

# **Position des FKPE e.V. zur Induzierten Seismizität**

## **Präambel**

Das Forschungskollegium Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE) koordiniert eine Stellungnahme der führenden deutschen Geophysik-Institutionen zum Umgang mit dem Auftreten von anthropogen verursachten Erdbeben. Derartige seismische Ereignisse können im Zusammenhang mit bergbaulichen Tätigkeiten, der Errichtung und dem Betrieb von Stauseen oder der Entnahme oder Einlagerung von Flüssigkeiten und Gasen im Untergrund stehen, beispielsweise bei der Erdölförderung, bei der Gasförderung mit und ohne Fracking, bei der Tiefen Geothermie sowie bei der CO<sub>2</sub>-Speicherung im Untergrund. Derzeit werden drei Positionspapiere bearbeitet, welche die Themenkomplexe der seismischen Überwachung, der Unterscheidung zwischen natürlicher und induzierter Seismizität sowie des Begutachtungsprozesses behandeln. Die Positionspapiere geben jeweils allgemeine Empfehlungen hierzu, ersetzen jedoch nicht die eingehende Prüfung der potentiellen seismischen Gefährdung einer geplanten oder sich im Betrieb befindlichen Anlage.

Das vorliegende, erste Positionspapier benennt die Grundlagen, welche für die Erfassung flacher und schwacher Seismizität relevant sind. Diese orientieren sich am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung von Aspekten der praktischen Umsetzbarkeit. Entsprechend setzt sich das Autorenteam aus erfahrenen Seismologen von Hochschulen, Behörden sowie der Industrie zusammen. Die vorgeschlagene Überwachung seismischer Emission ersetzt nicht die Erfassung der Einwirkung seismischer Wellen auf Gebäude und Menschen nach DIN 4150 (Immission). Es wird jedoch empfohlen, emissions- und immissionsrelevante Parameter messtechnisch zu kombinieren.

Die beschriebenen Messnetze sind so ausgelegt, dass je nach Anforderung oder Auflagen durch die zuständige Genehmigungsbehörde Mikroseismizität detektiert oder lokalisiert werden kann. Die Anforderungen an die Registrierqualität orientieren sich daran, schwächste spürbare Ereignisse durch eine zehnfach empfindlicher eingestellte Messtechnik sicher zu erfassen. Die empfohlenen Empfindlichkeiten werden von bereits existierenden Überwachungsnetzen auch unter schwierigen äußeren Bedingungen eingehalten.

## **Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE**

Kollektives Autorenteam (alphabetische Liste) für den Milestone 1 „Seismische Überwachung“ der Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE):

Dr. Stefan Baisch, Q-con GmbH, Bad Bergzabern

Dr. Ralf Fritschen, DMT GmbH, Essen

Dr. Jörn Groos, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut

Dr. Toni Kraft, Schweizerischer Erdbebendienst an der ETH-Zürich, Zürich

Dr. Thomas Plenefisch, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Dr. Katrin Plenkens, Erdbebendienst an der ETH-Zürich, Zürich

Priv.-Doz. Dr. Joachim Ritter, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut

Dr. Joachim Wassermann, Ludwig-Maximilians Universität, München

Kontakt: [www.fkpe.org](http://www.fkpe.org)

### **Empfehlung**

Die vorliegende Empfehlung beschreibt die messtechnischen Voraussetzungen zur Erfassung von induzierter Seismizität im Zusammenhang mit geotechnischen Anlagen. Unter geotechnischen Anlagen werden im Folgenden untertägige Anlagen zur Gewinnung von Rohstoffen (z.B. Bergwerkstätigkeiten, tiefe geothermische Energie, Kohlenwasserstoffe) oder zur Tiefenlagerung (z.B. Verpressen von flüssigen Abfällen, CO<sub>2</sub>-Speicherung, möglicherweise auch Speicherung von Erdgas etc.) verstanden. Die Empfehlung beschränkt sich auf die messtechnischen Mindestanforderungen zur sicheren Erfassung aller möglicherweise spürbaren induzierten Erdbeben (ab einer Schwinggeschwindigkeit von 0,3 mm/s), die im Zusammenhang mit der geotechnischen Anlage stehen. Es sei darauf hingewiesen, dass ein Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse mit den beschriebenen Maßnahmen im Allgemeinen nicht möglich ist, da schwächere Erdbeben nicht in ausreichender Vollständigkeit erfasst werden.

Der notwendige technische Aufwand für eine Überwachung induzierter seismischer Ereignisse an geotechnischen Anlagen hängt entscheidend von der Art der geotechnischen Anlage und damit den Anforderungen der Genehmigungsbehörde an die Überwachung ab. Wird beispielsweise nur eine generelle Beobachtung der Seismizität gefordert, so kann dies mit einer 3-Komponenten-Messstation erreicht werden, die die unten beschriebenen Anforderungen an die Messgenauigkeit und Datenverfügbarkeit erfüllt. Wird eine Lokalisierung der Ereignisse, eine Erfassung der raum-zeitlichen Entwicklung der Seismizität oder eine Diskriminierung zwischen

natürlicher und induzierter Seismizität gefordert, dann ist ein umfangreicherer instrumenteller Aufwand erforderlich.

#### 1) **Messgenauigkeit**

Es muss an den einzelnen Messstellen eine Kompressionswelle mit der Schwinggeschwindigkeitsamplitude von  $6 \mu\text{m/s}$  bei einem Signal-Stör-Verhältnis von mindestens 3 im Frequenzbereich 5-40 Hz gemessen werden können. Dies stellt eine Mindestanforderung dar. Es wird empfohlen, ein Signal-Stör-Verhältnis größer 6 zu erreichen. Es müssen 3 orthogonale Komponenten der Schwinggeschwindigkeit erfasst werden, wobei die Genauigkeit der Zeitbasis mindestens im Millisekundenbereich liegen muss.

#### 2) **Betrieb eines Messnetzes**

Sollen über eine generelle Beobachtung hinausgehend Herdparameter bestimmt werden, dann müssen mindestens 5 Messstationen im Umfeld einer geotechnischen Anlage (in einer Entfernung  $<15 \text{ km}$  von der geotechnischen Anlage) kontinuierlich betrieben werden. Die Aufstellungsorte sollen so gewählt werden, dass erstens die Messgenauigkeit nach 1) erfüllt und zweitens eine präzise Hypozentralbestimmung ( $2\sigma$ -Genauigkeit horizontal:  $\pm 500 \text{ m}$ , vertikal:  $\pm 2000 \text{ m}$ ) im Reservoirbereich und dem direkten Umfeld erreicht werden.

#### 3) **Datenintegration**

Emissionsmessungen zur Quellcharakteristik und Immissionsmessungen (DIN 45669) zur Beurteilung von Erschütterungen (DIN 4150) sollen zusammengeführt werden, um eine möglichst umfangreiche Datenbasis für seismologische Analysen zu erhalten. Seismologische Messdaten ausgewählter Betreiberstationen sollen den zuständigen seismologischen Diensten zur Erfüllung ihrer Aufgaben zur Verfügung gestellt werden. Umgekehrt, sollen seismologische Messdaten von Industrie, Ämtern und Forschungsinstitutionen in das Betreibermessnetz integriert werden.

#### 4) **Transparenz**

Es wird empfohlen, Messdaten in zentralen Datenbanken offen zu legen, um Transparenz, Überprüfbarkeit und die Anwendung weitergehender Auswerteverfahren zu ermöglichen.

