

## Einführung

Unter dem Begriff „*Geomesstechnik*“ werden geotechnische und geodätische Messsysteme, ihre wissenschaftlich-technische Methodik und ihre Anwendung inklusive der dazu erforderlichen ingenieurtechnischen Aufgabenstellungen zusammengefasst, die in dem vielschichtigen Prozess von der Konzeption eines geotechnischen Messprogramms, dessen Umsetzung im Entwurfs-, Bemessungs- und Ausführungsprozess bis zur Analyse und Bewertung der Messergebnisse mit Rückkopplung auf die erforderlichen Entscheidungsprozesse und gegebenenfalls deren Umsetzung in dem weiteren Entwurfs- und Bemessungsprozess erforderlich sind.

Im Rahmen der Ausführungsphase bildet die messtechnische Überwachung ausgewählter Größen den wesentlichen Bestandteil der als *Beobachtungsmethode* („*observational method*“) gemäß Eurocode 7 eingeführten und anerkannten Methodik, die auf einer Verknüpfung von rechnerischer Prognose, messtechnischer Überwachung und hierauf aufbauenden Handlungsszenarien beruht. Die Beobachtungsmethode ist heute ein unverzichtbares Instrument für eine sichere und den Regeln der Technik, insbesondere den Randbedingungen der Geotechnik, entsprechenden Entwurfs- und Bemessungspraxis und kann bei allen Formen von geotechnischen Strukturen, wie tiefen Baugruben, Tunneln, Gründungen, Geländeeinschnitten etc. zur Anwendung kommen.

Mit Anwendung der Beobachtungsmethode wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Bauen in und mit Boden und Fels durch besondere Randbedingungen und Anforderungen geprägt ist, die insbesondere darauf zurückzuführen sind, dass Boden und Fels ein natürlicher und, anders als Stahl oder Beton, kein genormter Baustoff ist. Der anstehende Baugrund muss im Rahmen einer Baugrunderkundung zunächst hinsichtlich seiner Zusammensetzung und seiner Eigenschaften erkundet werden und kann dabei immer nur stichpunktartig aufgeschlossen werden. Hierdurch bedingt verbleiben zwischen den Aufschlüssen Unsicherheiten bezüglich des Verlaufs von Baugrundsichten sowie der Baugrundeigenschaften. Zudem unterliegen auch innerhalb von Homogenbereichen die Baugrundeigenschaften einer ausgeprägten natürlichen Streuung. Diese räumliche Variabilität in Verbindung mit einer oft komplexen Baugrund-Bauwerk-Interaktion, die selbst bei Einsatz von numerischen Simulationsmodellen stets nur abstrahierend und vereinfachend abgebildet werden kann, führt dazu, dass rechnerische Prognosen mit der Anwendung der Beobachtungsmethode, d. h. durch eine fortlaufende messtechnische Be-

## XXII | Einführung

gleitung, also ein Monitoring der Ausführung und manchmal auch des Langzeitverhaltens geotechnischer Verbundkonstruktionen, zu kombinieren sind.

Das Monitoring, die messtechnische Überwachung physikalischer, insbesondere mechanischer Größen, ist ein wichtiges ingenieurtechnisches Werkzeug zur Qualitätssicherung von Herstellprozessen beim Bauen im und mit Boden und Fels, zur Überwachung von Bauwerken und ober- sowie unterirdischen Strukturen während ihres Baus und in ihrer Betriebsphase sowie bei der Beurteilung von Gefährdungen durch natürliche geotechnische Risiken wie Hangrutschungen und Massenströme (u. a. Muren, Lawinen).

Das geotechnische Monitoring ist eine übergreifende Teildisziplin der Geotechnik; sie ist von wachsender Bedeutung für alle Bereiche dieser Ingenieurwissenschaft. Der Einsatz geotechnischer und geodätischer Messverfahren ist eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis des Trag- und Verformungsverhaltens geotechnischer Konstruktionen und ist damit auch ein wichtiges Instrumentarium für die geotechnische Forschung – u. a. auch für regenerative Energiekonzepte, bei der Entsorgung von Reststoffen etc.

Geotechnisches Monitoring erlaubt die Früherkennung von Risiken oder Gefährdungen und damit das rechtzeitige Einleiten von Schutz- und Gegenmaßnahmen und unterstützt so die handelnden Personen maßgeblich dabei, Siedlungs- und Naturräume vor Naturgefahren zu schützen.

Das Monitoring von Herstellungsprozessen ist ein wichtiges Element des Risiko- und Qualitätsmanagements im Erd-, Grund- und Spezialtiefbau und trägt zur Optimierung von Bauprozessen und damit zur Effizienzsteigerung und Nachhaltigkeit bei.

Das fortlaufende Monitoring geotechnischer Verbundkonstruktionen während der Lebensdauer eines Bauwerks und natürlicher Gefährdungen dient der Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit, des Natur- und Katastrophenschutzes sowie als Beurteilungsgrundlage für Lebenszyklusanalysen.

Geotechnisches Monitoring ist geprägt durch den Einsatz hochspezialisierter Messverfahren und -methoden, die unter schwierigen Randbedingungen (Umwelteinflüsse, Baustellenbedingungen) eine dauerhaft zuverlässige Erfassung kleiner und kleinster Veränderungen ermöglichen müssen.

