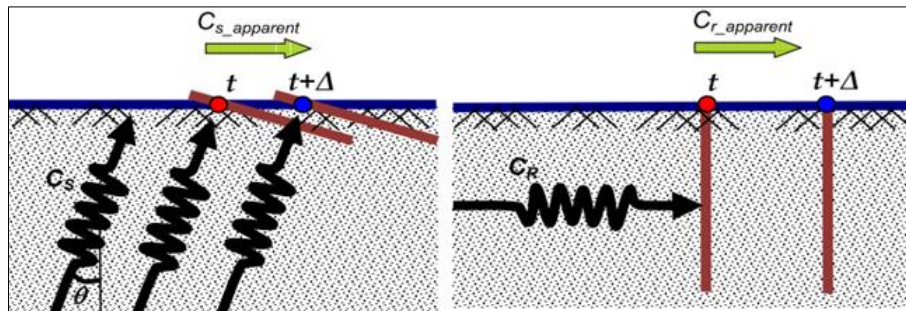


Bild A 7: Schematische Darstellung der scheinbaren seismischen Wellenausbreitung von a) S-Welle und b) R-Welle (IITK-GSDMA, 2007)

Die scheinbare Wellenausbreitungsgeschwindigkeit für die S-Wellen wird wie folgt berechnet:

$$C_{s_apparent} = \frac{C_s}{\sin \theta} \quad (11)$$

wobei C_s die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der S-Welle und θ der Einfallswinkel der S-Welle ist. Wenn in der horizontalen Ebene ein Winkel γ zwischen der Rohrachse und der Wellenausbreitungsrichtung besteht, ist die Komponente der Bodenbewegung parallel zur Rohrachse:

$$C_{s_apparent} = \frac{C_s}{\sin \theta \cos \gamma} \quad (12)$$

Außerdem wird festgestellt, dass die Bodenbelastung bei $\theta = \gamma = 45^\circ$ am höchsten ist:

$$\varepsilon_{\max,s} = \frac{V_{\max}}{2C_s} \quad (13)$$

Für die R-Wellen verläuft die horizontale Komponente der Bodenbewegung parallel zum Ausbreitungsweg und erzeugt daher in einem parallel zur Wellenausbreitungsrichtung verlegten Rohr eine axiale Dehnung, deren Maximalwert gegeben ist durch:

$$\varepsilon_{\max,r} = \frac{V_{\max}}{C_r} \quad (14)$$

wobei C_r die Phasengeschwindigkeit der R-Welle ist.

Da sich die R-Wellen immer parallel zur Bodenoberfläche ausbreiten, ist die scheinbare Ausbreitungsgeschwindigkeit $C_{r_apparent}$ gleich der Phasengeschwindigkeit C_r , die eine Funktion der Variation der Scherwellengeschwindigkeit mit der Tiefe ist und im Gegensatz zu den Körperwellen auch eine Funktion der Frequenz:

$$C_{r_apparent} = \lambda f \quad (15)$$

Zur Bestimmung der relativen Dehnung/Verschiebung zwischen zwei Stationen, die sich entlang der Pipeline befinden und durch einen Abstand L_s voneinander getrennt sind, schlägt M. O'Rourke vor, eine Wellenlänge zu berücksichtigen, die dem Vierfachen ihres Abstandes entspricht. Stattdessen nehmen viele aktuelle Bemessungsvorschriften mangels detaillierter Informationen $\lambda = 1,0$ km an (IITK-GSDMA, 2007; ALA, 2001).

Die Berechnung der R-Wellen-Phasengeschwindigkeit ist kompliziert und ein von M. O'Rourke vorgeschlagenes vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungskurve für geschichtete Bodenprofile wird allgemein verwendet (O'Rourke und Liu, 2012; IITK-GSDMA, 2007). Die normalisierte Ausbreitungskurve für eine gleichmäßige Schicht der Dicke H_s , mit der Scherwellengeschwindigkeit C_L und der Poissonzahl ν_L , über einen halben Raum mit der Scherwellengeschwindigkeit C_H und der Poissonzahl ν_H ist in Bild A 8 dargestellt.

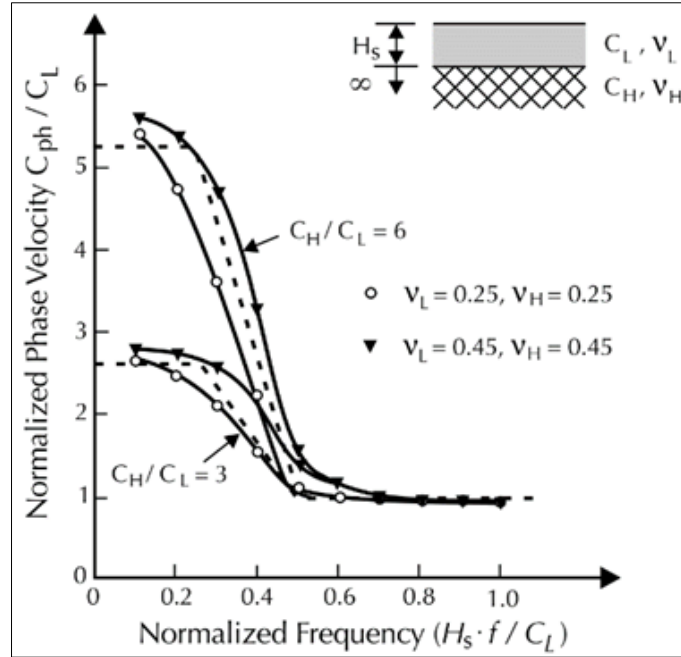


Bild A 8: Normalisierte Ausbreitungskurve für eine einzelne Schicht über einen halben Raum (Chen und Scawthorn, 2002)