Anmerkungen, Ausführungshinweise:

### Zu 1) Messgenauigkeit

- Alle seismischen Ereignisse, die zu Bodenbewegungen mit maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten oberhalb der Spürbarkeitsgrenze (0,3 mm/s in seltenen Fällen, vgl. DIN 4150-2<sup>1</sup>) führen, sollen lokalisiert werden. Dieses Vorgehen erlaubt die zeitnahe Katalogisierung und Veröffentlichung aller potentiell spürbaren Ereignisse. Bei einer Herdtiefe von etwa 2 km bis 5 km und im Umfeld eines sedimentären Beckens entspricht diese Anforderung in etwa der Lokalisierung aller Erdbeben ab einer Lokalmagnitude  $M_L$  von 1,0. In anderen Gebieten kann  $M_L$  einen anderen Wert annehmen (abhängig von Herdtiefe, Verstärkungsfaktoren der oberflächennahen Sedimentschichten usw.). Um sich von der Lokalmagnitude und ihren Unsicherheiten (Stationsmagnitude, Mittelung, fehlende Aussagekraft bzgl. der Intensität bzw. Auswirkung) zu lösen, soll hier im Folgenden die Bodenschwinggeschwindigkeit als Orientierungsmaß dienen.
- Zudem soll ggf. eine Gutenberg-Richter-Relation aus genügend kleineren Ereignissen erstellt werden können, um eine Prognose für stärkere Ereignisse aufstellen zu können. Ein relevantes stärkeres Ereignis liegt vor, falls die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit die Anhaltswerte für mögliche Gebäudeschäden nach DIN 4150-3 (3 mm/s für empfindliche Gebäude, 5 mm/s für Wohngebäude) überschreiten könnte. Dementsprechend sollten auch hierfür alle Ereignisse mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit von 0,3 mm/s im Epizentralgebiet zuverlässig lokalisiert werden.
- Um eine Entwicklung hin zu spürbaren Ereignissen rechtzeitig zu beobachten, müssen zudem auch Ereignisse unterhalb der Spürbarkeitsgrenze (0,3 mm/s in seltenen Fällen, vgl. DIN 4150-2) zuverlässig detektiert werden. Auf Grundlage der Gutenberg-Richter-Relation wird hierfür die Detektion aller Ereignisse mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit größer 0,03 mm/s im Epizentralgebiet empfohlen. Die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit tritt in der Regel auf einer der Horizontal-Komponenten auf.

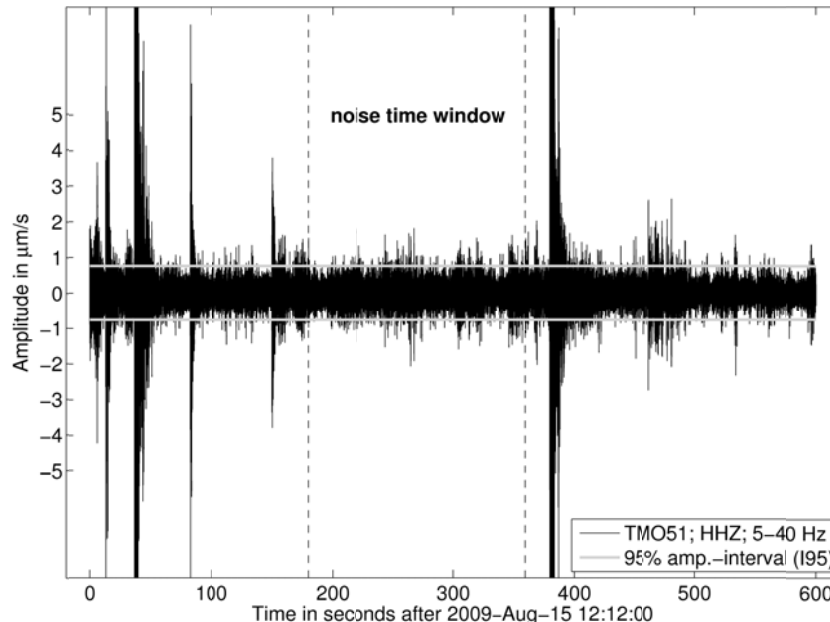
---

<sup>1</sup> Dieser Wert gilt für Messungen am Fundament von Gebäuden. Die DIN 4150-2 nennt als Spürbarkeitsgrenze  $KB_{Fmax}$ -Werte von 0,1 bis 0,2. Der  $KB_{Fmax}$ -Wert (maximale bewertete Schwingstärke) ist hierbei das Maximum des leitenden Effektivwertes eines frequenzbewerteten Erschütterungssignals, dessen Bestimmung in der DIN 4150-2 erläutert wird. Den Wert  $v_{max} = 0,3$  mm/s enthält man unter der Berücksichtigung, dass Erschütterungen zu den Obergeschossen hin verstärkt werden und dass der  $KB_{Fmax}$  Wert für Einzelereignisse kurzer Dauer ca. 1/3 des  $v_{max}$  Wertes beträgt.

- Um seismische Ereignisse detektieren und Einsatzzeiten für die Lokalisierung bestimmen zu können, ist die Messung und Identifizierung sowohl der P- als auch der S-Wellen eines Ereignisses notwendig. Zur Phasenidentifikation und Einsatzzeit-Bestimmung ist mindestens ein Signal-Stör-Verhältnis von 3 notwendig. Es müssen 3-Komponenten (1 vertikaler und 2 orthogonal horizontale Sensoren) verwendet werden.
- Die zuverlässige Detektion von seismischen Ereignissen mit maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten von 0,03 mm/s bzw. 30  $\mu\text{m/s}$  an einer Messstelle erfordert die Messung und Identifikation der Kompressionswelle (P-Ersteinsätze) mit z.T. wesentlich geringeren Bodenschwinggeschwindigkeiten. Um von der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit eines Ereignisses (i.d.R. die Scherwelle oder die Oberflächenwelle) auf die Maximalamplitude der Kompressionswelle (P-Welle) zu schließen, wird ein empirischer Faktor von 0,2 angesetzt. Dies führt zu einer im Epizentralgebiet mindestens aufzulösenden Schwinggeschwindigkeit von 6  $\mu\text{m/s}$  für den P-Ersteinsatz.
- Für die Lokalisierung von Ereignissen mit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit  $> 0,3 \text{ mm/s}$  im Epizentralgebiet müssen die Einsatzzeiten der P-Ersteinsätze an allen Messstellen des Netzwerkes bestimmt werden können. Die aufzulösende Schwinggeschwindigkeit an weiter entfernten ( $> 5 \text{ km}$  zum Epizentrum) Messstellen kann dabei auch weniger als 6  $\mu\text{m/s}$  betragen. Dies sollte bei der Bewertung der Rauschamplituden an den einzelnen Messstellen berücksichtigt werden.
- Ab einem Signal-Stör-Verhältnis (*SNR*) von etwa 3 können eine seismische Welle zuverlässig identifiziert und ihre Einsatzzeit bestimmt werden. Dies ist das entscheidende Kriterium der Messung und erfordert somit Rauschamplituden, die mindestens geringer als  $6/3 \mu\text{m/s}$  bzw. 2  $\mu\text{m/s}$  sind. Es wird jedoch dringend empfohlen, Rauschamplituden unter 1  $\mu\text{m/s}$  anzustreben. Als Bezugsgröße für die Berechnung des Signal-Stör-Verhältnisses im Zeitbereich soll das Amplitudenintervall verwendet werden, welches 95% der Amplitudenwerte (*I95*) der untersuchten mittelwertfreien Zeitreihe des seismischen Rauschens enthält (siehe Abb.). *I95* sollte mindestens innerhalb von  $\pm 2 \mu\text{m/s}$ , besser unter  $\pm 1 \mu\text{m/s}$ , liegen. Kann *SNR*  $> 3$  bei Messungen an der Oberfläche nicht erreicht werden (z.B. wegen zu starkem Hintergrundrauschen), dann soll im Bohrloch gemessen werden. Der Richtwert *I95* (s.u.) muss im Dauerbetrieb (24/7) eingehalten werden. Um das Signal-Stör-Verhältnis an einer potenziellen Messstation zu bestimmen, werden Testmessungen über mehrere Tage vor deren Einrichtung empfohlen. Diese Testmessungen sollen die Variation der mittleren Rausch-Messamplituden bestimmen (*I95*) sowie das Auftreten von transienten Störsignalen im Mess-Frequenzbereich abschätzen.