Die Entwicklung und Optimierung geotechnischer Messkonzepte ist eine komplexe und umfassende ingenieurtechnische Aufgabenstellung, die mit dem Erkennen der Notwendigkeit und der Definition der Ziele einer messtechnischen Überwachung beginnt und mit der Umsetzung und Einarbeitung der analysierten Messergebnisse in einen Bemessungs- und Überwachungsprozess endet. Dabei kann jeder einzelne Aspekt dieser vielschichtigen Aufgabenstellung maßgebend für den Erfolg der Messaufgabe sein. Die Geomesstechnik ist zugleich geprägt von einer besonderen Form der Interdisziplinarität, die aus der Verknüpfung der Geotechnik mit der Mess- und Prüftechnik (Feinmechanik, Elektrotechnik), der Geodäsie, der Geophysik und konstruktiven Belangen resultiert.

Mit den vorliegenden Empfehlungen des Arbeitskreises 2.10 „Geomesstechnik“ der DGGT (Deutschen Gesellschaft für Geotechnik) und der DVW (Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement) werden alle vorgenann-

ten Aspekte abgedeckt. Ausgehend von Grundüberlegungen zur Geomesstechnik (Kap. 1) und zur Zielsetzung geotechnischer Messungen (Kap. 2) folgt der Aufbau dieser Empfehlungen dem strukturiert sinnvollen Vorgehen des Planungsprozesses bei einer projektspezifischen Messaufgabe: Ausgehend von Überlegungen zu den zu erfassenden Messgrößen (Kap. 3) und den zur Erfassung dieser Messgrößen einzusetzenden Messsystemen und -verfahren (Kap. 4) werden das Datenmanagement, also Aspekte der Datenerfassung, -übertragung und -sicherung (Kap. 7), sowie die Datenauswertung, also der Prozess der Datenaufbereitung, -analyse und Visualisierung (Kap. 8) behandelt. Grundsätzliche bzw. anwendungsspezifische Empfehlungen zur Erstellung von Messprogrammen finden sich in den Kap. 5 und 6. Fallbeispiele zu den anwendungsspezifischen Empfehlungen verdeutlichen „Best-Practice“-Anwendungen. Auch Aspekte der Qualitätssicherung sowie vertragliche Rahmenbedingungen werden angesprochen (Kap. 9).

In der Summe bekommt der Anwender damit einen Leitfaden an die Hand, der alle wesentlichen Aspekte der Geomesstechnik nach dem Stand der Technik im Detail behandelt.

# 1

## Geomesstechnik

Die Geomesstechnik ist ein interdisziplinäres Fachgebiet von Geotechnik und Ingenieurgeodäsie. Sie hat zum Ziel, zur Beantwortung geotechnischer Fragestellungen mithilfe messtechnischer Methoden beizutragen. Sie umfasst die lösungsorientierte Entwicklung und Umsetzung von Messprogrammen z. B. zur Bestimmung des Ausgangszustandes für eine Beobachtungsmethode mit der Ermittlung von Kennwerten, zur Zustandsermittlung von Betriebs- oder Endzuständen sowie zur messtechnischen Erfassung von Zustandsänderungen. Dabei sind die Messergebnisse unter Einbeziehung von weiteren Beobachtungen und Informationen in geeigneter Weise zu analysieren und zu bewerten, sodass maßnahmenspezifische Sicherheiten bzw. Risiken eingeschätzt werden können und die Grundlagen für Entscheidungsprozesse zur Verfügung stehen.

Eine besondere Bedeutung der Geomesstechnik begründet sich durch die Etablierung der Beobachtungsmethode gemäß DIN EN 1997-1. Diese Methode beruht auf einer Verknüpfung von rechnerischer Prognose, messtechnischer Überwachung und hierauf aufbauenden Entscheidungsprozessen und Handlungen. Die hiermit einhergehende messtechnische Überwachung geotechnischer Objekte wird im Allgemeinen als „Geomonitoring“ bezeichnet. Die Beobachtungsmethode und damit auch die Geomesstechnik sind somit Instrumente für eine sichere und den Regeln der Technik entsprechende Entwurfs-, Bemessungs- und Ausführungspraxis, besonders bei komplexen Untergrundbedingungen und Bauwerken der Geotechnischen Kategorie 3. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz der Beobachtungsmethode während der Nutzung eines Bauwerks die Nachweisführung für dessen anhaltende Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit.

### 1.1 Ziele der Geomesstechnik

Die Geomesstechnik beinhaltet die messtechnische Zustandserfassung und Überwachung geologischer Körper sowie von Bauwerken im Erd-, Grund-, Fels-, Berg-, Ingenieur- und Deponiebau. Ihr kommt im Rahmen eines erhöhten Umweltbewusstseins, einer verstärkten Risikovorsorge vor Naturgefahren sowie erhöhter Ansprüche an die Kontrolle und Qualitätssicherung von Bauwerken und Bauverfahren eine besondere Bedeutung zu.

## 2 | 1 Geomesstechnik

Folgende Gesichtspunkte haben bei der Entscheidung über die Notwendigkeit dieser Empfehlungen des Arbeitskreises Geomesstechnik eine wesentliche Rolle gespielt:

