



Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Grundbau

Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit

für Matthias Martin
Matrikelnummer: 70502
Reg.-Nr.: BB-2010-13

Thema: **Historische Holzpfahlgründungen –
Entwurf eines Leitfadens zur Materialschadensanalyse**

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Zweitprüfer: Dr.-Ing. Thomas Baron
Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Dr. rer. nat. Gunther Ulrich Aselmeyer
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Dipl.-Ing. Ulrich Wilden
RWE Power Aktiengesellschaft, Bergheim

Arbeitsbeginn: 01.07.2010
Abgabetermin: 31.08.2010

Weimar, den 28. Juni 2010

Prof. Dr.-Ing. Willfried Schwarz
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Aufgabenstellung

Holzpfähle werden seit Jahrtausenden erfolgreich zur Gründung von Bauwerken an Standorten mit gering tragfähigem Untergrund und gleichzeitig hohem Grundwasserstand eingesetzt. Schäden treten in der Regel nach natürlichen oder technischen Grundwasserabsenkungen auf. Vor der Ertüchtigung historischer Bauwerke und wasserbaulicher Anlagen kommt es darauf an, eine Schadensanalyse am Material Holz durchzuführen, die Tragfähigkeit unterschiedlich stark geschädigter Pfähle zu ermitteln, um ein effektives und nachhaltiges Sanierungskonzept erstellen zu können. Bei der Sanierung selbst sind dann geotechnische, statische, baustoffliche und verfahrenstechnische Aspekte zu beachten.

Die Arbeit soll nach Auswertung von umfangreicher Literatur, welche zum Teil von den Betreuern zur Verfügung gestellt wird, zunächst einen Überblick über den aktuellen Wissenstand zu typischen Gründungsarten, Schadensbildern und Sanierungstechniken liefern. Anschließend soll ein Leitfaden entwickelt werden, mit dem eine Holzpfehlgründung zielgerichtet untersucht und hinsichtlich ihres Zustandes sicher beurteilt werden kann.

Im Einzelnen sind die folgenden Teilaufgaben zu bearbeiten:

1. Auswertung vorhandener Fachliteratur und Charakterisierung von Schäden an historischen Holzpfehlgründungen und geeigneter Untersuchungs- und Sanierungsmethoden
2. Ergänzung durch eigene Literaturrecherche (Bibliotheken, Internet usw.)
3. Beschreibung von Erkundungsmethoden als Datenbeschaffung zur systematischen Analyse und Bewertung von Schäden an Holzgründungen
4. Diskussion der Ergebnisse und Einordnung der eigenen Arbeiten in einen Leitfaden zur Bewertung von Schäden an Holzgründungen

Die Arbeit soll neben der Dokumentation eine Zusammenfassung mit knapper und prägnanter Darstellung der wesentlichen Ergebnisse enthalten. In einem Ausblick sind weitere Entwicklungstendenzen darzustellen. An der Professur Grundbau sind zwei Exemplare der Arbeit (in gedruckter Form und digital auf CD-R) sowie eine internetfähige digitale Kurzfassung (im html- oder pdf-Format) abzugeben.

Die Arbeit ist in enger Abstimmung mit den Betreuern durchzuführen. Nach einer Bearbeitungszeit von etwa drei Wochen ist ein Arbeitsplan vorzulegen, der fortzuschreiben ist. Es sind zwei Zwischenkonsultationen mit Bericht über die Ergebnisse und den Arbeitsfortschritt beim Erstprüfer erforderlich.

Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt (Erstprüfer)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
1 Einleitung	11
1.1 Problemstellung	11
1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit.....	13
2 Betrachtung der Vorarbeiten.....	14
2.1 Schadensbild	14
2.2 Information zum Bauwerk	16
2.3 Setzung- und Verschiebungsermittlung	18
2.4 Baugrundanalyse.....	23
2.5 Grundwasser	31
3 Erkundung der Gründung aus Holz	35
3.1 Grundlagen.....	35
3.1.1 Typische Gründungsarten.....	35
3.1.1.1 Gesamtüberblick	35
3.1.1.2 Echte Pfahlgründung.....	37
Allgemeines	37
Ausführung und Abmessungen	38
Statische Wirkungsweise	40
3.1.1.3 Spickpfahlgründung	43
Allgemeines	43
Ausführung und Abmessungen.....	43
Statische Wirkungsweise	45
3.1.1.4 Horizontale Balkenroste	46

Allgemeines	46
Ausführung und Abmessungen	47
Statische Wirkungsweise	48
3.1.1.5 Kombinierte Holzgründungen	49
3.1.2 Holzeigenschaften	52
3.1.2.1 Holzart	52
3.1.2.2 Holzalter	55
3.1.2.4 Kern- und Splintholz	59
3.1.3 Bodeneigenschaften	62
3.1.3.1 Bodenarten	62
3.1.3.2 Bodensetzung	63
3.1.3.3 Saugspannung	64
3.1.3.4 Kapillarität	65
3.2 Vorgehensweise	68
3.2.1 Zur Sichtung der Holzgründung	68
3.2.2 Zur Pfahlängenbestimmung	73
3.2.2.1 Allgemein	73
3.2.2.2 Vereinfachtes Messprinzip	75
3.2.2.3 Vorgehensweise	77
3.2.2.4 Fehleranalyse	78
3.2.2.5 Zusammenfassung	79
4 Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse	80
5 Fazit und Ausblick	85
Literaturverzeichnis	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schematische Problemdarstellung.....	12
Abbildung 2 Mögliche Rissbilder einer Wand [2].....	15
Abbildung 3 Allgemeiner Überblick zu Schadensbildern und Ursachen.....	15
Abbildung 4 Historische Gründung auf Holzpfählen mit Gegenbogen [8].....	17
Abbildung 5 Grundrisskizze mit Setzungsdifferenzen, Krakauer Rieselspeicher [7].....	20
Abbildung 6 Übersicht zur Baugrunduntersuchung [16].....	26
Abbildung 7 Wasserganglinie, Reichstagsgebäude Berlin [8].....	32
Abbildung 8 Tiefen- und Spickpfahlgründung [1].....	36
Abbildung 9 Echte Pfahlgründung [25].....	37
Abbildung 10 links "Eiserne Pfahlspitze" [26] rechts Aufpfropfungsformen [28].....	39
Abbildung 11 links stehende Pfahlgründung, rechts schwimmende Pfahlgründung [30].....	40
Abbildung 12 Ablauf der Kräftereaktion bei Druck [31].....	42
Abbildung 13 links: Spickpfahlgründung unter Gründungsmauerwerk [3].....	42
Abbildung 14 links: runde Anordnung rechts: quadratische Anordnung [3].....	44
Abbildung 15 Ausbildung starrer Fundamentkörper mit Überplattungen [3].....	46
Abbildung 16 (1) Längsschwelle (2) Querschwelle mit Bohlenbelag [3].....	48
Abbildung 17 Kombinierte Spickpfahl-Schwellenrostgründung (Grundriss) [24].....	50
Abbildung 18 Kombinierte Tiefenpfahl-Schwellenrostgründung [26].....	51
Abbildung 19 Abschätzung der Dauerhaftigkeit von wassergesättigten Holz [1].....	53
Abbildung 20 Prozessdiagramm zum Informationsgehalt des Holzalters.....	57
Abbildung 21 Jahrringe einer Tanne aus Mitteleuropa [44].....	58
Abbildung 22 Datierungsprinzip in der Jahrringforschung [44].....	58
Abbildung 23 Holzquerschnitt eines Kernholzbaumes [45].....	58
Abbildung 24 Einteilung der Holzquerschnitte [47].....	61
Abbildung 25 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche für verschiedene Wassergehalte eines schluffigen Feinsandes [51].....	65

Abbildung 26 Verteilung der Sättigungszahl im Kapillarsaum [54]	67
Abbildung 27 Skizze des Lageplans vom Krakauer Speicher [7]	68
Abbildung 28 Pfahllängenbestimmung von Langpfählen [7]	74
Abbildung 29 Prinzip der Pfahllängenbestimmung (Hammerschlagmethode) [7]	75
Abbildung 30 (1) Nagel, (2) oberer BM, (3) unterer BM, (4) Kernholz, (5)Verstärker [7].....	75
Abbildung 31 links:Seitliche Signaleinbringung rechts:Axiale Signaleinbringung [7]	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Geodätische Messverfahren	21
Tabelle 2 Geodätische Messverfahren (Fortführung).....	22
Tabelle 3 Geophysikalische Messverfahren an der Erdoberfläche	27
Tabelle 4 Geophysikalische Messverfahren an der Erdoberfläche (Fortführung)	28
Tabelle 5 Geophysikalische Messverfahren im Bohrloch [9].....	29
Tabelle 6 Geophysikalische Messverfahren im Bohrloch (Fortführung)	30
Tabelle 7 Interaktion zwischen Trockenlegung und Schädigung [3].....	33
Tabelle 8 Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit gegen holzerstörende Pilze [36] ...	53
Tabelle 9 Splintholzbreiten von typischen Holzarten für Pfahlgründungen [1].....	61
Tabelle 10 Einteilung der Porengrößen [52]	65
Tabelle 11 Kapillare Rückhaltehöhen einiger Bodenarten [54].....	67

Abkürzung- und Bezeichnungsverzeichnis

BM	Beschleunigungsmesser
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
GWL	Grundwasserleiter
GWS	Grundwasserspiegel
KH	Kernholz
KPP	Kombinierte Pfahl-Plattengründung
LH	Laubholz
LSI	„Low-Strain“-Integritätsprüfung
NH	Nadelholz
q_B	Spitzendruck (früher σ_s)
R	Gesamtpfahlwiderstand
R_B	Pfahlwiderstand durch Spitzendruck
R_S	Pfahlwiderstand durch Mantelreibung
SH	Splintholz
SPG	Spickpfahlgründung
zul. F (N)	zulässige Normalkraft

1 Einleitung

Gründungskonstruktionen aus Holz stellen eine der ältesten Gründungsarten dar. Sie reichen von der römischen Antike bis zur heutigen Neuzeit. Historisch betrachtet, gab es bis Ende des 19. Jahrhunderts keine alternativen Baustoffe, außer Steingründungen. Unter der Einwirkung der Elemente Luft, Wasser und Boden weißt Holz, bei fachgerechter konstruktiver Anwendung, eine vergleichsweise hohe Gebrauchsdauer auf. Auf Grund dessen lag und liegt das Einsatzkriterium von Hölzern vor allem im Grund- und Wasserbau. Ein weiteres Motiv der Holzverwendung, speziell im Gründungsbau, liegt in der relativ langen Nutzungsdauer bei vollständiger Wassersättigung unter Luftabschluss. Gründungen unter dem GWS können in manchen Situationen ihre zugeordneten Lastabtragungen weit über 500 Jahre erfüllen [1]. Speziell im wenig tragfähigen Baugrund, verbunden mit einem hohen Grundwasserstand, waren Holzgründungen bis Anfang des 20. Jahrhunderts eine optimale Lösung. Zu diesem Baugrund zählten insbesondere Bodenschichten mit weicher Konsistenz auf denen das Errichten von Gründungsmauern ohne Verfestigung schier unmöglich schien. Durch die Weiterentwicklung der Baustoffe wurden Holzgründungen fast ausschließlich durch bewehrte und unbewehrte Betonbauweisen ersetzt. Holzgründungsarten werden dadurch oft nur noch mit dem Begriff der Bauwerkssanierungen in Verbindung gebracht. Vor allem dann wenn eine Schädigung durch Grundwassersenkung vorliegt.

1.1 Problemstellung

Natürliche oder technische Grundwassersenkungen gehen immer mit unmittelbaren oder mittelbaren Setzungen einher. Im Normalfall handelt es sich bei ihnen um gleichmäßige Bodenverformungen. Es können aber auch ungleichmäßige Setzungen auftreten. Die Ursachen für verschiedene Raten und Verteilungen der Setzungen können von ganz unterschiedlicher Natur sein. Trockenlegung und anschließendes Schwinden von Holz sowie die Schädigung durch Pilze, Bakterien und Hydrolyse einer Holzgründung geben Motive. Aber auch aus geotechnischer Sicht sind Untersuchungen bei Grundwassersenkungen aufzustellen. Unterschiedliche Schichtung des Baugrunds, mögliche inhomogene Aufschüttungen, organische Bestandteile oder Steifigkeitsverringerung stellen unter anderem Probleme dar. All diese Einflüsse können zu Verformungen im Gründungsbereich führen,

welche Setzungen und Verschiebungen beinhalten und sich negativ auf die Tragfähigkeit bzw. der Gebrauchstauglichkeit eines Gebäudes auswirken. Ein Fokus der Problemstellung soll der Holzgründung, besonders der Ausführung durch Pfähle, gewidmet sein. Durch eine GWS wird der Luftabschluss von dem Holz aufgehoben. Die noch vorhandene Feuchte und der Sauerstoffgehalt in den Luftporen des umgebenden Bodens bieten optimale Verhältnisse für die Existenz von Pilzen. Als Vertreter sollen an dieser Stelle die Moderfäule und die Braunfäule genannt werden. Diese können in kürzester Zeit zur Zerstörung des Holzes führen. Aber auch unter Luftabschluss erfährt der Pfahl im Baugrund durch anaerobe Bakterien, sowie der Hydrolyse und der Aussetzung von Druck und Temperatur eine konstant anhaltende Schädigung. Diese führen, wie auch der Pilzbefall, zur Verringerung der Tragfähigkeit der Holzgründung. Dazu kommt, dass heutige Normen und derzeit zulässige Materialbeanspruchungen für die Beurteilung der Tragfähigkeit einer alten Konstruktion nicht immer nur Maßstab sein können. Hier muss der Fachingenieur aufgrund seiner Erfahrungen, Abschätzung zur vorhandenen Resttragfähigkeit selber treffen und Aussagen formulieren, wie lange und in welchem Umfang das Gebäude noch nutzbar ist. Bei zu starker Schädigung der Holzgründung muss es dann zu geeigneten Sanierungsmethoden kommen. Ein weiteres Problem, was analysiert werden soll, sind die Unterschiede der vorliegenden Schädigungen. Verallgemeinerungen des Erhaltungszustandes eines Pfahls auf andere sind vollkommen unzulässig. Deswegen ist es angebracht die Eigenschaften des Holzes als auch des Baugrundes, genauestens und umfassend zu analysieren. Nur so kann eine genaue Diagnose des Gründungsschadens erstellt werden. Diese bildet dann die Grundlage für weitere Tragfähigkeitsabschätzungen und erlaubt passende Sanierungskonzepte.

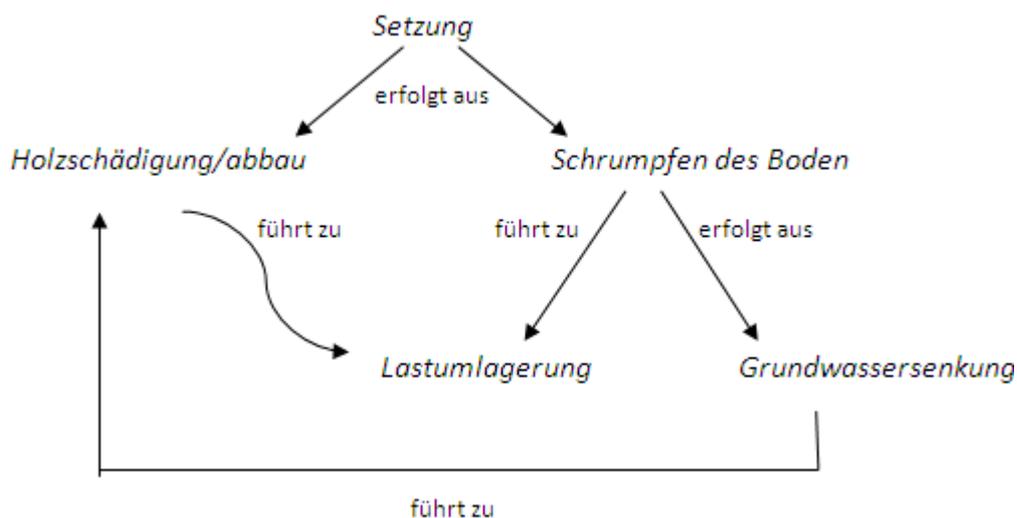


Abbildung 1 Schematische Problemdarstellung

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Je besser die Vorbetrachtung und Gründungsuntersuchung, desto dauerhafter und günstiger wird das Ergebnis der Sanierung sein. Voreilige Überlegungen zur Schadensursache und sofortige Beseitigung sollen unbedingt vermieden werden. Aus diesem Grund wird anfangs der Arbeit ein grober Überblick durch zutreffende Vorarbeiten gegeben. Diese stellen die Interpretation des Schadenbilds, die Baugeschichte des Gebäudes, die zeitliche Entwicklung der Schäden, die Baugrundanalyse und die Grundwasseruntersuchung dar. Sie machen alle Prozesse aus, die vor einer Gründungserkundung stattfinden sollten. Aufgrund ihres Informationsgehalts wird dann ein ingenieurfachlicher Untersuchungsplan erstellt, der auch eine angepasste Gründungserkundung (Art und Umfang) vorsieht. Kenntnis über frühere Bauweisen und Ausführungen, Technologien und deren Einsatz bei variierenden territorialen Besonderheiten sollten dem Fachingenieur vorher bekannt sein. Daher werden alle in der Historie relevanten vorkommenden Holzgründungsformen mit zeitlichem Entstehungsbezug bündig vorgestellt, wobei auch Erläuterungen zur statischen Wirksamkeit gegeben werden. Eine durch Erkundung hervorgegangene, treffende Analyse einer derartigen historischen Gründung ist nur möglich, wenn man sich mit den relevanten Eigenschaften des Baugrunds und des Holzes auseinandergesetzt hat. Bei Holz spielen vor allem die Art, das Alter und der Querschnitt eine wichtige Rolle bei Erkundungsprozessen. Sie erlauben bei einer Freilegung der Holzgründung und deren visuellen Begutachtung erste grobe Schlussfolgerungen auf die noch vorhandene Tragfähigkeit. Der Boden hingegen kann Aufschluss über seine Wasserhaltung und Setzungsempfindlichkeit bei Grundwasser-senkung geben. Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Sichtung und deren Ausführungsarten soll dazu dienen, wirtschaftlich konstruktive und statische Gegebenheiten sorgfältig und richtig zu erfassen. Des Weiteren soll eine genaue Recherche der Art und des Tragprinzips sowie des Zustands der historischen Holzgründung möglich sein. Am Ende der Arbeit sollen dann alle Ergebnisse der Erkundungsmethoden zusammengefasst und bewertet werden. Sie dienen dann zur Analyse und Bewertung von Schäden an Holzgründungen und sollen des Weiteren adäquate und möglichst wirtschaftliche Sanierungslösungen zur Folge haben. Die Arbeit selbst stellt nur einen kleinen Beitrag eines Leitfadens dar, der als Ergebnis die Bewertung von Holzgründungen vorsieht. Der hier aufgeführte Teil des Leitfadens beschäftigt sich mit allen Schritten, die vor einer Materialschadensanalyse ausgeführt werden sollten und legt sein Hauptaugenmerk auf die Erkundung.

2 Betrachtung der Vorarbeiten

2.1 Schadensbild

Das Schadensbild, das das Gebäude durch vorangegangene Bodenverformungen hervorruft, könnte für den Fachingenieur schon erste verlässliche Aussagen zur Schadensursache liefern. Bestimmte Setzungen¹ und Gebäudeschäden besitzen kausale Zusammenhänge mit bestimmten Problematiken im Gründungsbereich. Allgemein seien hier die zwei wichtigsten Schadensbilder aufgeführt. Erfährt ein Bauwerk durch gleichmäßige Setzung oder Verschiebungen eine Lageveränderung, so wird diese sich als Starrkörpertranslation ausbilden. Dieser durch Setzung oder Verschiebung hervorgerufene Schaden, würde nur dann zu Nutzung und Tragwerksschäden führen, wenn unverträgliche Größenordnungen erreicht werden. Einer Starrkörperrotation hingegen geht eine ungleichmäßige Bodenverformung zuvor. Diese könnte auch eine Veränderung des gesamten Kräfteflusses im Tragwerk zur Folge haben [2]. Somit können ungleichmäßige Setzungen zusätzliche Beanspruchungen und korrespondierende Deformationen in manchen Tragwerksteilen hervorrufen. Für den Gutachter können sich diese Deformationen durch Schrägstellung von Gebäudeteilen äußern. Typisch resultierende Schadensbilder werden auch durch Risse, Verbiegungen, Schubverformungen und Verzerrungen an Wänden und Decken ersichtlich. Um zu verdeutlichen, dass das Schadensbild tatsächlich Schlüsse auf vorliegende Gründungsschäden erlaubt, soll ein skizzenhafter Einblick in die Analyse von Rissen vorgebracht werden. In der Praxis ist darauf zu achten, dass Risse im und am Gebäude nicht nur auf Probleme im Gründungsbereich basieren. Ansonsten ist festzustellen, dass Risse es erlauben, Rückschlüsse auf die lokale Verteilung der Setzungen zu führen. In Abbildung 2 ist dargestellt, wie sich die Rissarten unter anderem grob unterteilen lassen. Es gibt die Rissausbildung als Schubverformung sowie eine muldenförmige und sattelförmige Entwicklung des Verlaufs. Bei einer sattelförmigen Setzungslinie bilden sich die Risse von der Wandmitte zu den Rändern ansteigend aus. Analog verhält sich die muldenförmige Setzungslinie. Die Risse steigen umgekehrt von den Rändern zur Wandmitte an [3]. Da Risse mit ihrem auslaufenden dünner werdenden Ende zum Krümmungskreismittelpunkt zeigen, kann von den Querrissen auf den Ort der größten Setzung geschlossen werden. Des Weiteren ist bekannt, dass man Spannungen visuell an Bauwerken nicht erfassen kann. Jedoch entstehen diese bei der Ausbildung von veränderten

¹ Setzungen die sich gleichmäßig oder ungleichmäßig ausbilden.

Kräfteschlüssen, gerade durch ungleichmäßige Bodenverformungen. Risse machen wortwörtlich Spannungen sichtbar, indem sie die korrespondierenden Dehnungen aufzeigen. Quer zur Rissausbildung besitzt das Tragwerk keine Zugspannungen mehr. Weitere und viel tiefgründigere Schlüsse und Deutungen lassen sich aus Schadensbildern, wie Risse, Schrägstellungen, Ausbeulungen, Stützensenkung sowie anderen, ziehen. Diese werden jedoch hier nicht tiefgründiger aufgeführt und somit soll an dieser Stelle auf [3] verwiesen werden. Des Weiteren ist bei der praxisbezogenen Aufnahme der Schadensbilder, die im Zusammenhang mit der Gründung stehen, immer ratsam einen Tragwerksplaner vor Ort zu haben. Dieser kann zur Analyse wichtige Informationen zur Lastableitung und Umlagerung beitragen. Auch wird empfohlen, wie bei allen anderen Bauschäden auch, diese zu dokumentieren. Vor allem digitale Bilder stellen bei der Darstellung der Schadensentwicklung gute Vergleichsmöglichkeiten dar. Dies kann bei der Prognose des Schadensausmaßes helfen [4].