Zur Rauschanalyse von Standorten siehe auch: Groos J. & Ritter, J., 2010. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. In Ritter, J. and Oth, A. (eds.), *Proceedings of the workshop Induced Seismicity*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 30, 157 pp., ISBN N° 978-2-91989-709-4).

- Die zu messenden Frequenzen an der Erdoberfläche umfassen etwa 5 Hz (S-Welle) bis 40 Hz (P-Welle) für Erdbeben mit Lokalmagnituden  $M_L < \sim 3$ . Für stärkere Ereignisse können kleinere Frequenzen angeregt werden. Deshalb müssen mindestens 4,5 Hz Geophone eingesetzt werden, die Messung tieferer Frequenzen ist optional. Die Abtastrate muss mindestens 100 Hz betragen. In Bohrlöchern sollte versucht werden, Signale mit einem Frequenzgehalt bis mindestens 80 Hz zu messen (200 Hz Abtastrate), da dort höhere Frequenzen beobachtet werden können.
- Die Genauigkeit der Zeitbasis der seismischen Messdaten muss im Bereich von Millisekunden liegen. Dies ist z.B. für die Berechnung präziser Relativlokalisierungen der seismischen Ereignisse notwendig (s.u.). Eine Zeitsynchronisation im Bereich von Millisekunden oder präziser ist bei standardmäßiger Synchronisation der Uhr der Datenerfassung mit einem externen Zeitzeichen problemlos realisierbar. Es wird empfohlen, die Zeitsynchronisation über GPS (Global Positioning System) durchzuführen.



**Abb.:** Darstellung des Amplitudenintervalls  $I_{95}$  (zwischen den grauen Linien) zur Evaluierung des Rauschpegels. Innerhalb  $I_{95}$  befinden sich 95% der gemessenen Amplitudenwerte. Transiente Rauschereignisse können diese Amplitude kurzfristig übertreffen. Die größeren, in dieser Darstellung teilweise saturierten Ereignisse sind induzierte Erdbeben. Der Standort TMO51 befindet sich im Oberrheingraben (Oberflächenstation an einem Ortsrand),  $I_{95}$  liegt hier unterhalb der geforderten  $\pm 2 \mu\text{m/s}$ .

## Zu 2) Betrieb eines Messnetzes

- Die Konfiguration eines Messnetzes orientiert sich an den zu erzielenden Ergebnissen einer Überwachungsmaßnahme: Detektion von Einzelereignissen, Präzision der Hypozentralparameter-Bestimmung (geographische Breite und Länge sowie Tiefe und Herdzeit) sowie den lokalen Gegebenheiten (Signal-Stör-Verhältnisse, Genehmigungen für Messstandorte, Infrastruktur etc.).
- Ist im Rahmen einer generellen Beobachtung nur die sichere Detektion einzelner spürbarer Ereignisse gefordert, so genügt eine Messstation, die den unter 1) genannten Anforderungen entspricht, wenn zusätzlich eine hohe Datenverfügbarkeit von mindestens 98.5% garantiert werden kann.
- Soll darüber hinaus eine Lokalisierung von seismischen Ereignissen angestrebt werden, sollte diese zumindest die Bestimmung der Epizentralkoordinaten mit  $\pm 500$  m Genauigkeit erreichen (die Unsicherheit ist hier  $2\sigma$ ). Neben gut bestimmten P- und S-Welleneinsatzzeiten (Kompressions- und Scherwellen) benötigt man hierfür auch ein präzises Geschwindigkeitsmodell.
- Die Bestimmung der Hypozentraltiefe hängt stark von der Güte des seismischen Geschwindigkeitsmodells ab, vor allem für die Scherwellen. Es wird empfohlen, das Geschwindigkeitsmodell und/oder die Laufzeiten zu kalibrieren. Dies kann beispielsweise mit Kalibrationsschüssen in Bohrlöchern, initialen Stimulationseignissen, Sonic-Log- / Full-Wave-Sonic-Log-Messungen oder durch VSP-Messungen (vertical seismic profiling) erfolgen. Unsicherheiten von  $\pm 2000$  m ( $2\sigma$ ) in der Hypozentraltiefen-Bestimmung sollen nicht überschritten werden.
- Zum Erreichen der oben genannten Lokalisierungsziele sind verschiedene Messkonfigurationen denkbar. Es sind erfahrungsgemäß mindestens 5 Messstationen notwendig. Es ist weiterhin zu bedenken, dass wegen technischer Stationsausfälle, unzureichenden Beobachtungsmöglichkeiten (Stationslage auf Nodalfläche, ungewöhnliche Rauschereignisse etc.) u.U. eine Redundanz zusätzlich notwendig ist. Um eine gute Tiefenlokalisierung zu erreichen, sollen nicht alle Stationen in derselben Entfernung von der möglichen Quelle platziert sein. Die Azimutwinkel zwischen den Stationen sollen möglichst gleich und klein sein, um eine gute horizontale Auflösung der Lokalisierung zu erreichen. Es soll kein Azimutbereich größer  $90^\circ$  von der seismischen Quelle ohne Messstation entstehen.
- Neben den oben beschriebenen absoluten Lokalisierungen wird auch auf die Technik der relativen Lokalisierung hingewiesen. Entsprechend bestimmte

Hypozentren sind untereinander sehr genau festgelegt und helfen beispielsweise, die Entwicklung der Seismizität im Reservoir zu charakterisieren.

- Der Nachweis zur Auflösungsfähigkeit des Netzwerks sollte durch numerische Modellierungen vor Beginn der Überwachung erbracht werden.
- Stand der Technik ist die kontinuierliche Echtzeit-Datenübertragung (wenige Sekunden Zeitverzögerung) in ein Datenzentrum (z.B. beim Anlagenbetreiber und/oder ein öffentliches Datenportal), automatische Qualitätskontrolle der Registrierungen und automatische Detektion sowie Meldung (z.B. an Anlagenbetreiber u.a.). Bei technischen Problemen der Datenübertragung muss ggf. im Hybrid-Modus (z.B. nur Übertragung von Stationszustand (*state of health*) und getriggerten Ereignis-Wellenformen) oder gar teilweise ohne Echtzeit-Datenübertragung gemessen werden. Die Weiterentwicklung der Mobilfunktechnik (LTE-Standard etc.) wird heute noch auftretende Probleme aber in Kürze lösen.
- Im Hinblick auf eine online Datenübertragung, die kompatibel mit anderen seismologischen Einrichtungen ist, wird empfohlen, die Schnittstellen und das Datenformat vor Beginn der Einrichtung des Netzwerkes mit beteiligten Behörden, Datenzentren etc. abzusprechen. Als Austauschformate werden empfohlen: 1) SEED (SEED Reference Manual, 2010) und 2) GSE2.1 (GESTT-3, 1997). Auch die Metadaten sollen in den entsprechenden Formaten bereitgestellt und ausgetauscht werden. Es wird auf die Möglichkeit von SeedLink (Heinloo, 2000) und ArcLink zur standardisierten Datenübertragung hingewiesen.