1. Die Öffentlichkeit beansprucht im zunehmenden Maße, dass große Bauprojekte, einschließlich der Stadt- und Regionalplanung, mit Sensibilität und Transparenz geplant und durchgeführt werden.
2. Objektive, über die gesamte relevante Projektdauer erfasste geomesstechnische Daten sind eine wesentliche Voraussetzung für die gesellschaftliche Teilhabe und Akzeptanz.
3. Messtechnische Verfahren haben in den letzten Jahren hinsichtlich ihrer Methoden und Techniken eine intensive Weiterentwicklung erfahren. Dabei sind in der Baupraxis geotechnische und geodätische Überwachungsmessverfahren in vielfacher Weise zusammengewachsen. Diese Verfahren sind bislang noch nicht in einem umfassenden Dokument zusammengefasst und abgehandelt worden.
4. Im Rahmen einer einheitlichen Regulierung von Dienstleistungen in Europa ist in der grundlegenden geotechnischen Euronorm DIN EN 1997-1 (Eurocode 7) die „Beobachtungsmethode“ zum Entwurf geotechnischer Bauwerke aufgeführt. Geotechnische Überwachungsmessungen sind eine wesentliche Voraussetzung für die fachgerechte Anwendung dieser Methode.
5. Geomesstechnik ist eine Ingenieuraufgabe, die durch eine ganzheitliche und systematische Vorgehensweise charakterisiert ist, vergleichbar der, wie sie im konstruktiven Ingenieurwesen üblich ist. Ein geomesstechnisches Projekt umfasst Inhalte und Abläufe zur Planung, Durchführung, Auswertung und Interpretation geotechnischer Messungen, was eine Koordinierung mit Planern und anderen am Bau Beteiligten erforderlich macht.
6. Das Risikobewusstsein der Fachleute und der Öffentlichkeit verlangt, dass potenzielle Gefährdungen aus Naturgefahren und Baumaßnahmen zuverlässig eingeschätzt und sinnvolle Maßnahmen getroffen werden. Geomesstechnik ist dabei ein notwendiger Bestandteil des Risikomanagements.

Dieser Leitfaden soll helfen, das notwendige Wissen zur Geomesstechnik bereitzustellen und für typische Aufgabenstellungen exemplarische Handlungsanweisungen für ein dem Stand der Wissenschaft und Technik entsprechendes Vorgehen zu geben.

### 1.2 Sensibilität, Transparenz, Akzeptanz

Die Sicherung des Lebensraumes der modernen Gesellschaft ist verbunden mit der Errichtung und dem Betrieb von Einrichtungen und Maßnahmen gegen Naturgefahren (z. B. Hangrutschung, Hochwasser) sowie von aufwendigen Bauwerken und der Nutzung des Untergrundes (z. B. zur Rohstoff- und Energiegewinnung, Deponiebau). Im Vergleich zur Vergangenheit ist in den letzten Jahren eine erhöhte Sensibilität der Gesellschaft gegenüber diesen Projekten festzustellen, die insbesondere bei Eingriffen in die Natur, dramatischen Unfällen oder medienwirksamen

## 3 Messgrößen

### 3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel informiert über grundsätzlich in der Geomesstechnik betrachtete Messgrößen, mit deren Hilfe das Verhalten des Untergrunds sowie das Zusammenwirken von Boden, Bauverfahren und Baukonstruktionen beobachtet werden können.

Das Kapitel beginnt mit einer Erläuterung zum Raumbezug der geomesstechnischen Informationen auf Basis von Bezugssystemen. Je nach Komplexität der Aufgabe, Größe des Projektgebiets und Anforderungen an die Genauigkeit sind verschiedene Varianten des Raumbezugs möglich. Zur Entscheidung über die zweckmäßigste Variante ist ein grundlegendes Verständnis der Zusammenhänge unabdingbar.

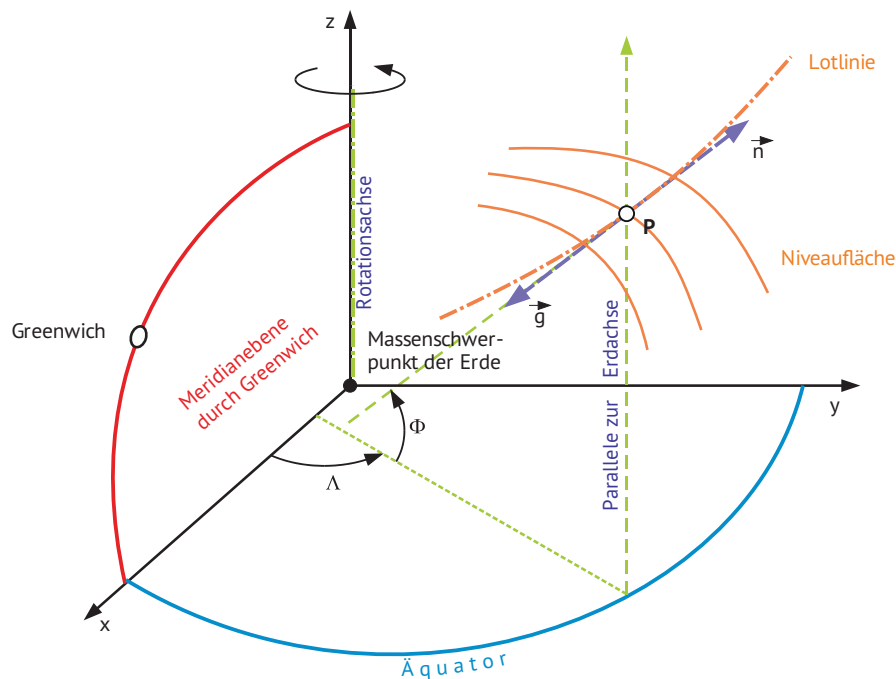
Anschließend werden die wichtigsten, in der Geomesstechnik betrachteten geometrischen, mechanischen und geophysikalischen Messgrößen vorgestellt, ergänzt um umweltbezogene Messgrößen (Einwirkungen) und Volumenströme (Durchflüsse). Jede der betrachteten Messgrößen wird zunächst grundsätzlich beschrieben; anschließend werden häufige Anwendungsgebiete genannt.

Die zur Erfassung der Messgrößen geeigneten Messverfahren werden im unmittelbar anschließenden Kap. 4, die zugehörigen Messprogramme im Kap. 6 beschrieben.