Es wird beobachtet, dass bei niedrigen Frequenzen ($H_s f / C_L \leq 0,25$) die Wellenlänge im Vergleich zur Schichtdicke groß ist und die Phasengeschwindigkeit etwas geringer ist als die Scherwellengeschwindigkeit des steiferen Halbraums. Umgekehrt ist bei hohen Frequenzen ($H_s f / C_L > 0,5$) die Wellenlänge vergleichbar oder kleiner als die Schichtdicke, und die Phasengeschwindigkeit ist etwas geringer als die Scherwellengeschwindigkeit der Schicht. Die gestrichelten Linien in Bild A 8 stellen die angenäherte Beziehung (16) der Dispersionskurve für eine beliebige Einzelschicht über einen halben Raum dar:

$$C_{r_apparent} = \begin{cases} 0.875C_H, & \frac{H_s f}{C_L} \leq 0.25 \\ 0.875C_H - \frac{0.875C_H - C_L}{0.25} \left(\frac{H_s f}{C_L} - 0.25 \right), & 0.25 \leq \frac{H_s f}{C_L} \leq 0.50 \\ C_L, & \frac{H_s f}{C_L} \geq 0.50 \end{cases} \quad (16)$$

Diese Technik kann auf mehrere Bodenschichten ausgeweitet werden, wie in O'Rourke und Liu, 2012, ausführlich beschrieben.

Nach dem Newmark-Modell wurde angenommen, dass an der Rohr-Boden-Grenzfläche keine relative Verschiebung auftritt und daher wurde die Rohrdehnung als gleich der Bodendehnung angesehen. Bei großen Bodenbewegungen kommt es jedoch in der Regel zu einem Rutschen an der Rohr-Boden-Grenzfläche, was zu einer Rohrdehnung führt, die etwas geringer ist als die Bodendehnung.

Wie in Bild A 9 schematisch dargestellt, ergibt sich unter der Annahme einer gleichmäßigen Reibungskraft pro Längeneinheit t_u an der Rohr-Boden-Grenzfläche die maximale Dehnung, die durch Reibung in die Rohrleitung induziert wird, wie folgt:

$$\varepsilon_a = \frac{t_u \lambda}{4AE} \quad (17)$$

wobei A die Querschnittsfläche des Rohrs, E der Elastizitätsmodul des Rohrmaterials und λ die scheinbare Wellenlänge der seismischen Wellen an der Bodenoberfläche ist.

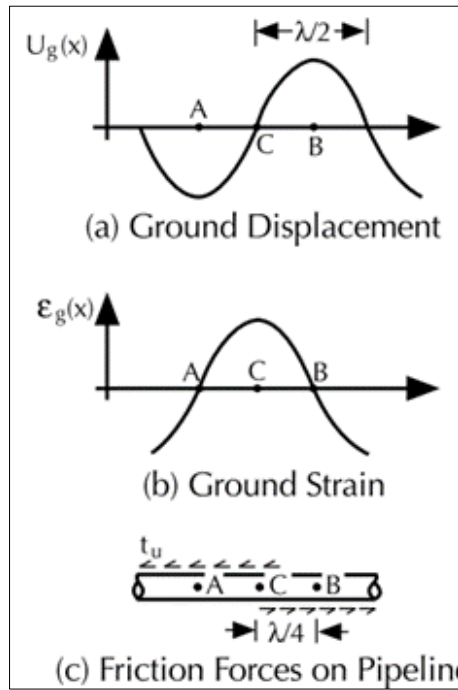


Bild A 9: Reibungsdehnungsmodell für Wellenausbreitungseffekte auf erdverlegte Rohrleitungen (Chen und Scawthorn, 2002)

Daher sollten die durch S- und R-Wellen induzierten axialen Verformungen $\varepsilon_{max,s}$ bzw. $\varepsilon_{max,r}$ die durch Reibung induzierte maximale Dehnung ε_a in der Rohrleitung nicht überschreiten (13). Für den Fall von R-Wellen, die typischerweise größere Bodendehnungen erzeugen, wenn sie in einem Bodenbewegungsprotokoll vorhanden sind, haben einige moderne Bemessungscodes (IITK-GSDMA, 2007; ALA, 2001) kürzlich empfohlen, $C_{ph} = 500$ m/s und $\lambda = 1,0$ km in den Gleichungen (10) bzw. (13) zu verwenden.

Es wird davon ausgegangen, dass das örtliche Knicken in einem Stahlrohr auftritt, wenn die Dehnung dem folgenden Ausdruck entspricht:

$$\varepsilon_{cr} = 0.175 \frac{t}{R} \quad (18)$$

wobei t die Rohrwandstärke und R der Rohrradius ist (Calvi und Nascimbene, 2011; IITK-GSDMA, 2007; ALA, 2005).

Außerdem beträgt die maximale Bodenverformung, die durch die Ausbreitung seismischer Wellen verursacht wird, etwa 0,4 % für eine Bodenschicht mit einer natürlichen Periode von 0,7, wie in der japanischen Konstruktionsnorm (Japan Gas Association, 2000) angegeben. Wenn die Bodendehnung die in (18) angegebene Dehnungsgrenze überschreitet, knickt das Stahlrohr lokal ein. In diesem Fall sollte die Reibung zwischen dem Rohr und dem umgebenden Boden minimiert werden, z. B. durch eine geeignete Rohrbeschichtung- oder ummantelung.

Polyethylenumhüllungen werden üblicherweise als Korrosionsschutz verwendet, der auch zur Verringerung der Reibung zwischen Rohr und Boden beiträgt (IITK-GSDMA, 2007). Eine weitere Methode zur Verringerung der Wechselwirkung zwischen Boden und Rohrleitung ist die Verwendung einer leichten Verfüllung (d. h. expandiertes Polystyrol) anstelle einer dichten Verfüllung (Barbas und Weir, 2007).

14.2.3.2.2 Permanente Bodenverformung (PGD)

14.2.3.2.2.1 PGD aufgrund von Erdrutschen und verflüssigungsbedingter seitlicher Ausbreitung

Die Rohrleitung kann die PGD-Zone in jeder beliebigen Richtung durchqueren, jedoch wird das Verhalten der Rohrleitung aufgrund von PGD typischerweise für zwei kritische Bedingungen untersucht, nämlich für die parallele und die senkrechte Durchquerung, wie in Bild A 10 dargestellt.