GESTT-3, Provisional GSE2.2 –Message Formats and Protocols, Operations Annex 3. May 1997, GSE Technical Test 3.

([www.seismo.ethz.ch/prod/autodrm/provisional\\_GSE2.1.pdf](http://www.seismo.ethz.ch/prod/autodrm/provisional_GSE2.1.pdf)).

Heinloo, A., 2000. SeedLink design notes and configuration tips.

([geofon.gfz-potsdam.de/geofon/seiscomp/seedlink.html](http://geofon.gfz-potsdam.de/geofon/seiscomp/seedlink.html)).

ArcLink ist ein Protokoll zur Datenabfrage von archivierten Wellenform- und Metadaten über TCP/IP Verbindungen.

([www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/arclink](http://www.seiscomp3.org/wiki/doc/applications/arclink)).

SEED Reference Manual, 2010. SEED Reference Manual, Standard for the Exchange of Earthquake Data, SEED Format Version 2.4, May 2010. Incorporated Research Institutions for Seismology, Washington, DC.



### Zu 3) Datenintegration relevanter stärkerer seismischer Ereignisse

- Verknüpfung von Messungen nach DIN 45669 zur Beurteilung von Schäden nach DIN 4150 mit Messungen zur klassischen Überwachung: Generell können DIN-konforme Messungen zur Beweissicherung in Gebäuden auch zur Lokalisierung etc. von Ereignissen verwendet werden. Oft sind die Empfindlichkeiten jedoch geringer als in 1) vorgegeben, d.h. die Wellenformen der DIN-konformen Messungen sind nur für stärkere Ereignisse auswertbar. Die Hinzunahme der Daten der DIN-konformen Messungen zu der seismologischen Auswertung ist aber anzustreben, da hierdurch zusätzliche Informationen zur Charakterisierung größerer Ereignisse geliefert werden (z.B. zusätzlich abgedeckte Azimute bei Herdflächenlösungen usw.).
- Nicht DIN-konforme Messstationen, die aber modernen seismologischen Ansprüchen genügen, übertreffen technisch oft die Anforderungen der DIN 45669. Durch digitale Filterung können dann DIN-konforme Messungen simuliert werden. Wichtig ist, dass das Seismometer mindestens alle drei Jahre kalibriert wird, indem die Übertragungsfunktion zwischen 1 Hz und 80 Hz auf geeignete Normale zurückgeführt wird (siehe DIN 45669).
- Den staatlichen Diensten soll zur Erfüllung ihrer Aufgaben der Zugriff auf ausgewählte seismologische Betreiberdaten gewährt werden. Dies ist insbesondere deshalb notwendig, damit nach dem Auftreten eines spürbaren induzierten Erdbebens belastbare Aussagen zu Ort und möglicher Ursache des Ereignisses möglich sind.
- Umgekehrt sollen in den Überwachungssystemen der Betreiber auch seismologische Messdaten von staatlichen Diensten und Forschungsinstitutionen herangezogen werden. Hierdurch werden die Unsicherheiten der Herdparameter u.U. verringert.

#### Zu 4) Transparenz

- Eine seismische Überwachung sollte transparent sein: Gegenüber den Behörden und gegenüber der betroffenen Bevölkerung.
- Eine online Offenlegung der seismischen Wellenformen (alle oder ausgewählte Messstationen), z.B. über das Datenportal der BGR oder eine Webseite des Betreibers, kann die Transparenz der seismischen Überwachung fördern (proaktive Öffentlichkeitsarbeit etc.).
- Bereits eine teilweise Offenlegung der Registrierungen von beispielsweise nur 2 Messstationen pro geotechnischer Anlage kann die überprüfbare seismische Überwachung in Kombination mit den staatlichen Messnetzen deutlich verbessern, ohne schützenswerte Betriebsgeheimnisse aus dem Reservoirbereich offen zu legen. Dies erlaubt beispielsweise die schnelle Überprüfung der Hypozentralparameter seismischer Ereignisse durch Behörden oder die unterstützende Auswertung durch Forschungsinstitute.
- Bei eng zusammenstehenden geotechnischen Anlagen können Stationen mit offen vorliegenden Daten gemeinsam genutzt werden. Die Abstimmung der Stationsstandorte verschiedener Betreiber kann insgesamt eine Reduzierung der erforderlichen Stationsanzahl möglich machen.
- Wenn die seismischen Daten verschiedener Netzwerke in einem gemeinsamen Datenformat zugänglich vorliegen, dann können sie dahingehend ausgewertet werden, dass die Prozesse der induzierten Seismizität besser verstanden werden. Verschiedene Auswertemethoden (z.B. Herdflächenlösungen) können nur mit einer integrierten Datenbasis mehrerer kleiner Netzwerke zuverlässig durchgeführt werden.

#### **Haftungsausschluss:**

Diese Empfehlung wurde von den beteiligten Autoren gemeinsam nach ihrem besten Wissen und Verständnis auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnis zum derzeitigen Zeitpunkt (2011) erarbeitet. Eine Haftung der Autoren oder der durch sie vertretenen Institutionen für jegliche Folgen aus der Anwendung dieser Empfehlung wird ausdrücklich ausgeschlossen.

## Anhang

### **A1 Hinweise zur Standortsuche und -auswahl**

#### A1.1 Allgemeine Überlegung zur Standorteignung

Der Standort einer seismologischen Station hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der aufgezeichneten Erdbebensignale. Durch die sorgfältige Standortsuche und -auswahl lassen sich vor allem die beiden folgenden Qualitätskriterien beeinflussen:

- *Geringes Störsignalniveau im Frequenzbereich des Erdbebensignals:*  
Seismologische Störsignale stammen aus den unterschiedlichsten Quellen. Im Frequenzbereich 5-40 Hz, der für die hier diskutierte Anwendung relevant ist, sind hauptsächlich meteorologische und anthropogene Störquellen für Störsignale verantwortlich.
- *Geringe Verfälschung des Erdbebensignals durch die lokale Geologie:*  
Das Schwingungsverhalten des lokalen Standortuntergrundes wird von der lokalen Geologie und Morphologie beeinflusst. Erdbebenwellen können dadurch verstärkt oder abgeschwächt werden.

Neben den rein seismologischen Auswahlkriterien sind auch technische und logistische Überlegungen bei der Auswahl eines möglichen Standortes wichtig. Hierzu zählen:

- *Verfügbarkeit von technischer Infrastruktur (z.B. Strom, Datenleitung):*  
Permanente Stromversorgung und Datenverbindung sind generell zu bevorzugen, da hierdurch die Verfügbarkeit der Station erhöht und der Wartungsaufwand verringert wird.
- *Zugänglichkeit und Sicherheit des Standortes:*  
Funktionsstörungen müssen schnell zu beheben sein und Vandalismus an der Station vermieden werden. Auch die Anfälligkeit gegenüber Naturgewalten (z.B. Blitzschlag) sollte berücksichtigt werden.
- *Kosten der Umsetzung:*  
Oft können Baukosten durch die Nutzung geeigneter vorhandener Infrastruktur vermieden werden.