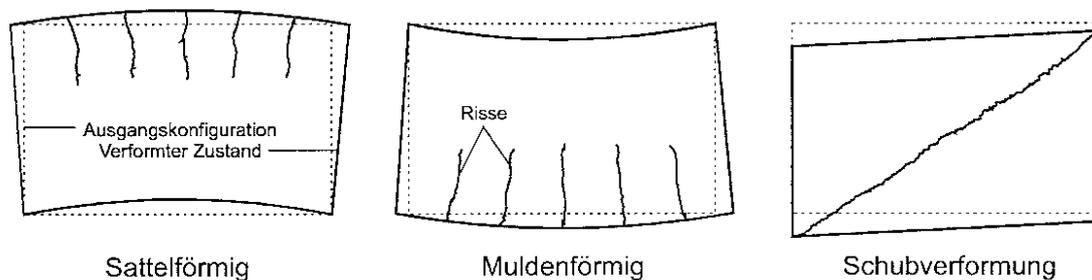


Abbildung 2 Mögliche Rissbilder einer Wand [2]

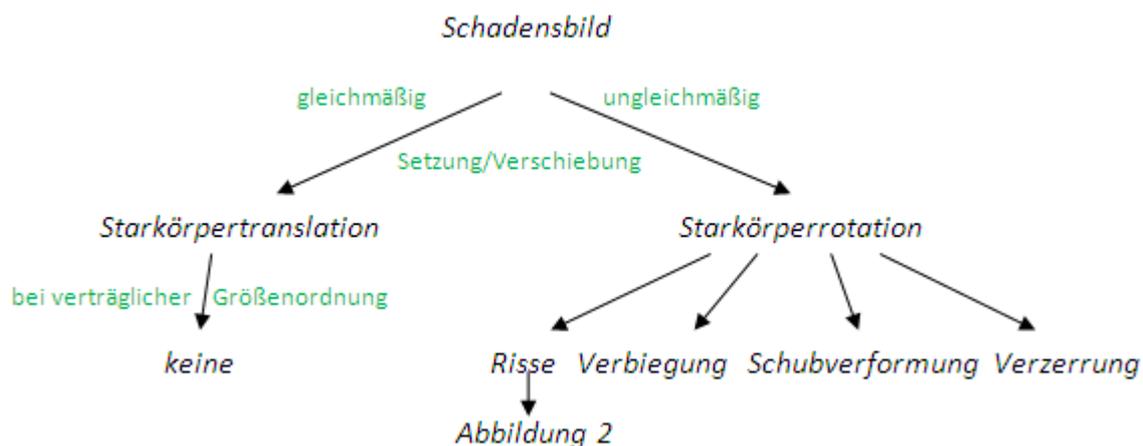


Abbildung 3 Allgemeiner Überblick zu Schadensbildern und Ursachen

2.2 Information zum Bauwerk

Schon bei K. Pieper² wird dieser erste Prozess einer Sanierungsanalyse hervorgehoben [5]. Er wird bei ihm unter dem Namen Anamnese³ verwendet. Der Stellenwert dieses Schwerpunktes ist genauso hoch zu wichten, wie alle anderen Erarbeitungsprozesse bei der Analyse eines grundwassersenkungsbedingten Gründungsschadens. Im Ablauf sollte dieser Schritt meist zu Anfang geschehen, um eventuelle bedeutsame Ursachen von Bodenverformungen schon früh zu erkennen. Wichtig erscheint es hier vor allem, alte Unterlagen über Geschichte, Umbauten, Nutzung, Konstruktion, Verformung und Setzungen des betreffenden Gebäudes zu erlangen [5]. Meist wird der beauftragende Ingenieur aber feststellen, dass solche Unterlagen nicht oder nur bedingt verfügbar sind. Gründe sind in der damals meist mangelnden Dokumentation zu suchen. Es bleiben dem Ingenieur jedoch auch noch andere Alternativen, die hier kurz erwähnt werden sollen. Zum einem gibt es die Möglichkeit, damals aktuelle Bauzeitschriften zu studieren. Oft geben fragmentarische Skizzen mit textlicher Erläuterung weitere Auskunft [6]. Zum anderen besteht die Eventualität Nachbarn zu befragen über mögliche Umbauten oder Umnutzung des Gebäudes [7]. Jedoch scheint dies eher abwegig, da das Alter des Gebäudes meist nicht im Verhältnis steht. Behilft sich der untersuchende Ingenieur bei der Informationssuche mit der Beauftragung eines Historikers, so könnten daraus unter Umständen auch brauchbare Ergebnisse resultieren. Dieser könnte behilflich sein, die Gründungsdatierung auf mögliche Einwanderungen von niederländischen Siedlern und Zimmermännern im betreffenden Umland zu untersuchen. Dies wiederum würde erlauben, die möglichen Gründungsausführungen einzugrenzen bzw. mit in den Niederlanden zeitlich parallel ausgeführten Konstruktionen zu vergleichen [7]. Wichtig erscheint es, gerade weil es sich größtenteils um historische Gründungen handelt, den Denkmalwert des Gebäudes in Erfahrung zu bringen. Im kritischen Fall schadet die Einbeziehung eines Archäologen nicht [3]. Um erste Informationen zum antreffenden Lockergestein im Baugrund zu erhalten, empfiehlt es sich, unter der Einbeziehung eines örtlichen Geologen, topographische und insbesondere geologische Karten zu studieren. Trotz eines noch nicht stattgefundenen Baugrundgutachtens können so erste Vermutungen zum antreffenden Untergrund angegeben werden (3.1.3.1 Bodenarten). Geologische Karten können bei den jeweiligen Landesämtern bestellt bzw. besichtigt werden und enthalten Informationen zu geologischen Schichten, deren Mächtigkeit und Grenzen sowie Angaben zu Karstausbildungen und hydrologischen Verhältnissen. Durch die Auswertung örtlicher

² Pieper, K. : „Sicherung historischer Bauwerke“ , Berlin 1983

³ Begriff aus dem Medizinischen der das Erlangen der Vorgeschichte eines Patienten beschreibt, dem ein Gespräch zur aktuellen Erkrankung voran ging.

Karten und möglicherweise vorhandenen Blockbildern lassen sich im Voraus schon bodenmechanische Eigenschaften einschätzen.

Alle zu erhaltenden möglichen Informationen können dann ein ineinander übergehendes Bild der gesamten Bauwerksgeschichte geben. Dieses erlaubt, wie die Erkundung des Schadensbilds, eine erste Bewertung der Tragfähigkeitsanalyse [5]. So kann zum Beispiel eine dokumentierte Verteilung von Langpfählen oder Aufzeichnungen zur Verwendung von Contre-Bögen⁴ (Abbildung 4) viele Aufschlüsse zum Tragverhalten geben. Bauwerke, die trotz ihrer frühen Richtzeit gut dokumentiert wurden, sind z. B. der Dom zu Königsberg, das Schloss zu Schwerin, das Reichstagsgebäude in Berlin und das Postamt in Konstanz. Aber auch bei kleineren Gebäuden, wie bei der von RWE dokumentierten Sanierung der Erftmühle, kam es zu umfangreichen Ermittlung der Bauwerksgeschichte, die sicherlich Einfluss auf die Gründungs und korrespondierende Tragfähigkeitsanalyse nahm [4].

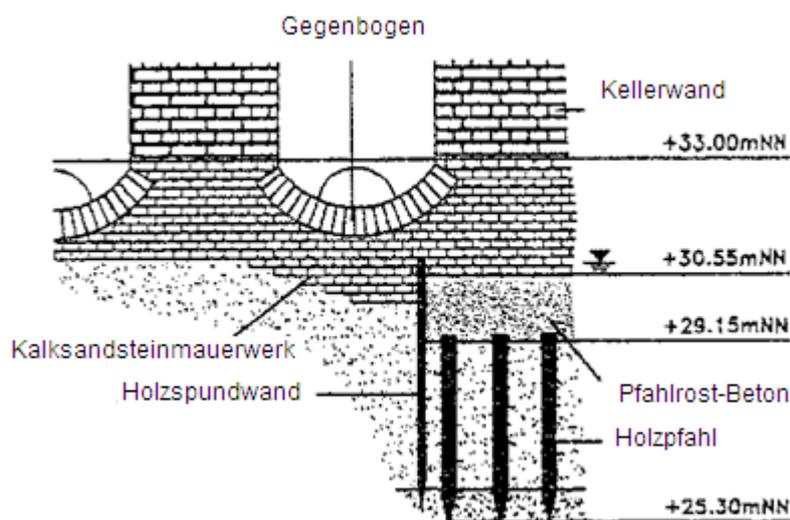


Abbildung 4 Historische Gründung auf Holzpfählen mit Gegenbogen [8]

⁴ Bögen die zur Lastverminderung von Fundamenten verwendet wurden. Auch Gegenbogen genannt.

2.3 Setzung- und Verschiebungsermittlung

Dieser Untersuchungsschritt ist vor allen anderen Arbeiten am Gebäude durchzuführen. Da zum Beispiel vorher ausgeführte Erkundungsschürfe, Setzungen hervorrufen können, die zu Verfälschungen der Messergebnisse führen. Dieser dritte Schritt dient zur Aufnahme des Ist-Zustands und erlaubt bei der Ausführung durch einen Fachmann genauere Prognosen. Prinzipiell unterscheidet man bei der Ermittlung von Setzungen zwischen ihren Raten und der zu dato entstandenen Differenz zu einem angenommenen Bezugspunkt [7].

Setzungsraten müssen mindestens einen Bemessungszeitraum von drei bis fünf Jahren aufweisen, um überhaupt verlässliche Aussagen erwarten zu lassen [3]. Natürlich bieten Jahrzehnte lange Beobachtungen mehr als gute Voraussetzungen. Sie werden in [mm/a] angegeben. Die Ergebnisse, die aus dem Verlauf von Setzungsbewegungen, bodenmechanischer Entstehung, zu erwarten sind, können vielseitig und sehr von Bedeutung sein. Sie erlauben letztendlich eine Präzisierung des Sanierungsbedarfs [7]. So kann aus jahrelangen Setzungsbemessungen der Fachingenieur eine Einschätzung zu Setzungsursachen geben. Dies beruht darauf, dass beispielsweise der Zerfall einer Holzgründung ein anderes langzeitliches Setzungsverhalten besitzt, als eine Kriechverformung⁵. Aufgrund von jahrelang aufgezeichneten Setzungsdiagrammen kann ein Fachmann mögliche Schadensursachen noch genauer eingrenzen. So besitzt ein Bakterienbefall an der Holzgründung oder die Zerstörung durch Hydrolyse eher ein langsam konstantes und geringausfallendes Setzungsverhalten. Der Befall durch Moderfäule hingegen würde wahrscheinlich durch ein plötzlich stark wachsendes Graphenverhalten diagnostiziert werden. Dennoch sollten die entstandenen Prognosen aus der Auswertung mit Vorsicht genossen werden, da Ursachen von Bodensetzungen vielseitig sein können. Ein weiterer Vorteil der Setzungsratermittlung ist die Erstellung von Prognosen. Möglicherweise ist bei den Setzungen ein Abklingen zu toleranten Raten ersichtlich und es wäre nun zu klären, ob weitere Untersuchungen überhaupt nötig sind. Aber auch ein rapides Ansteigen oder ein jahreszeitlich periodisches Verhalten der Bodensenkungen würde sofort erkennbar sein und Schlussfolgerungen zu Ursachen erlauben. Des Weiteren stellen Langzeitmessungen gerade während des Bauprozesses eine Art Sicherheit dar und geben nach der Sanierung eine Gründungskontrolle [9].

⁵ Zeitlich lang andauernde und nur in der Summierung erhebliche Verformung des Bodens. Kriechverformungen sind keine Konsolidierungsverformungen.

Bei der Setzungsdifferenz handelt es sich um eine kurzzeitliche Untersuchung, die in [mm] angegeben wird. Sie stellt trivialerweise einen Bestandteil der Langzeitmessung dar. Bei einem Gründungsschaden, resultierend auf Setzungen, wird nach [3] eine Bestandsaufnahme der Setzungsdifferenz veranlasst und dokumentiert. Das Verfahren ist allgemein gültig und durch seine vergleichsweise einfache Ausführung sehr wirtschaftlich. Der ausführende Vermesser sucht sich eine ehemals horizontale Gebäudefuge⁶, die sich über den gesamten Grundriss verfolgen lässt und bestimmt, ausgehend von einem Festpunkt⁷, die Höhendifferenzen der einzelnen auf der Gebäudefuge ausgewählten Vermarkungspunkte [9]. Es wird empfohlen die Setzungsdifferenzen in einem Grundriss zu dokumentieren (Abbildung 5). Anschließend kann man schwache Gründungsstellen anschaulich lokalisieren und eventuell Prognosen zu weiteren Absenkungen des Grundrisses erstellen.

Aus den Ergebnissen beider Ermittlungen, also der Größe und dem Verlauf der Setzungen, lassen sich, wie schon beim Schadensbild, Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit und den Sanierungsbedarf schließen [5].

Um diese Ergebnisse aber erst einmal zu erhalten, muss man sich im Vorhinein für das, auf das Gebäude mit seinen Gründungsschaden, passende geodätische Bemessungsverfahren entscheiden. Passend bedeutet in diesem Zusammenhang ein ausgeglichenes Wechselspiel zwischen Aussagekraft⁸, Aufwand und Kosten. Zuverlässigkeit und Genauigkeit sollten bei der Wahl des Messverfahrens und der dazu gewählten Messinstrumente auch mit einbezogen werden. Dabei wird nicht immer das Messverfahren mit dem höchsten Leistungspotential gewählt [7]. Es wird in diesem Abschnitt der Arbeit ein kurzer tabellarischer Überblick der zutreffenden geodätischen Vermessungsmöglichkeiten gegeben. Dieser stellt eine Art Zusammenfassung des Abschnitts „Geodätische Überwachung von geotechnischen Bauwerken“ aus [9] dar, wobei ausschließlich auf Messtechniken, zur Bestimmung von grundwassersenkenden Gründungsschäden, Bezug genommen wird. Auf vertiefende Quellen, zur Theorie bestimmter geodätischer Messverfahren, wird verwiesen.

⁶Zum Beispiel eine Lagerfuge im Sockelbereich.

⁷Vermessungspunkt dessen Koordinaten bekannt und stabil sind.

⁸Erfassen von langzeitlichen und kurzzeitlichen Setzungen in vertikaler und horizontaler Richtung.

Tabelle 1 Geodätische Messverfahren

Art der Messung	Anwendungsbereich	Messprinzip	Bewertung
<p>1. Neigungsmesser 1.1 justierbare Neigungsmesser: Wassermessing, Libellen, Clinometer 1.2 elektrische Neigungsmesser mit unterschiedlichen Lotsensorsystemen</p>	<p>- Kippen von Bauwerken (horizontale und vertikale Schiefstellung eines Gebäudes) - Neigungsänderungen</p>	<p>Ein elektronischer Neigungsmesser stellt den Lotsensor automatisch auf den Nullpunkt. Der justierbare Neigungsmesser muss durch das Prinzip "Messen in zwei Lagen" erst ausgerichtet und dann auf den Nullpunkt eingestellt werden. Anschließend sind dauerhafte Langzeitmessungen die konstant durchgängig geführt werden oder Messen in großen Zeitabständen (monatlich/jährlich) möglich. Neigungsänderungen werden dann durch die Differenzen der Neigungen ermittelt.</p>	<p>Messwerte können Driften unterschiedlichster Ursachen anzeigen. (thermische Einflüsse wie Sonnenstrahlung, Alterungseffekte, zeitlich ändernde Justierwerte) Sie stellt eine kostengünstige Ermittlung dar, wenn diese in relativ großen Zeitabständen erfolgt. Es muss vorausgesetzt werden, dass das Messobjekt mit einer hohen Präzession reproduzierbar auf den Messpunkt wieder aufgesetzt werden kann. Für viele Überwachungsaufgaben ist diese Variante ausreichend.</p>
<p>2. Geometrische Nivellement 2.1 manuelles Libellen-Nivelliergerät 2.2 Kompensator-Nivelliergerät und Digital-Nivelliergerät</p>	<p>- Messung von Höhenunterschieden</p>	<p>Höhenunterschied zweier Punkte erhält man, indem man an zwei verschiedenen Punkten einen horizontal ausgerichteten Zielstrahl, an einer lotrecht angehaltenen Messlatte, abliest. Die Differenz der zwei Punkte ist der Höhenunterschied.</p>	<p>Dieses stellt das wichtigste Verfahren dar, da es in der Praxis am weitverbreitetsten angewendet wird. Es sind manuelle Libellen-Nivelliergeräte gerade bei elektromagnetischen Feldern vorteilhaft. Automatisch horizontierende Nivelliergeräte sind zeitlich schneller Einsatzbereit. Die Genauigkeit liegt auf einem Kilometer Doppelnivellement bei $s \sim 0,3\text{mm}$.</p>
<p>3. Theodolit Tachymeter</p>	<p>- Geometrische Höhenmessung</p>	<p>Bei trigonometrischen Höhenmessungen wird die Höhe aus dem gemessenen Zenitwinkel und der Distanz berechnet. Dies geschieht vom Gerät vor Ort.</p>	<p>Bei längeren Visuren wird der Lichtstrahl durch Refraktionen abgelenkt. Desweiteren wird bei der Berechnung der Höhen selbst, die Erdneigung nicht mit beachtet. Im Fall einer Berechnung zur Höhendifferenz spielt das aber keine Rolle.</p>
<p>4. Schlauchwaage 4.1 ohne Drucksensoren 4.2 mit Drucksensoren</p>	<p>- Hydrostatische Höhenmessung</p>	<p>Grundprinzip: Der Flüssigkeitsspiegel ist in kommunizierenden Gefäßen gleich hoch. (Bermoullie) Die Pegel werden manuell oder mit Sensoren abgelesen.</p>	<p>Fälschung der Höhenunterschiede durch Messungen bei verschiedenen Wassertemperaturen bzw. unterschiedlichen Luftdruckverhältnissen.</p>

Tabelle 2 Geodätische Messverfahren (Fortführung)

<p>5. Faseroptische Dehnungsmessung mit Lichtleitensensoren</p>	<p>- Dehnungsmessung: Abweichung von zwei oder mehreren Punkten</p> <p>- Permanente Bauwerksüberwachung</p>	<p>Zu Anfang werden Dehnungssensoren (Lichtleitfasern) an das zu überwachende Gebäude dauerhaft angebracht. Das auf die Dehnungssensoren geworfene Licht wird mit einer bestimmten Wellenlänge reflektiert. Die Wellenlängenänderung wird mit einem Spektrometer über einen CC-Zeilensensor gemessen und anschließend durch elektromagnetische Signalverarbeitungstechnik ausgewertet.</p>	<p>Es findet keine Beeinflussung durch äußere elektromagnetische Felder statt. Es können geringe Messwertverfälschungen durch minimale Wärmeableitung und Wärmekapazität erfolgen. Die Standardabweichung durch Dehnung liegt bei $1\text{-}5 \cdot 10^{-5}$. Durch Dehnungen lassen sich auch Spannungen im Bauteil bestimmen. Es erfolgt eine schnelle Informationsauswertung.</p>
<p>6. Inklinometermessung</p>	<p>- Überwachung von horizontalen und vertikalen Verschiebungen im Baugrund</p>	<p>Ein Bohrloch wird bis zu einer gewünschten Tiefe vorantreiben. Anschließend wird ein flexibles Inklinometerrohr, welches z. B. die Rutschbewegung eines Hanges stand hält, eingeleitet. Anschließend durchfährt eine Inklinometersonde das Rohr. Die Form des Rohrs wird als Polygonzug beschrieben. Die schrittweise gemessenen Richtungen entsprechen dann den Neigungen. Dadurch ist ein Nachweis der Verschiebungen quer zur Achse eines Rohres möglich.</p>	<p>Inklinometermessung stellt eher ein geotechnisches Feldversuchsverfahren dar, zur Überwachung von Verbaumaßnahmen, Böschungen und natürlichen Hängen in Boden und Fels. Die Messrohre sind theoretisch auch horizontal verlegbar. Die Problematik ist, dass die Genauigkeit für die Setzungsermittlung mit einer Standardabweichung von 1,4 mm auf einem Meter zu ungenau ist.</p>
<p>7. Photogrammetrie</p>	<p>- Verformungsbemessung</p> <p>- Lageänderung</p>	<p>Objekte werden flächenhaft erfasst. Sie werden dreidimensional bestimmt. Dabei werden Bilder mit einer speziellen Messkamera aufgenommen. Anschließend Abgleich der Aufnahmen.</p>	<p>Das Vermessungsverfahren befindet sich auf einem sehr hohen Niveau mit großer Genauigkeit. Die Photogrammetrie arbeitet berührungsfrei und kann kurzfristig ausgeführt werden. Auswertungen müssen nicht vor Ort stattfinden.</p>

8. Deflektormessung

Diese Messtechnik ist vergleichbar mit der Inklinometermessung. Es wird auch ein räumlicher Polygonzug im Rohr erzeugt und Neigungen gemessen. Da die Messabweichungen bei diesem Verfahren noch wesentlich ungünstiger sind, als bei dem für unsere Zwecke schon ungenauen Inklinometermessverfahren, wird darauf nicht weiter eingegangen. Vertiefende Literatur zu geodätischen Messverfahren stellen [9], [10] und [11] dar.

2.4 Baugrundanalyse

Nicht nur bei Errichtung eines Neubaus, sondern vor allem bei der Analyse von Gründungsschäden ist es noch weit unumgänglicher ein Baugrundgutachten zu erstellen. Das Wissen um die verschiedenen Bodenschichten und ihrer Eigenschaften erlaubt sehr viele Schlussfolgerungen. Ein paar Fragen sollen dazu in den Raum gestellt werden, die die Komplexität widerspiegeln. Gründet eine mögliche Tiefenpfahlgründung in eine tragfähige Schicht? Wie ändert sich die Konsistenz einer Bodenart bei Grundwassersenkung und welche Setzungswerte sind durch die Lasterhöhung in der Größe des Auftriebs zu erwarten? Liegen inhomogene Aufschüttungen oder sogar organische Bodenschichten im Gründungsbereich an? Um diese und viele andere Fragen analysieren zu können, muss eine genau und komplex angelegte Baugrundanalyse zuvor gehen, die hier erst einmal allgemein vorgestellt werden soll.

Prinzipiell unterscheidet die Bodenmechanik zwischen direkten und indirekten Baugrundaufschlüssen. Bei der Direkten liegen natürliche oder künstliche Aufschlüsse vor, die eine Besichtigung von Boden, Entnahme von Proben und Durchführung von Feldversuchen gestattet. Indirekte Aufschlüsse sind die, die durch Korrelation⁹ zwischen physikalischen Messgrößen und bodenmechanischen Kenngrößen Rückschlüsse auf den Baugrund ermöglichen [12]. Eine zusätzliche Untersuchungsart des Baugrundes stellt die geophysikalische Standortuntersuchung dar. In der Regel setzt sich dieses Verfahren aus mehreren geophysikalischen Methoden zusammen und ergänzt die indirekten und direkten Baugrundaufschlüsse [13].

Zu der indirekten Untersuchung gehört zum Beispiel die Erkundung durch Sondierung. Sie ist weit verbreitet und lässt sich unterschiedlich ausführen. Das Grundprinzip einer jeden Sondierung besteht darin, dass eine Stange in den Baugrund gedreht, gedrückt oder gerammt wird. Die Änderung der Größe des Eindringwiderstands über die Tiefe gibt anschließend Aufschluss über die Festigkeit bzw. die Mächtigkeit einer Schicht [7]. Somit lassen sich auch gleichmäßige und ungleichmäßige sowie besonderes lockere und feste Bereiche im Baugrund feststellen. Die Ergebnisse einer Sondierung (Spitzenwiderstand) würden dann herangezogen werden, wenn es zu einer Gründungssanierung kommen muss. Aus diesem Widerstand lässt sich dann die Beanspruchbarkeit des Bodens berechnen. Verschiedene Typen sind die Flügelsondierung, Rammsondierung, Drucksondierungen und

⁹ Beziehung zwischen zwei oder mehreren Unbekannten, die möglicherweise kausal zusammenhängen

andere. Genauere Informationen zur Ausführung und zum Wirkungsprinzip findet man im Skript der Bodenmechanik [14] und in [15].

Die Bohrung gehört zu den direkten Aufschlüssen, die im Allgemeinen zur Probeentnahme dient. Das generelle Prinzip erscheint so, dass verrohrte Bohrungen mit einem Durchmesser von 30 bis 2000 mm in den Boden vorangetrieben werden. Die Entnahme der Proben erfolgt dann über Kernrohre, Halbrohrschnellen und andere Verfahren. Die durchfahrenden Böden können anschließend identifiziert und beschrieben werden. Grenzen von Bodenschichten sind bestimmbar sowie viele andere Eigenschaften, die bei Laboruntersuchungen ausgewertet werden. Vertreter sind Rotationsbohrungen, Rammbohrverfahren und andere¹⁰.

Die dritte Aufschlussmöglichkeit von Böden zur Baugrundanalyse sind die Schürfe. Sie könnten parallel zur Gründungserkundung an der Fundamentsohle genutzt werden. Ihre Tiefe ist bei durchlässigen Böden mit dem Stand des Grundwassers begrenzt und auch ihre Ausführungen an Fundamenten sollte nur bis zur Sohle gestattet werden. Diese Aufschlussvariante erlaubt die Entnahme von Proben mit ausreichender Güte, wodurch Bodenschichten visuell eventuell schon zu erkennen sind und sich der Fachmann sofort einen Eindruck vom Bodenzustand machen kann [7]. Schürfe erlauben oft nur Entnahmen von gestörten Bodenproben. Jedoch wäre es angebracht bei Bohrungen ungestörte Proben (Säulen) zu entnehmen um Bodeneigenschaften, wie Kalkgehalt, Korngrößenverteilung, Konsistenzgrenzen, Gehalt organische Bestandteile, Feuchtegehalt und andere genau zu bestimmen [16]. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass indirekte Untersuchungen stets mit direkten Aufschlüssen zur Ansprache des Baugrunds vervollständigt werden sollten, um so genauere Aussagen zu erhalten [3]. Als Erläuterung wäre hier zum Beispiel zu nennen, dass eine Rammsondierung zwar Abschätzungen über die Tragfähigkeit eines Bodens zulässt, aber erst durch eine Bohrung die Bodenart bestimmbar wird. Sozusagen ist eine alleinige Sondierung ein ziemliches Wagnis, da ohne folgende Bohrungen ein großer Spielraum von Fehlerinterpretationen geschaffen wird [7].