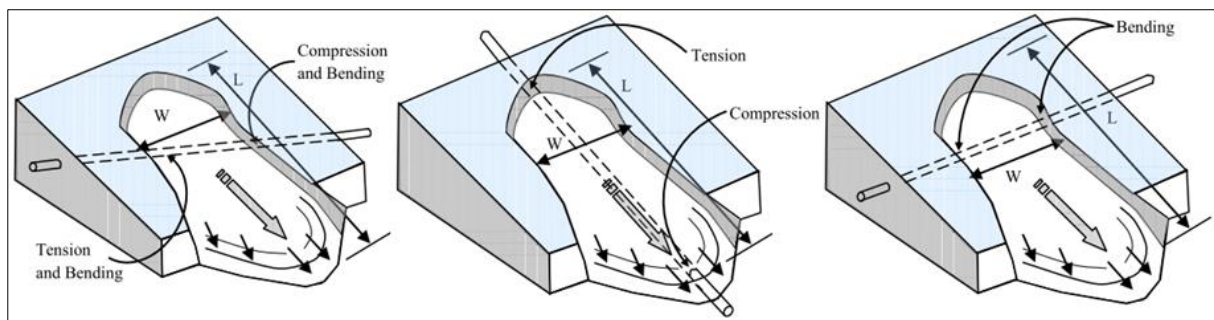


Bild A 10: Permanente Bodenverformung: a) schräge Kreuzung, b) Längskreuzung, c) senkrechte Kreuzung (IITK-GSDMA, 2007)

Wenn die Rohrleitung einer Bodenverschiebung parallel zu ihrer Rohrachse ausgesetzt ist, ergibt sich die geplante Bodenverschiebung in Längsrichtung wie folgt:

$$\delta_L^d = \delta_L I_p \quad (19)$$

wobei I_p den Wichtigkeitsfaktor auf der Grundlage der Rohrleitungsklassen darstellt, wie in Tabelle A 7 angegeben, während die räumliche Ausdehnung der PGD-Zone durch die Länge L , die Breite W und die maximale Bodenlängsverschiebung δ_L definiert ist, wie in Bild A 11 dargestellt.

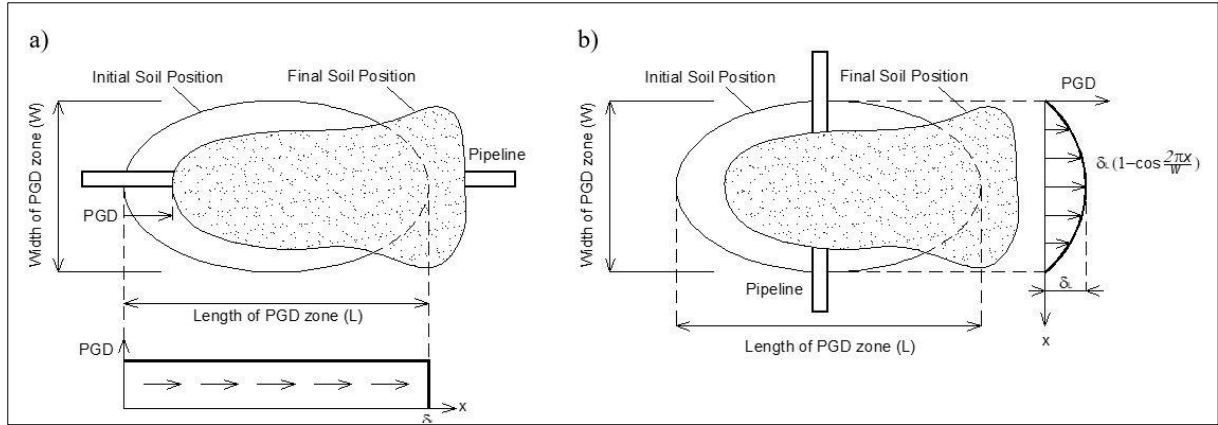


Bild A 11: Reaktion des Rohrs auf PGD: a) in Rohrlängsrichtung und b) in normaler Rohrrichtung

Im Allgemeinen werden zwei Arten von unelastischen Modellen für erdverlegte Rohrleitungen verwendet, die einem Blockmuster von PGD in Längsrichtung ausgesetzt sind, wie erstmals von O'Rourke vorgeschlagen (O'Rourke und Liu, 2012):

Fall 1: Der Betrag der Bodenbewegung δ_L^d ist groß und die Rohrdehnung wird durch die Länge L der PGD-Zone gesteuert, wie in Bild A 12a dargestellt. Dann kann die maximale axiale Dehnung im Rohr wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_{a1} = \frac{t_u L}{2\pi D t E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{t_u L}{2\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (20)$$

wobei L die Länge der permanenten Bodenverformungszone, σ_y die Fließspannung des Rohrmaterials, n und r die Ramberg-Osgood-Parameter, E der Elastizitätsmodul des Rohrmaterials, t_u die maximale Reibungskraft pro Längeneinheit des Rohrs an der Boden-Rohr-Grenzfläche, D der Außendurchmesser des Rohrs und t die Dicke des Rohrs sind.

Fall 2: Die Länge L der PGD-Zone ist groß und die Rohrdehnung wird durch den Betrag der Bodenbewegung δ_L^d gesteuert, wie in Bild A 12b dargestellt. Dann kann die maximale Dehnung des Rohrs sowohl für Zug als auch für Druck wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_{a2} = \frac{t_u L_e}{\pi D t E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{t_u L_e}{\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (21)$$

Dabei ist L_e die effektive Länge der Rohrleitung, über die die Reibungskraft t_u wirkt, und kann anhand der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\frac{\delta_L^d}{2} = \int_0^{L_e} \varepsilon_a dx \Rightarrow \delta_L^d = \frac{t_u L_e^2}{\pi D t E} \left[1 + \left(\frac{2}{2+r} \right) \left(\frac{n}{1+r} \right) \left(\frac{t_u L_e}{\pi D t \sigma_y} \right)^r \right] \quad (22)$$

Der Bemessungswert der axialen Verformung infolge des Erdbebens ist gegeben durch:

$$\varepsilon_{seismic}^d = \min(\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}) \quad (23)$$