## A1.2 Standortsuche:

In einem ersten Schritt wird eine auf die Art der geotechnischen Anlage abgestimmte idealisierte Geometrie des Überwachungsnetzes festgelegt (siehe A2). Ausgehend von den idealisierten Standorten sollten Suchregionen für jeden möglichen Standort mit einem Suchradius  $r$  in Abhängigkeit der mittleren Ausdehnung des Überwachungsnetzwerkes ( $\langle D \rangle$ ) definiert werden:

$$r = \frac{\langle D \rangle}{10} < 2 \text{ km} \quad (\text{Gl. A1})$$

Die eigentliche Standortsuche kann dann in folgende Schritte gegliedert werden:

### A1.2.1 Vorauswahl möglicher Standorte:

Durch eine sorgfältige Vorauswahl möglicher Standorte können unnötige kostenintensive Feldarbeiten vermieden werden. Grundlage der Vorauswahl sollten aktuelle topographische und geologische Karten der Suchregion sein (Maßstab möglichst 1:25.000), anhand derer mögliche Standorte und Störquellen identifiziert werden können. Sehr hilfreich sind auch Online-Kartendienste, die eine Darstellung von aktuellen Luftbildern und zusätzlichen GIS-Daten erlauben. Ein herausragendes Beispiel für einen solchen Dienst findet sich bei SwissTopo (<http://map.geo.admin.ch>).

Mit Hilfe der Kartenanalyse werden vorrangig Ausschlussregionen um bekannte Störquellen festgelegt. Eine Liste möglicher Störquellen, mit Bewertung ihres Störniveaus und des möglichst einzuhaltenden Mindestabstandes, ist in Tabelle A1 gegeben. Standorte sollten nur außerhalb der Ausschlussregionen gesucht werden. Eine Liste möglicher geeigneter Standorte findet sich in Tabelle A2. Danach wird die Geologie der Standorte bewertet, wie in Tabelle A3 beispielhaft gezeigt.

<b>Störquellen</b>	<b>Störniveau</b>	<b>Abstand</b>	<b>N</b>
Industriegebiete, urbane Gebiete, Kraftwerke, Sägewerke, Pumpwerke, rotierende Groß-Maschinen, Sendemasten, Hochspannungsleitungen, Bahnlinien, Straßen, Fließgewässer, ...	hoch	1 km	<b>0</b>
Wald, landwirtschaftlich genutzte Flächen, ...	mittel	0,5 km	<b>0,5</b>
Grasland, niedrige Vegetation, offene Flächen, ...	gering	0 km	<b>1</b>

Tabelle A1: Liste möglicher Störquellen und deren Beurteilung.

<b>Standort</b>	<b>Eignung</b>	<b>S</b>
Bunker, WBH ohne Pumpen, Felsenkeller, Keller eines selten genutzten Hauses, ebenerdiger Schacht mit Fundament, ...	sehr gut	1
Keller eines wenig genutzten Gebäudes, ...	mittel	0.5
Keller eines täglich genutzten Gebäudes, ...	schlecht	0

Tabelle A2: Liste möglicher geeigneter Standorte und deren Beurteilung.

<b>Geologie</b>	<b>Eignung</b>	<b>G</b>
Kristallin, kompetente Gesteinskomplexe mit geringer Verwitterungsschicht, ...	sehr gut	1
Gut verfestigte Sedimentgesteine, ...	mittel	0.5
Sedimentbecken, Quartär, ...	schlecht	0

Tabelle A3: Liste möglicher geologischer Untergründe an Stationsstandorten und deren Beurteilung.

Die in den Tabellen A1 bis A3 gegebenen Werte N, S und G können zur systematischen Beurteilung und Priorisierung P der Standorte herangezogen werden:

$$P = w_N \cdot N + w_G \cdot G + w_S \cdot S \quad (\text{Gl. A2})$$

Die in der Gleichung A2 enthaltenen Gewichte der einzelnen Bewertungsparameter können anwendungsbezogen angepasst werden, sollten aber wie folgt angeordnet sein:

$$w_N > w_S \geq w_G \quad (\text{Gl. A3})$$

In jeder Suchregion sollten möglichst mindestens zehn potenzielle Standorte bewertet werden. Aus diesen Standorten sollten mindestens die fünf Standorte mit den höchsten Prioritäten P für die Standorterkundung vor Ort ausgewählt werden.

Anmerkung:

Es kann nötig sein, Suchregionen zu verlegen, weil keine Standorte mit ausreichend hoher Qualität gefunden werden können. Dies sollte immer in der Form geschehen, dass die ideale Netzgeometrie möglichst wenig verzerrt wird. Dabei hat die Beibehaltung der azimutalen Gleichverteilung der idealen Standorte höhere Priorität, als deren Stationsabstand vom Zentrum (Standort der geotechnischen Anlage). Die Suchregion im Zentrum des Netzwerkes sollte nicht verschoben werden. In dicht besiedelten Gebieten kann es von Vorteil sein, computergestützte Optimierungsverfahren zur Bestimmung der idealen Netzwerkgeometrie einzusetzen und dabei ein Modell der erwarteten Bodenunruhe zu berücksichtigen (siehe A2.2).

### A1.2.2 Standorterkundung im Feld

Bei der Standorterkundung müssen die bei der Vorauswahl getroffenen Bewertungen vor Ort überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Zusätzlich zu den oben genannten Punkten müssen folgende Abklärungen vorgenommen werden:

- 1) Ist die erforderliche technische Infrastruktur (Zeitzeichenempfang, Datenanbindung und Stromversorgung) vorhanden ? ( I )
- 2) Ist der Standort für Wartungsarbeiten zugänglich ? ( Z )
- 3) Ist der Standort sicher (Vandalismus, Blitzschlag, ...) ? ( V )
- 4) Ist die Umsetzung wirtschaftlich sinnvoll ? ( K )
- 5) Ist das Einverständnis des Eigentümers zu Bau und Betrieb vorhanden ? ( U )

Die Standorterkundung sollte schriftlich und mit aussagekräftigen Bildern umfassend dokumentiert und die voraussichtlichen Standorte der Stationskomponenten möglichst genau festgelegt werden. Anschließend müssen die Standortprioritäten P neu berechnet werden:

$$P = ( w_N \cdot N + w_G \cdot G + w_I \cdot I + w_V \cdot V + w_Z \cdot Z + w_K \cdot K ) \cdot U \quad (\text{Gl. A4})$$

In der Gleichung A4 können die Bewertungsparameter (N, G, I, Z, V, K, U) Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Die zugehörigen Gewichte sind anwendungsbezogen anzupassen, sollten jedoch wie folgt angeordnet sein:

$$w_N > w_I \geq w_V \geq w_Z \geq w_G \geq w_K \quad (\text{Gl. A5})$$

### A1.2.3 Testmessungen an geeigneten Standorten

Nach der Standorterkundung sollten in jeder Suchregion wenigstens an den drei Standorten mit der höchsten Priorität Testmessungen durchgeführt werden. Ziel der Testmessung ist den Bewertungsparameter N, der das höchste Gewicht bei der Bewertung der Standortqualität hat, aus einer objektiven Messung ableiten zu können.

Die Testmessung sollte möglichst mit Messgeräten durchgeführt werden, die denselben technischen Spezifikationen genügen wie die im späteren Dauerbetrieb eingesetzten Geräte. Wichtig sind hier vor allem die Gesamtempfindlichkeit und Dynamik des Messsystems sowie die Bandbreite des Messaufnehmers. Auch die Betriebsparameter der Testmessung, im Besonderen die Abtastrate und die Vorverstärkung des Messaufnehmers, müssen identisch zum Dauerbetrieb gewählt werden.