### 3.2 Bezugssysteme (Raumbezug)

#### 3.2.1 Definition von Bezugssystemen

Ein Bezugssystem ist erforderlich, um das Verhalten ortsabhängiger Größen eindeutig und vollständig zu beschreiben. Es wird definiert, indem man einen Bezugspunkt wählt und die Raumrichtungen festlegt. Zudem ermöglicht es, Koordinatensysteme einzuführen, mit denen Ereignisse durch Angabe ihrer raumzeitlichen Koordinaten mathematisch beschrieben werden können. Von einem Raumbezug spricht man, wenn die Lage (1-D, 2-D oder 3-D) diskreter Objekte in Bezug zur Erde angegeben werden soll. Grundlage für den Raumbezug sind sog. Raumbezugssysteme, wie z. B. globale, nationale oder lokale Koordinaten- und Höhenbezugssysteme.



**Abb. 3.1** Natürliches Bezugssystem.

Ein *natürliches Bezugssystem* für Positionen auf der Erdoberfläche wird durch das Schwerefeld der Erde gebildet (Abb. 3.1). Dieses Erdschwerefeld wird u. a. durch die Anziehungskraft der Erdmasse (Gravitation), durch die Zentrifugalkraft der rotierenden Erde und durch die Masseninhomogenitäten im Erdinnern mit ihren lokalen und zeitlich variierenden Anomalien bestimmt; es wird durch den örtlichen Lotvektor  $\vec{g}$  repräsentiert. An verschiedenen Orten aufgehängte Schnurlote sind nicht parallel zueinander, da sie jeweils in Richtung zum Erdmittelpunkt weisen (man spricht von der *Konvergenz der Lotlinien*). Darüber hinaus verlaufen die Lotlinien nicht geradlinig; sie sind vielmehr gekrümmte Raumkurven (Abb. 3.1).

Der örtliche Lotvektor  $\vec{g}$  spannt zusammen mit der Richtung der Erdachse eine Ebene auf. Der Winkel zwischen dieser Ebene und der Meridianebene durch Greenwich wird als *astronomische Länge*  $\Lambda$  bezeichnet. Die *astronomische Breite*  $\Phi$  ist der Winkel des negativen Lotvektors  $\vec{n}$  in Bezug zur Äquatorialebene (Abb. 3.1). Beide Größen (astronomische Koordinaten) werden zumeist in den Dimensionen Grad, Minute und Sekunde angegeben. Eine Angabe der dritten Dimension, der Höhe, ist hierbei direkt nicht vorgesehen.

Eine Fläche, die von den Lotlinien senkrecht durchdrungen wird, ist eine *Niveaulfläche* (Abb. 3.2). Eine spezielle Niveaulfläche, welche die unter den Kontinenten fortgesetzt gedachte, vorhandene Meeresoberfläche unter Ausschaltung äußerer Kräfte (z. B. Wind und Meeresströmungen) darstellt, wird als *Geoid* (Abb. 3.2) bezeichnet.

Da das Geoid keine Fläche ist, die sich mit verhältnismäßig einfachen mathematischen Formeln darstellen lässt, ist es als Bezugsfläche für Lagemessungen ungeeig-

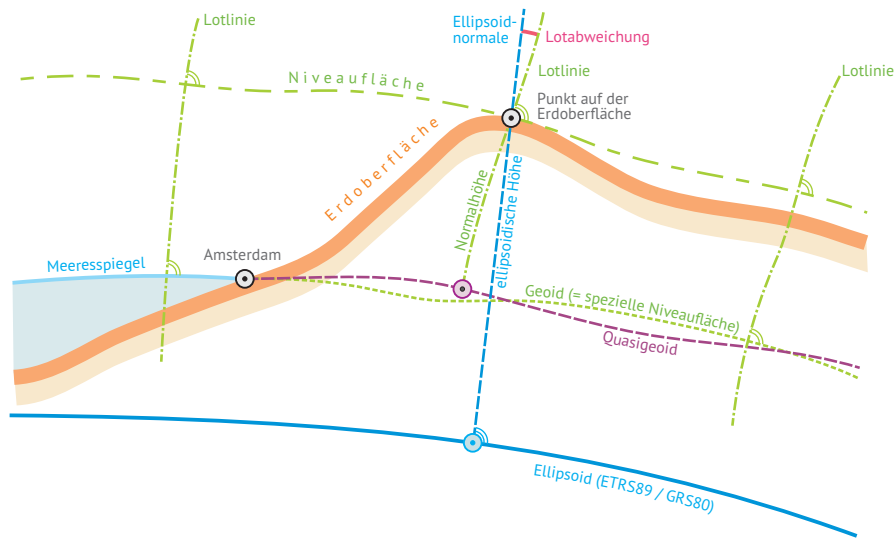


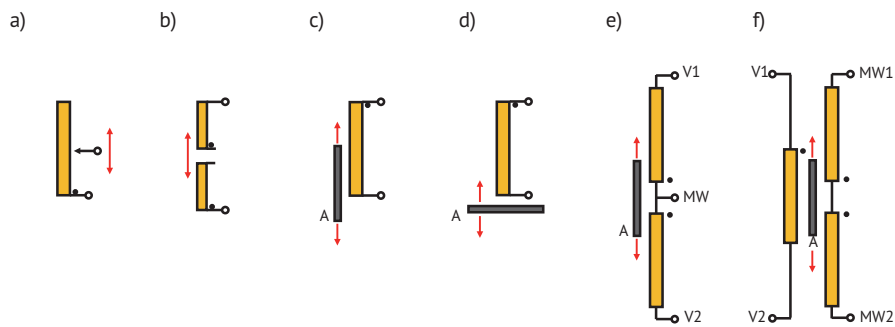
Abb. 3.2 Niveaufläche, Geoid, Quasigeoid, Lotlinie, Ellipsoid.