Um diesen noch weiter zu reduzieren, kann ein Gesamtprogramm aus mehreren geophysikalischen Messverfahren erstellt werden, das stets in Verbindung mit direkten Aufschlussverfahren auszuführen ist [9]. Aufgeführt sind diese Verfahren auch in der DIN 4020 und werden auf der Seite 25 in einer Tabelle zusammengefasst. Neben dem Aufbau und der Struktur des Baugrundes sind auch seine Eigenschaften, wie Dichte, Wassergehalt und Elastizitätsparameter, bestimmbar. Das Grundprinzip der geophysikalischen Verfahren beruht auf der Messung von Baugrundanomalien. Veränderungen im Boden führen zu einem Wechsel der physikalischen Eigenschaften, und sind somit messbar und auswertbar. Neben

¹⁰ Dies ist in [14] und [15] nachlesbar.

der Erkundung des Baugrundes besitzen die einzelnen geophysikalischen Verfahren weitere Vorteile, worauf auch ihre wachsende Popularität zurückzuführen ist. Zum einen wäre da der Kostenpunkt zu nennen, der durch den geringen Einsatz an Einrichtungs- und Personalbedarf, vergleichsweise zu anderen Aufschlussverfahren, vertretbar ist [9]. Zum anderen kann man punktuell erlangte Informationen des Baugrundes so in die Fläche interpolieren, dass bei einer Auswertung der Messdaten ein dreidimensionales Profil erstellt werden kann [13]. Ein Großteil der geophysikalischen Messverfahren wird prinzipiell von der Geländeoberfläche ausgeführt und sieht keinen direkten Eingriff in die Baugrundsubstanz vor. Gerade bei denkmalgeschützten Gebäuden und deren Baugrund bewährt sich dieses indirekte Messverfahren sehr. Im Bezug zur Erkundung von geschädigten Holzgründungen und deren Analyse ist die Verwendung solcher Messverfahren mit Vorsicht zu genießen. Es ist im Vorhinein abzuklären, welche der zur Verfügung stehenden geophysikalischen Verfahren tragbare Ergebnisse liefern und inwiefern diese mit zusätzlichen direkten Baugrundaufschlüssen in Verbindung gebracht werden müssen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Neben der Ermittlung des Grundwasserstandes durch das Messprinzip der Elektromagnetik könnten die geophysikalischen Verfahren auch zur Erkundung der Art und der Dimensionierung der Holzgründung von Bedeutung sein. Vor allem dann, wenn bei einer Recherche der Gebäudeunterlagen (Abschnitt 2.2 Informationen zum Gebäude) diese Informationen nicht dokumentiert wurden. Die Elektromagnetik und speziell das Verfahren der reinen Magnetik dienen dabei der Ermittlung von Metallen und eisenhaltigen Materialien, womit sich eventuell eiserne Pfahlfüße, Aufpfropfungen und andere metallische Holzverbindungsmitel nachweisen und orten lassen. Mithilfe des Bodenradars und dem seismischen Verfahren sind Einbauten, Hindernisse und Störungen im Baugrund erfassbar, die auf eine mögliche Holzgründung schließen lassen können. Das kann bei genaueren Ergebnissen auch zur Charakterisierung der Gründungsart führen. Inwieweit solche Untersuchungen wirklich verlässliche Ergebnisse liefern und ob diese dann auch ökonomisch vertretbar sind, muss der ausführende Geophysiker und Fachingenieur beurteilen. Zusammenfassend soll an dieser Stelle auf Abbildung 6 verwiesen werden, die noch einmal eine allgemeine Übersicht zu Baugrunderkundungsmethoden zur Erstellung eines geotechnischen Berichts gibt¹¹.

Bei der Ausführung von Baugrunduntersuchungen sollte Acht gegeben werden, wo und wie viele Entnahmestellen angeordnet werden. Natürlich spielen dabei Kosten immer eine entscheidende Rolle und eine hohe Quantität an Untersuchungsstellen hat nicht ständig eine hohe Qualität der Baugrundanalyse zur Folge. Es empfiehlt sich jedoch nach [3], Stellen

¹¹ Auch in [16] wird alles noch einmal ausführlich geschildert.

entlang oder in der Nähe von Fundamenten zu koordinieren. Wenn bei der Suche nach Informationen zum Gebäude (Abschnitt 2.2 Informationen zum Bauwerk) ein vorangegangener Baugrundaufschluss vorzufinden ist, sollte die Ausführlichkeit und Fehlerlosigkeit geprüft werden. Manchmal ergeben sich Widersprüche oder es liegt eine zu geringe Untersuchungstiefe vor. Je nach dem muss der Fachingenieur dann Abwegen eine neue Baugrunduntersuchung zu veranlassen. Die Ergebnisse werden dann in einem Baugrundgutachten festgehalten und geben wiederum Antworten auf die Frage des Grundes des Gründungsschadens. Man muss diese Baugrunduntersuchung, wie auch alle anderen vorangegangenen und folgenden Untersuchungsschritte des Leitfadenausschnitts als Puzzlestück sehen, das am Ende die Unklarheit der Schadensursache und der damit verbundenen Tragfähigkeitsabschätzung sichtbar macht.

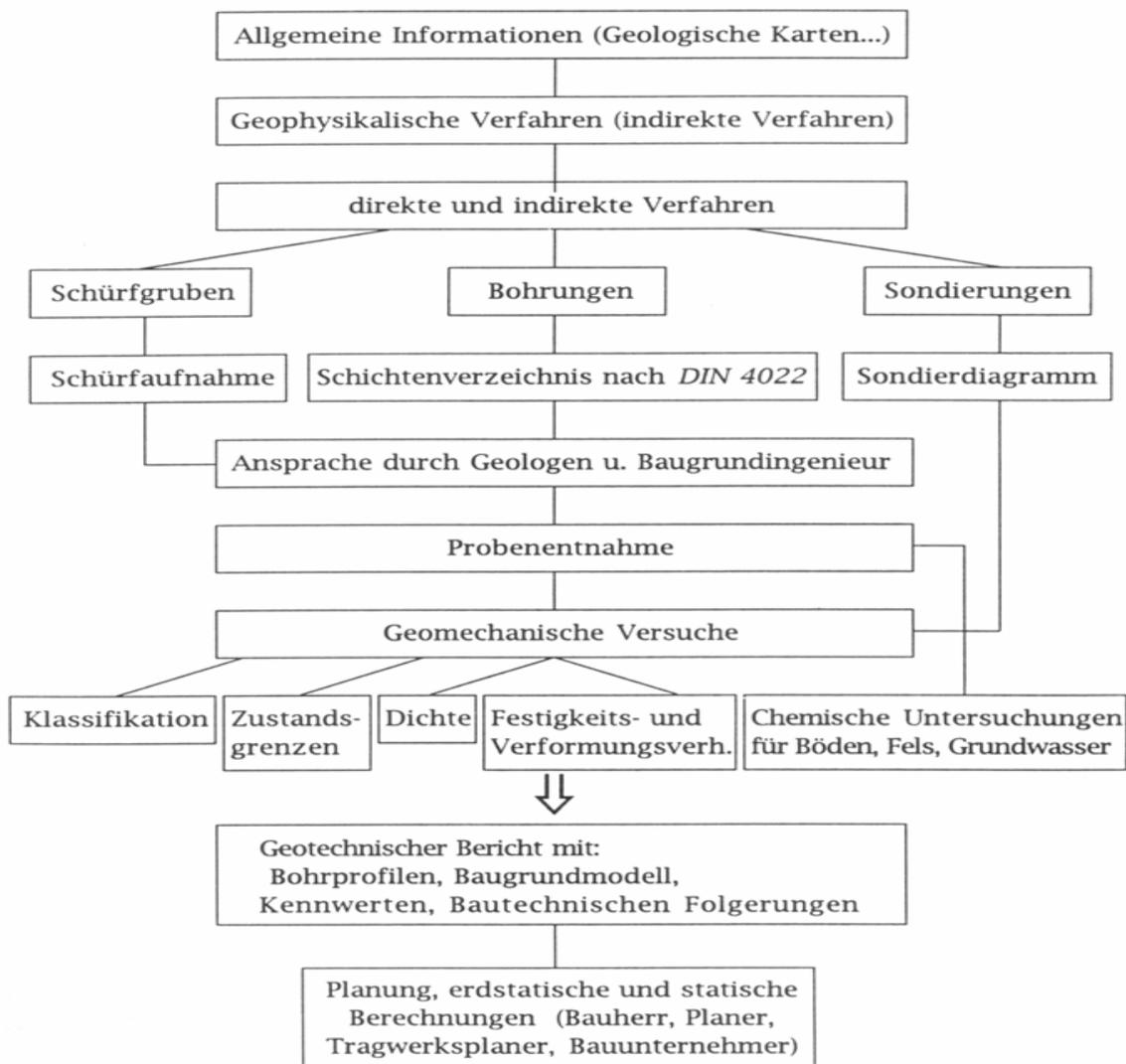


Abbildung 6 Übersicht zur Baugrunduntersuchung [16]

Tabelle 3 Geophysikalische Messverfahren an der Erdoberfläche

Messverfahren	Einsatzort	Messprinzip	Verwendungsbereich
<p>Seismik</p> <ul style="list-style-type: none"> -Reflexionsseismik -Refraktionsseismik -seismische Tomographie -Oberflächenwellenseismik -Vertikale Seismische Profilmessung (VSP) 	<p>Geländeoberfläche und Bohrloch Geländeoberfläche Bohrloch Geländeoberfläche Bohrloch</p>	<p>Informationsträger sind künstlich erzeugte elektrische Wellen und Wellenfelder. Diese besitzen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Materialien. Die Ausbreitung der Wellen wird durch Reflexion, Refraktion, Absorption und Streuung im Untergrund bestimmt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Lage und Verlauf von Schichtgrenzen -Hinweise auf Boden- und Felsarten -Auflockerungen, Hohlräume, Störungen, Einbauten (aus dynamischen Elastizitätsparametern)
<p>Magnetik</p> <ul style="list-style-type: none"> -Totalfeldmessung -Gradientenmessung 	<p>Geländeoberfläche und Bohrloch Geländeoberfläche und Bohrloch</p>	<p>Anfangs kommt es zur Vermessung des Magnetfeldes. Es wird die Magnetfeldstärke in Nanotesla gemessen. Dabei kann es zur Detektierung der Magnetisierung künstlich geschaffener Körper kommen die das lokale Magnetfeld beeinflussen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Auffinden magnetisierbarer Körper/eisenhaltiger Bestandteile (eisenhaltige Silikate/Leitungen, Schrott, bewehrte Fundamente)
<p>Geoelektrik</p> <ul style="list-style-type: none"> -geoelektrische Sondierung -geoelektrische Tomographie 	<p>Geländeoberfläche und Bohrloch Geländeoberfläche und Bohrloch</p>	<p>Zwischen zwei Elektrodenpaaren wird Gleich- oder Wechselstrom eingebracht. Anschließend wird die elektrische Spannung gemessen. Aus Strom und Spannung lässt sich dann der scheinbare Widerstand berechnen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Lage und Verlauf von Schichtgrenzen -Grundwasserspiegel -Hohlräume/Auflockerungszonen -Fundamente -Metalle
<p>Elektromagnetik</p> <ul style="list-style-type: none"> -Elektromagnetische Induktion -Transientenelektromagnetik -Magnetotellurik 	<p>Geländeoberfläche und Bohrloch Geländeoberfläche und Bohrloch Geländeoberfläche und Bohrloch</p>	<p>Ein elektromagnetisches Wechselfeld wird von einer Primärschleife abgestrahlt. Von den im Erdschicht sich befindenden Metallen u. Erdschichten wird eine Spannung induziert. Die elektromagnetischen Felder der Wirbelströme werden von der Sekundärschleife empfangen. Aus den elektrischen Parametern des Baugrundes können dann Ableitungen getroffen werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Lage und Verlauf von Schichtgrenzen -Grundwasserspiegel -Hohlräume/Auflockerungszonen -Störungszonen -Fundamente -Metalle -anthropogene Materialien (Blindgänger, Spundwände)

Tabelle 4 Geophysikalische Messverfahren an der Erdoberfläche (Fortführung)

Gravimetrie -Regionalfeldmessungen -Lokalfeldmessungen	Geländeoberfläche Geländeoberfläche	Es wird die Veränderung des Erdschwerefeldes, aufgrund der Dichteinhomogenität im Untergrund, mithilfe einer Federwaage gemessen.	-Hohlräume und Einschlüsse -Dichteänderungen -Auffüllungen
Bodenradar -Elektromagnetische Reflexionsmessung	Geländeoberfläche und Bohrloch	Kurze elektromagnetische Impulse werden in Baugrund abgesendet. Sie werden an Schichten reflektiert und refraktiert und anschließend von einer Empfangsantenne aufgenommen.	-Lage und Verlauf von Schichtgrenzen -Hindernisse wie Leitungen -Hohlräume
Radiometrie -Geophysikalische Radiometrie (-Aeroradiometrie)	Bohrloch Flugzeug	Aussenden von Gamma- und Neutronenstrahlen. Aus gemessenen Energiespektren wird die Menge des Nuklids bestimmt und dadurch kann dann auf Gesteins bzw. Bodenart geschlossen werden.	-Dichte und Wassergehalt des Baugrundes
Thermografie	Bohrloch	Messung von Temperaturanomalien durch Temperatursensoren.	-Störungszonen im Fels -Grundwasserströmungen

Zusätzlich gibt es noch die Gruppe der geophysikalischen Bohrloch-Messverfahren, bei denen die an der Erdoberfläche praktizierten Messungen mithilfe von speziell entwickelten Sonden (auch Logs genannt) in die Tiefe übertragen werden und erlauben dadurch so eine Extrapolation der einzelnen Bohrlochinformationen entlang eines Profils (auch dreidimensional). Im Laufe der Zeit haben sich zusätzlich ergänzende Messmethoden bei den Bohrloch-Messverfahren entwickelt. Zu ihnen zählt die Gamma-Ray-Log, die Gamma-Gamma-Log, die Kaliber-Log, der Optiskanner und der TelevIEWer. Die aus Vollständigkeitsgründen folgende, aus [9] übernommene Tabelle, beschreibt diese Verfahren nach Messprinzip und Verwendungszweck genauer und gibt einen allgemeinen Überblick der zurzeit praktizierten Methoden. Genauere Informationen zu allen geophysikalischen Verfahren sind in [13], [18] und [9] zu finden.

Tabelle 5 Geophysikalische Messverfahren im Bohrloch [9]

Spalte	1	2	3	4	5
Zeile	Verfahren	Messprinzip	Messgrößen	Verwendung/Zweck	Bemerkungen/Anwendungsgrenze
1	Seismik: Crosshole-, Downhole-Messungen	Erzeugung seismischer Wellen in einem weiteren oder demselben Bohrloch oder an der Geländeoberfläche	Laufzeiten bzw. Geschwindigkeiten zwischen Bohrlochern („Crosshole“) oder zwischen Geländeoberfläche und Punkten im Bohrloch („Up-hole“, „Down-hole“)	Ermittlung der dynamischen Moduln, Bestimmung von Schichtgrenzen, Schichtansprache	Die Ausbildung der Bohrlöcher muss einwandfreien Kraftschluss zum Aufnehmer ermöglichen, s. a. ASTM-Standard D4428/D4428M-00.
2	Akustik/Sonic-Log	Erzeugung und Empfang seismischer Wellen an der Bohrlochwand	Intervall-Laufzeiten zwischen Geber und Empfänger im Dezimeter- bis Meterbereich	Ermittlung von Schichtgrenzen, Porosität, Klüftigkeit, Schichtansprache	Reagiert stark auf Auskesselungen und Unregelmäßigkeiten der Bohrlochwand. Nur in mit Flüssigkeiten gefüllten Bohrlochern anwendbar; u. U. kann hinter der Verrohrung gemessen werden.
3	Geoelektrik: Widerstands-Log, Latero-Log, Microlatero-Log, Dipmeter	Gleichstrom- und Spannungsmessung an unterschiedlichen Elektroden-/Sondenanordnungen im Bohrloch	Stromstärke an Elektroden, Spannungen zwischen unterschiedlich angeordneten Sonden; scheinbarer spezifischer Widerstand	Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit zur Schichtansprache, Porositätsbestimmung, Ermittlung von Schichtgrenzen; Dipmeter: Bestimmung der Raumlage von Schichtgrenzen im Bohrloch	Nur in unverrohrten und mit elektrisch leitender Flüssigkeit gefüllten Bohrlochern anwendbar.
4	Geoelektrik: Eigenpotential-Log	Messung des natürlichen elektrischen Potentials	elektrische Spannung zwischen Bohrlochsonde und Geländeoberfläche	Hinweis auf Schichtgrenzen und auf Wasserdurchlässigkeit	Nur in unverrohrten und mit elektrisch leitender Flüssigkeit gefüllten Bohrlochern anwendbar, unsicher, Effekt nicht immer deutlich.
5	Radiometrie: Gamma-Log	Messung der natürlichen Gammastrahlung	Strahlungsintensität (Zählrate)	Bestimmung von Schichtgrenzen, Schichtansprache (Tongehalt)	Auch in verrohrten und trockenen Bohrlochern anwendbar.

Tabelle 6 Geophysikalische Messverfahren im Bohrloch (Fortführung)

Spalte 1	2	3	4	5
Zeile	Messprinzip	Messgrößen	Verwendung/Zweck	Bemerkungen/Anwendungsgrenze
6	Radiometrie: Gamma-Gamma-Log, Neutron-Log	Intensität (Zählrate) der rückgestreuten Strahlung (Gamma-Strahlung bzw. von Neutronen)	Bestimmung von Dichte bzw. Wassergehalt, Schichtansprache	Reagiert stark auf Auskesselungen und Unregelmäßigkeiten der Bohrlochwand. Auch in verrohrten und trockenen Bohrlochern anwendbar. Gleiches Messprinzip auch bei geramten radiometrischen Tiefensonden, siehe auch „Merkblatt über die Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehalts von Böden“ (FGSV-Nr. 591).
7	Temperatur-Log und Salinitäts-Log	Temperatur, Ionen-gehalt	Hinweise auf Grundwasserströmung	Nur in Flüssigkeit gefüllten unverrohrten bzw. verfilterten Bohrlochern anwendbar. Wartezeit erforderlich, bis Gebirgstemperatur erreicht wird.
8	Kaliber-Log	Durchmesser und Querschnitt	Korrektur der durch unterschiedliche Durchmesser beeinflussten Messgrößen, Lagebestimmung von Aufweitungen	Nur in unverrohrten Bohrlochern sinnvoll, einseitige Ausbrüche der Bohrlochwand verfälschen die Messung.
9	Televiewer	Laufzeiten und Wellenzüge bzw. Signalamplituden der von der Bohrlochwand reflektierten Echos	Ermittlung von Schichtgrenzen und Klüften und ihrer Raumlage im Bohrloch, Schichtansprache; Größe und Querschnitt des Bohrlochs	Nur in mit akustisch transparenter Flüssigkeit gefüllten, unverrohrten Bohrlochern anwendbar.
10	Fernschonde (Optic-Shuttle)	Bilder der Oberfläche von der Bohrlochwand	Ermittlung von Schichtgrenzen und Klüften und ihrer Raumlage im Bohrloch, Schichtansprache; Größe und Querschnitt des Bohrlochs	Nur in luftgefüllten Bohrungen oder in klarer, ungetrübter Spülung anwendbar.
11	Flowmeter	Fließgeschwindigkeit	Wasserwegigkeiten, Zu- oder Austritte von Wasser	Wird oft mit Temperatur- und Salinitätslog in Kombination und bei Pumpversuchen eingesetzt; Ungenauigkeiten bei Auskesselungen.

2.5 Grundwasser

Der Aspekt des Grundwassers spielt in dieser Arbeit eine entscheidende Rolle. Schließlich soll thematisiert und analysiert werden, inwiefern eine Senkung des GWS unmittelbar zu Schäden an der vorliegenden Holzgründung führen kann. Des Weiteren besteht auch ein direkter Zusammenhang zu den im Baugrund resultierenden Prozessen, auf die eingegangen werden soll. Grundwassersenkungen führen nämlich im Regelfall¹² nicht nur zur Aufhebung des Luftabschlusses des Holzes, sondern lösen im Gründungsbereich auch Setzungsprozesse durch Lastumlagerungen aus. Doch bevor darauf in Abschnitt 4 Analyse und Diskussion weiter eingegangen wird, sollen hier erst einmal Grundlagen und Vorgehensalgorithmen aufgezeigt werden.

Der Grundwasserspiegel bildet im Allgemeinen eine Ausgleichfläche zwischen dem Druck des Grundwassers und dem der Atmosphäre. Bei der Messung des Standes ist zu unterscheiden, dass es einen gespannten und einen ungespannten Grundwasserleiter gibt. Der ungespannte GWL steht im direkten Kontakt mit der Atmosphäre. So entsteht zum Beispiel bei der Wasserentnahme durch Brunnen ein sogenannter Absenktrichter. Gespannte Grundwasserstände entstehen, wenn das Grundwasser nach oben durch eine undurchlässige Schicht begrenzt wird. Als nächstes ist zu klären, welche Informationen über das Grundwasser bei einer Gründungsanalyse relevant sind. Normalerweise reicht es aus, den Stand des Grundwassers zu ermitteln. Für diese Untersuchung sind offene Grundwassermessstellen bedeutsam. Sie erlauben die freie Ermittlung der Grundwasser-oberfläche eines ungespannten Grundwasserleiters und die Grundwasserdruckfläche eines gespannten Grundwasserleiters [19]. Der Grundwasserstand selber wird als Abstrich ermittelt. Dieser stellt die Differenz zwischen Grundwasserstand und Messpunkt dar. Manchmal ist es aber auch von Vorteil, nicht nur den Stand, sondern auch im Baugrund vorherrschende Porenwasserdrücke und Wasserqualitäten zu messen. Für diese Bemessungszwecke werden geschlossene Grundwassermessstellen errichtet. Ergibt das Baugrundgutachten, dass Bodenschichten mit verschiedenen Durchlässigkeiten k vorhanden sind, so sind Messungen in verschiedenen Ebenen anzuordnen. Für solche genaueren Messungen wird das Bohrloch mit einem oder mehreren Piezometern¹³ ausgestattet. In der ISO EN 22475-1 Abschnitt 8-10 gibt es eine genaue Beschreibung zu Verfahren zur Messung von Grundwasserständen. EN 1997-2 legt hingegen die Art und die Anordnung von

¹² Dies trifft nicht zu, wenn eine luftundurchlässige Bodenschicht über der Gründung keinen Sauerstoff an das Holz durchdringen lässt.

¹³ Genauere Informationen zu dieser Technik gibt es in [21].

Grundwassermessstellen fest [9]. Praktischerweise werden Messstellen zur Grundwasserbeobachtung dort ausgebildet, wo Bohrlöcher nach der Aufnahme des Bohrprofils nicht wieder verfüllt werden. Zuvor wird jedoch das Bohrkernprofil analysiert und versucht im offenen Bohrloch den Wasserstand zu messen. Fallen beide Bestimmungen positiv aus, wird das Bohrloch zur Grundwassermessstelle umgebaut. Bei dieser Arbeit wird das Bohrloch bis zur grundwasserführenden Schicht mit Filterrohren ausgestattet und der trockene restliche Bereich mit Vollrohren ausgebaut. Anschließend wird zwischen Filterrohr und Baugrund Filterkies verfüllt. Darauf folgt oft die ca. 0,5 m messende Verfüllung des Ringraums mit Feinsand. Der Bereich des Vollrohrs wird meist ausbetoniert oder mit Dichtungston verfüllt [22]. Je nach Gebäudegröße kommt es zur Ausbildung mehrerer Messstellen, um Angaben über die räumliche Verteilung zu erhalten. Sollte in Erwägung gezogen werden das Grundwasser auf seine chemische Aggressivität zu untersuchen, um Aussagen über das Bodenmilieu zu erhalten, ist es ratsam, dies an geschlossenen Messstellen mithilfe einer Pumpe durchzuführen [9].