Die Testmessung kann im Batteriebetrieb mit lokaler Datenspeicherung erfolgen. Auf die kontinuierliche Datenaufzeichnung kann jedoch nicht verzichtet werden. Eine Synchronisation des Messgerätes mit einer absoluten Zeitbasis (z.B. über GPS) ist

wünschenswert, die Abweichung der Absolutzeit der internen Uhr sollte jedoch wenigstens im Bereich weniger Sekunden liegen.

Um einen Eindruck von der Bodenunruhe des Standortes im Frequenzbereich von 5-40 Hz zu gewinnen, kann eine Messdauer von wenigen Stunden an einem typischen Werktag ausreichend sein. Es wird jedoch empfohlen, die Testmessung für wenigstens 7 Tage durchgehend zu betreiben, um möglichst alle transienten Störsignale zu erfassen. So erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, ein lokales Erdbeben aufzuzeichnen und zur Beurteilung der Standortqualität heranziehen zu können.

Während der Testmessung sollten alle bekannten lokalen Störsignalquellen kurzzeitig in Betrieb genommen werden (z.B. Belüftungsanlagen, Wasserbehälter-Befüllung, usw.), um diese beurteilen zu können. Hierüber sollte ein Protokoll geführt werden, um die Signale bei der Auswertung der Testmessung zuordnen zu können.

#### A1.2.4 Bewertung der Testmessungen und Standortauswahl

Die Beurteilung der Testmessung sollte von einer Fachperson mit Erfahrung in der Auswertung seismologischer Daten erfolgen. Die Datenanalyse sollte dabei sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich erfolgen. Beispiele der jüngeren wissenschaftlichen Literatur zu diesem Themengebiet finden sich in der Liste der weiterführenden Literatur.

Folgende Punkte sollten in die Standortbewertung eingehen:

- Störsignalniveau im Frequenzbereich 5-40 Hz (z.B. /95) (F)
  - akzeptabel < 2000 nm/s; gut < 500 nm/s ; sehr gut < 100 nm/s
- Monofrequente Störsignale im Frequenzbereich 5-15 Hz (M)
  - akzeptabel <500 nm/s; gut < 200 nm/s ; sehr gut < 50 nm/s
- Transiente Störsignale im Frequenzbereich 5-15 Hz (T)
  - akzeptabel <500 nm/s; gut < 200 nm/s ; sehr gut < 50 nm/s
- Unsicherheit der Einsatzzeitbestimmung von Lokalbeben (Q)
  - akzeptabel  $\pm 0,1$  s; gut  $\pm 0,05$  s; sehr gut  $\pm 0,025$  s
  - falls kein Lokalbeben aufgezeichnet:  $Q = G / 1.25$

Die Bewertungsparameter (F, M, T, Q) können Werte zwischen 0 und 1 annehmen (z.B. akzeptabel = 0,5, gut = 0,8, sehr gut = 1 und 0 sonst). Damit kann die objektive Bewertung des Störsignalniveaus N mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$N = w_L \cdot L + w_M \cdot M + w_T \cdot T + w_Q \cdot Q \quad (\text{Gl. A6})$$

Die zugehörigen Gewichte sind anwendungsbezogen anzupassen, sollten jedoch wie folgt angeordnet sein:

$$w_L > w_M \geq w_T > w_Q \quad (\text{Gl. A7})$$

Abschließend kann die endgültige Standortbewertung durch Einsetzen des neuen Bewertungsparameters N aus Gleichung A6 in Gleichung A4 berechnet werden. Am Standort mit der höchsten Priorität sollte die seismologische Station errichtet werden.

#### *Weiterführende Literatur*

- Bormann, P., 1998. Conversion and comparability of data presentations on seismic background noise, *J. Seismol.*, **2**, 37-45
- Bormann, P., 2002. Seismic signals and noise. In Bormann, P. (ed.), *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 1, GeoForschungsZentrum, Potsdam, Chapter 4. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP\_r1\_ch4 bzw.: <http://www.gfz-potsdam.de/portal/cms/Bibliothek/Publizieren/C-Verlag/zu+Vetrieb/New+Manual+of+Seismological+Observatory+Practice+NMSOP;jsessionid=92B6130B99806506827A031D02869B69> (freie Online-Publikation)
- Groos J. & Ritter, J., 2010. Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. In Ritter, J. and Oth, A. (eds.), *Proceedings of the workshop Induced Seismicity*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, **30**, 157 pp., ISBN N° 978-2-91989-709-4)
- McNamara, D.E., & Boaz, R.I., 2011. PQLX: A seismic data quality control system description, applications, and users manual: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1292, 41 p.
- Trnkoczy, A., Bormann, P., Hanka, W., Holcomb, L.G & Nigbor, L.R, 2002. Site selection, preparation and installation of seismic stations. In Bormann, P. (ed.), *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 1, GeoForschungsZentrum, Potsdam, Chapter 7. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP\_r1\_ch7 bzw.: <http://www.gfz-potsdam.de/portal/cms/Bibliothek/Publizieren/C-Verlag/zu+Vetrieb/New+Manual+of+Seismological+Observatory+Practice+NMSOP;jsessionid=92B6130B99806506827A031D02869B69> (freie Online-Publikation)



## **A2 Typische Überwachungsszenarien**

Im Folgenden werden grundsätzliche Empfehlungen für die Durchführung einer Überwachung anhand von drei typischen Szenarien gegeben.

### A2.1 Detektion mit einer Einzelstation

Eine generelle Beobachtung (Detektion) von seismischen Ereignissen im unmittelbaren Umfeld einer geotechnischen Anlage ist grundsätzlich mit einer einzelnen 3-Komponenten-Messstation möglich, die den in 1) genannten Kriterien genügt. Diese Form der Überwachung ermöglicht im Wesentlichen den Nachweis von seismischen Ereignissen und die Bestimmung von Ereignisraten. Unter günstigen Umständen kann die Größenordnung der Lokalmagnitude, die Herdzeit und Entfernung von Ereignissen grob geschätzt werden.

Es empfiehlt sich eine Aufstellung der Einzelstation an einem geeigneten Standort (siehe A1) nahe der zu erwartenden Epizentren bzw. der Lage des geotechnisch genutzten Volumens im Untergrund. Bei der Überwachung mit einer Station ist die Diskriminierung zwischen seismischen Ereignissen und transienten Störsignalen (z.B. Straßenverkehr, Schienenverkehr, Industrieanlagen) erschwert. Die Häufigkeit von transienten lokalen Störsignalen hat daher bei der Standortauswahl eine hervorgehobene Bedeutung.

Eine Integration der Einzelstation in bestehende lokale oder regionale Netzwerke zur seismischen Überwachung (z.B. Landeserdbebendienst) sollte im Sinne einer transparenten Überwachung angestrebt werden. In diesem Fall empfiehlt sich eine frühzeitige Abstimmung der dazu notwendigen technischen Voraussetzungen sowie bei der Standortauswahl.

Grundsätzlich können auch die Daten von Messstellen nach DIN 45669 verwendet werden, falls die unbewertete Bodenschwinggeschwindigkeit als kontinuierlicher Datenstrom zur Verfügung steht und am Fundament eines Gebäudes oder im Freifeld gemessen wird.