net. Man verwendet folglich für Lagemessungen und nur dafür sog. mathematisch-geometrische Ersatzflächen. So werden in der Landesvermessung als Ersatzflächen Rotationsellipsoide und bei kleineren Staaten Kugelflächen benutzt. Für Messgebiete mit Ausdehnungen von bis zu  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$  werden für normale Vermessungen als Ersatzflächen Ebenen gewählt. Diese Ersatzflächen, z. B. die Rotationsellipsoide, können nun so in ihren Abmessungen und in ihrer Lagerung in Bezug zur Erde gewählt werden – man spricht hier von der Festlegung des *geodätischen Datums* –, dass sie entweder die Erde als Ganzes weltweit oder aber nur regional, z. B. für einen Staat, bestmöglich approximieren. Entsprechend werden die Bezugssysteme als global, national oder lokal bezeichnet. Bei der Lagerung des Ellipsoides wird darauf geachtet, dass die Achse des Rotationsellipsoides zum Zeitpunkt der Definition parallel zur realen Erdachse verläuft.




Die Abbildung der tatsächlichen Erdoberfläche auf die Oberfläche eines Rotationsellipsoides erfolgt derart, dass Punkte auf der Erdoberfläche entlang der Ellipsoidnormalen verschoben werden (Abb. 3.3). Der Lotfußpunkt auf der Oberfläche des Ellipsoides ist dann Träger der Lageinformation des Punktes mit den Koordinaten *geografische Länge*  $L$  und *geografische Breite*  $B$  (wieder in den Dimensionen Grad, Minute und Sekunde), die natürlich von den gewählten Abmessungen und von der Lagerung des Rotationsellipsoides (geodätisches Datum) abhängen. Der Abstand des Punktes von der Oberfläche des Ellipsoides ist seine *ellipsoidische Höhe*, die allerdings in den Bereichen der Geotechnik und des Bauingenieurwesens kaum eine Bedeutung hat. Der Winkel zwischen der Ellipsoidnormalen und dem örtlichen Lotvektor in einem Punkt wird als *Lotabweichung* (Abb. 3.2) bezeichnet.

Berechnungen mit den geografischen Koordinaten auf der Oberfläche eines Ellipsoides auszuführen, ist recht aufwendig. Aus diesem Grund werden die ellipsoidischen Koordinaten mit sog. Abbildungsgleichungen in ebene Koordinaten, wie z. B. die UTM-Koordinaten, überführt (siehe Abschn. 3.2.2).





Legende:

	Schleifer	V1/V2	Wechselspannung
	Anker/Tauchanker	MW	Messwert
	Spule		

**Abb. 4.2** (a–d) Bauarten induktiver Wegaufnehmer, (e) Messprinzip Differenzialdrossel, (f) Differenzialtransformator.

In der Praxis werden für induktive Wegaufnehmer im geomesstechnischen Bereich sehr häufig die Bauarten der Differenzialdrossel (Abb. 4.2e) bzw. des Differenzialtransformators, LVDT (linear variable differential transformer), (Abb. 4.2f) eingesetzt.

Bei der Differenzialdrossel bewirkt die Bewegung eines ferromagnetischen Kerns (Tauchanker) eine Änderung der Induktivität der beiden in Reihe geschalteten Spulenhälften. Differenzialtransformatoren bestehen aus einer Primärspule, die mit Wechselspannung gespeist wird, und den beiden (gegenläufig) geschalteten Sekundärspulen. Die Primärspule induziert in den Sekundärspulen jeweils eine Spannung, die sich in der Mittelstellung des Tauchankers gegeneinander aufheben. Bei der Bewegung des Tauchankers verändert sich die Messspannung proportional zum Weg.

Beide Bauarten arbeiten praktisch verschleißfrei und sind für schnelle Messungen geeignet, im Gegensatz zum resistiven Sensorprinzip. Sie sind wenig empfindlich gegenüber Temperaturunterschieden. Die benötigte Wechselspannung erfordert allerdings eine aufwendige Messverstärkertechnik. Kapazitive Änderungen der Messleitungen bewirken relativ große Messwertänderungen. Deshalb wird empfohlen, induktive Wegsensoren immer mit der vorgesehenen Messkabellänge zu kalibrieren.

Die Spulen im Sensorgehäuse der Differenzialdrossel oder des LVDT können verschweißt oder vergossen in druckwasserdichter Ausführung hergestellt werden. Der kontaktlos arbeitende Tauchanker benötigt keinen Schutz gegen Wasserdruck oder Feuchtigkeit. Damit sind diese Bauarten auch Unterwasser mit langer Lebensdauer einsetzbar.

*Kapazitive Wegaufnehmer* beruhen auf dem Prinzip, dass sich die elektrische Kapazität zwischen den Elektroden eines Kondensators oder eines Kondensatorsystems bei sich gegenseitig ändernden Abständen der Kondensatorplatten auch

56 | 4 Messsysteme und -verfahren

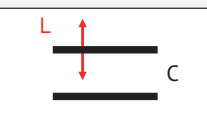
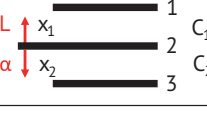
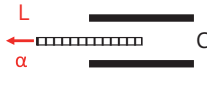
Mechanischer Aufbau	Modell	Eingang
(1) Kondensator mit verschiebbarer Elektrode		Länge L
(2) Differential-Kondensator		Länge L oder Winkel $\alpha$
(3) Kondensator mit verschiebbarem Dielektrikum		Länge L oder Winkel $\alpha$

Abb. 4.3 Bauarten kapazitiver Wegaufnehmer nach Schlemmer (1996).

verändert. Davon kann eine Elektrode die anzumessende Oberfläche selbst sein. Die gemessene Kapazität ist dann ein Maß für den Abstand bzw. für die Abstandsänderung. Kapazitive Wegsensoren gibt es in verschiedenen Bauarten, wie z. B. in Abb. 4.3 dargestellt.