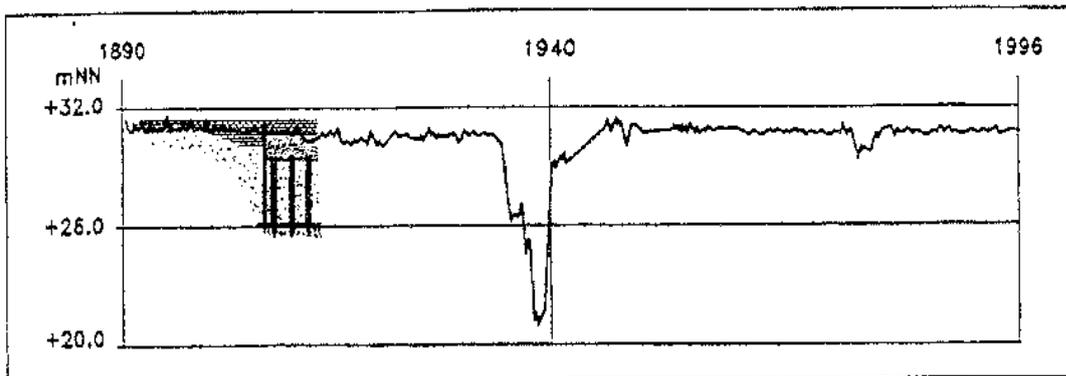


Abbildung 7 Wasserganglinie, Reichstagsgebäude Berlin [8]

Um hilfreiche Prognosen von den Eigenschaften des Grundwassers abzuleiten, sollte neben der Anzahl der Messstellen auch eine Pegelbeobachtung in Betracht gezogen werden [8]. Aus dieser kann eine Wasserganglinie über kurz oder lang erstellt werden (Abbildung 7). Die zeitlichen Messabstände sind vom Fachingenieur zu wählen. Meist werden diese Messstellen auch noch nach der Erkundung bzw. einer folgenden Sanierung weiter betrieben, um den Pegelstand zu kontrollieren und zu dokumentieren. Neben den aus Bohrlöchern umgebauten Messstellen, kann auch an Schürfen, die den Grundwasserbereich tangieren, Pegelbeobachtungen durchgeführt werden. Man kann bei länger offenliegenden Schürfgruben dann auch den jahreszeitlichen Wassergang verfolgen und dokumentieren [9]. Letztendlich gibt es aber nur drei triviale Ergebnisse. Entweder befindet sich die zu

erkundende Holzgründung im Grundwasserbereich und steht somit unter Sauerstoffabschluss, sodass ein Pilzbefall ausgeschlossen werden kann. Mögliche Schadensursachen wären dann bei Bakterien oder dem Prozess der Hydrolyse zu suchen und zum anderen kann sie sich komplett über dem GWS befinden, sodass der Luftumschluss als auch die noch vorhandene Feuchte einen optimalen Nährboden für Pilze bildet. Oder es befinden sich nur die Pfahlköpfe bzw. ein eventuell vorhandener Schwellenrost über dem Grundwasserstand. Je nach Sachlage muss dann in Abschnitt 4 eine Bewertung geführt werden. Durch Langzeitbeobachtung kann auch noch ein vierter Spezialfall auftreten, der sozusagen die drei vorher genannten verbindet. Möglicherweise kann es durch anliegende andere Baumaßnahmen und damit verbundenen Grundwassersenkungen oder durch jahreszeitlich temperaturabhängige Auswirkungen zum Wechsel der Wasserganglinie kommen. Eine kurz oder langzeitliche Senkung und einer damit verbundenen teilweise Trockenlegung der Gründung ist sehr ernst zu nehmen. M. Goldscheider gibt in [3], Tabelle 7, eine Interaktion zwischen Schädigung und zeitlicher Trockenlegung an. Nicht nur, dass sich ein Pilzbefall ausbreiten kann, stellt eine Gefahr der Dauerhaftigkeit der Gründung dar, sondern die irreparable Volumenabnahme des Holzes ist kritisch anzusehen [23]. Holzaustrocknung führt bei einer vorangegangenen Wassersättigung über ca. 30 Prozent zur Volumenverminderung. Es ist zu erwähnen, dass Wiederbefeuchtung nicht zur Wiederaufnahme des gleichen Volumens führt. Je trockener die Holzgründung war, um so weniger wird vom Ausgangsvolumen vor der Senkung erreicht.

Dauer der Absenkung des Wasserspiegels	Wassersättigung des Holzes	Pilzwachstum	Auswirkung auf das Holz
Stunden, z. B. Gezeitenwechsel	unvermindert	keines	keine Schädigung
eine Woche bis einen Monat	nahezu unvermindert	vernachlässigbar	keine Schädigung
	leicht vermindert	beginnend	keine Schädigung
mehr als sechs Monate	merklich vermindert	unterschiedlich	beginnender Abbau
	merklich vermindert	stark	Zerstörung

Tabelle 7 Interaktion zwischen Trockenlegung und Schädigung [3]

Es ist zu klären welche Vorgänge¹⁴ sich im Baugrund abspielen, wenn der GWS sich unter die Oberkante der Holzgründung senkt. Auch ist zu analysieren, ob das Holz dann überhaupt Wasser abgibt und von was dieser Vorgang alles abhängig ist? Wenn der Stand des Grundwassers abnimmt, dann sind die Bodenkapillare nicht mehr oder nur noch teilweise mit Wasser gefüllt. Die Wasserdampfsättigung der Hohlräume ist dann so gering, dass Wasser aus dem Holz in die Bodenhohlräume abdampft. Doch bevor es zu diesem Vorgang kommt, müssen mehrere Dinge erfüllt sein. Der Boden muss unter dem Punkt der Dampfsättigung der Bodenkapillare absinken. Es sollten wenigstens geringe vertikale Kräfte auf den Pfahl oder die Schwelle wirken. Das Holz sollte nur noch eine minimale radiale Druckfestigkeit besitzen. Diese könnte zum Beispiel durch eine hohe Verbundlosigkeit, ausgelöst durch Holzerstörung, erreicht werden. Als Grenze dieser minimalen Druckfestigkeit wird in [23] eine Dichte von Holz um die 0,18 bis 0,2 g/m³ angegeben. Dieser Wert scheint auch logisch, da mit erhöhten Holzerstörungsgrad, die Wasserzunahme des Holzes steigt und analog dazu seine Dichte abnimmt. Dieser Prozess stellt eine Art Verfahrenheit dar, da eine einmal angefangene Schädigung kaum aufzuhalten ist.

¹⁴ Als Vorgänge ist hier das Wechselspiel Boden Holz gemeint.

3 Erkundung der Gründung aus Holz

3.1 Grundlagen

Bei einer geotechnischen Erkundung einer Holzgründung ist es wichtig zu wissen, welche Gründungsarten zum Einsatz kamen und wie sie historisch einzuordnen sind. Besondere Ausführungsmerkmale und Dimensionierungen können hilfreich bei der weiteren Analyse und Wertung sein. Auch sollte man sich mit dem Baustoff Holz auseinander setzen und versuchen durch seine Eigenschaften und seiner Anatomie weitere Aufschlüsse zur Schädigung zu gewinnen. Das Holz nimmt bei der Tragfähigkeitsabschätzung einen hohen Stellenwert an und sollte genauestens labortechnisch und mechanisch auf seine Eigenschaften untersucht werden. Holzcharaktere wie Dichte, Wassergehalt und E-Modul sind besonders zu analysieren. Da die Materialschadensanalyse aber in einer Fortsetzung des Leitfadens aufgegriffen werden soll, wird hier lediglich auf erkundungsrelevante Eigenschaften eingegangen. Diese sollen in Rahmen dieser Arbeit das Holzalter, die Holzart und der visuell erfassbare Pfahlquerschnitt sein. Außerdem soll ein kurzer Überblick zu den relevantesten Bodenarten und besonderen Baugrundeigenschaften, immer auf eine Interaktion zum Baustoff Holz bedacht, gegeben werden. Genauer wird dann auf die Kapillarität bindiger und nichtbindiger Böden eingegangen. Sie prägt die unterschiedlichen Saugspannungen verschiedener Bodenarten und steht im Zusammenhang mit der Wasserabgabe im Holz. Aufgrund dieser Grundlagen kann man die Gründungskonstruktion einordnen und eine erste Wertung des Schadens vornehmen. Mögliche Schadensursachen durch Ausschlussverfahren eingrenzen und zukünftige Tragfähigkeiten abschätzen.

3.1.1 Typische Gründungsarten

3.1.1.1 Gesamtüberblick

Im Allgemeinen gibt es drei Gründungskonstruktionen aus Holz, die echte Pfahlgründung, die Spickpfahlgründung und die horizontalen Balkenroste (Abbildung 8). Teilweise trifft auch der Begriff der historischen Gründung auf diese drei Formen zu. Gerade in Deutschland finden sie immer seltener ihre Anwendung. Blickt man zurück in die Historie, so ist festzustellen, dass sie im Gegensatz zu heute früher einen viel höheren Stellenwert besaßen. Schon vor über 10.000 Jahren kam Holz zur Baugrundverbesserung zum Einsatz [24]. Heute spielen sie vor allem bei Gründungssanierungen sowie den vorausgegangenen Gründungsschäden eine wichtige Rolle. Ihr Anwendungsbereich lag und liegt in der Baugrundverbesserung von nicht tragfähigen Bodenschichten. Zu beachten ist, dass die

oben genannten Gründungskonstruktionen immer unter Sauerstoffabschluss im Grundwasserbereich ausgeführt wurden. Die nachfolgende Vorstellung der einzelnen Gründungskonstruktionen aus Holz und deren mögliche Kombinationen soll dem Leser einen Einblick verschaffen, auf welche Gründungsart und deren Ausführung man bei einer Gründungserkundung stoßen kann, wie sie zeitlich einzuordnen ist, welche Besonderheiten sie haben kann und wie sie statisch wirkt. Natürlich lässt diese Zusammenfassung nur einen Überblick zu. Deshalb wird auf tiefer eindringende Literatur von M. Goldscheider „Baugrund und historische Gründung“, H. Wichert „Einfluss der Alterung auf die Tragfähigkeit von historischen Spickpfahlgründungen und P. Böttcher „Untersuchung von Tragverhalten von Holzpfehlgründungen in Abhängigkeit von der Holzerstörung im Untergrund“ verwiesen. Sie decken nur einen kleinen Bereich der zu Verfügung stehenden Literatur ab. Dieser folgende Überblick soll helfen in Abschnitt 4 „Analyse und Diskussion der Ergebnisse“, Schäden und die statische Wirksamkeit von Holzgründungen einzuordnen und zu bewerten.

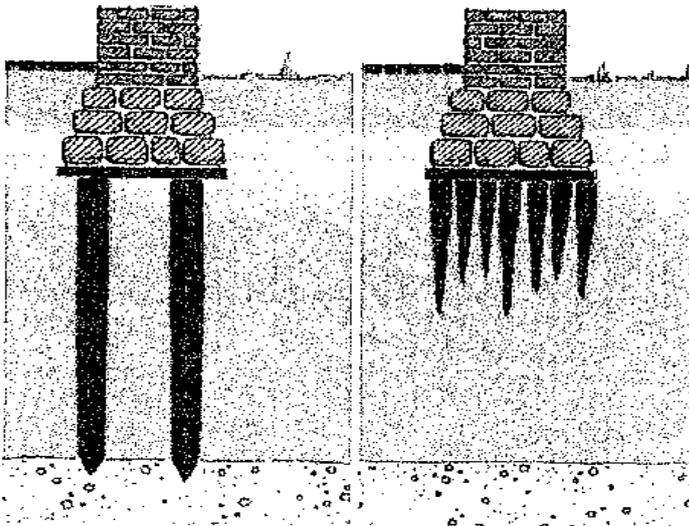


Abbildung 8 Tiefen- und Spickpfahlgründung [1]

3.1.1.2 Echte Pfahlgründung

Allgemeines

Die echte Pfahlgründung, die auch Langpfahl- oder Tiefenpfahlgründung genannt wird, entspricht im groben der heutigen Definition eines geotechnischen Gründungspfahls [3]. Beide, früher wie auch heute, haben die Aufgabe in tieferliegende tragfähige Bodenschichten zu gründen [25] (Abbildung 9). Vor allem bei Konzentrationen großer Lasten, der Gründung im Grundwasserbereich, nicht tragfähigen Deckschichten und unregelmäßigem Aufbau der Gründungsschicht behelf man sich schon früher dieser Technik. Zur Ausführung der Pfahlgründung wurden vor allem harzreiche Kiefern, Buchen, Eichen als auch Erlenstämme verwendet [24], die basierend auf damaligen Erfahrungswerten, eine höhere Lebenserwartung besaßen, als vergleichsweise andere Nadel und Laubholzarten (Abschnitt 3.1.2.1 Holzart). Prinzipiell leitet eine Tiefenpfahlgründung aus Holz, wie sie damals ausgeführt wurde, ausschließlich Normalkräfte in den Baugrund ab. Deswegen sind sie auch relativ zerstörungsanfällig, was die Belastung auf Biegung bzw. die Einleitung von Querkräften angeht [26].

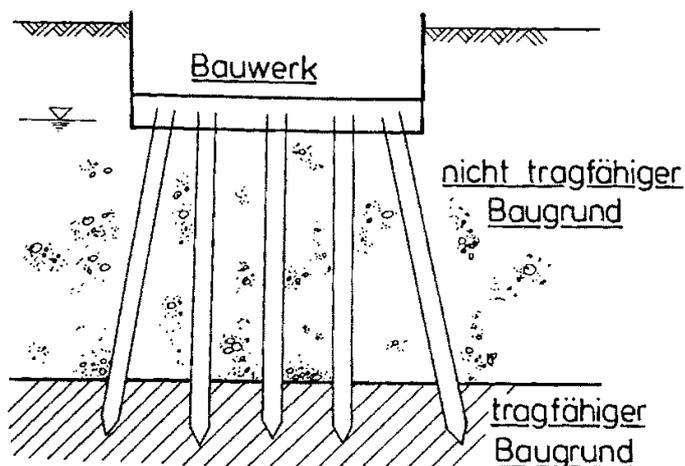


Abbildung 9 Echte Pfahlgründung [25]

Ausführung und Abmessungen

Erhält der Ingenieur bei der Erkundung einer Holzgründung mittels einer dendrochronologischen Untersuchung (Abschnitt 3.1.2.2 Holzalter) ein Holzalter, das sich bis vor das 18. Jahrhundert datiert, kann man davon ausgehen, dass der Pfahl meist eine Länge von 3 m nicht überschreiten wird. Dies beruht darauf, dass bis zum 18. Jahrhundert überlieferte Faustformeln verwendet wurden, die eine Länge über 3 m nicht vorsahen. Erst durch die Einführung und Übermittlung neuer Erkenntnisse und Erfahrungen aus den Niederlanden nach Preußen und der dazu parallel verlaufenden industriellen Weiterentwicklung, welche auch die Erfindung der Dampftramme einschließt, war es nun möglich Pfahllängen bis zu 15 m in den Boden zu rammen. Zuvor geschah dies nur mit einer Zug bzw. Kunsttramme manuell [3]. Der Querschnitt eines Pfahls wurde aus seiner Länge ermittelt, wobei zwei Faustregeln zum Tragen kamen. Zum einen sagte man, dass ein Holzpfehl der Länge 4 m einen mittleren Durchmesser von 22 cm besitzen sollte und mit jedem Meter, den er länger bemessen wurde, sollte der Durchmesser um 1,5 bis 1,0 cm/m vergrößert werden. Zum anderen gab es die Faustformel $d=12+3l$ (l in m) bzw. $d=15+0,02l$ (l in cm), die im Grunde die erste bestätigt. Angeordnet wurden die Tiefengründungspfähle parallel zu den Gründungsmauern unter dem Gebäude. Häufig bediente man sich der Anordnung einer Dreierreihe unter den lastabtragenden Wänden mit einem Abstand von 0,6 bis 1,0 m. Man ging davon aus, dass somit die Pfahlbelastung um 50 Prozent ausgenutzt wurde und dadurch noch eine gewisse Sicherheit zur Verfügung stand. Selten wurden Mauern auch nur auf einer Reihe errichtet. Eine Reihenanzahl größer drei gab es unter besonderen Fundamenten von Türmen oder Pfeilern von Brücken. Der Abstand der Pfähle innerhalb einer Reihe beträgt ungefähr 1 m. Von diesem Wert darf bei einer Erkundung ausgehen werden. Der Abstand hängt einerseits von der tatsächlichen Last ab, inwiefern der damalige Baumeister bei hohen Lasten engere Abstände wählte und andererseits vom technisch möglichen kleinsten Abstand. Wurde dieser nämlich zu eng gewählt, konnte es beim Rammvorgang zur Beschädigung der Nachbarpfähle kommen. Außerdem würde auch der Rammwiderstand unüberwindbar werden, da die Nachbarpfähle eine Behinderung der seitlichen Bodenverdrängung bewirken. Hatte man nun den Pfahl entweder manuell mit der Kunst¹⁵/Zugtramme¹⁶ bzw. später automatisch mit der Dampftramme in den Boden geschlagen, wurde anschließend der Pfahlkopf unter dem GWS abgesägt. Oft kam es nach diesem Schritt noch zu einer Ausbildung einer Zapfenverbindung an der Pfahlspitze, um so einen kraftschlüssigen Verbund zu dem meist darauf ausgebildeten Schwellenrost

¹⁵ Mittelalterliche Ramme bei der die Arbeiter an einer Radwelle arbeiten. Durch Vorgelege kann hier das Gewicht und die Steighöhe des Rammbaren beliebig vergrößert werden.

¹⁶ Große Ramme, die mit bis zu 40 Männern betrieben wurde. Rammbar wurde über Seile manuell gehoben.

herzustellen. Nicht selten wurde anschließend der Übergangsbereich zwischen den einzelnen Tiefenpfählen und dem Schwellenrost (vergleiche Abschnitt 3.1.1.4 Horizontale Balkenroste) mit Kies, Schutt oder Lehm verfüllt, um so eine bessere Tragwirkung zu erzielen. Gerade bei Gründungspfählen, die oft durch die damalige zu kurze Dimensionierung keine tragfähigen Bodenschichten erreichten, ist man von einer kombinierten Tragwirkung ausgegangen. So wurde auch die Aufschüttung, anders als heute, zur Lastabtragung herangezogen so dass beim Versagen der Pfahlgründung es sofort zur geplanten Lastumlagerung auf dem Baugrund kam, und somit die Setzungen relativ gering ausfielen. [3] Weitere Ausführungsbesonderheiten, auf die man stoßen kann, bei der Freilegung einer solchen Holzgründung sind Aufpfropfungen (Abbildung 10). Diese dienten dazu zwei Holzpfähle miteinander zu verbinden, um so in tieferliegende tragfähigere Bodenschichten zu gründen. Ausgeführt wurden diese Verbindungen durch Stahlbänder, schmiedeeiserne Schienen oder Kreuzstößen [27]. An der Pfahlspitze, die meist am Zopfende¹⁷ des Stammes orientiert war, befanden sich oft eiserne Pfahlschuhe, die die Spitze beim Rammvorgang gegen Zerstörung schützen sollten (Abbildung 10) [26].

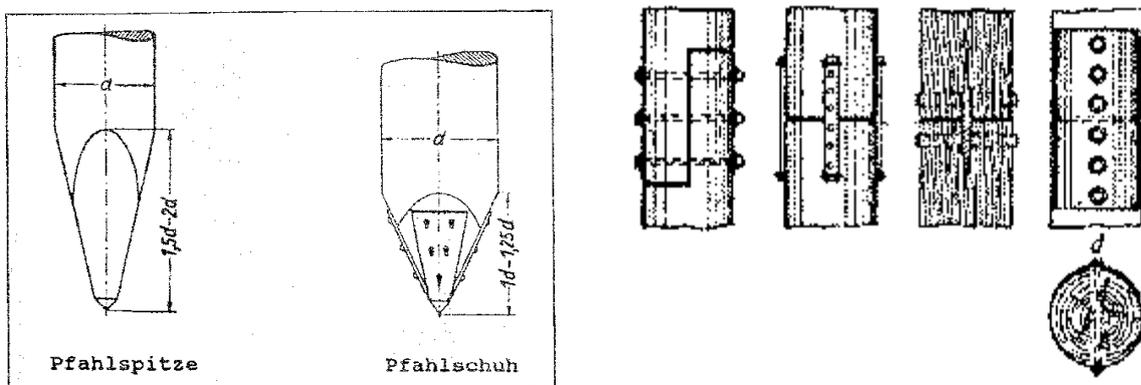


Abbildung 10 links "Eiserne Pfahlspitze" [26] rechts Aufpfropfungsformen [28]

¹⁷ Ist das obere dünnere Ende des geschlagenen Baumstammes.

Statische Wirkungsweise

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Abtragung der Normalkräfte eines Rammpfahles auf den Baugrund [29]. Zum einen über seinen Pfahlquerschnitt, den sogenannten Spitzendruck (Spitzendruckpfahl). Hierbei spricht man von einer stehenden Gründung, welche die Normalkräfte des Bauwerks in eine tieferliegende feste Bodenschicht abträgt. Im Idealfall ist diese eine mitteldicht gelagerte nichtbindige Schicht, um alle Lasten sicher aufzunehmen [3]. Eine oder mehrere nichttragende weiche Bodenschichten werden dabei von dem Holzpfahl überbrückt. Die andere Möglichkeit der Rammpfähle Normalkräfte auf den Baugrund zu übertragen, ist über die Mantelreibung des Umfangs (Mantelreibungspfahl). Hierbei durchdringt der Holzpfahl eine oder mehrere Schichten mäßiger Tragfähigkeit und gibt seine Last allein über Mantelreibung in Abhängigkeit von der Pfahllänge an den Baugrund ab. Man spricht auch von einer schwimmenden Gründung. In der damaligen Zeit, als solche Rammpfähle ausgeführt wurden, unterschied man prinzipiell zwischen Mantelreibungspfählen (schwimmende Pfahlgründung) und Spitzendruckpfählen (stehende Pfahlgründung) (Abbildung 11). Heute ist jedoch bekannt, dass jeder Pfahl mit einer gewissen Mantelreibung trägt und in manchen Fällen sogar der Spitzendruck vernachlässigt werden kann. Zur Tragfähigkeitsabschätzung behalf man sich früher wie heute mit der zulässigen Normalkraft (zul. F), wobei man heute eher vom Pfahlwiderstand spricht. Diese Kraft beschreibt die Beanspruchbarkeit eines Pfahls und gibt den Widerstand des Holzpfahls gegenüber einer axialen Belastung an. In der Geotechnik wird dieser Wert mit der

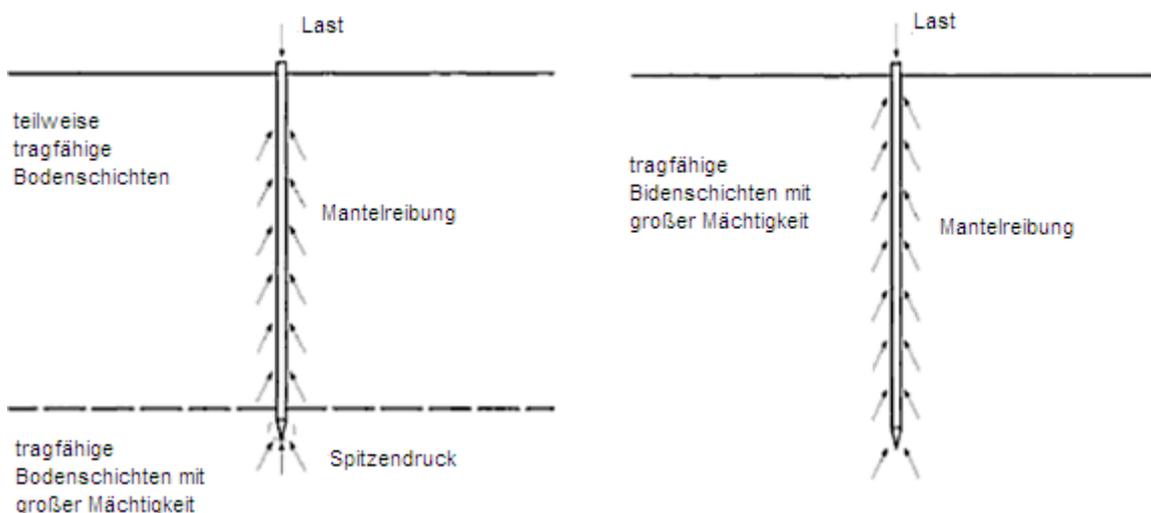


Abbildung 11 links stehende Pfahlgründung, rechts schwimmende Pfahlgründung [30]

Beanspruchung, also der tatsächlichen Belastung des Holzpfahls verglichen, um so seine Tragfähigkeit zu ermitteln und die damit verbundenen Setzungen abzuschätzen. Bei ausschließlicher Berücksichtigung des Spitzendrucks q_B (früher σ_S) wird aktuell die Tragfähigkeit wie folgt berechnet: $R_B = D^2 \cdot \pi / 4 \cdot q_B$ [31]. Heutige Annahmen des Spitzendrucks q_B liegen bei nichtbindigen Böden bei 2-4 MN/m², bindigen Böden bei 0,8-1,5 MN/m² und Fels bei 1,5 bis 10 MN/m². Die früher zur Anwendung gekommene Tragfähigkeitsformel *zul.* $F = \sigma_S \cdot A$ hat eine identische Aussage. Lediglich der Spitzendruck σ_S wurde zwischen 0,08 MN/m² bei Moorböden und 0,7 MN/m² bei Sand, Lehm und Tonböden geringer in Ansatz gebracht [26]. Diese kleiner angenommenen Werte des Spitzendrucks σ_S hatten zur Folge, dass entweder Querschnitte zu groß dimensioniert bzw. aufnehmbare Lasten auf der Widerstandsseite mit zu kleinen Werten ermittelt wurden. Somit ergab sich eine erhöhte Sicherheit in der damaligen Berechnung des Spitzendrucks. Nur logisch erscheint es, dass manche der damaligen Baumeister viele Spitzendruckpfähle mit dem breiteren Durchmesser zuerst in den Baugrund trieben, um so die Tragfähigkeit des Holzpfahls zu erhöhen. Wichtig aus heutiger Sicht ist es, den Widerstand durch Spitzendruck nur dann anzusetzen, wenn man in eine tragfähige Bodenschicht gründet. Dies entspricht einer Art zusätzlicher Sicherheit. Früher wurde dies nicht berücksichtigt.