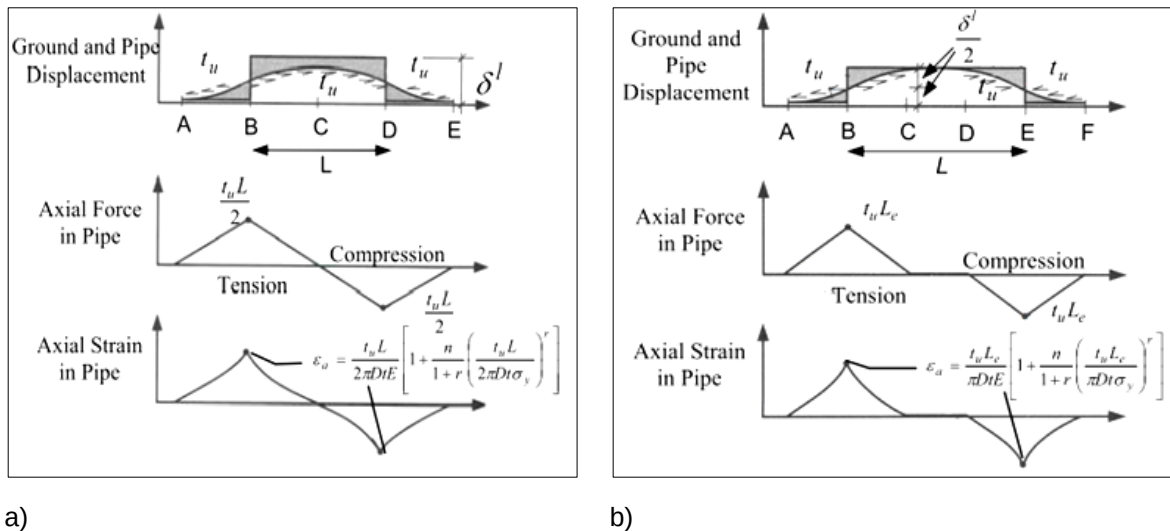


Bild A 12: Unelastisches Modell für die longitudinale PGD a) Fall 1; b) Fall 2 (O'Rourke und Liu, 2012)

Stattdessen dehnt und krümmt sich eine durchgehende Rohrleitung, wenn sie einer Bodenverformung in Querrichtung ausgesetzt ist, während sie versucht, diese aufzunehmen. Die konstruktive Bodenverschiebung in Querrichtung kann wie folgt berechnet werden:

$$\delta_T^d = \delta_T I_p \quad (24)$$

Wobei δ_T die maximale Bodenverschiebung in Querrichtung und I_p der Wichtigkeitsfaktor der Rohrleitung ist, wie in Tabelle A 7 angegeben.

Nach dem von O'Rourke und Liu (O'Rourke und Liu, 2012) vorgeschlagenen Modell wird eine Kosinusfunktion angenommen, um das transversale PGD-Profil zu definieren (siehe Bild A 11b), und es werden zwei Fälle zur Berechnung der maximalen Biegeverformung betrachtet, wie in Bild A 13 dargestellt.

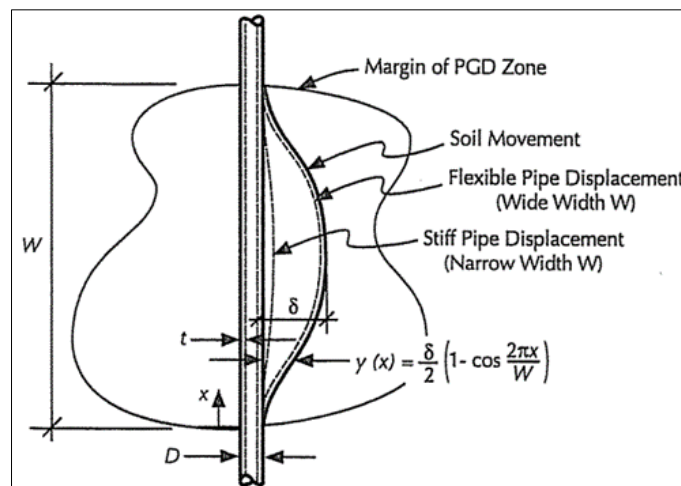


Bild A 13: Analytisches Modell für eine Rohrleitung, die einer räumlich verteilten, transversalen PGD ausgesetzt wurden (O'Rourke und Liu, 1999)

Fall 1: Bei einer großen Breite der PGD-Zone verhält sich das Rohr wie ein flexibles Kabel (d. h. vernachlässigbare Biegesteifigkeit), und es wird angenommen, dass seine Dehnung hauptsächlich auf die Bodenkrümmung zurückzuführen ist (d. h. verschiebungsgesteuert). Die maximale Biegedehnung ε_{b1} im Rohr ist gegeben durch:

$$\varepsilon_{b1} = \pm \frac{\pi^2 D \delta_L^d}{W^2} \quad (25)$$

wobei D der Außendurchmesser des Rohres, δ_L^d die Bemessungsbodenverschiebung, t die Dicke des Rohres und W die Breite der PGD-Zone ist.

Fall 2: Bei einer geringen Breite ist die Rohrleitung relativ steif und verhält sich wie ein an beiden Rändern befestigter Balken, und es wird angenommen, dass ihre Dehnung durch die Belastung an der Grenzfläche zwischen Boden und Rohr verursacht wird (d. h. kontrollierte Belastung). Die maximale Dehnung in der Rohrleitung ist gegeben durch:

$$\varepsilon_{b2} = \pm \frac{P_u W^2}{3\pi E t D^2} \quad (26)$$

wobei P_u der maximale seitliche Widerstand des Bodens pro Längeneinheit des Rohrs und E der Elastizitätsmodul des Rohrmaterials ist.