Die grundsätzlichen technischen Voraussetzungen hinsichtlich der Datenübertragung, Datenspeicherung und Datenauswertung für die seismische Überwachung mit einer Einzelstation unterscheiden sich beim heutigen Stand der Technik nicht von denen für die Überwachung mit einem Netzwerk. Bei der technischen Realisierung sollte daher von Beginn an die optionale Erweiterung der Überwachung mit einem seismischen Netzwerk eingeplant werden. Dies betrifft insbesondere die Auswahl der verwendeten Software. Es steht eine Reihe geeigneter kommerzieller sowie freier und speziell anpassbarer Softwareprodukte zur Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenauswertung zur Verfügung.

Die Kernkomponenten seismischer Stationen (Seismometer, Datenrekorder) sind in der Regel nicht innerhalb weniger Tage am Markt verfügbar. Um eine

Datenverfügbarkeit von 98,5 % (359,5 von 365 Tagen pro Jahr) zu erreichen, sollten alle kritischen Komponenten vorrätig gehalten oder eine zweite identische Station betrieben werden.

Anmerkung:

Die Detektion von seismischen Ereignissen mit nur einer Station ist keine einfache Aufgabe. Einfache Detektionsalgorithmen, wie sie in den meisten seismischen Netzwerken zum Einsatz kommen, reagieren auf das Überschreiten einer vorgegebenen Signalamplitude. Wird dieser Schwellwert niedrig angesetzt, um kleiner Ereignisse zuverlässig zu erfassen, bedeutet dies im Allgemeinen auch, dass die Anzahl der Fehldetektionen ansteigt und ein hoher Bedarf an manueller Nachbearbeitung entsteht. Fortgeschrittene Detektionsalgorithmen können die Anzahl der Fehldetektionen deutlich reduzieren, müssen aber von erfahrenen Fachpersonen auf die lokalen Gegebenheiten angepasst und gepflegt werden.

### *Weiterführende Literatur*

Agius, M. R. & Galea, P., 2011. A single-station automated earthquake location system at Wied Dalam station, Malta. *Seismological Research Letters*, **82**, 545-559.

## A 2.2 Lokalisierung seismischer Ereignisse

### A 2.2.1 Isolierte geotechnische Anlage

Eine isolierte geotechnische Anlage liegt vor, wenn sich in einem Umkreis von 20 km keine weitere seismisch zu überwachende geotechnische Anlage befindet.

In diesem Fall sollte ein seismisches Netzwerk mit mindestens 5 seismischen Stationen, die jeweils den Kriterien in 1) genügen, eingerichtet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass unter optimalen Voraussetzungen auch Netzwerke mit nur 3 oder 4 Stationen für eine Lokalisierung verwendet werden können. Solche Netzwerke setzen für eine Lokalisierung jedoch eine hochpräzise Bestimmung sowohl von P- als auch S-Einsatzzeiten voraus und bieten außerdem keinerlei Redundanz gegenüber Stationsausfällen. Es wird deshalb davon abgeraten, Netzwerke zur Lokalisierung mit weniger als 5 Stationen im Regelbetrieb zu betreiben.

Die Geometrie des seismischen Netzwerkes ist von den zu erwartenden Hypozentren, der lokalen geologischen Struktur, der Lage und Art anderer seismischer Quellen (Straßenverkehr, Industrie) sowie der mit vertretbarem Aufwand betreibbaren möglichen Stationsstandorte abhängig. Bei ausgedehnten geotechnischen Anlagen (Ausdehnung >1 km; z.B. große Kohlenwasserstoff-Reservoirs) ist in der Regel eine größere Anzahl an seismischen Messstellen notwendig, um die geforderte Lokalisierungsgenauigkeit im gesamten

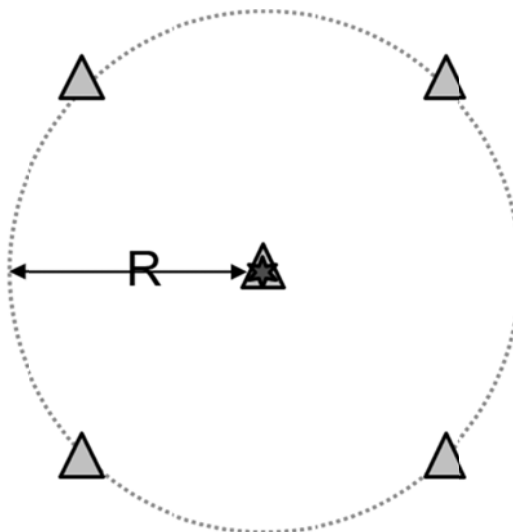
Ausdehnungsgebiet der Anlage zu gewährleisten. Es wird empfohlen, in einem solchen Fall die Einhaltung der Lokalisierungsgenauigkeit durch computergestützte Verfahren im Vorfeld zu simulieren und zu verifizieren.

In Abbildung A1 ist eine Stationsgeometrie angegeben, die im idealisierten Fall einer eng begrenzten geotechnischen Anlage (Ausdehnung  $< 1$  km), als optimal in Bezug auf die Erdbebenlokalisierung gelten kann. Dabei werden 4 seismische Stationen im gleichen Winkelabstand auf einem Kreis mit Radius  $R$  um die geotechnische Anlage angeordnet. Eine Messtation wird im Zentrum des Kreises direkt über der Anlage installiert. Der Radius  $R$  des Messnetzwerkes kann mit der erwarteten Herdtiefe der Seismizität über die Faustregel (Steinberg & Rabinowitz, 2003):

$$R \geq 2 \cdot \text{erwartete Herdtiefe}$$

bestimmt werden. Es wird jedoch empfohlen, den tatsächlichen optimalen Radius anhand von computergestützten Simulationen unter Verwendung eines Modells der lokalen Untergrundstruktur (seismische P- und S-Wellengeschwindigkeit) genauer abzuschätzen.

Eine obere Schranke für den Radius  $R$  ist außerdem durch die Anforderung gegeben, auch an den Kreisstationen Erdbeben, die im Zentrum des Netzes stattfinden und eine Größenordnung unter der Fühlbarkeitsgrenze liegen, mit einem Signal-Stör-Verhältnis von 3 aufzeichnen zu können. Aus diesem Grund sind Stationsradien größer 15 km bei der Überwachung eng begrenzter geotechnischer Anlagen in der Regel nicht sinnvoll.



**Abb. A1:** Optimale Geometrie eines Stationsnetzwerkes mit 5 Stationen (Dreiecke) zur Lokalisierung von Erdbeben im Zentrum des Netzwerkes. Vereinfachende Annahmen: Homogenes Geschwindigkeitsmodell, gleiche Störsignalniveaus an den Stationsstandorten und geringe ( $< 1$  km) Ausdehnung der geotechnischen Anlage.

Es empfiehlt sich, in einem ersten Schritt eine größere Anzahl möglicher Standorte anhand der Kriterien aus A1 in einem Umkreis von 15 km zu bestimmen. Dabei ist auf eine gleichmäßige azimutale Abdeckung zu achten. Für die endgültige Auswahl der Stationsstandorte des seismischen Netzwerkes empfiehlt sich die Verwendung computergestützter Verfahren zur Optimierung seismischer Netzwerke (siehe weiterführende Literatur).

Es wird empfohlen, die technischen Voraussetzungen für Datenübertragung, Datenspeicherung und Datenauswertung so zu gestalten, dass ein Datenaustausch mit seismologischen Diensten oder Behörden technisch jederzeit möglich ist. Es stehen dazu geeignete kommerzielle und freie Softwareprodukte zur Verfügung.