Um bei einem Holzpfahl den Tragfähigkeitsanteil durch Mantelreibung q_S zu ermitteln, verwendet man heute den Ansatz: $R_S = D \cdot \pi \cdot L \cdot q_S$ [31]. Die Mantelreibung q_S wird hierbei bei nichtbindigen Böden mit 40-100 KN/m², bei bindigen Böden mit 25-60 KN/m² und bei Fels mit 80-500 KN/m² angenommen. Analog zum Spitzendruck hat auch die früher verwendete Formel zur Berechnung der Mantelreibung eine kompatible Aussage: *zul.* $F = R_0 \cdot \pi \cdot L \cdot d$ [26]. Lediglich die damaligen Annahmen des Reibungsbeiwertes R_0 bürgen wieder höhere Bemessungssicherheiten mit R_0 gleich 0-2 KN/m² bei Torfböden, ≤ 10 KN/m² bei weichem Lehmvorkommen, ≤ 20 KN/m² bei Schwemmsand und ≤ 30 KN/m² bei Sanden und festen Tonen [26]. Mantelreibungspfähle, wie man sie auch früher bezeichnete, wurden mit dem Zopfende zuerst in den Boden gerammt, um so den Manteldruck zu erhöhen.

Je nach vorliegender Gründungssituation kann es auch zur Superposition der beiden Tragfähigkeitsanteile kommen. Dies würde zum Beispiel in Betracht gezogen werden, wenn ein Pfahl in eine tragfähige Schicht ausreichend tief eingetrieben wird und zusätzlich durch angreifende Reibungskräfte Lasten an die umliegenden Bodenschichten abgeben kann. Folglich berechnet man den Holzpfahlwiderstand $R = R_S + R_B$ bzw. die zulässige Normalkraft $F = \sigma_S \cdot A + R_0 \cdot \pi \cdot L \cdot d$. Beim Aufbringen der Last wird zuerst die Mantelreibung bis zu ihrem Grenzwert ausgenutzt und anschließend wird der Spitzendruck bei weiterer Lastzunahme bis zum Versagen aktiviert (Abbildung 12). Eine unzureichende Dimensionierung der Pfähle

bzw. eine falsche Ausführung der Gründung kann somit auch als eine Schadensursache herangezogen werden. In Abschnitt 4 wird erläutert, was geotechnisch mit der Holzpfahlgründung passiert, wenn es durch Grundwassersenkung zur Sekundärsetzung der Bodenschichten kommt. Die Problematik der Lastumlagerung und der negativen Mantelreibung werden dort näher betrachtet.

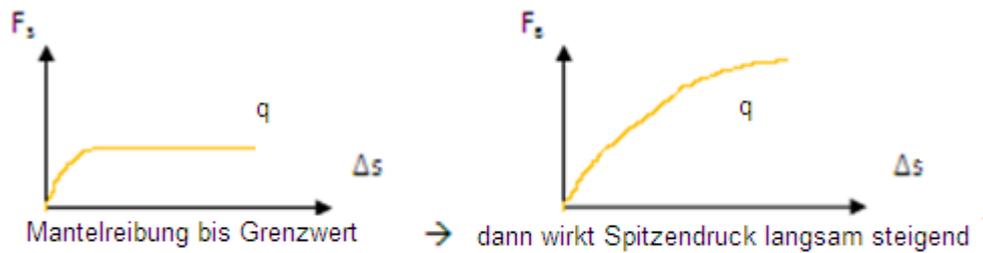


Abbildung 12 Ablauf der Kräftereaktion bei Druck [31]

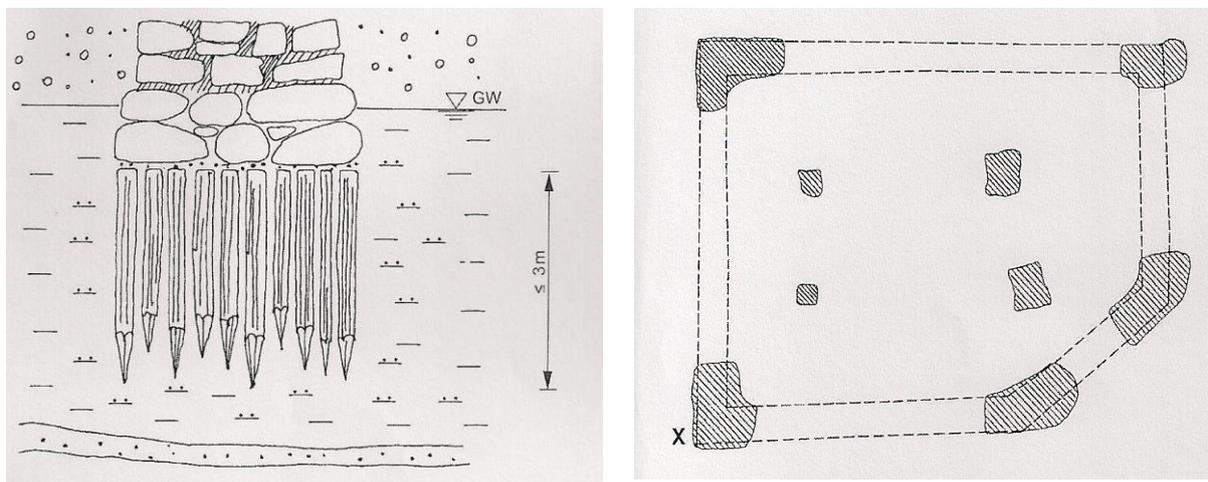


Abbildung 13 links: Spickpfahlgründung unter Gründungsmauerwerk [3]

rechts: Verteilung einer Spickpfahlgründung unter einem Gebäude

3.1.1.3 Spickpfahlgründung

Allgemeines

Die Spickpfahlgründung, die auch Verdichtungspfahl- bzw. Kurzpfahlgründung genannt wird, ähnelt prinzipiell in ihrer geotechnischen Wirkungsweise derjenigen eines kurzen Verdrängungspfahls. Sie dienen beide zur Baugrundverbesserung. Die SPG ist eines der ältesten Gründungsverfahren. Gerade Böden, bei denen ein hoher GWS eine sehr weiche Konsistenz des Bodens zur Folge hat, eigneten sich Verdichtungspfähle aus Holz optimal zur Baugrundverbesserung. Das Einschlagen der Holzspickpfähle unter den GWS ließ unter Sauerstoffabschluss eine lange Nutzungsdauer annehmen und machte diese Baugrundverbesserung Jahrhunderte lang praktikabel. Sie wurde auch bei der Gefahr einer Fundamentunterspülung sowie bei der Gründung in Talauen und Flussniederungen angelegt [24]. Überall, wo man auf schlechten bzw. weichen Baugrund traf oder relativ hohe Lasten in den Boden abtrug, kamen Spickpfähle aus Holz zum Einsatz. Es handelt sich hierbei nicht um eine klassische Pfahlgründung, sondern um eine Methode der Baugrundverdichtung.

Ausführung und Abmessungen

Funde aus dem 13. Jahrhundert [3] belegen, dass diese Art der Baugrundverbesserung schon damals eine übliche Methode war. Natürlich hat sich im Laufe der Zeit das Wissen um Technik und Ausführung einer solchen Gründung drastisch verändert. So findet man bei jahrhundertealten SPG anfangs eine regellose Anordnung von Pfählen vor. Gerade in Gebäudeecken der Fundamente traf man auf ein verstärktes Vorkommen der Kurzpfähle (Abbildung 13). Anders als heute dachte man wahrscheinlich, dass dort die zentrierte Lastableitung stattfinden würde. Nichtsdestotrotz wurden schon damals meist gleichlange Pfähle sehr dicht in den weichen Baugrund getrieben. Man nannte dieses Rammen "Mann an Mann" und verwendete an Stellen höherer Festigkeit einfach kürzere Pfähle, umso so eine einheitlich feste und gleich ebene Gründungsfläche zu erhalten. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelten sich zwei Hauptvorgehensweisen bei der Einbringung der Pfähle, um maximale Verdichtung zu erreichen. Zum einem wurden die Pfähle ringförmig angeordnet (Abbildung 14), sodass der verdichtete Boden nach außen gedrängt wurde. Dies eignete sich vor allem bei einer flächigen Anordnung der SPG unter dem gesamten Gebäude. Hier zählte das Prinzip mit vielen Pfählen eine hohe Verdichtung zu erzielen. Zum anderen wurden die Pfähle quadratisch angeordnet, um dann in den Schnittpunkt der Diagonalen wieder einen Pfahl einzutreiben (Abbildung 14). Anschließend wurden noch vier

Pfähle in die Seitenhalbierenden des Quadrats getrieben, sodass man 4 neue Quadrate erhielt. Diesen Vorgang konnte man bis zur gewünschten Verbesserung des Baugrunds wiederholen bzw. solange bis kein Pfahl mehr einrammbar war. Diese Vorgehensweise wurde angewendet, wenn man gezielt Lasten unter einzelnen Gründungsstellen abtragen wollte. Mit dieser Variante konnte man auch mit relativ wenig Pfählen eine hohe Tragfähigkeit erzielen. Als Spickpfähle wurden üblicherweise Holzscheite bzw. angespitzte Rundhölzer verwendet. Die verwendete Holzart unterscheidet sich nicht von derjenigen der Tiefenpfähle und lässt sich meistens auf Buche, Kiefer, Erle oder Eiche zurückführen. Bei der Freilegung bzw. Entfernung einer solchen Spickpfahlgründung wird man auf Ausführungslängen von 2-3 m stoßen welche 4 m kaum übertreffen [24]. Aufgrund vieler dokumentierter Fälle weiß man, dass die Ausführungsdurchmesser zwischen 5 und 30 cm liegen können. Somit muss nicht jeder freigelegte Pfahlkopf mit einem Durchmesser größer 20-25 cm gleich ein Indiz für eine Tiefengründung sein. Es ist zu empfehlen die Länge der Pfähle zu bestimmen, womit sichere Rückschlüsse auf die Gründungsart möglich sind (Abschnitt 3.2.2 Zur Pfahllängenbestimmung).

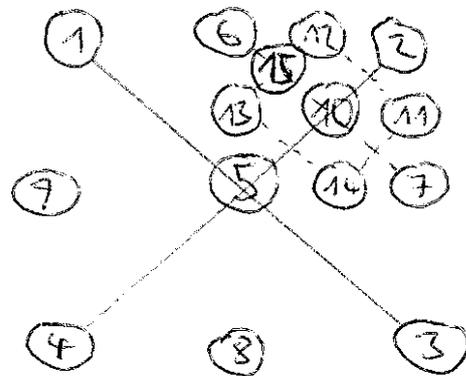
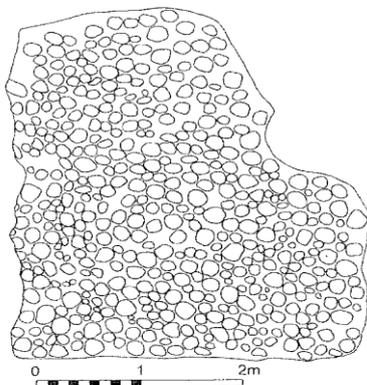


Abbildung 14 links: runde Anordnung

rechts: quadratische Anordnung [3]

Statische Wirkungsweise

Ganz allgemein betrachtet und wie schon erwähnt, besteht die statische Aufgabe einer SPG in der Regel darin, den oberen Baugrund zu verbessern. Dies bedeutet, eine festere und tragfähigere Gründungssohle durch Verdichtung zu erzeugen. Man könnte die einzelnen Holzpfähle im Boden mit einer Art Bewehrung gegen Druck, aber auch Biegung und Zug vergleichen. Es entsteht eine Art Verbundwirkung zwischen Baugrund und Holz, die eine Aussteifung des Bodens zur Folge hat. Gerade gegen entstehende Schubverformung, resultierend aus Primär- und Sekundärkonsolidierung, die unterschiedliche Setzungen zur Folge haben können, wirkt die zusätzliche Bodenaussteifung entgegenwirkend. Zudem wird die Gefahr des Grundbruchs eingedämmt [3]. Bei genauerer Betrachtung entsteht durch den Rammvorgang ein intensiver Verbund zwischen Pfahlfuß und Boden, sodass bei Spickpfählen bereits zu Beginn der Lastaufbringung die eingebrachten Lasten über Mantel und Spitzenwiderstand abgetragen werden. Dies hat zur Folge, dass Primärsetzungen geringer ausfallen. Da SPG meist in nicht tragenden, weichen Baugrund getrieben wurden, und sie im Gegensatz zu Tiefengründungen nur geringe Längen besitzen, können sie nicht zur Lastabtragung in tragfähige Schichten angesetzt werden. Dem zufolge fällt auch der Mantelreibungswiderstand in Abhängigkeit von der Länge geringer aus. Ein anderer Nachteil dieser Gründungsvariante besteht in der Wirtschaftlichkeit der Gesamttragfähigkeit. Da der Achsabstand der Spickpfähle viel geringer ausfällt als bei Langpfahlgründungen, kommt es zu Überschneidungen der Wirkungsbereiche vieler Kurzpfähle. Nichtsdestotrotz hatte diese damalige Ausführung der Gründung, wie auch die der Schwellenroste (Abschnitt 3.1.1.4), hauptsächlich noch eine Aufgabe, nämlich eine ebene, tragfähige Fläche zu schaffen, worauf man das Fundamentmauerwerk gründen konnte.

3.1.1.4 Horizontale Balkenroste

Allgemeines

Der Horizontale Balkenrost, der in der Literatur auch als Schwellenrost beschrieben wird, besteht aus Längs- und Querschwellen. Ähnlich einer heutzutage ausgeführten Bodenplatte dienen sie zur Lastverteilung. Aber auch die einfachere Ausführung des Gründungsmauerwerks auf den darunter befindlichen Bohlen zählt zu den Vorteilen einer solchen Gründung. Gerade Eichenholz (Abschnitt 3.1.2.1 Holzart) wurde bevorzugt zur Herstellung der Schwellen verwendet, da man sich meist in der Wasserwechselzone befand. Diese bietet gerade für Schädlinge, wie Pilze, optimale Lebensbedingungen. Das Vorhandensein von Sauerstoff und Feuchte sind optimale Existenzvoraussetzungen für sie. Das ist auch der Grund, warum bei einer Gründungserkundung meist nur noch Reste der Bohlen und Schwellen vorzufinden sind.

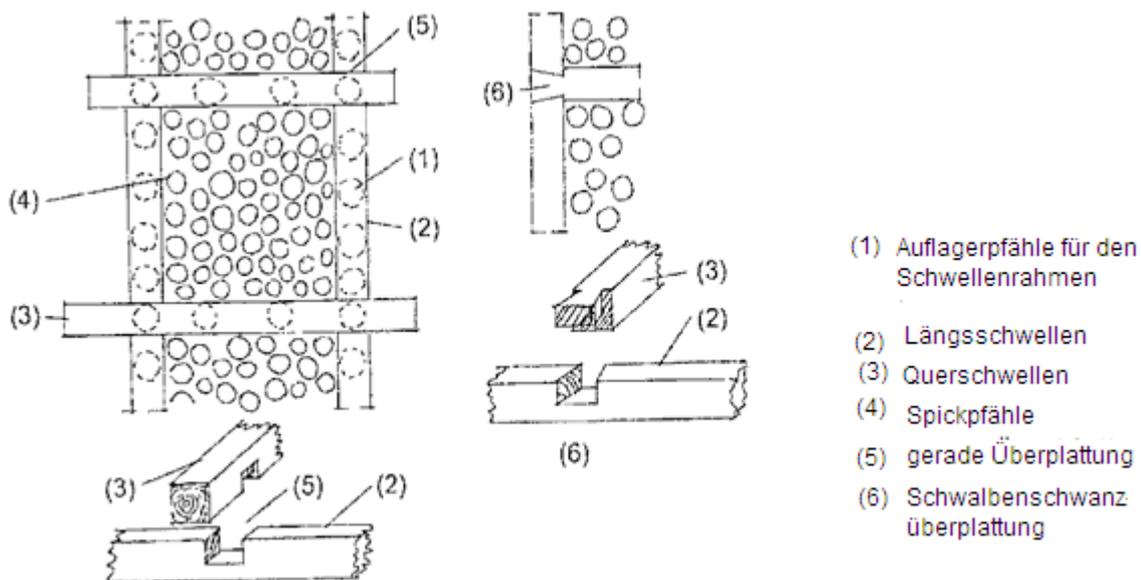


Abbildung 15 Ausbildung starrer Fundamentkörper mit Überplattungen [3]

Ausführung und Abmessungen

Erst im 16. Jahrhundert kam es durch niederländischen Einfluss zur Durchsetzung von Schwellenrostgründungen in Deutschland [3]. Die Techniken der Ausführung wurden ständig verbessert und entwickelten sich immer weiter bis in das 20. Jahrhundert hinein. Anfangs wurden zum Aufbau von Balkenrosten noch unbearbeitete Baumstämme für Längs- und Querschwellen verwendet. Dies änderte sich schnell und bald wurden statt runder Holzstämme kantige mit Auskämmungen verwendet. Die dadurch beständigeren Verbindungen der einzelnen Schwellen kamen der Steifigkeit der Gründung zugute. Aufgebaut war der Rost so, dass unter den Gründungsmauern alle 1-2 m kurze Querschwellen angeordnet wurden. Die Länge dieser Querschwellen entsprach derjenigen der Gründungsmauer mit einem gewissen Überstand. Diese halten die Längsschwellen, die in Wandlängsrichtung verlaufen. Die Breite der Anordnung der Längsschwellen entsprach der Fundamentsohle. An Längsstößen wurden sie immer versetzt angeordnet und an den Ecken gekreuzt übereinandergelegt, um so höhere Festigkeiten zu erreichen. Um dies bei besonders hohen Lasten noch zu steigern, wurden Einkerbungen an den Längs- und Querschwellen vorgenommen. So konnten die Längsschwellen mit den darunterliegenden Querschwellen schubfest verkämmt werden (Abbildung 15). Auch bei Baugrunderkundungen angetroffene, seitlich neben den Längsschwellen angeordnete Pflöcke, dienten wahrscheinlich zur Steifigkeitserhöhung des Rostes. Es wurde meist resistentes Eichenholz für die Schwellen verwendet, das einen Stammdurchmesser von etwa 40 cm hatte. In der weiteren Entwicklung dieser Gründungsart plante man Abstände zwischen den Längsschwellen mit ein. Auch Rundhölzer kamen immer weniger zum Einsatz, da es praktischer war mit Kanthölzern zu arbeiten. So wurde eine klassische Schwellengründung unter einem 1,5 m breiten Fundament wie folgt dimensioniert. Die Längsschwellenbreite betrug 20 cm und die Längsschwellenhöhe 26 cm. Es wurden drei Reihen verlegt, wobei der Abstand 65 cm betrug. Desweiteren wurde ein geschlossener Bohlenbelag über die Längsschwellen verlegt (Abbildung 16). Dieser bestand wiederum aus Eichenholz und besaß eine Stärke von 8 bis 10 cm. Dies besaß den Vorteil, dass Fundamentmauerwerk einfacher und sauberer zu errichten. Es gab im Grunde zwei Ausführungsformen. Zum einen errichtete man den Schwellenrost nur unter den Gründungsmauern, zum anderen auch flächig unter dem gesamten Gebäude. Die Zwischenräume der Schwellen, sowie des ganzen Rostes, wurden dann mit Bauschutt, Lehm, Kies und eventuell Holzreisig verfüllt [24]. Diese Ausführungsform der Schwellenroste betitelte man als reine Schwellenrostgründung. Natürlich ist diese auch kombiniert mit der Tiefenpfahl- oder Spickpfahlgründung ausführbar (Abschnitt 3.1.1.5 Kombinierte Holzgründung). Ab Ende des 19

Jahrhunderts wurden dann Betondecken statt aufwändiger Balkenroste zur Ausbildung von Gründungssohlen erstellt, und Balkenroste kamen immer seltener zur Ausführung.

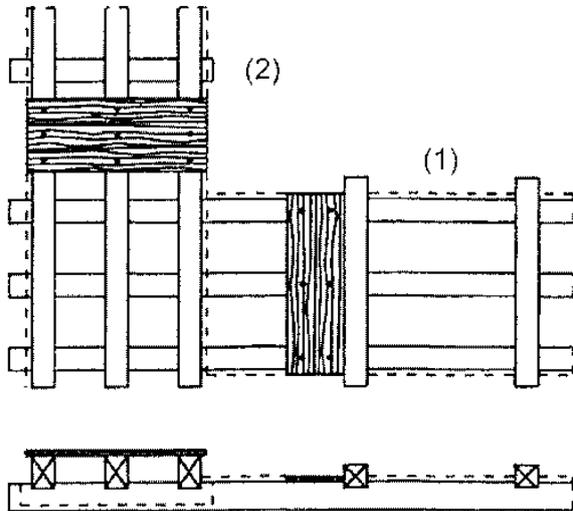


Abbildung 16 (1) Längsschwelle (2) Querschwelle mit Bohlenbelag [3]

Statische Wirkungsweise

Im Vordergrund bei der Ausführung einer solchen Gründung steht die Schaffung einer festen Aufstandsfläche auf einer nicht tragfähigen Schicht für das Fundamentmauerwerk. Durch die Ausbildung einer starren Scheibe, ähnlich einer Fundamentplatte, kommt es zur ausgeglichenen und besseren Lastverteilung auf den Baugrund. Die dadurch entstehende Aussteifung des Gebäudes macht es beständiger gegen unterschiedliche Setzungen und lässt diese auch gleichmäßiger ablaufen. Diese Aussteifung, durch die Verbindung der Schwellen miteinander, wurde vor allem durch eine flächige Ausbildung des Rostes bewirkt. Zimmermannsmäßige Verbindungen wie die Überblattung, Überschneidung, Zapfung, Versatzung und Kämmung machten die Verbindungen kraftschlüssig. Sie lassen die Schwellenrostgründung als steife Scheibe wirken. Ein weiterer Vorteil dieser Gründungsvariante ist die Verringerung der Bodenpressung aufgrund der Lastverteilung. Außerdem können höhere Gesamtlasten besser aufgenommen werden. Auch das nachgewiesene Vorkommen von Holzspundwänden aus der Erbauerzeit, als Schutz gegen Grundwasser, birgt einen Vorteil mit sich. Bei zu hoher Belastung und der Gefahr eines Grundbruchs verhindern solche Wände das Ausweichen des Bodens unter dem Fundament.

3.1.1.5 Kombinierte Holzgründungen

Wenn eine geplante Gründung so auslegt wird, dass zwei verschiedene Gründungsarten kombiniert werden, so verfolgt man mit Sicherheit eine Optimierung der Gründungseigenschaften. In der Regel erhält man eine Verbesserung der Gründungssituation. So addieren sich im besten Fall die positiven Eigenschaften beider Einzelmaßnahmen. Wird dazu noch die Wirtschaftlichkeit einer solchen Kombination betrachtet, so kann man im Vorhinein eine gewollte Spickpfahl-Tiefenpfahlgründung ausschließen. Schon allein das Ziel einer Tiefenpfahlgründung, in tragfähigere tieferliegende Bodenschichten zu gründen, lässt sich nicht mit der einer SPG vereinbaren. Diese sieht nämlich vor, den Boden so zu verdichten, um sicher in den oberen anliegenden Baugrund zu gründen. Desweiteren würden sich die Wirkungsbereiche beider Ausführungen überlagern. Der dadurch doppelt aktivierte Widerstand des Bodens projiziert ein unwirtschaftliches Bild. Deswegen werden hier nur die zwei anderen Kombinationsmöglichkeiten, der der Spickpfahl-Schwelengründung und der der Tiefenpfahl-Schwelengründung betrachtet.