Der Bemessungswert der Biegeverformung infolge des Erdbebens ist gegeben durch:

$$\varepsilon_{seismic}^d = \min(\varepsilon_{b1}, \varepsilon_{b2}) \quad (27)$$

Schließlich tritt die maximale Rohrdehnung bei einer bestimmten Breite der PGD-Zone W_{cr} auf, die abgeschätzt werden kann, indem der Ausdruck (25) gleich dem Ausdruck (26) mit $\delta = \delta_{max}$ gesetzt wird:

$$W_{cr} = \sqrt[4]{\frac{3\pi^3 E t D^3 \delta_L^d}{P_u}} \quad (28)$$

14.2.3.2.2 Auftrieb aufgrund von Verflüssigung

Wenn das Rohr in gesättigtem Sand vergraben ist, kann sich der das Rohr umgebende Boden bei starken seismischen Erschütterungen verflüssigen. Folglich kann sich das Rohr seitlich verformen, wenn der verflüssigte Boden einen Hang hinunterfließt, oder es kann sich aufgrund des Auftriebs nach oben bewegen, wie in Bild A 14 schematisch dargestellt. Die Nettokraft nach oben aufgrund des Auftriebs wird durch den folgenden Ausdruck beschrieben:

$$P_{up} = \frac{\pi D^2}{4} (\gamma_{soil} - \gamma_{content}) - \pi D t \gamma_{pipe} \quad (29)$$

Wobei γ_{soil} , $\gamma_{content}$, γ_{pipe} das Gewicht pro Volumeneinheit des verflüssigten Bodens, der Rohrinhalt bzw. das Rohr sind.

Für relativ kurze Abschnitte erdverlegter durchgehender Rohrleitungen können die Biegespannung σ_{up} und die durch Auftriebskräfte verursachte Dehnung $\varepsilon_{seismic}^d$ mit den folgenden Ausdrücken berechnet werden (Calvi und Nascimbene, 2011; O'Rourke und Liu, 1999):

$$\sigma_{up} = \frac{P_{up} L_L^2}{10Z} \quad (30)$$

$$\varepsilon_{seismic}^d = \pm \frac{\sigma_{up}}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma_{up}}{f_y} \right)^r \right] \quad (31)$$

$$Z = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - (D-2t)^4}{D} \quad (32)$$

wobei L_L die Länge der Rohrspannweite in der Auftriebszone und Z das Widerstandsmoment des Rohrquerschnitts ist.

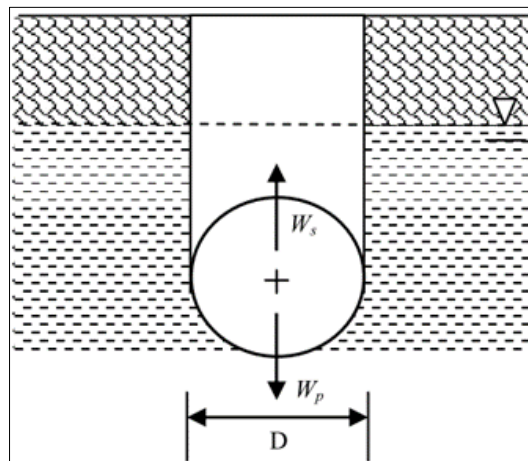


Bild A 14: Resultierende Auftriebskraft auf das Rohr (IITK-GSDMA, 2007; ASCE, 2001)

Ein Rohr, das von verflüssigtem Boden umgeben ist, wird viel weniger wahrscheinlich durch räumlich gestörte, transversale PGD beschädigt als ein nicht verflüssigter Boden, für die gleiche Menge an PGD und Breite der PGD-Zone (O'Rourke und Liu, 1999). Daher wird bei der Bemessung konservativ davon ausgegangen, dass ein Rohr, das einer räumlich verteilten, transversalen PGD ausgesetzt ist, in einem kompetenten, nicht verflüssigten Boden befindet, der die verflüssigte Schicht überlagert.

14.2.3.2.2.3 Oberflächenstörungen

Bei Störungen handelt es sich um seismisch induzierte PGD, die mit einer relativen Verschiebung benachbarter Teile der Erdkruste verbunden sind.

Die Fehler werden ja nach Bewegungsrichtung in Streichen, normales Gleiten und umgekehrtes Gleiten klassifiziert, wie in Bild A 15 schematisch dargestellt. Tritt die Normal- oder Umkehrstörung in Kombination mit der Streichen-Rutsch-Störung auf, wird sie als Schrägstörung bezeichnet.

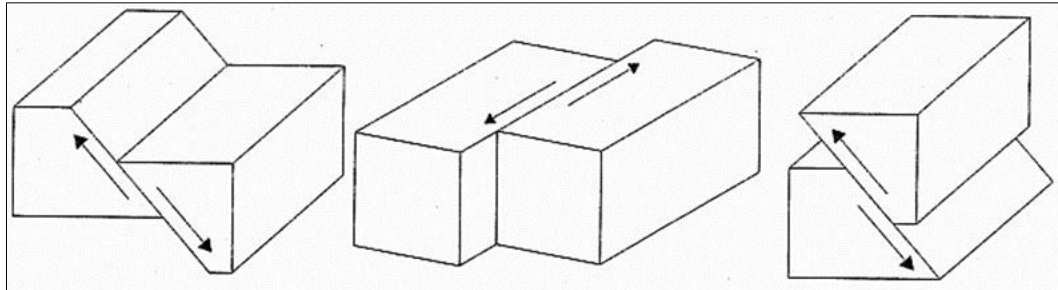


Bild A 15: Klassifizierung von Störungsbewegungen: a) normal, b) Scherbruch, c) umgekehrt (Calvi und Nascimbene, 2011)

Stattdessen ist eine Rohrleitung, die einen normalen Fehler oder einen Scherbruchfehler zwischen der Fehlerspur und der Rohrachse β kreuzt (siehe Bild A 16), einer Biege- und axialen Zugkraft ausgesetzt und kann daher durch Zugbruch versagen. Eine Rohrleitung, die eine Umkehrverwerfung oder eine Verwerfung mit einem stumpfen Schnittwinkel zwischen der Verwerfungsspur und der Rohrachse kreuzt, ist dagegen einer Biege- und axialen Druckkraft ausgesetzt und kann daher durch Knicken versagen (O'Rourke und Liu, 1999).