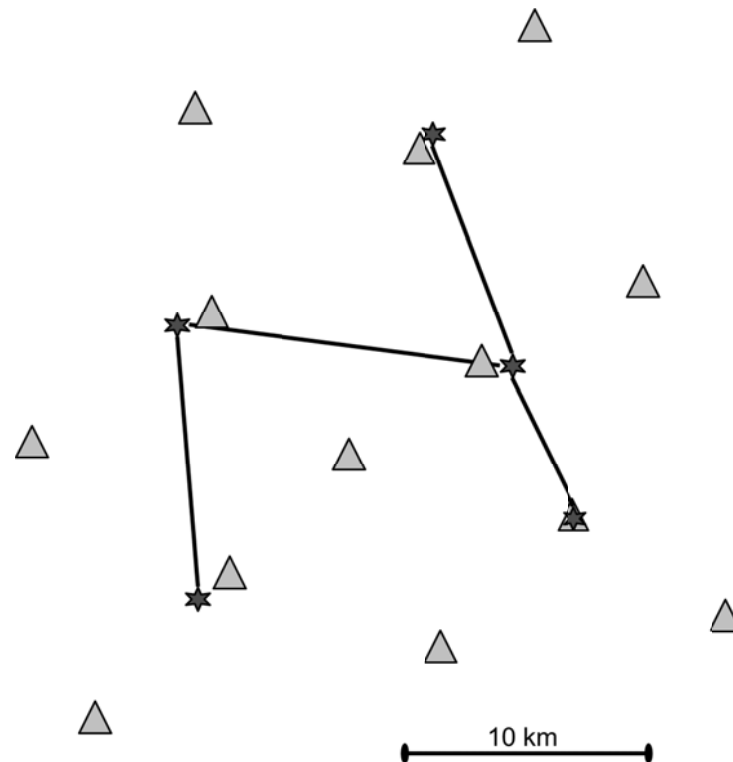
Falls ein Immissionsnetz mit Messstellen nach DIN 45669 besteht, wird die Einbindung geeigneter Messstellen in die Datenerfassung des seismischen Messnetzes empfohlen. Eine geeignete Messstelle liegt vor, falls die unbewertete Bodenschwinggeschwindigkeit als kontinuierlicher Datenstrom zur Verfügung steht und am Fundament eines Gebäudes oder im Freifeld gemessen wird. Mit dieser Maßnahme werden Redundanzen geschaffen, um den Ausfall von Messstationen des seismischen Netzwerkes kurzfristig zu überbrücken.

#### A 2.2.2 Gruppierung geotechnischer Anlagen

Unter einer Gruppierung geotechnischer Anlagen (GgA) wird im Folgenden eine Gruppe von seismologisch zu überwachenden geotechnischen Anlagen verstanden, die sich über einen zusammenhängenden Graphen mit einer maximalen Kantenlänge von 20 km verbinden lassen (siehe Beispiel in Abb. A2).

Eine GgA bietet den Vorteil, Stationen des seismischen Überwachungsnetzes so zu platzieren, dass sie von benachbarten Projekten gemeinsam genutzt werden können. Dadurch kann die Anzahl der zur seismologischen Überwachung benötigten Stationen oft stark reduziert werden. Im ungünstigsten Fall einer linearen Anordnung von N Anlagen sind dies N-1 eingesparte Stationen. Bei günstiger Geometrie kann die Einsparung bei 50% und mehr liegen (siehe dazu Abb. A2).

Zur Planung des Überwachungsnetzes für eine GgA sollte ein computergestützter Optimierungsalgorithmus verwendet werden. Idealerweise sollte dabei auch ein Modell des anthropogenen Störsignalniveaus im Untersuchungsgebiet berücksichtigt werden. Auch für den Fall, dass eine GgA aus einer isolierten geotechnischen Anlage entsteht oder nachträglich erweitert wird, ist eine computergestützte Netzwerkplanung zu empfehlen. In der Liste weiterführender Literatur finden sich dazu ausgewählte Fallbeispiele zur Netzwerkoptimierung.



**Abb. A2:** Skizze einer Gruppierung geotechnischer Anlagen (Sterne). Die Kanten des zusammenhängenden Graphen, der die Anlagen verbindet, sind weniger als 20 km lang (schwarze Linien). Die Anzahl der zur Überwachung aller 5 Anlagen benötigten seismologischen Stationen (Dreiecke) kann in diesem hypothetischen Beispiel von 25 auf 13 gesenkt werden.

Neben rein ökonomischen Gründen spricht auch die potenzielle Verbesserung der seismologischen Auswertung für eine gemeinsam koordinierte Überwachung einer GgA. So kann sich dadurch die Qualität der Lokalisierung verbessern und auch die Bestimmung des Bruchprozesses (Herdmechanismus) möglich werden.

Die technischen und qualitativen Anforderungen an die Stationen eines GgA-Überwachungsnetzes unterscheiden sich nicht von denen zur Überwachung einer isolierten geotechnischen Anlage. Entscheidend ist jedoch, dass die Daten aller Stationen in Echtzeit ausgetauscht werden und einheitliche Standards für die Datenübertragung, das Datenformat und die Beschreibung der Metadaten festgelegt werden. Bei den deutschen Erdbebendiensten haben sich dabei, wie in den meisten anderen Ländern weltweit, SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data) und SeedLink durchgesetzt. Es wird deshalb auch hier empfohlen, diese Standards zu nutzen.

Es wird empfohlen, die Daten des GgA-Überwachungsnetzes an einer Stelle zusammenzuführen und eine zentrale Auswertung und Datenspeicherung durchzuführen. So können auch hier die Kosten für Beschaffung, Betrieb und Personal optimiert werden. Eine zentralisierte Auswertung hat weiter den Vorteil,

dass für den Fall des Auftretens von induzierter Seismizität einheitliche Alarmierungskonzepte und klare Kommunikationswege definiert werden können.

Seismologische Dienste haben die nötige Erfahrung mit dem Betrieb von lokalen und regionalen Überwachungsnetzen. Im Besonderen sind die Erdbebendienste sehr gut mit den lokalen Besonderheiten der Erdbebensignale und deren Auswertung vertraut. Außerdem sind die Kommunikationswege von und zu Behörden und Bevölkerung durch die Informationspflicht der Dienste über die natürliche Seismizität erprobt und etabliert. Es ist deshalb sehr empfehlenswert, die Erdbebendienste frühzeitig in die Überwachung einzubeziehen.

Die Finanzierung der seismologischen Überwachung einer GgA kann über einen gemeinsamen Überwachungsfond geschehen, in den die Betreiber der betroffenen geotechnischen Anlagen anteilig einzahlen, um die Kosten für Geräte, Wartung, Betrieb und Personal gerecht zu verteilen.

#### *Weiterführende Literatur*

- Hardt, M. & Scherbaum, F., 1994. The design of optimum networks for aftershock recordings. *Geophysical Journal International*, **117**, 716-726.
- Kraft, T., Mignan, A., Husen, S. & Giardini D., 2012. Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland, *submitted to Geophysical Journal International*.
- Maurer, H., Curtis, A. & Boerner, D. E., 2010. Recent advances in optimized geophysical survey design. *Geophysics*, **75**, 75A177-75A194.
- Steinberg, D. M. & Rabinowitz, N., 2003. Optimal seismic monitoring for event location with application to On Site Inspection of the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty. *Metrika*, **58**, 31-57.