Gegenüber kontinuierlich arbeitenden Messsystemen besitzen *inkrementelle Wegaufnehmer* im Innern eine Maßverkörperung mit einer sich wiederholenden, periodischen Zählspur. Die Messung beruht auf einer Richtungsbestimmung und einer Zählung. In Abb. 4.4 ist das Grundprinzip des Abtastsystems eines derartigen inkrementellen Wegaufnehmers dargestellt. Die Glasplatte mit dem Strichgitter ist mit dem Messtaster fest verbunden, sodass die Bewegungen des Tasters vom Abtastsystem erfasst werden.

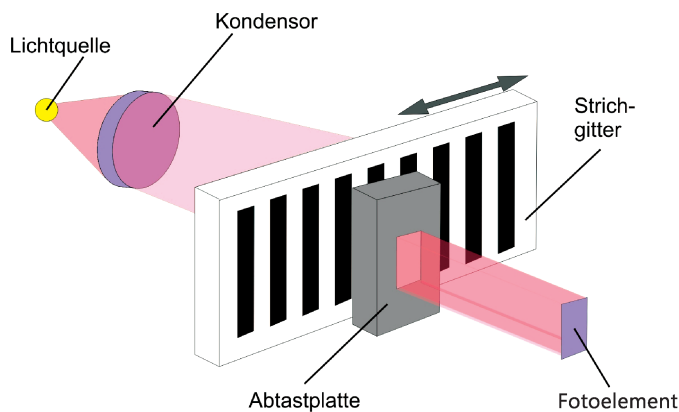
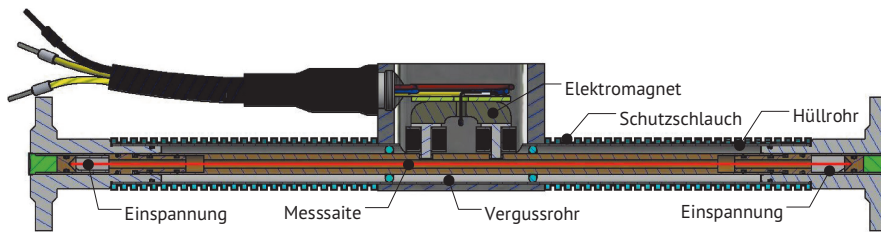


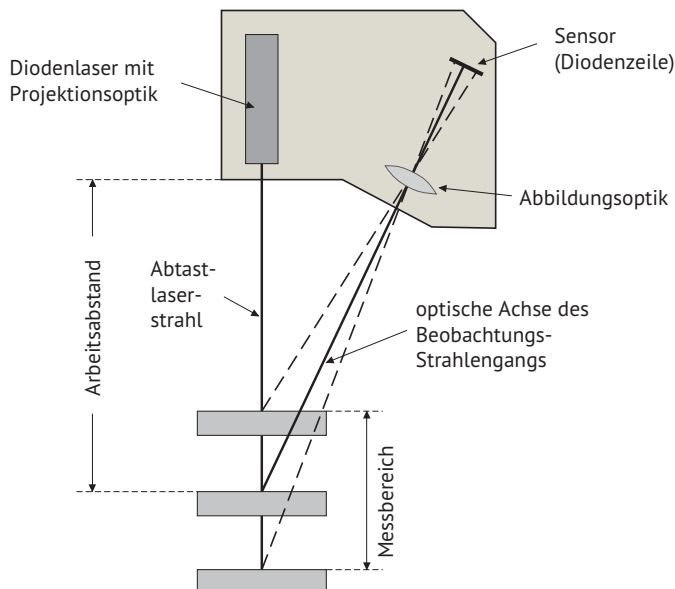
Abb. 4.4 Abtastsystem eines inkrementellen Wegaufnehmers (nach Fischer 1990).



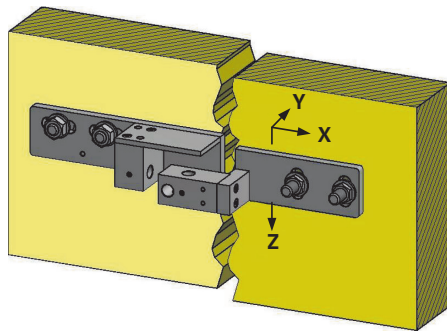
**Abb. 4.5** Messprinzip eines Schwingsaitenaufnehmers (GLÖTZL 2020).

Bei einem *Schwingsaitenaufnehmer* wird eine gespannte, metallische Saite durch eine elektromagnetische Anregung in Transversalschwingungen versetzt (Abb. 4.5). Die Eigenfrequenz der Schwingensaite ist abhängig von der mechanischen Spannung, der Dichte des Saitenmaterials und der Länge der Saite. Spannungs- oder Temperaturänderungen bzw. die Durchbiegung einer Membran, mit der die Saite verbunden ist, führen zu einer Längenänderung der Saite und damit zu einer Änderung der Eigenfrequenz. Die Schwingungen der Saite induzieren in einem Magnetfeld eines Elektromagnetsystems eine Spannung gleicher Frequenz, über die dann die Eigenfrequenz und somit über eine entsprechende Kalibriergleichung die Längenänderung der Schwingensaite bestimmt werden kann. In Abb. 4.5 ist die aktive Messbasis des Sensors mit der gespannten Schwingensaite mechanisch durch die Fixpunkte festgelegt. Für Dehnungsaufnehmer beträgt die Messbasis typischerweise 150–250 mm. Damit können in der Regel Dehnungen bis  $3000 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\epsilon$ ), bei einer Auflösung von  $\text{ca } \pm 1 \mu\epsilon$ , gemessen werden.