Die Anfälligkeit erdverlegter Rohrleitungen gegenüber Verwerfungen wird stark von der Größe der Fehlerverschiebung und dem Schnittwinkel zwischen Rohr und Verwerfung beeinflusst. Das Ausmaß der Fehlerverschiebung hängt hauptsächlich von der Art des Fehlers, der Größe des Erdbebens, der Schwerepunkttiefe und der Geologie ab. Durch das Fehlen exakter Daten über die zu erwartenden Fehler können die von Wells und Coppersmith (1994) eingeführten Beziehungen verwendet werden:

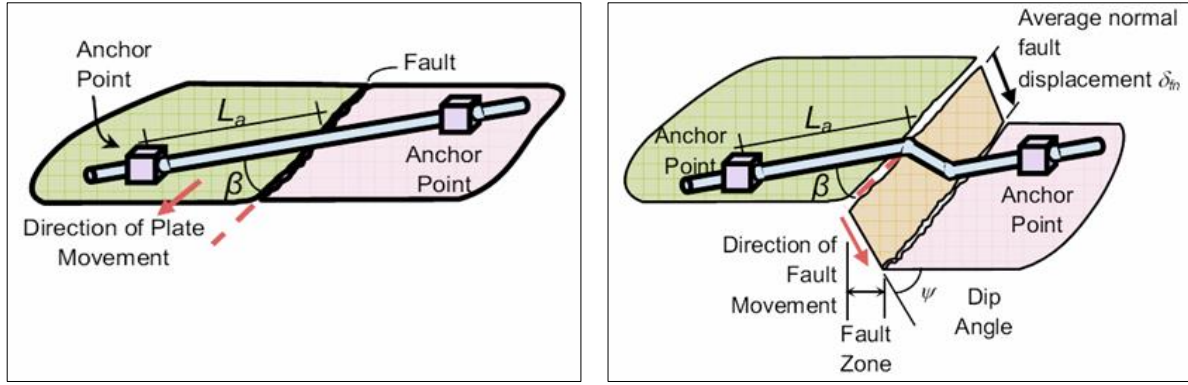
$$\log \delta_{fs} = -6.32 + 0.90M \quad \text{für Scherbruch Fehler;} \quad (33)$$

$$\log \delta_{fn} = -4.45 + 0.63M \quad \text{für normale Fehler;} \quad (34)$$

$$\log \delta_{fr} = -0.74 + 0.08M \quad \text{für umgekehrte Fehler;} \quad (35)$$

$$\log \delta_{fb} = -4.80 + 0.69M \quad \text{für einen blinden Fehler (d. h. einen kaum bekannten Fehler).} \quad (36)$$

Wobei δ_{fs} , δ_{fn} , δ_{fr} , die durchschnittlichen Fehlerverschiebungen des Scherbruchs, der Normalverwerfung bzw. der Umkehrverwerfung in Metern sind, während M die Größenstärke des Erdbebens ist. Nach Wells und Coppersmith variiert die beobachtete Fehlerverschiebung zwischen 0,05 und 8,0 m bei Scherbrüchen, 0,08 bis 2,1 m bei normalen Fehlern und 0,06 bis 1,5 m bei umgekehrten Fehler (Calvi und Nascimbene, 2011; IITK-GSDMA, 2007; Wells und Coppersmith, 1994).



a)

b)

Bild A 16: Kreuzung von Pipelines: a) Scherbruch und b) normaler Schlupfbruch (IITK-GSDMA, 2007)

Wie in Bild A 16 dargestellt, sind die Komponenten der Scherbruchverschiebung δ_{fax} und δ_{ftr} in axialer bzw. transversaler Richtung der Rohrleitung bei einem Streichen der Fehler wie folgt gegeben:

$$\delta_{fax} = \delta_{fs} \cos \beta \quad (37)$$

$$\delta_{ftr} = \delta_{fs} \sin \beta \quad (38)$$

Bei einem normalen Fehler (Bild A 16b) hingegen können die Komponenten der Fehlerverschiebung δ_{fax} , δ_{ftr} und δ_{fvt} in axialer, transversaler und vertikaler Richtung der Rohrleitung wie folgt berechnet werden:

$$\delta_{fax} = \delta_{fn} \cos \psi \sin \beta \quad (39)$$

$$\delta_{ftr} = \delta_{fn} \cos \psi \cos \beta \quad (40)$$

$$\delta_{fvt} = \delta_{fn} \sin \psi \quad (41)$$

Wobei β der Schnittwinkel zwischen der Fehlerspur und der Rohrachse und ψ der Neigungswinkel des Fehlers ist.

Außerdem werden bei umgekehrten Fehlern die Verschiebungskomponenten wie bei Fehlern mit normalem Schlupf bewertet, jedoch mit negativem Schlupf. Stattdessen können bei schrägen Fehlern die Scherbruch-Verschiebung und die Normalschlupf-Verschiebungen in axialer, transversaler und vertikaler Richtung der Rohrachse algebraisch addiert werden.

Die Bemessungsfehlerverschiebungen δ_{fax}^d , δ_{ftr}^d und δ_{fvt}^d entlang der axialen, transversalen bzw. vertikalen Richtung der Rohrleitung sind gegeben durch:

$$\delta_{fax}^d = \delta_{fax} I_p \quad (42)$$

$$\delta_{ftr}^d = \delta_{ftr} I_p \quad (43)$$

$$\delta_{fvt}^d = \delta_{fvt} I_p \quad (44)$$

wobei I_p der Wichtigkeitsfaktor ist, wie in Tabelle A 7 angegeben.

Die durchschnittliche Rohrdehnung infolge von Fehler kann auf der Grundlage des Modells von Newmark und Hall (Newmark und Hall, 1975) wie folgt berechnet werden:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \frac{\delta_{fax}^d}{L_a} + \frac{1}{8} \frac{(\delta_{fir}^d)^2 + (\delta_{fvt}^d)^2}{L_a^2} \quad (45)$$

wobei L_a die in Bild A 16 dargestellte unverankerte Rohrlänge ist, die durch (46) gegeben ist:

$$L_a = \min(L'_a, L''_a) \quad (46)$$

wobei L'_a der Abstand von jedem Verankerungspunkt ist, der durch Bögen, Krümmungen oder Kreuzungen in der Nähe der Störungszone bereitgestellt wird, während L''_a die effektive unverankerte Länge der Rohrleitung ist, bei der die axiale Einspannung des Rohres nur durch die Rohr-Boden-Reibung erfolgt:

$$L''_a = \frac{E \varepsilon_y \pi D t}{t_u} \quad (47)$$

wobei t_u die in axialer Richtung des Rohres wirkende Reibungskraft, ε_y die Streckgrenze des Materials, E der Elastizitätsmodul des Rohrmaterials, D der Durchmesser des Rohres und t seine Dicke ist.