Die Spickpfahl-Schwelengründung ist in zwei historisch verschiedene Ausführungsformen zu unterteilen. Zum einem gibt es die einfache und früher entwickelte Verbindung beider Gründungen. Hier hat man entweder unter dem kompletten Schwellenrost, nur unter Gebäudeecken oder an Gebäudeabschnitten, wie Türmen und Widerlagern von Mühlrädern, Spickpfähle angeordnet. Dementsprechend überall dort, wo mit hohem Lasteintrag gerechnet werden musste. Eine direkte konstruktive Verbindung beider Gründungsarten gab es dabei nicht. Man hat also erst den Baugrund unter dem Gründungsmauerwerk mit Spickpfählen verdichtet und anschließend die runden Querswellen lose darauf verlegt, desweiteren die Längsswellen aufgebracht und die Zwischenräume mit Bauschutt, Kies oder Lehm verfüllt. Dennoch ist genau ersichtlich, inwiefern man hier von einer zusätzlichen Verbesserung der Gründungssituation sprechen kann. Die Gefahr von zu hohen Primärsetzungen wird weiter reduziert. Die, durch den scheibenartig ausgebildeten Schwellenrost, verteilten Lasten können nun noch besser vom Boden aufgenommen werden. Auch war es nun möglich, Gebäude mit sehr hohem Lastaufkommen bereits Anfang der Frühen Neuzeit (16. bis 17. Jahrhundert) auf schlechten Baugrund, ausreichend sicher zu gründen. Dies betraf vor allem Kirchen, Klöster, Mühlen und Schlösser in Flussniederungen und Auenlandschaften. Beispiele hierfür sind der Rieselspeicher „Krakauer Mühle“ [7], die Erftmühle [4], die St. Martin-Kirche [32] und St. Jodok-Kirche [33] in Landshut und das historische Rathaus Zweibrücken [34].

Die zweite und später ausgeführte Spickpfahl-Schwelengründung kann man als eine Art Weiterentwicklung und Optimierung der ersten sehen. Sie verläuft parallel mit der

Optimierung der Schwellenrostbauweise. Man wählte Spickpfähle größeren Durchmessers aus. Auch wurden unter allen Schwellen diese eingetrieben. Desweiteren wurden zimmermannsmäßige Verbindung, wie zum Beispiel Zapfen, zwischen Spickpfahl und Querschwelle ausgebildet oder man behalf sich mit Eisen bzw. Holznägeln. Schwellen wurden wieder kantholzartig und nicht rund ausgebildet. Wurde ein floßartiger, also flächenhafter, Schwellenrost gewählt, so wurden in den Zwischenräumen der Schwellen weitere kleiner dimensionierte Spickpfähle eingetrieben und dann erst mit Steinen und Schotter verdichtet (Abbildung 17). Dies alles erlaubte, den Baugrund noch weiter zu belasten und sicherer und setzungsarmer zu gründen. Gerade die kraftschlüssige Verbindung „Schwelle zu Spickpfahl“ und die zwischen den Schwellen eingetriebenen Kurzpfähle ließen einen noch starreren Fundamentblock entstehen [3]. Dies geschah dadurch, dass die Querschwellen zugfest mit den Längsschwellen verbunden waren. Das wiederum verhinderte bei hoher Lasteinwirkung ein Auseinanderspreizen der Spickpfähle. Große Setzungsdifferenzen im Einzelnen traten dadurch kaum noch auf.

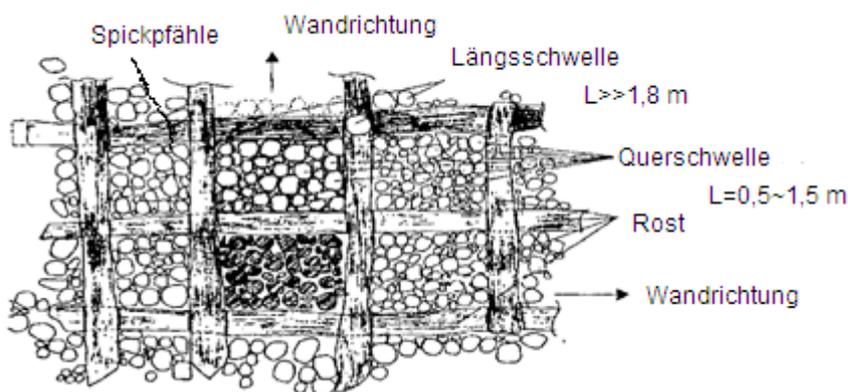


Abbildung 17 Kombinierte Spickpfahl-Schwellenrostgründung (Grundriss) [24]

Die Kombination aus einer Tiefenpfahlgründung und dem darauf befindlichen Schwellenrost kann man als eine Art Vorgänger der heutigen kombinierten Pfahl-Plattengründung sehen (Abbildung 18). Je nachdem, wie die Pfähle in den Baugrund ihre Last abgaben (siehe Abschnitt 3.1.1.2 statische Wirkungsweise), konnte man die genaue Tragwirkung der KPP beurteilen. Also entweder eine schwimmende oder stehende Tiefenpfahl-Schwellenrostgründung. Als Beispiel dient hier, das Schloss zu Schwerin, das auf einer aus Holz ähnelnden stehenden KPP gründet [2]. Analog zu den Spickpfählen wurden auch hier zimmermannsmäßig ausgesteifte Verbindungen zwischen Pfahl und Schwelle hergestellt.

Ließen sich nun die oberen Bodenschichten stark verformen und handelte es sich um eine stehende Pfahlgründung, so wurden die Kräfte über die Pfähle abgetragen und der kombinierte Lastabtrag „Schwelle-Pfahl“ rückte in den Hintergrund. Hier hat die Schwellengründung die Aufgabe, die Lasten auf die Tiefenpfähle gleichmäßig zu verteilen. Außerdem wurde wieder die Ausführung des Gründungsmauerwerks auf den Bohlen des Rostes einfacher. Liegt eine Baugrundsituation vor, dass die Pfahlgründung schwimmend ihre Lasten abträgt, da sie nicht in eine tragfähige Schicht gründet, so hat man den Idealfall einer KPP vorliegen. Die Flachgründung in Form des Schwellenrostes erfährt eine Belastung. Diese wird an die schwimmende Pfahlgründung weitergeleitet. Je nach Baugrundeigenschaften erfahren beide eine Setzung. Diese hängt im Wesentlichen von der Ausführung des Schwellenrostes (unter Gründungsmauerwerk oder flächig), der Lage, der Länge und der Anzahl der Pfähle im Zusammenspiel mit dem Baugrund ab. Hier tritt die gewünschte Interaktion zwischen drei Bereichen ein, dem Schwellenrost, dem Tiefenpfahl und dem Baugrund. Man kann auch von einem gewünschten Gesamtgründungskörper sprechen, der bei richtiger Dimensionierung sich setzungsarm verhält [35].

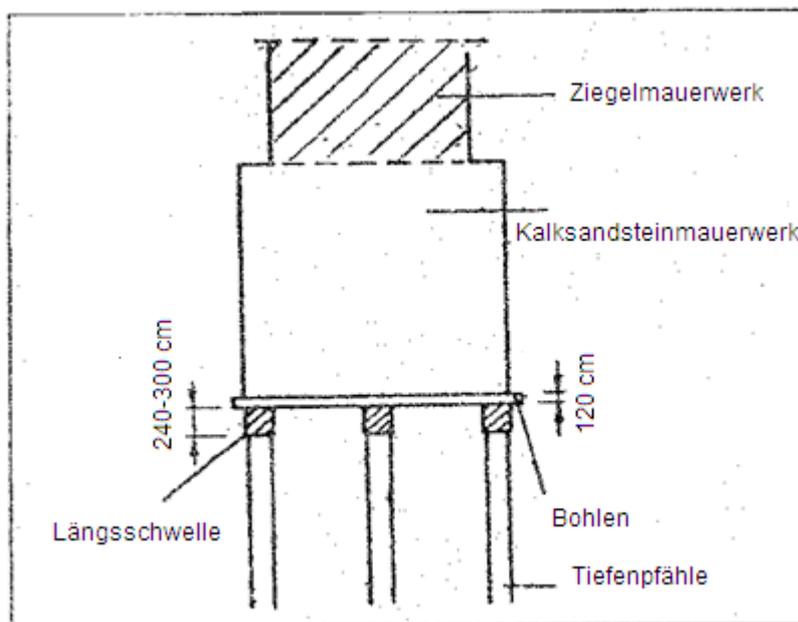


Abbildung 18 Kombinierte Tiefenpfahl-Schwellenrostgründung [26]

3.1.2 Holzeigenschaften

Die hier aufgeführten Holzeigenschaften (Holzart und Holzalter) stellen nur einen begrenzten Teil der relevanten holzkundlichen Untersuchung dar. Auf sie wird auch nur im Allgemeinen eingegangen, um einen ersten Überblick zur Interaktion der Holzeigenschaften mit der Problematik der Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit von Holzgründungen zu geben. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Erkundung und nicht in der Analyse liegt, wird hier auf die Materialschadensanalyse in der Fortsetzung des Leitfadens sowie der von RWE in Auftrag gegebenen holzkundlichen Untersuchung von Pfahlgründungen in [1] verwiesen. Aus der sich ergebenden praktischen Relevanz und der möglichen Ableitung einer Resttragfähigkeit bei einer Holzpfahlerkundung sind am Ende dieses Abschnitts noch ein paar Informationen zum querschnittsbildenden Kern- und Splintholz gegeben.

3.1.2.1 Holzart

Im Mittelpunkt der Betrachtung der Holzart sollen vor allem die Resistenz und die damit verbundene natürliche¹⁸ Dauerhaftigkeit einheimischer Hölzer stehen. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften und den aus den letzten Jahrhunderten gesammelten Erfahrungen aus dem Hoch-, Grund- und Wasserbau, lassen sie sich in verschiedene Resistenz-, Gebrauchs- und Dauerhaftigkeitsklassen unterteilen. Ein besonderer Fokus soll vor allen den im Erd- bzw. Wasserkontakt verwendeten, teilweise bzw. vollständig gesättigten Holzarten gelten. In der DIN-EN 305-2 werden die einzelnen Holzarten nach ihrer natürlichen Dauerhaftigkeit klassifiziert, wobei eine Unterscheidung zwischen der Schädigung von holzerstörenden Pilzen, Insekten, Termiten und Schädlingen im Meerwasser getroffen wurde. Bei den zu erkundenden Holzpfählen und Schwellen soll lediglich der Befall durch Pilze, wie der Moder-, Braun- und Weißfäule, näher beleuchtet werden (Tabelle 8). Dort ist zu erkennen, dass das Kernholz der Robinie bis sehr dauerhaft, das Kernholz¹⁹ der Eiche und der Edelkastanie als dauerhaft, das Kernholz der europäischen Lärche, Douglasie und Kiefer mäßig bis gering dauerhaft und das Kernholz von Fichte, Tanne, Esche, Birke und Buche nicht dauerhaft bis vergänglich eingestuft wird. Das Splintholz wird prinzipiell als nicht dauerhaft angesehen (Resistenzklasse 4-5). Diese Einteilung der Holzarten bezieht sich zwar auf das Resistenzverhalten gegen Pilze im Hochbau, deckt sich aber nach [1] mit der tatsächlich in der Praxis vorkommenden Dauerhaftigkeit von Holzpfählen und Schwellen im

¹⁸ Eine natürliche Dauerhaftigkeit entspricht der vom Holz eigenständigen Widerstandsfähigkeit gegen beispielsweise holzerstörende Organismen. Das Kern- und Splintholz besitzt keine Konservierungsmaßnahmen.

¹⁹ Auf das Kern- und Splintholz wird im Abschnitt 3.1.2.4 Querschnitte näher eingegangen.

1	sehr dauerhaft	z.B. Afzelia, Maobi, Bilinga, Greenheart, Padouk, asiat. Teak, Makoré
1-2	.	z.B. Robinie *)
2	dauerhaft	z.B. europ. Eiche, Edelkastanie, amer. Western Red Cedar, Bankirai, Bubinga, Merbau, Bongossi, Mahogany
2-3	.	z.B. Yellow Cedar, amerik. Weißeiche
3	mäßig dauerhaft	z.B. Pitch Pine
3-4	.	z.B. europ. Lärche, europ. Douglasie
4	wenig dauerhaft	z.B. Tanne, Fichte, Ulme, amerik. Roteiche, Yellow Meranti,
5	nicht dauerhaft	z.B. Birke, Buche, Esche, Linde, White Meranti

Tabelle 8 Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit gegen holzerstörende Pilze [36]

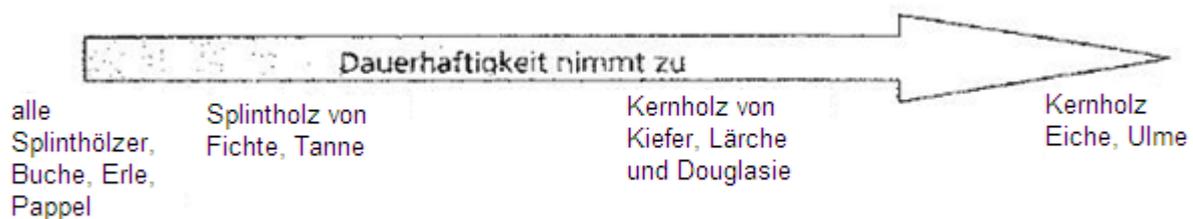


Abbildung 19 Abschätzung der Dauerhaftigkeit von wassergesättigten Holz [1]

Grundbau, obwohl im Baugrund ständig andere Bedingungen vorherrschen. Genannt werden soll hier das unterschiedliche Milieu des Bodens (toxisch, sauer, mikrobiell usw.), die verschiedenen Abbaumechanismen (Hydrolyse, anaerobe und aerobe Bakterien), der Stand des Grundwassers und der damit zusammenhängende Luftkontakt. Aufgrund der zwar teilweise auf den Grund- und Wasserbau übertragbaren und zutreffenden DIN-EN 305-2 gibt es speziell für die im Erdkontakt verwendeten Holzarten eine Abschätzung der Dauerhaftigkeit. In [1] wird aufgrund zahlreicher dokumentierter Holzgründungsuntersuchungen und dem Abschlussbericht des von der EU geförderten Projekt Bacpoles²⁰ eine derzeit aktuelle Einstufung der Dauerhaftigkeit von stets mit Wasser gesättigten Holzarten dargestellt (Abbildung 19). Als neue Feststellung kann die hohe Dauerhaftigkeit

²⁰ Bacpoles ist ein von der EU Kommission finanziertes Projekt zur Identifizierung von Bakterienarten, die am Holzerfall im Boden beteiligt sind.

des Kernholzes der Ulme angesehen werden, wenn Pfähle aus deren Holz sich vollständig unter dem GWS befinden. Des Weiteren wurde erneut bestätigt, dass im mitteleuropäischen Raum vor allem das Kernholz der Eiche sehr dauerhaft und resistent ist.

Nach DIN-EN 335-1 werden Holzgründungen, die unter den GWS liegen, aufgrund ihres ständigen Boden- und Süßwasserkontakts der Gebrauchsklasse 4 (GK4) zugeordnet. Damit fallen sie nach DIN 68800-3 Tabelle 1 in die Gefährdungsklasse 4, die eine Gefährdung durch Insekten, Pilze, Auswaschung und Moderfäule berücksichtigt [37]. In [26] werden für solche Holzbauteile im Erdbau Gebrauchsdauern des jeweiligen Kernholzes angegeben, die für mitteleuropäische Verhältnisse abgeschätzt wurden. Hierbei wird für Fichte und Tanne eine Gebrauchsdauer unter 10 Jahren und für Kiefer, Lärche, Douglasie sowie Eiche eine Gebrauchsdauer von 10-15 Jahren angegeben. In [38] wird für das Kernholz der Robinie sogar eine Gebrauchsdauer von 20-30 Jahren festgelegt. Dennoch sind diese Angaben mit Vorbehalt zu beachten, da es sich ausschließlich um Richtwerte handelt, die vom schlimmsten Szenario ausgehen und mit großen Sicherheiten bürgen. Gerade Holzgründungen unter der Grundwasserlinie besitzen eine beträchtlich längere Gebrauchsdauer, bei denen auch noch weit über 100 Jahren tragfähige Strukturen nachweisbar sind. In [3], [1] (Untersuchung des Pfahls einer Rotbuche), [39] (Holzpfahlgründung des Reichstags zu Berlin) und [40] (Gründungspfähle des Wismarer Hafens) wird von solchen Fällen berichtet. Desweiteren ist festzustellen, dass die damaligen Bauherren aufgrund von Überlieferungen von der Dauerhaftigkeit mancher Holzarten informiert waren, da vor allem im Schwellenbereich vorwiegend Eichenholz anzutreffen ist. Neben diesem Wissen spielten sicherlich auch die geographische Verfügbarkeit, der Reichtum an einer Holzart sowie deren Erschwinglichkeit bei der Verwendung eine Rolle. Allgemein wird in [26] festzuhalten, dass Laubbölzer eine höhere Resistenz als Nadelhölzer besitzen, aber im Falle einer holzkundlichen Untersuchung der Gründung sollten keine Verallgemeinerungen getroffen werden. Es gibt durchaus auch Nadelbäume, wie die Kiefer oder die Douglasie, die gegenüber Laubbäumen, wie beispielsweise die Birke oder die Esche, eine viel höhere natürliche Resistenz besitzen. Jede Baustelle und somit jeder Pfahl und jede Schwelle unterliegt spezifischen Randbedingungen, die strukturiert untersucht und ausgewertet werden müssen. Einen entscheidenden Beitrag zur Abschätzung der Resttragfähigkeit erlaubt neben der Holzart letztendlich nur die Bestimmung der Schadensorganismen sowie der Holzfeuchte.

Die Holzart selber sollte vom Fachmann diagnostiziert werden, da trotz autodidaktischer Arbeit, sich eine eindeutige Identifizierung meist als kompliziert erweist. Neben den im Baugrund vorherrschenden Bedingungen, die das äußere Erscheinungsbild des Holzes beeinträchtigen, kann auch der Grad der Zerstörung die genaue Einordnung des Holzes erschweren. In der Praxis unterscheidet man zwischen einer makroskopischen und mikroskopischen Untersuchung. Eine makroskopische Betrachtung wird vor Ort visuell mit einer Lupe (unterschiedliche Vergrößerungen) ausgeführt, bei der es zur Betrachtung von Jahrringen, sichtbaren Poren, Holzstrahlen und Harzkanälen sowie des Kern- und Splintholzanteils mit ihrer Färbung kommt. Anschließend werden diese Eigenschaften mit denen von einheimischen Holzarten im Ausschlussverfahren verglichen, um eine genaue Bestimmung zu treffen. Dies geschieht hauptsächlich durch den Einsatz von Bestimmungsbüchern, Tabellen und Computerprogrammen [41]. Voraussetzung für diese Variante ist eine sauber gearbeitete Querschnittsfläche am Pfahl, die wiederum vom Erhaltungszustand des Holzes abhängig ist. Makroskopische Untersuchungen an Holzpfehlgründungen sollten stets mit der Mikroskopie einer genommenen Holzprobe einhergehen. Mithilfe dieser Methode werden an Dünnschnitten Vergleiche zwischen holzanatomischen Merkmalen aufgestellt, um sichere Aussagen zur Holzart zu treffen. Hierbei werden gattungsspezifische Merkmale wie die Breite der Holzstrahlen, die Öffnungen zwischen den Gefäßelementen, die Ausformungen der Zellwände und die Anordnung der Tüpfel mit dem eigenen und dem festgehaltenen Wissen in der Fachliteratur verglichen. Eine klare Aussage zur Holzart trägt zu weiteren Überlegungen des zukünftigen Tragverhaltens einer Holzgründung im Boden bei.

3.1.2.2 Holzalter

Die Bestimmung des Holzalters ist eine typische Anwendung der Dendrochronologie²¹ und sollte bei einer Gründungserkundung immer veranlasst werden. Die Grundlage der Altersbestimmung von Holz stellen die Jahresringe dar, die als lesbare Chronik verstanden werden sollten. Diese Aufzeichnungen der Natur entsprechen dem Zuwachsbereich des Baumes innerhalb eines Jahres. Sie fallen in ihrer Größenordnung von Baumart zu Baumart unterschiedlich aus und bilden sich bei manchen Kiefern- und Pappelarten größer als 13 mm aus [42]. Aufgrund dessen ist bei manchen Baumarten schon vor Ort eine erste allgemeingültige visuelle Altersbestimmung möglich. Gerade Nadelbaumarten, speziell Lärche und Tanne, besitzen eine sehr gut mit dem Auge zählbare Ringausbildung

²¹ Die Dendrochronologie stellt in diesem Fall mithilfe von Jahresringen eine Datierungsmethode der Geowissenschaften dar.

(Abbildung 21). Neben den in Mitteleuropa vorkommenden jahresringausbildenden Baumarten gibt es in anderen Teilen der Welt Vegetationszonen mit Hölzern, die diese Eigenschaft nicht besitzen [43]. Sie weisen keine jährlich periodisch entstehende Zuwachszone auf, die zur Jahresringausbildung führt. Bei genauerer Betrachtung der Baumentwicklung beginnt die Vegetationsperiode je nach Waldart und geographischer Lage von Anfang Mai bis Juni mit einem stürmischen Wachstum, das innerhalb eines Monats bis zu 2/3 der Jahresringbreite ausmachen kann. Das restliche Drittel des Ringes wird in den darauf folgenden zwei bis drei Monaten bis Ende September/Okttober gebildet. Somit entstehen bei diesem jährlichen Prozess ein aus dünnwandigen, großen Zellen bestehendes helles Frühholz und ein aus kleinen dickwandigen Zellen bestehendes dunkles Spätholz. Die mittlere Rohdichte kann zwischen diesen beiden Bereichen von $0,3 \text{ g/cm}^3$ auf 1 g/m^3 variieren und lässt erahnen, dass für die Festigkeit und Tragfähigkeit vor allem das Spätholz verantwortlich ist [42]. Prinzipiell dienen die Jahresringe bei einer Gründungserkundung aber nicht zur Altersbestimmung von Bäumen, sondern stellen erst durch die Einordnung der Wachstumszeit das Grundverfahren der Dendrochronologie dar. Dieser Prozess zur Einreihung des Fällungsjahres wird auch "Crossdating" genannt. Grundlage dieses Verfahrens ist die Erstellung eines unendlich langen Baumes aus Jahrringreihen, an denen Vergleiche vorgenommen werden und anschließend eine Diagnose erstellt werden kann. In der Geschichte bis zum heutigen Zeitpunkt gibt es Wissenschaftler, die sich damit beschäftigen von verschiedenen Baumarten in unterschiedlichen Einzugsgebieten Jahrringreihen zu entwickeln bzw. zu vervollständigen. So existiert zum Beispiel eine 10.000 jährige Eichenchronologie für Mitteleuropa [42], an der das Verfahren des Crossdating praktiziert werden kann. Heutzutage führt den Vergleich der Jahresringeigenschaften, wie Dicke, Struktur und Färbung, ein EDV-Programm aus, dessen Ergebnisse²² anschließend von einem Fachmann unabhängig bestätigt werden müssen (Abbildung 22). Prinzipiell wird hierbei der Querstreifen der Probe mit der Jahresringreihe Stück für Stück überlagert bis es zur Übereinstimmung von chronologischen Fixpunkten kommt [4]. Auch wenn in manchen Fällen die Bestimmung des Holzalters bei einer Erkundung als irrelevant einzuschätzen ist, so kann eine dendrochronologische Untersuchung des Holzquerschnittes eine mögliche Fehlstelle in der Chronologie einer Jahresringreihe einer bestimmten Holzart besetzen bzw. bei sehr alten Holzfunden diese noch verlängern. Auf der Baustelle wird, soweit es ausführbar ist, an dem in einer Schürfgrube freigelegten Pfahl mithilfe einer Kettensäge oder einer Handsäge eine Querschnittsprobe entnommen. Diese wird anschließend poliert, sodass die Zählung der Ringe und soweit möglich, ein optischer Vergleich in Form einer

²² Das Ergebnis wird als Baumringdiagramm dargestellt [21].

Kurvensynchronisation vor Ort stattfinden kann. Jahrgenaue Datierungen werden jedoch meist schwierig sein, da die äußere Zuwachszone²³ entweder vor dem Rammvorgang entfernt wurde oder bis zur Freilegung schon eine zu starke Schädigung des Splintholzes erfahren hat. Ansonsten ist festzustellen, dass das äußere Ringalter zugleich das Fälldatum ist. Im Bezug zu einer Gründungserkundung der Schwellen und der Pfähle kann das Holzalter nicht nur zur Bauhistorie, sondern auch zur Konstruktionseinordnung, Informationen beitragen. Anfangs ist zu klären, ob das Alter des Holzes auch dem Zeitpunkt der Gründungsentstehung zuzuordnen ist, denn oftmals kam es zur Errichtung von Gebäuden auf schon vorhandenen Fundamenten aus Steinen und Holz [4]. Eine Vergleichsmöglichkeit der dendrochronologischen Datierung des Schlagalters wäre mit gesammelten Informationen zum Gebäude und deren Errichtungszeitraum möglich. Es sollte prinzipiell das Holzalter nicht dem Entstehungsalter des Gebäudes gleich gesetzt werden. Lässt sich dieser Zusammenhang aber durch historische Aufzeichnungen bestätigen, so sollte eine zeitliche Zuordnung der damals praktizierten Holzgründung vorgenommen werden, wodurch die konstruktive Ausführung und ihr Tragverhalten abzuschätzen wären. Ganz im Gegenteil dazu lässt sich aus dem Alter des Holzes keine Angabe zu seinem Erhaltungszustand abgewinnen. Es ist ein Trugschluss, anzunehmen, dass älteres Holz weniger Tragfähigkeit besitzt als jüngeres, da letztendlich dafür Faktoren wie der Milieueinfluss des Bodens, verschiedene Schädlinge, chem. Prozesse, der Grundwasserstand und andere äußere Standorteinwirkungen verantwortlich sind [7]. Genaue Aussagen zum Erhaltungszustand der Holzgründung kann nur eine Materialschadensanalyse liefern.