Optional wird das Dehnungsverhalten des Basissensors z. B. unter Mitwirkung einer gespannten Feder auch zur Wegmessung mit einem größeren Messbereich ein-



**Abb. 4.6** Prinzip eines Triangulationssensors.



**Abb. 4.35** Funktionsprinzip 3-D-Fissurometer (GLÖTZL GmbH, Rheinstetten).

Als weitere Wegaufnehmer werden für die Messung Sensoren mit dem Messprinzip *Schwingsaite* (vgl. Abschn. 4.2.1.1) eingesetzt (typische Messbereiche 50–300 mm, Linearität < 0,5 % v. E.).

Ein 3-D-Fissurometer kann Relativverschiebungen an Klüften in drei aufeinander orthogonal stehenden Richtungen erfassen (Abb. 4.35).

Die Risse werden mechanisch durch zwei unabhängige Geräteteile überbrückt, die an der Bruchzone im Bauteil links und rechts davon fixiert werden. Eine Seite der Mechanik bildet das Widerlager für die Taststifte der Wegaufnehmer, die auf der anderen Seite mit ihrem Gehäuse z. B. in Bohrungen fixiert sind. Der Messbereich je Richtung beträgt max.  $\pm 15$  mm, kann aber je nach Gesamtmessbereich des eingesetzten Wegaufnehmers (in der Regel bis max. 50 mm) bei Bedarf nachjustiert werden.

Beim Einsatz von Fissurometern ist grundsätzlich zu beachten, dass damit lediglich die Distanzänderungen zwischen den fixierten Punkten gemessen werden. Es kann damit aber nicht ermittelt werden, welche Seite des Risskörpers sich absolut bei der Beobachtung verschiebt und welche Seite fest (unverschieblich) bleibt, oder aber, ob sich beide Seiten zusätzlich zu der Relativverschiebung auch absolut verschieben. Es handelt sich daher um ein relatives Messverfahren.

#### 4.3.1.11 Sondenextensometer

Als *Sondenextensometer* (z. B. Gleitmikrometer) bezeichnet man portable Messinstrumente, welche zur Ermittlung von Längenänderungen zwischen zwei Messpunkten innerhalb eines Messrohres dienen. Hierfür werden vorab im Baugrund oder in Betonstrukturen Messrohre eingebaut, die mit Zement-Bentonit-Suspensionen im zu messenden Medium verankert werden. Die Messrohre sind in der Regel im Abstand von 1 m mit teleskopierbaren Messmarken ausgestattet. Beim Messvorgang wird das Sondenextensometer durch den Messtechniker jeweils zwischen zwei Messmarken gespannt und die Länge der aktuellen Messbasis ermittelt. Durch den Abgleich zu einer Nullmessung aus dem unbeeinflussten Zustand erhält man die differenzielle Längenänderung zwischen den Messmarken entlang eines Messrohres im Vergleich zur Nullmessung. Durch Integration der Verschiebungen über die Einzelabschnitte ergibt sich die Gesamtverschiebung entlang des Messrohres.

**Tab. 4.3** Kennwerte und Merkmale für ausgewählte Sondenextensometer (Gattermann und Stahlmann 2006).

Kennwerte und Merkmale	Systeme verschiedener Hersteller, Messbasis der Sonde je 1 m		
	Inkrex	Gleitmikrometer/TRI- VEC	Gleitdeformeter
Messrohre	ABS Ø 70/60 mm	HPVC Ø 63/51 mm	
Messmarke	Messingring Ø 86/70,5 mm	Teleskopkupplung Messing Ø <sub>außen</sub> 68 mm	Teleskopkupplung Kunststoff Ø <sub>außen</sub> 67 mm
Sondendurchmesser bzw. Messkopf	46 mm	32/48 mm	47 mm
Messbereich Sonde	±20 mm	±10 mm	98 (±49) mm
Messauflösung	±0,01 mm	±0,001 mm	±0,01 mm
Messunsicherheit	±0,05 mm	±0,003 mm	±0,03 mm

Die Systeme sind besonders für hochpräzise mobile Messungen in Lockergesteinen, Fels und Beton, im Tunnelbau, in Pfählen, in Stützwänden und für Setzungsmessungen in Dämmen und Gründungen geeignet.

Mit dem System TRIVEC wird in vertikalen Messrohren die Messung der axialen Längenänderung zusätzlich mit einer biaxialen Neigungsmessung (Messbereich ±10° zur Vertikalen) kombiniert. In Tab. 4.3 sind die Eigenschaften einiger ausgewählter Sondenextensometer gegenübergestellt.

Gegenüber automatisierten Messungen (Bohrlochextensometer) sind die diskontinuierlichen Messungen mit Sondenextensometern aufwendiger. Für viele Anwendungen ergeben sich aber Vorteile durch die vergleichsweise hohe örtliche Auflösung (in der Regel 1 m) und die Langlebigkeit der Systeme. Während das Messrohr fest im Boden verbleibt, kann die Sonde regelmäßig kalibriert oder auch ersetzt werden. In Staumauern existieren Messserien, die seit mehr als 30 Jahren durchgeführt werden.