Weitere Verbesserungen der Beziehung von Newmark und Hall (Newmark und Hall, 1975) (45) wurden in nachfolgenden Arbeiten entwickelt (Kennedy et al., 1977; Wang und Yeh, 1985; Takada et al., 2001; Karamitros et al., 2007, Trivonov und Cherniy, 2010).

Das oben beschriebene Verfahren auf der Grundlage des Modells von Newmark und Hall (Newmark und Hall, 1975) ermöglicht eine Annäherung an die Bemessungswerte erster Ordnung. Für eine detaillierte Analyse und Bemessung wird jedoch eine auf nichtlinearen finiten Elementen basierende Analyse empfohlen (IITK-GSDMA, 2007).

Um das Risiko einer Rohrleitung an einer Störungsstelle zu verringern, wird dringend empfohlen, die Rohrleitung so auszurichten, dass eine Stauchung vermieden wird, die zu einem Knickversagen mit anschließendem Materialaustritt führen kann. Darüber hinaus sollten die Rohrleitungen im Bereich der Störungskreuzung in einem relativ geraden und gleichmäßigen Querschnitt verlegt werden, wobei scharfe Änderungen der Richtung, der Höhe oder der Wanddicke sowie andere Spannungskonzentratoren zu vermeiden sind. Die Verankerungspunkte wie Bögen, Krümmung und Flansche sollten so weit wie möglich von der Störungszone entfernt sein, damit sich die Rohrleitung der Störungsbewegung mit einem minimalen Spannungsniveau anpassen kann. Darüber hinaus kann in der Nähe der Störungszonen eine harte und glatte Rohrumhüllung (z. B. eine Epoxidbeschichtung) oder ein geeignetes Verfüllmaterial (z. B. lockerer bis mittelgroßer körniger Boden) verwendet werden, um die Bodenbeanspruchung der Rohrleitung während der Störungsbewegung zu minimieren (IITK-GSDMA, 2007).

Literaturverzeichnis

American Lifeline Alliance (ALA), 2001, "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe", FEMA, 75 Seiten.

American Lifeline Alliance (ALA), 2005, "Design Guidelines for Seismic Resistant Water Pipeline Installations", FEMA, 255p.

Ballantyne, D.B., Berg, E., Kennedy, J., Reneau, R., Wu D., 1990. Modellierung von Erdbeschäden für das Wassersystem von Seattle: Bericht an US Geological Survey unter Grant 14-08-0001-G1526. Technischer Bericht, Kennedy/Jenks/Chilton, Federal Way, Washington, USA.

Barbas S.T., Weir M.S., 2007, Strain-Based Design Methodology for Seismic and Arctic Regions, ISOPE-2007-SBD-55.

Barenberg, M.E., 1988. Korrelation von Pipelineschäden mit Bodenbewegungen. J. Geotech. Eng., ASCE 114 (6), 706-711.

Calvi G.M., Nascimbene R., 2011, Progettare i Gusci, IUSS Press (auf Italienisch).

CEN, 2006, Eurocode 8 - Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 4: Silos, Tanks und Rohrleitungen, EN 1998-4.

Chen W.F., Scawthorn C.R., 2002, Handbook of Earthquake Engineering, CRC Press.

Eguchi, R.T., 1983. Seismische Anfälligkeitsmodelle für unterirdische Leitungen. In: Proceedings of Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, PVP-77, ASME, New York, S. 368-373.

Eguchi, R.T., 1991. Seismische Gefährungsdaten für Rettungssleitsysteme. Struct. Saf. 10, 193-198.

Eidinger J., 1998. Wasserverteilungssystem. In: Anshel J. Schiff (ed.) The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989 - Lifelines. USGS Professional Paper 1552-A, US Government Printing Office, Washington, A 63-A78.

Eidinger, J., Maison, B., Lee, D., Lau, B., 1995. Schäden in der Wasserversorgung des East Bay Municipal District nach dem Loma Prieta-Erdbeben von 1989. In: Proceedings of the 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, TCLEE, Monograph 6, S. 240-24.

Gardoni, P., J. W. van de Lindt, B. Ellingwood, T. P. McAllister, J. Lee, H. Cutler, und D. Cox. 2018. "The interdependent networked community resilience modeling environment (IN-CORE)." In Proc., 16th European Conf. on Earthquake Engineering. Gaithersburg, MD: NIST.

Gehl, P., Desramaut, N., Reveillere, A., Modaressi, H., 2014. Fragilitätsfunktionen von Gas- und Ölnetzen. SYNER-G: Typologiedefinition und Fragilitätsfunktionen für seismisch gefährdete physikalische Elemente. Geotech, Geol. Earthq. Eng., Springer 27, 187-220.

Isoyama, R., Ishida, E., Yune, K., Shirozu, T., 2000. Verfahren zur Abschätzung seismischer Schäden an Wasserversorgungsrohrleitungen. In: Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1762.

IITK-GSDMA, 2007, Guidelines for the seismic design of buried pipelines, Indian Institute of Technology Kanpur.

Katayama, T., Kubo, K., Sato, N., 1975. Erdbebenschäden an Wasser- und Gasverteilungssystemen. In: Proceedings of the U.S. National Conference of Earthquake Engineering, Oakland, CA: EERI, S. 396-405.

Kennedy, R. P., Williamson, R. A., Chow, A. M. 1977. Fault movement effects on buried oil pipeline. Transportation Engineering Journal of ASCE, 103(5), 617-633.

Japan Gas Association, 2000, Recommended Practices for Earthquake Resistant Design of Gas Pipelines, Earthquake resistant Design Codes in Japan, Kapitel 6.

Karamitros D., Bouckovalas G., Kouretzis G., 2007, Stress Analysis of Buried Steel Pipelines at Strike-Slip Fault Crossings, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, pp. 200-211.

Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., 2012. Eine Beobachtungsanalyse der seismischen Anfälligkeit von Industrierohrleitungen. Chem. Eng. Trans. 26, 567-572.

Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., 2013. Seismische Anfälligkeit von Erdgaspipelines. Reliab. Eng. Syst. Saf. 117, 73-80.

Lanzano, G., Salzano, E., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., 2014. Seismic vulnerability of gas and liquid buried pipelines. J. Loss Prev. Process Ind. 28, 72-78.

Lanzano, G., Santucci de Magistris, F., Fabbrocino, G., Salzano, E., 2015. Seismische Schäden an Pipelines im Rahmen der Na-Tech Risikobewertung. J. Loss Prev. Process Ind. 33, 159-172.

Mazumder, R. K., Fan, X., Salman, A. M., Li, Y., & Yu, X. (2020). Framework for seismic damage and renewal cost analysis of buried water pipelines. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 11(4).

Nationales Institut für Bauwissenschaften (NIBS), 2004. Methodik zur Schätzung von Erdbebenschäden. Technisches Handbuch HAZUS. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, USA.

Navarro, C. M., H. D. Hampton, J. S. Lee, N. L. Tolbert, T. M. McLaren, J. D. Myers, B. F. Spencer Jr., und A. S. Elnashai. 2008. "MAEviz: Erkundung von Strategien zur Verringerung des Erdbebenrisikos". In Proc., 2008 IEEE 4th Int. Conf. on eScience, 457. New York: IEEE.

Newmark, N. M. 1968. Problem der Wellenausbreitung in Boden und Fels. In Proceedings of Int. Symp. Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials (S. 7-26). Univ. New Mexico Press.

Newmark N. M., Hall W. J., 1975, Pipeline Design to Resist Large Fault Displacements, Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Michigan.

O'Rourke, T. D., Trautmann, C. H., 1980. Analytical Modeling of Buried Pipeline response to Permanent Earthquake Displacements, Bericht Nr. 08-4, School of Civil Engineering and Environmental Engineering, Juli, Cornell University, Ithaca, NY.

O'Rourke, M. J., Hmadi, K. E. 1988. Analysis of continuous buried pipelines for seismic wave effects. Earthquake engineering & structural dynamics, 16(6), 917-929.

O'Rourke, M.J., Ayala, G., 1993. Pipeline-Schäden aufgrund von Wellenausbreitung. J. Geotech. Eng. 119 (9), 1490-1498.

O'Rourke, T. D., Toprak, S., und Sano, Y. (1998). Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake. In US-Japan Workshop on earthquake disaster prevention for lifeline systems.

O'Rourke, M. J., Liu, X., 1999, Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.

O'Rourke, M.J., 2009. Analytische Zerbrechlichkeitsbeziehung für erdverlegte segmentierte Rohre. Technical Council Lifeline Earthquake Engineering Conference (TCLEE), Oakland, CA, June 28- July 1, Reston, VA, American Society of Civil Engineers, USA.

O'Rourke, M. J., Liu, X. 2012. Seismic design of buried and offshore pipelines. MCEER Monograph MCEER-12-MN04, 380.

O'Rourke, M.J., Filipov, E., Uçkan, E. 2015. Towards robust fragility relations for buried segmented pipe in ground strain areas. Earthq. Spectra 31 (3), 1839-1858.

O'Rourke, M.J., Nordberg, C. 1991. Analysis Procedures for Buried Pipelines Subject to Longitudinal and Transverse Permanent Ground Deformation", Proceedings of the Third Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, San Francisco, California, Technical Report NCEER-91-0001, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, S. 439-453.

O'Rourke, M. J., und C. Nordberg. 1992. Auswirkungen der permanenten Bodenverformung in Längsrichtung auf erdverlegte durchgehende Rohrleitungen. NCEER-92-0014. Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research.

O'Rourke, M., Vargas-Londono, T., 2016. Analytical model for segmented pipe response to tensile ground strain. Earthquake Spectra, 32(4), 2533-2548.

O'Rourke, M., Vargas-Londono, T. 2018. Influence of diameter on seismic response of buried segmented pipelines. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 107, 332-338.

O'Rourke, T.D., Jeon, S.S., Toprak, S., Cubrinovski, M., Hughes, M., Van Ballegooy, S., et al., 2014. Erdbebenreaktion von unterirdischen Rohrleitungsnetzen in Christchurch, Neuseeland. *Earthq. Spectra* 30, 183-204.

Pineda-Porras, O., Ordaz, M., 2003. Seismische Verwundbarkeitsfunktion für erdverlegte Rohrleitungen mit großem Durchmesser: Der Fall des Hauptwassersystems von Mexiko-Stadt. In: *Proceedings of the International Conference on Pipeline Engineering Constructions*, Bd. 2, S. 1145-1154.

Pineda-Porras, O., Ordaz, M., 2007. Ein neuer seismischer Intensitätsparameter zur Abschätzung von Schäden in erdverlegten Rohrleitungen aufgrund seismischer Wellenausbreitung. *J. Earthq. Eng.* 11 (5), 773-786.

Shi, P., T. D. O'Rourke, und Y. Wang. 2006. Simulation der Leistung der Wasserversorgung nach einem Erdbeben. In *Proc., 8th National Conf. on Earthquake Engineering*. Papier Nr. 8NCEE-001295. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute.

Takada S., Hassani N., Fukuda K., 2001, A new proposal for simplified design of buried steel pipes crossing active faults, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30.

Trifonov O.V., Cherniy V. P., 2010, A semi-analytical approach to a nonlinear stress-strain analysis of buried steel pipelines crossing active faults, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1298-308.

Wang L.R.L., Yeh Y., 1985, A Refined Seismic Analysis and Design of Buried Pipeline for Fault Movement, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 13, pp. 75-96.

Wells D. L., Coppersmith K. J., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin der Seismologischen Gesellschaft von Amerika*, Bd. 84, Nr. 4.

Wang, L. R. L. 1994. Numerische seismische Analyse und Modellierung von erdverlegten Pipelines. *Soil Structure Interaction: Numerische Analyse und Modellierung*, 557-603.

Yoo, D. G., D. Jung, D. Kang, J. H. Kim, und K. Lansey. 2015. Seismic hazard assessment model for urban water supply networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 142 (2): 04015055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000584).