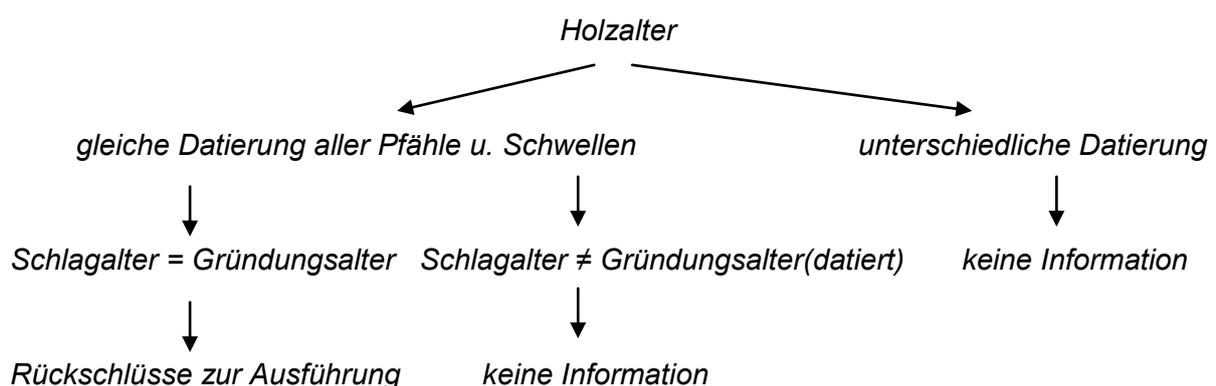


Abbildung 20 Prozessdiagramm zum Informationsgehalt des Holzalters

²³ Die äußere Zuwachszone setzt sich aus dem Splintholz und der Waldkante zusammen.

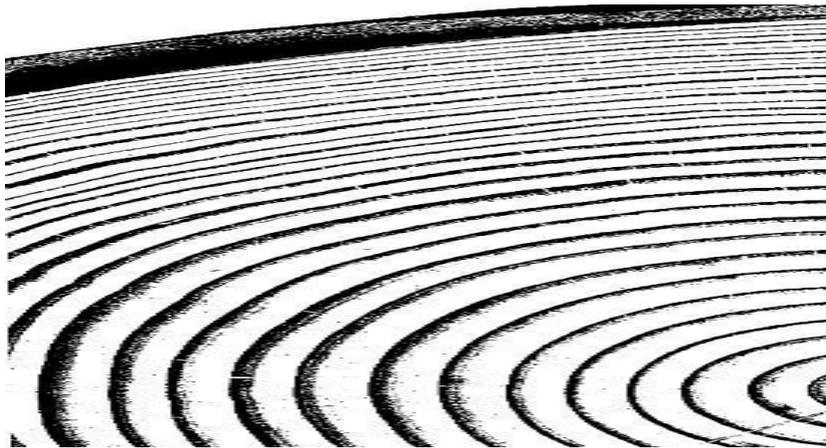


Abbildung 21 Jahrringe einer Tanne aus Mitteleuropa [44]

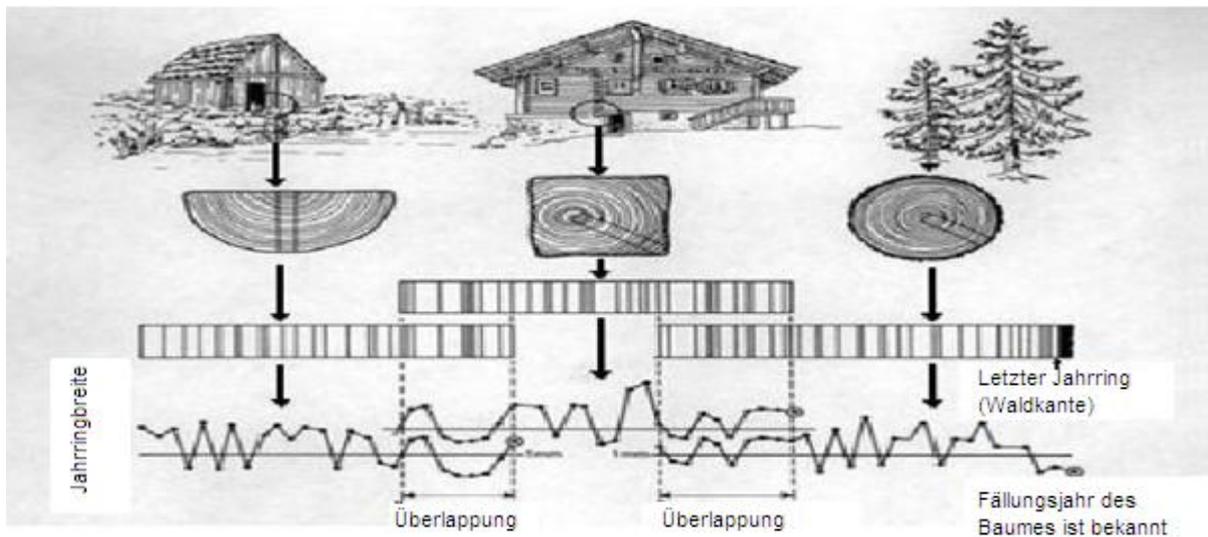


Abbildung 22 Datierungsprinzip in der Jahrringforschung [44]

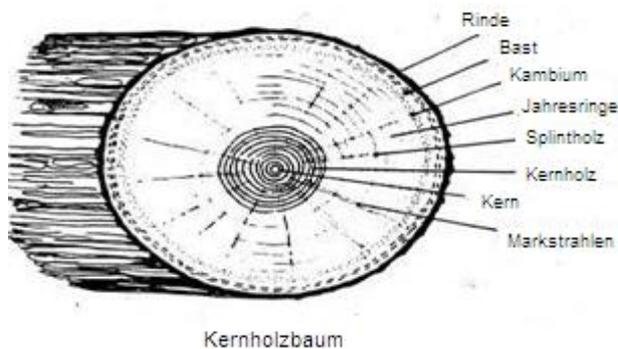


Abbildung 23 Holzquerschnitt eines Kernholzbaumes [45]

3.1.2.4 Kern- und Splintholz

Sofern es möglich ist, kommt es bei der Erkundung der Spick- und Tiefenpfähle zur Freilegung der Pfahlköpfe. Sie werden so bearbeitet, dass am Querschnitt des Pfahls eine erste Einschätzung zu Holzalter und Holzart, eine Probenentnahme, eine Pfahllängenbestimmung und eine Lasteinleitung möglich sind. Dem Ingenieur sollte schon bei einer Erkundung allgemein bekannt sein, weshalb zum Beispiel bei einem Pfahl von außen nach innen die Festigkeit zunimmt oder warum unterschiedliche Holzfärbungen im Außen- und Innenbereich vorliegen können. Aus diesem Grund wird hier etwas genauer auf das querschnittsbildende Kern- und Splintholz eingegangen. Der Querschnitt eines Holzpfehles, der auch Stirnholz genannt wird, besteht prinzipiell von außen nach innen aus der Borke, dem Bast, dem Korkkambium, dem Kambium, dem SH, dem KH und dem Mark (Abbildung 23). Die Borke, die Bestandteil der Rinde ist, bildet bei den Bäumen die äußere Schicht und entsteht aus dem Korkkambium und den abgestorbenen Teilen des Bastes. Sie schützt den Baum vor mechanischen Beschädigungen. Der Bast bildet das lebende Gewebe unter der Borke und kann neben dem Schutz des Leitgewebes auch teilweise die Funktion des Stofftransportes übernehmen. Dem schließt sich das Korkkambium an, das auch als sekundärgebildetes Kambium bezeichnet wird. Dieses bildet gegen Pilze eine kaum angreifbare und abbaubare Korkschicht und wird in einigen Werken auch als Bestandteil des Bastes angesehen [42]. Folgend befindet sich zwischen dem Splintholzbereich und dem Bast das Holzbildungsgewebe, das als Kambium bezeichnet wird. Dem schließt sich bei den meisten Holzarten das hellere SH, das meist dunklere innerliegende KH und das Mark an, auf die im Bezug zu ihrem Vorkommen und ihren Eigenschaften im Folgenden etwas genauer eingegangen werden soll [42]. Grundsätzlich übernimmt das SH Stoffspeicher- und Transportaufgaben und das KH ausschließlich Stoffspeicherfunktionen. Durch die im Splint stattfindende Ansammlung leicht abbaubarer Stoffe, wie Stärke und Zucker, ist dieser besonders anfällig gegen die Zersetzung von Pilzen und Bakterien. Dem entgegen steht im KH eine geringe Einlagerung an Stärke und Zucker sowie der Speicherung abbauwidriger Gerbstoffe und Harze, die den Kern bedeutend länger erhalten.

Bei der Bildung des Kernholzes werden die Wasserleitbahnen des Holzes unterbrochen. Dies geschieht bei den NH durch die Verschließung der Hoftüpfel und bei den LH durch die Verthyllung²⁴ der Zelllumen²⁵. Die anschließend gebildeten phenolischen Kerninhaltsstoffe²⁶,

²⁴ Im Zuge des Wachstums werden bei den NB nicht mehr genutzte Wasserleitbahnen vom Baum verschlossen.

²⁵ Zelllumen sind Poren in der Holzstruktur.

²⁶ Phenolische Kerninhaltsstoffe sind, allgemein ausgedrückt, Konservierungsstoffe die in Zellen eingelagert werden, um sie vor Pilz-, Insekten- und Bakterienbefall zu schützen.

die das Holz vor pilzlichen und tierischen Schädlingen schützen, werden in den Zellwänden eingelagert [42]. Durch diesen Prozess lässt sich die längere natürliche Dauerhaftigkeit von KH gegenüber dem SH im Baugrund ableiten.

Es sind aufgrund der Kern -und Splintholzausbildung die Baumarten auch nach obligatorischen und fakultativen Verkernern zu unterscheiden. Baumarten, wie Eiche, Kiefer oder Lärche, zählen durch ihre dunkelfarbene Ausbildung des Kernbereichs zu den Farbkernholzbäumen. Es gibt aber auch Baumarten, bei denen kein Farbunterschied erkennbar ist, aber in ihrem Innenbereich des Querschnitts trotzdem eine Verkernung stattgefunden hat. Diese Baumarten, zu denen die Fichte, die Tanne und die Linde zählen, werden als Reifholzbäume bezeichnet. Aufgrund des geringeren Feuchteanteils im Querschnittsinneren sind sie trotz homogener Färbung zu identifizieren. Die Kernholz- und Reifholzbäume gehören zu den obligatorischen Verkernern, aber es gibt auch Bäume, wie Buche und Esche, die dazu tendieren, einen farblichen Kern anzusetzen, der sich aber nicht durch eine erhöhte Dauerhaftigkeit auszeichnet. Man spricht dann von einem Falschkern, da die Kernbildung nicht regelmäßig und endogen stattfindet und zählt deren Baumarten zu den fakultativen Verkernern [46]. Bei der Freilegung von Holzschwellen- und Pfählen wird man meistens auf einen Querschnitt treffen, der lediglich aus dem SH und KH besteht, da vor einer Einrammung der Pfähle häufig eine Entfernung der Borke und des Bastes stattgefunden hat [3]. Aus Praxisberichten geht hervor, dass das Splintholz eine mehrere Zentimeter tiefe Einweichung²⁷ bei der Freilegung besitzen kann [7], aber dennoch beim Kernholz eine vorhandene Lastableitung vorzufinden ist. Gerade aus diesem Grund sollte aus Sicherheitsgründen der Splintholzanteil bei möglichen Pfahlwiderstandsberechnungen im Querschnitt vernachlässigt werden. Dennoch ist zu empfehlen, das SH vor dem Einbau nicht zu entfernen, da es sich hierbei um einen zusätzlichen Schutz des Kernholzes handelt, der zuerst von Pilzen, Bakterien sowie durch Hydrolyse geschädigt wird [3]. Deshalb wird bei einer Materialschadensanalyse empfohlen, das Kern-und Splintholz getrennt auf Dichte, Feuchtegehalt, Zerstörungsgrad und Schädlingsbefall zu untersuchen, um eine zukünftige Lebensdauer genauer abschätzen zu können [8].

Es ist festzustellen, dass sich die Gebrauchsdauer eines freigelegten Pfahls oder einer Schwelle umso mehr erhöht, je geringer der Splintholzanteil ist. Daraus lässt sich auch die Tatsache erklären, warum es im mitteleuropäischen Raum vor allem zum Einsatz von Eichenhölzern kam und teilweise noch kommt (Tabelle 9). Genauere Informationen zu den

²⁷ Wenn das Holz sich manuell zerquetschen lässt und kaum noch eine Festigkeit besitzt [1].

Holzquerschnittsbestandteilen, ihren anatomischen Aufbau, ihren Merkmalen und deren Aufgaben sind zum Beispiel in [41] und im Taschenbuch der Holztechnik²⁸ zu finden.

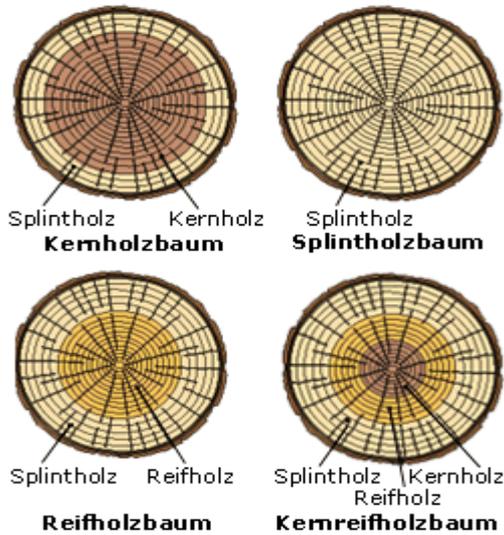


Abbildung 24 Einteilung der Holzquerschnitte [47]

Holzart	Farbe des echten Kernholzes	Breite des SH	Bemerkungen
Eiche	hell-bis dunkelbraun	3-5 cm	Stein- und Stieleiche technologisch gleichwertig
Rotbuche		100%	Splintholzbaum, Rotkern kommt vor (nicht dauerhaft)
Erle		100%	Splintholzbaum
Pappel		100%	Zitterpappel nur Splintholz Andere Pappeln Kern nicht dauerhaft
Kiefer	rötlich	3-12 cm	Splintbreite sehr variabel
Fichte	hell	3-5 cm	Reifholzbaum

Tabelle 9 Splintholzbreiten von typischen Holzarten für Pfahlgründungen [1]

²⁸ Taschenbuch der Holztechnik, Andre Wagenführ und Frieder Scholz, Hanser Verlag

3.1.3 Bodeneigenschaften

An dieser Stelle soll ein allgemeiner Überblick von ausgewählten Eigenschaften des Bodens gegeben werden, die bei einer Grundwassersenkung von Bedeutung sind. Dieser beinhaltet eine kurze Zusammenfassung der Böden, die eine höhere Relevanz in der Ausführung der damaligen Holzgründungen besaßen sowie ausgewählte bodenmechanische Vorgänge im Baugrund. Dabei wurde die Setzung und die mit der Kapillarität im Zusammenhang stehende Saugspannung des Bodens näher betrachtet.

3.1.3.1 Bodenarten

Geschichtlich bedeutsame Gebäude, wie Kirchen, Schlösser, Klöster, historische Rathäuser und andere, deren Erhalt von hoher Bedeutung ist, lassen sich meist der geographischen Lage alter Siedlungen zuordnen. Diese Standpunkte wurden vor allem von wirtschaftsgeographischen Faktoren, wie Nahrung, Schutz vor Feinden und Transportwegen, und nicht den Problemen im Baugrund bestimmt. Deswegen lassen sich viele der heutigen Städte und Dörfer an Ufern von Binnenseen, Flüssen, Bächen und ehemaligen Flachwasserzonen finden [3]. Gerade bei Auen- und anderen Flusslandschaften kam es aufgrund von tiefreichend weichen Baugründen mit hohem Grundwasserstand zu Schwierigkeiten der Gebäudeerrichtung. Unter solchen Umständen ist es dann vorwiegend zum Einsatz von Spick- und Langpfahlgründungen gekommen. Als Baugrund kamen theoretisch alle fluviatile und limnische Sedimente²⁹, wie Bachschotter, Flussskies, Sand, Auenlehm, Seeton, und organogene³⁰ und organische Böden wie Seekreide, Kalkmudde und andere organische Mudden sowie Torf infrage. Aufgrund des Umfangs der Beschreibungen der Eigenschaften der einzelnen Böden wird an dieser Stelle auf M. Goldscheider „Baugrund und historische Gründung“ [3] verwiesen. Natürlich wird nicht jedes Gebäude, das an einem Fluss oder See liegt, auf Gewässerablagerungen gegründet sein. Je nach den vorhandenen geologischen Verhältnissen, kann auch auf jede andere Baugrundart geschlossen werden. Bei Bodenarten mit einer erhöhten Acidität³¹ ist mit einer stärkeren Schädigung durch Hydrolyse zu rechnen [23]. Wiederum sind Böden mit hohen Anteilen an gebundenen Kohlenwasserstoffen ein idealer Nährboden für Bakterien. Sie können durch zusätzlich organische aggressive Bestandteile (Industrieabfälle) eine hohe Schadensintensität des

²⁹ Fluviale Sedimente sind Ablagerungen von Flüssen und limnische Sedimente sind Ablagerungen von Seen.

³⁰ Organogene Böden sind grobkörnige, gemischtkörnige und feinkörnige Böden mit bis zu 20% Masseanteil an organischen Beimengungen. Diese sind Ablagerungen aus im Meer abgestorbenen Lebewesen.

³¹ Die Acidität beschreibt den Säuregehalt eines Bodens.

Holzes durch Bakterienbefall hervorrufen [40]. Liegt ein graues bis tief schwarzes Sediment vor, das einen fauligen Geruch besitzt, handelt es sich bei dem anzutreffenden Boden um Faulschlamm. Dieser ist ein Indiz für Sauerstoffabschluss, wodurch eine Holzschädigung durch Pilze ausgeschlossen, jedoch mit anaeroben Bakterien gerechnet werden kann.

Mechanische, biologische und chemische Bodeneffekte hängen immer von der Art der beteiligten Böden ab und sind bestimmend für die Analyse einer Holzgründung. Die vorhandene(n) Bodenart(en) im Baugrund, ermittelt durch indirekte und direkte Aufschlussverfahren (Abschnitt 2.4 Baugrundanalyse), lässt nicht nur Berechnungen zu den Pfahlwiderständen aufgrund des jeweiligen Steifemoduls des Bodens zu, sondern kann auch Aussagen zum zeitlichen Verlauf der Setzungen sowie zur Interaktionen mit der Holzgründung geben.

3.1.3.2 Bodensetzung

Eine Setzung des Bodens kann nicht nur an der durch Schädigung oder Austrocknung verringerten Tragfähigkeit der Tiefen- und Spickpfähle einhergehen, sondern kann bei einer Grundwassersenkung auch auf bodenmechanische Prozesse zurückgeführt werden. Durch eine Grundwassersenkung wird die wirksame Spannung im Korngerüst um den Betrag des Auftriebverlustes erhöht. Anders formuliert, ergibt sich eine gewisse Austrocknung der Bodenschichten, mit der sich die Wichte des Bodens erhöht, da der Auftrieb verloren geht. Diese zusätzliche hervorgerufene Spannung kann Zusammendrückungen der einzelnen Bodenschichten hervorrufen, die in ihrer Summe eine Senkung der Geländeoberfläche zur Folge haben. Ein beispielsweise tragfähiger Baugrund aus Kies, der schichtweise weiche organische Einlagerungen besitzt, wird bei einer Grundwassersenkung und der damit verbundenen Gewichtszunahme, eine Verdichtung und somit eine Senkung erfahren. Man spricht hierbei auch vom Schrumpfen des Baugrundes. Das Ausmaß der Setzungen ist abhängig von der Beschaffenheit und der Art des Bodens. Es können gleichmäßige und ungleichmäßige Senkungen des Baugrundes entstehen, wobei gleiche Setzungen in tolerablen Bereichen keine zusätzlichen Beanspruchungen für das Gebäude darstellen (siehe Abschnitt 2.1 Schadensbild). Andersrum gelten ungleichmäßige Setzungen oft als Ursache für Bauwerksschäden [2]. Bei dem Auftreten von Schäden am Gebäude, verursacht durch die Gründung, ist immer zu Differenzieren, inwiefern eine Schrumpfung des Bodens oder eine Schädigung der Holzgründung verantwortlich gemacht werden kann. Des Weiteren ist zu analysieren, ob die möglichen Sekundärsetzungen nach Senkung des GWS

abgeschlossen sind. Das könnte zum Beispiel durch die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Messmethoden geschehen.

3.1.3.3 Saugspannung

Eine Senkung des GWS hat nicht unverzüglich eine Austrocknung des Bodens zur Folge. Abhängig von der vorkommenden Bodenart im Baugrund kann dieser das Wasser in seinen Poren zurückhalten. Diese Fähigkeit eines Bodens, Wasser anzusaugen und festzuhalten, beruht auf der existierenden Saugspannung, die sich zu $u_a - u_b$ ergibt. (u_a -Porenluftdruck, u_b -Porenwasserdruck). Vereinfacht lässt sie sich auch durch $2 \cdot \sigma_0 \cdot \cos \alpha / r$ bestimmen, wobei σ_0 die Oberflächenspannung, $\cos \alpha$ der Benetzungswinkel und r der Radius des Meniskus³² ist. Da der Benetzungswinkel α annäherungsweise mit dem Porenradius gleichgesetzt werden kann, zeigt sich, dass die Saugspannung, und somit auch die Fähigkeit eines Bodens das Porenwasser zu halten, bei kleiner werdenden Porengrößen steigt [51]. Vertreter solcher Bodenarten mit kleinen Porengrößen sind vor allem bindige Böden, wie beispielsweise Ton, Schluff und schluffige Feinsande. In Tabelle 10 ist erkennbar, inwieweit aus einer feiner werdenden Kapillarität des Korngerüsts die Oberflächenspannung des benetzenden Fluides und somit die Saugspannung zunimmt. Interessant scheint es bei der Erkundung einer Holzgründung, inwieweit ein bindiger Boden durchlüftet und somit aerobe Bakterien und Pilze mit Sauerstoff versorgt. Durch die Messung der Dehnung eines bindigen Bodens³³ im einaxialen Druckversuch bei verschiedenen Wassergehalten ist erkennbar, dass durch abnehmenden Feuchtegehalt es zum Anstieg der Dehnung und somit zur Verfestigung des Bodens (Sand) kommt. (Abbildung 25). Der dargestellte Versuch verdeutlicht, dass bei abnehmendem Wassergehalt ein Anstieg der Saugspannung anzunehmen ist, wodurch sich eine Verfestigung des Bodens einstellt. Diese ist auf eine erhöhte Druckspannung im Korngerüst, hervorgerufen durch die Zugspannung des Porenwassers, zurückzuführen [54] und nachweisbar durch verschiedene Tensiometermessungen³⁴ bei abnehmendem Wassergehalt [51]. Allgemein ist festzustellen, dass bei einer Entwässerung des Bodens, zum Beispiel durch GWS, eine immer höher werdende Saugspannung in Abhängigkeit der Bodenart sich einstellt. Es ist zu klären, inwieweit das Vorhandensein feinporiger bindiger Böden, zum Wasserentzug einer Holzgründung beiträgt und diese zeitlich Austrocknen und Schrumpfen lässt.

³² Ein Meniskus ist eine Wölbung in der Oberfläche einer Flüssigkeit.

³³ Dafür würde sich zum Beispiel ein schwach schluffiger Sand sehr gut eignen.

³⁴ Ein Tensiometer ist ein Messgerät zur Ermittlung der Oberflächenspannung des Wassers und gibt somit Rückschlüsse auf die Saugspannung des Bodens.