#### 4.3.1.12 Konvergenzmessgeräte

Zur Bestimmung von relativen Distanzänderungen zwischen zwei Punkten kann ein Konvergenzmessgerät verwendet werden. Typische Anwendungsbereiche sind Verformungsmessungen in einem Tunnelquerschnitt und die Überwachung der Kopfverformungen bei Baugruben und Schächten.

Der Abstand zwischen den Messpunkten wird entweder über einen Invar-Draht mit fester Länge und Kupplungen an den Enden für jede einzelne Messstrecke bzw. mit einem gelochten Konvergenzmessband aus Stahl überbrückt. Die Messpunkte bestehen aus Konvergenzmessbolzen, an denen das Messgerät beidseitig über Kreuzgelenke beweglich eingehängt und eingespannt ist. Im Geräteteil wird über

## 5

### Grundsätze bei der Erstellung von Messprogrammen

Die Erstellung von Messprogrammen ist ein konzeptioneller Prozess, der einem allgemein gültigen Ablauf folgt, jedoch auf das speziell zu betrachtende Projekt abgestimmt werden muss. Die einzelnen Entwicklungsschritte von Messprogrammen laufen in der Praxis nicht streng nacheinander ab. Vielmehr handelt es sich um einen iterativen Gestaltungsprozess auf Basis von vorangegangenen Projekterfahrungen. Trotzdem sind alle nachfolgend genannten Schritte erforderlich, da diese systematisch aufeinander aufbauen. Grundlegende Anforderungen an geotechnische Messprogramme sind in DIN EN ISO 18674-1:2015-09 formuliert.

#### 5.1 Bestandteile des Messprogramms

Messprogramme müssen schriftlich fixiert werden. Häufig ist eine Bestätigung/Freigabe durch den Projektverantwortlichen, den Prüflingenieur oder die Aufsichtsbehörde erforderlich. Folgende Bestandteile sollten enthalten sein:

- Beschreibung der Projektbedingungen und geotechnische Fragestellungen,
- Verantwortlichkeiten und Verteilerkreis,
- Rhythmus der Informationsteilung,
- Angaben zum Informationsaustausch,
- Liste der Messpunkte mit eindeutiger Bezeichnung,
- einzusetzende Messverfahren und Messinstrumente bzw. -systeme,
- zulässige Messunsicherheit, Angaben zu deren Nachweis,
- Anforderungen an Überprüfung/Justierung/Kalibrierung der Messinstrumente,
- Festlegungen zur Durchführung der Messungen (z. B. Messanweisung),
- Messbeginn, Messzeitpunkte, Messintervalle, Festlegungen zu gegebenenfalls erforderlichen Sondermessungen,
- Schwellen-, Eingreif- und Alarmwerte (siehe Abschn. 5.7.2),
- Anforderungen an die Datenübertragung,
- Anforderungen an Auswertung, Dokumentation, Berichtswesen und Archivierung,
- Festlegungen zur Alarmierung der Projektverantwortlichen (wer, wann, wie),
- Skizzen/Übersichtspläne mit der Lage der Messpunkte.

Wertvolle Hinweise zur Herangehensweise bei der Erstellung geotechnischer Messprogramme sind in Dunnycliff et al. (2012, Kap. 94) gegeben. Wesentliche Anforderungen an geodätische Messprogramme werden in DIN 18710-1:2010-09, Abschn. 4.3, an Messprogramme im Bereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltungen in VV-WSV 2602 (2012), benannt.

## 5.2 Definition der allgemeinen Projektbedingungen und Messziele

Bevor die konkreten geotechnischen Fragestellungen herausgearbeitet werden, müssen die übergeordneten Projektziele und -bedingungen im Messprogramm benannt werden. Zudem ist es erforderlich, in dieser frühen Entwurfsphase von Messprogrammen diejenigen Mechanismen zu identifizieren, die Einfluss auf das Verhalten des zu beobachtenden Objektes haben. Im Rahmen des Risikomanagements nach Abschn. 1.5 müssen die mit dem Projekt verbundenen (geotechnisch relevanten) Risiken identifiziert, analysiert und bewertet werden. Diese Betrachtungen sind zunächst unabhängig von der späteren messtechnischen Realisierung durchzuführen.

Folgende Projektbedingungen sollten beispielsweise bei Bauprojekten beschrieben werden:

- Projektgebiet (Baugrund, Bauwerk):
  - Kennwerte,
  - Besonderheiten (Trennflächen etc.),
  - Ausdehnung des beeinflussten Bereiches, Bezugssysteme,
- existierende Modellierungen und statische Nachweise:
  - Beschreibung erforderlicher bzw. existierender Modelle (z. B. Spannungs-Verformungs-Modelle, Grundwasserströmungsmodelle),
  - Benennung der räumlichen Modellgrenzen,
  - modellierte Einwirkungen/Lastfälle/Tragwiderstände,
- Formulierung der erwarteten Erkenntnisse aus den Messungen (bzw. Bezug auf die Zielsetzung laut Kap. 2), beispielsweise:
  - Rückwirkung auf Konstruktion und Tragwirkung des Bauwerks,
  - potenzielle Ursachen für Spannungsänderungen und Deformationen,
  - voraussichtliche zeitliche Entwicklung der Spannungen und Deformationen in Größe und Richtung,
  - potenzielle Folgen der Spannungsänderungen und Deformationen,
  - Validierung/Kalibrierung der Modellierung,
  - Alarmierung, Warnung,
- geotechnisch relevante Risiken durch das/für das Projekt:
  - Wahrscheinlichkeit,
  - Konsequenzen,