Poren	Äquivalentdurchmesser [mm]	Wasserspannung [bar]	Durchlüftung
grob	>50	<0,06	leicht
mittel	50-0,2	0,06-15	schwer
klein	<0,2	>15	keine

Tabelle 10 Einteilung der Porengrößen [52]

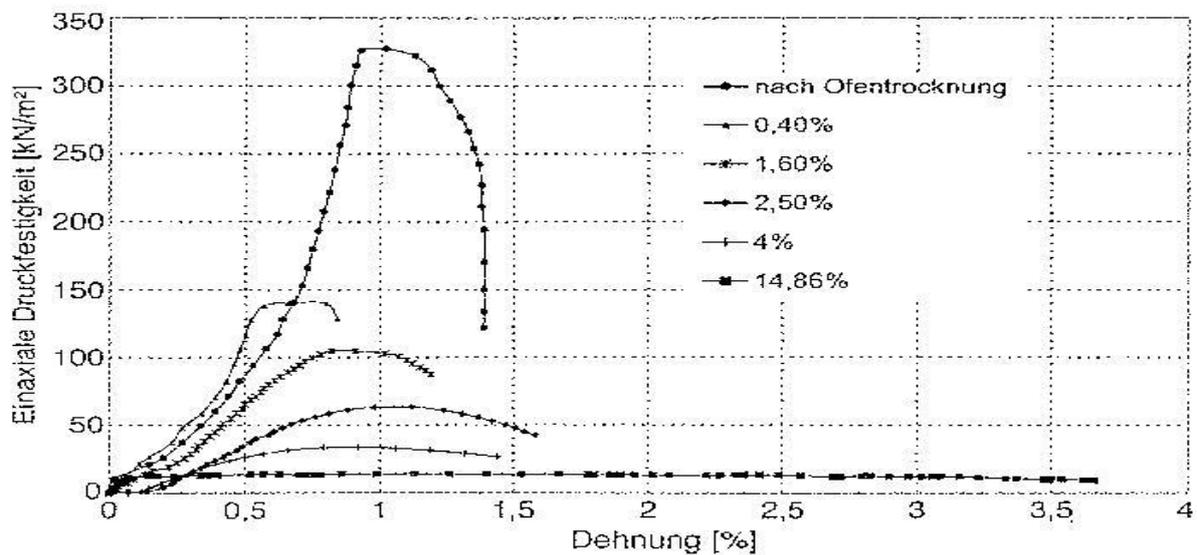


Abbildung 25 Ergebnisse der einaxialen Druckversuche für verschiedene Wassergehalte eines schluffigen Feinsandes [51]

3.1.3.4 Kapillarität

Die Kapillarität ist ein Verhalten von Flüssigkeiten in Kapillaren. Wird ein dünnes Glasrohr senkrecht in Wasser getaucht, so bewirkt die Oberflächenspannung einen Anstieg des

Wassers (benetzende Flüssigkeit). Es ist festzustellen, dass mit abnehmendem Radius des Röhrchens der innere Flüssigkeitsstand zunimmt. Die Steighöhe ist also dem Radius der Kapillare umgekehrt proportional. Der Höhenunterschied vom äußeren zum inneren Wasserstand wird auch als h_k bezeichnet. Wird der Wasserspiegel bei diesem Versuch abgesenkt, halten kleine Durchmesser das Wasser mehr zurück als große. Diese kapillare Rückhaltehöhe h_{kp} wird auch als passive kapillare Steighöhe bezeichnet [52]. Im Baugrund stellen die unterschiedlichen Weiten der Poren diese Kapillaren dar. Somit besitzt ein feinkörniger Boden mit kleinen Poren eine höhere Kapillarität das Wasser entgegen der Gravitation im Korngerüst festzuhalten, als beispielsweise ein grobkörniger Boden mit großen Kapillaren. Kommt es nun zum Absinken des Grundwasserspiegels, wird aus dem vorher im Grundwasser anzufindenden gesättigtem Boden ein teilgesättigter. Der Übergangsbereich dieser beiden Bodenzonen wird auch als Kapillarsaum bezeichnet. Bedingt durch die Kapillarwirkung des Bodens im Bereich des Kapillarsaums können Wechselwirkungen, verbunden mit Stofftransporten beider Richtungen, auftreten [53]. Ein wassergesättigter Boden besitzt immer eine Sättigungszahl³⁵ $s_r = 1$ und ein ungesättigter < 1 . Kommt es nun zu einer, wie im Fokus dieser Arbeit betrachteten, Grundwassersenkung, so stellt sich aufgrund der im Boden schwankenden Porenweiten ein sich im Gleichgewichtszustand befindende Verteilung der Sättigungszahl s_r ein. Sie verläuft, wie in Abbildung 26 dargestellt, über dem GWS von D zu A. Es ist zu erkennen, dass der Boden über dem GWS bis zu einer Höhe h_{kp} noch eine volle Sättigung erfahren kann [54]. Diese durch die Saugspannung hervorgerufene Tatsache ist der Kapillarität des Korngerüsts sowie der Oberflächenspannung des Wassers geschuldet. Die kapillare Rückhaltehöhe h_{kp} kann bei Sanden und Schluffen labormäßig ermittelt werden und wird in Tabelle 11 dargestellt. Zusätzlich kann diese Saugspannung (Zugspannung) des Porenwassers zu einer erhöhten Druckspannung im Korngerüst und somit zur Schrumpfung des Bodens führen [52]. Die sich dadurch einstellende erhöhte Scherfestigkeit³⁶ des Bodens wird auch Kapillarkohäsion bezeichnet [51].

Aufgrund der Kapillarität und der damit verbunden Saugspannung eines Bodens, lässt sich vielleicht erklären, weshalb in der Praxis, trotz deutlich gesunkenen Grundwasserständen, bei manchen Holzgründungen noch eine volle Tragfähigkeit des Holzes vorzufinden ist. An dieser Stelle müsste man eventuell den Baugrund genauer auf seine Zusammensetzung, Porosität und Sättigung untersuchen.

³⁵ Die Sättigungszahl s_r gibt an, in welchem Ausmaß die Poren des Bodens mit Wasser gefüllt sind. s_r berechnet sich aus dem Quotienten des wassergefüllten Porenanteils zum Gesamtporenanteil.

³⁶ Die Scherfestigkeit ist im Bruchzustand der größte Widerstand, den ein Boden den Scherkräften entgegenwirkt.

Bodenart	Wirksamer Korndurchmesser d_w [mm]	h_{kp} [m]
sandiger Kies	0,7	0,08
Mittel- und Grobsand	0,35	0,20
Fein und Mittelsand	0,10	0,50
schluffiger Feinsand	0,045	1,0
Schluff	0,01	5,0
Ton	0,001	50,0

Tabelle 11 Kapillare Rückhaltehöhen einiger Bodenarten [54]

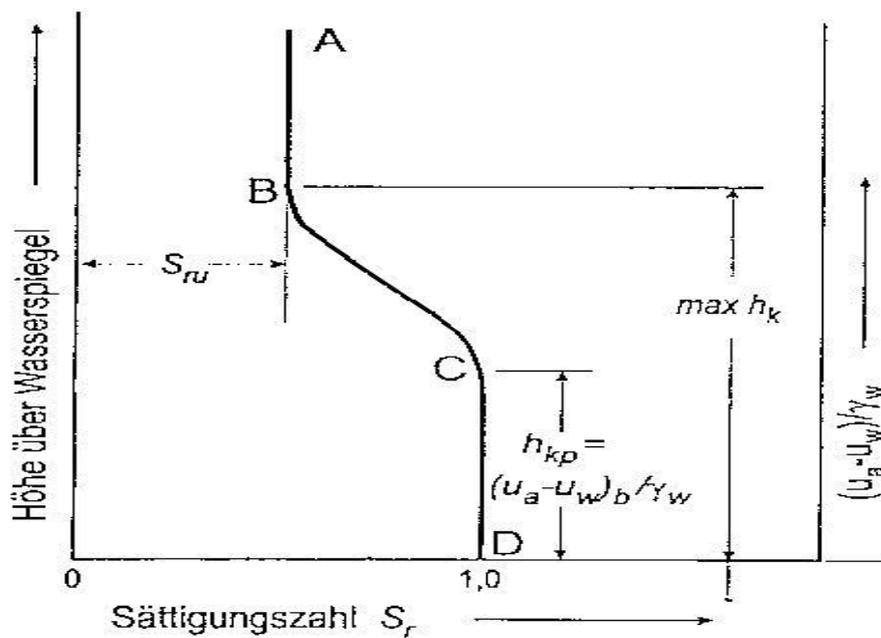


Abbildung 26 Verteilung der Sättigungszahl im Kapillarsaum [54]

3.2 Vorgehensweise

3.2.1 Zur Sichtung der Holzgründung

Bei einer Erkundung und der damit verbundenen Sichtung ist es wichtig, mit einem vertretbaren Aufwand auf einen möglichst großen Informationsgewinn zu kommen. Das Verhältnis der beiden sollte immer im Gleichgewicht stehen [7]. Natürlich kann man eine solche Beziehung auch zwischen dem Risiko der Ausführung und der Qualitätsaussage der Erkundung herstellen. Hierbei ist zum Beispiel das Wechselspiel zwischen der Untergrabung der Fundamentsohle und der Aussagekraft der ersichteten Holzgründung gemeint. Um einen optimalen Erfolg einer Gründungssichtung zu erzielen, sollte anfangs eine Art Lageplan erstellt werden. In diesen werden die vorangegangenen Untersuchungsschritte festgehalten. Baugrundaufschlüsse, Schürfstellen, Grundwasserstände und Schadensstellen mit besonders großen Setzungen sollten eingezeichnet werden sowie die Gebäudeabmessungen und eventuell relevante historische Zusatzinformationen aus Abschnitt 2.2 Informationen zum Bauwerk. Aufgrund dessen hat der leitende Fachingenieur nun die Möglichkeit Anzahl und Ausführungsart der Erkundungen festzulegen (Abbildung 27).

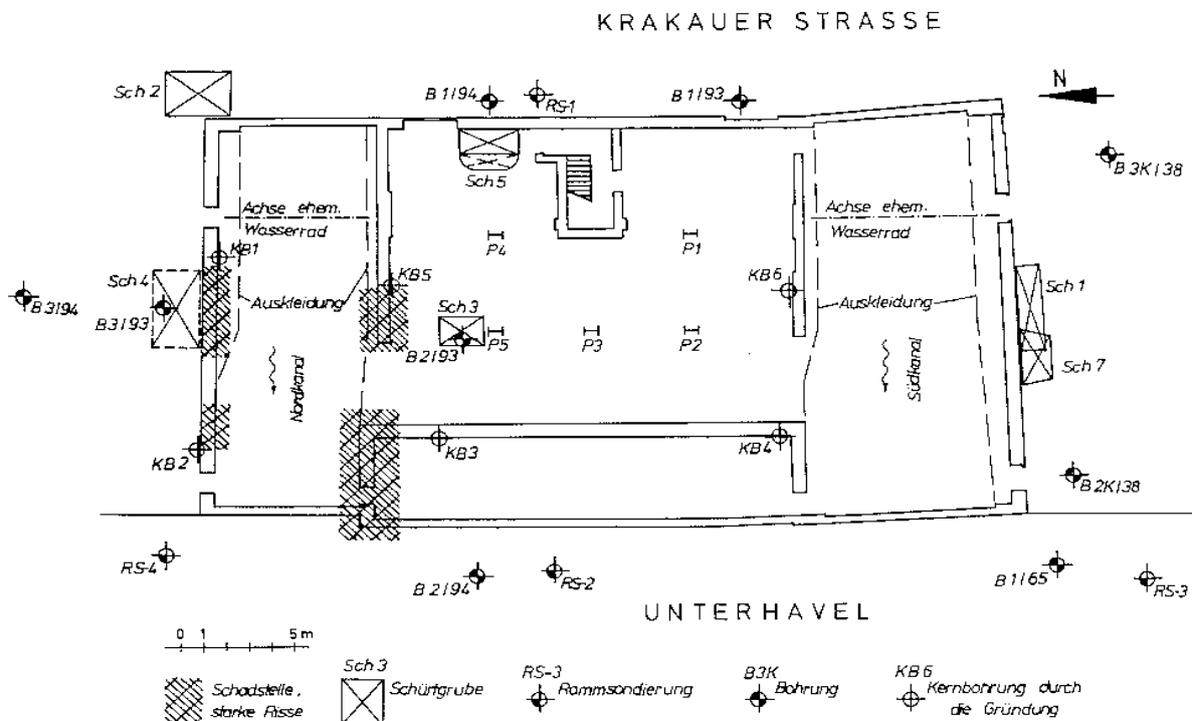


Abbildung 27 Skizze des Lageplans vom Krakauer Speicher [7]

Bei der Art der Untersuchung handelt es sich meist um das Anlegen einer Schürfgrube. Diese wird maschinell oder mit der Hand in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten ausgeführt [4]. Sie kann länglich über mehrere Meter oder punktuell ausgeführt werden. In entkernten Kellern sind sie mit zuvor getroffenen Sicherheitsmaßnahmen auch im Gebäude ausführbar. Ansonsten ist der Regelfall eher an den Gebäudeaußenwänden. Zeit- und kostensparend wäre die Nutzung von eventuell noch vorhandenen Schürfgruben der Baugrundanalyse, die dann ausgeweitet werden können. Vielleicht sollte man schon im Vorhinein, als leitender Ingenieur, die Schürfgruben zur Bodenanalyse so wählen, dass sie zur Gründungssichtung weiter verwendet werden können. Erwünschte Ziele dieser Untersuchungsmethode sind die Erkundung der Abmessung sowie der Aufbau und der Erhaltungszustand der Holzgründungskonstruktion. Diese Ausführung der Sichtung bürgt aber auch Risiken mit sich, da sie nicht nur sehr aufwendig ist, sondern auch die Stabilität der Fundamente infrage stellt. Als Regel eines Schurfes bei Holzgründungen sollte immer gelten, dass am Fuß der Fundamentsohle spätestens der Aushub gestoppt wird. Schließlich handelt es sich hier um die Freilegung der tragenden Fundamente. Auch weiß man aus der Praxis, dass das Fundamentmauerwerk meistens unvermörtelt und locker ist bei älteren Gebäuden [3]. Deshalb sollte das Gebäude ständig auf vertikale und horizontale Bewegungen kontrolliert werden. Eventuell durch die in Abschnitt 2.3 vorgestellten geodätischen Messmethoden. Meistens ist es so, dass man im Konflikt zwischen informativen Sichtungen und statischen Risiken steht. Oftmals reichen die in der Literatur empfohlenen kleinen Freilegungen [3] nicht aus, sodass zum Beispiel zwischen der ersten Reihe der freigelegten Holzpfähle weiter Boden entfernt wird. Dieses Risiko, basierend auf einer Interaktion zwischen Holzgründung und Baugrund, kann zur Lastumlagerung und somit zu weiteren Setzungen führen. Ein drittes Problem stellt die kurzzeitliche teilweise Trockenlegung der Holzgründung dar. Zwar besitzt ein Holzpfahl nachgewiesenerweise eine Art Dochtsystem [1], wo am Pfahlkopf verdunstetes Wasser von unten nachgeliefert wird, jedoch nützt dieses Gleichgewicht des Wasserhaushalts nicht viel, wenn eine Grundwassersenkung bis unter den Pfahlfuß vorliegt. Deshalb sollte geplant werden, die Holzgründungen zeitlich nur so kurz wie möglich freizulegen, um sie so vor Austrocknung zu schützen. In [1] wird vorgeschlagen, bei längerer Schürföffnung die Holzgründung künstlich zu befeuchten und mit Folien abzudecken. Generell sollte aber gelten, dass die Untersuchung an Holzgründungen schnell abgeschlossen werden und der Schurf wieder verfüllt wird. Schließlich sind Volumenabnahmen des Holzes bei dieser Art von Austrocknung irreversibel. An dieser Stelle eröffnet sich die Frage, wie es sich nun aber mit dem Luftsauerstoff verhält, der der Gründung durch Freilegung zugeführt wird. Prinzipiell liegt bei einer vorangegangenen Grundwassersenkung schon ein Luftkontakt, über die Luftporen im

Boden, zur Holzgründung vor. Es sei denn, es besteht der Ausnahmefall, dass im Baugrund sich luftundurchlässige Bodenschichten befinden. Dann wär dies aber auch kein großes Schadensrisiko, da bei Verfüllung der Sauerstoff sehr schnell vom Boden und dem Holz wieder aufgebraucht wird [1]. Sollte sich bei einer Sichtung der Holzgründung herausstellen, dass sie trotz ihres Alters sich in einem einwandfreien tragfähigen Zustand befindet, so wird empfohlen, die Schichtenfolge wieder so einzubringen, wie sie beim Erstellen des Schurfes vorgefunden wurden ist [3].

Eine andere Ausführung zur Gründungssichtung ist die der Kernbohrung. Nicht zu Verwechseln mit den Bohrtechniken der Baugrundanalyse. Kernbohrungen werden meist zusätzlich, nach der Begutachtung in Schürftgruben, ausgeführt. Sie sollen den Informationsgehalt der Erkundung noch verdichten. Gewählte Durchmesser sind eher klein festzulegen und befinden sich im Bereich von 50 mm [3]. Die Bohrungen selber werden dann an den Stellen ausgeführt, an denen genauere Informationen zur Gründung erwünscht werden. In der Regel werden sie schräg durch die Grundmauern, das Fundament und den Holzrost getrieben [3]. Bei der damaligen üblichen Bauweise findet man bei historischen bzw. älteren Gebäuden ein Naturstein- oder Ziegelmauerwerk vor. Das oft auf Sandsteinblöcken oder großen Findlingen gegründet wurden ist. Diese wiederum sind auf Schwellenrosten, Spickpfählen oder Langpfählen gelagert. Mithilfe der Bohrkerne kann man nun erschließen, in welchem Zustand die Holzgründung, das Fundament und das Mauerwerk sich befinden. Ihr Vorteil besteht darin, dass sie bausubstanz-schonend, preiswert, flexibel und schnell ausführbar sind und einen relativ hohen Informationsgehalt zum Gründungsaufbau liefern.

Bei der Anzahl der Untersuchungen muss der Fachingenieur anhand seines Lageplans diese Entscheidung wohl überlegt treffen. Es ist die Methode zu bevorzugen, bei der mehrere kleine Schürfstellen angelegt werden als eine länglich durchgehende Ausführung. Dies bürgt nicht nur ein statisches Risiko, sondern kann bei Denkmalsgeschützen-Bauwerken auch zu Konflikten führen, da hier ein erheblicher Eingriff in das Bodendenkmal stattfindet [7]. Ein weiterer Grund, der für die Ausführung vieler kleiner Sichtungen spricht, ist die Unzulässigkeit von Extrapolationen³⁷. Auf Grund von Praxiserfahrungen und Dokumentationen vieler Fallbeispiele lässt sich feststellen, dass eine Holzgründung die ihre Tragfähigkeit durch Pilzerstörung an einer Stelle verloren hat, an einer nur wenige Meter entfernten anderen noch intakt ist [55]. Am besten man wählt aufgrund des Lageplans die Stellen aus, welche Schwachpunkte darstellen und untersucht dort den Zustand der Holzgründung. Dies wird nun an einem Beispiel erläutert. Wenn die Grundwasserganglinie

³⁷ Beschreibt die Interpolation zwischen zwei Messergebnissen.

einen sehr starken Abfall an einer Gebäudefront erfahren hat und die Setzungsermittlung ergab, das in der Mitte dieser Gebäudeseite die stärksten Setzungen auftreten, zusätzlich die Baugrundanalyse das Vorhandensein von organischen Bodenschichten bestätigt, dann sollte dort definitiv eine Schürfstelle angelegt werden, um den Zustand der Gründungskonstruktion zu erkunden. Es wäre ohne eine Sichtung mit einer Probenentnahme kaum zu erschließen, ob sich die Bodenschicht verdichtet und mikrobiell zersetzt hat oder ein Pilzbefall vorliegt und wie die weitere Tragfähigkeit abzuschätzen ist. Schürfstellen an Gebäudeecken sind prinzipiell zu vermeiden, da der Kräftefluss in einer Gebäudeecke schwer einzuschätzen ist. Sollte aufgrund von Setzungen oder anderen Gebäudeschäden trotzdem ein Schurf dort zwingend notwendig sein, so ist dieser immer einseitig auszuführen. Dabei kann nach der Erkundung der einen Seite, diese wieder verschlossen und ein Schurf auf der anderen Gebäudeseite erstellt werden. Dieses Vorgehen verringert das Risiko eines Grundbruches.

Ziel einer Sichtung ist es vor allem immer, die Ausführungsart der vorliegenden Holzgründung zu bestimmen. Also zu klären, ob eine Spickpfahl, Tiefenpfahl oder Schwellenrostgründung vorliegt bzw. eine Kombinationen aus ihnen hervorgeht. Erst so kann überhaupt geklärt werden, wie die Lasten an den Baugrund weiter gegeben werden. Schürftgruben lassen schnell erkennen, ob ein lastverteilender Schwellenrost unter dem Fundament hergestellt wurde. Bei offengelegten Pfahlköpfen versucht man, sich über den Pfahldurchmesser auf eine Pfahlgründung festzulegen. Kleinere Durchmesser sind ein Indiz für kurze Spickpfähle (Abschnitt 3.1.1.3), wo hingegen große Durchmesser ein Anzeichen für Tiefenpfähle sind (Abschnitt 3.1.1.2). Wenn man sich im Überschneidungsbereich der Ausführungsdurchmesser befindet, klärt eine Pfahllängenbestimmung (Abschnitt 3.2.2) das Problem. Auch aus einer erlangten Kernbohrungsprobe kann ein Experte Aussagen zur Gründungsart treffen. Ansonsten gibt es viele Randbedingungen, die Hilfe bei der Analyse der vorhandenen Gründung geben. Zimmermannsmäßige Verbindungen stellen zum Beispiel immer ein Anzeichen für neuzeitliche Pfahl-Schwellenrostgründungen dar [7]. Viele ungleichmäßig verteilte Pfähle mittleren Durchmessers, sprechen für eine sehr alte Spickpfahlgründung. Aufgrund von vielen Fallbeispielen kann der ausführende Ingenieur sich ein Überblick verschaffen, welches anzutreffende Merkmal für welches Gründungsalter und somit für welche Gründungsart spricht. Manchmal ist dies jedoch mit Vorsicht zu genießen. In [55] wird berichtet, dass es Ausführungen gibt, die von großer Ratlosigkeit zeugen. Ein klarer Faden der Ausführung war trotz zahlreicher Schürfe und Kernbohrungen nicht möglich festzustellen. Gründungsgrundsätze wurden vernachlässigt oder gar missachtet. Ein Beispiel ist die große Vielfalt in der Gründungstiefe. Es wurden sehr viele unterschiedliche Pfahllängen bei benachbarten Gründungen festgestellt. Zusätzlich wurden anliegende sich

beeinflussende Gründungskörper, direkt nebeneinander, unterschiedlich hoch ausgeführt. Dies soll veranschaulichen, dass man festgestellte Ergebnisse, eines oder mehrerer Schürfe, nicht auf die komplette Holzgründung projizieren sollte.

Ein weiteres Ziel einer Sichtung von Holzgründung ist die visuelle Feststellung des Erhaltungszustandes vom Holz, aufgrund äußerer Erscheinungen. Dies ist jedoch ohne Laboruntersuchungen sehr kompliziert. Gerade für den Laien, auf dem Gebiet der Holzanatomie, ist dies sehr fern liegend [3]. Bei dem Freilegen der Holzpfähle stellt das dunklere schwarze innerliegende Holz das Kernholz dar. Das hellere äußere, meist braune Holz ist das Splintholz (Abschnitt 3.1.2.3 Kern- und Splintholz) [4]. In ganz exaltierten Situationen kann es passieren, dass man das verrottende Holz kaum vom Baugrund, in seiner dunklen Färbung, unterscheiden kann. Hier sollte besonders langsam und vorsichtig der Schürf ausgeführt werden. Des Weiteren gibt es noch ein paar besondere Erkundungsaufschlüsse, die hier geschildert werden sollen. Zum einem kann sich dem Ingenieur beim Schürfvorgang ein sehr strenger Geruch entgegen wirken³⁸. Zusätzlich wird er bemerken, dass sich die Oberfläche der Holzgründung sowie die des umgebenden Baugrundes sich nach Luftkontakt verfärbt haben [3]. Hier hat sich unter Luftabschluss ein Milieu gebildet, was sich anaerobe Bakterien zunutze gemacht haben. Solche Besonderheiten kann man über oder unter GWS vorfinden. Schädigungen des Holzes aufgrund von Wirken anaerober Bakterien fallen eher unbedenklich aus und sollten einer Materialschadensanalyse unterworfen werden. Eine weitere Besonderheit, die auf den ersten Blick nicht logisch erklärbar ist, sind beispielsweise makellos erhaltene Holzschwellen im Fundamentbereich, die sich über dem GWS befinden, aber darunter liegende Holzpfähle stark geschädigt sind [4]. Dies soll erneut verdeutlichen, dass es keine festen Regeln und Verallgemeinerungen bei der Sichtung von Holzgründungen zugelassen sind. Es sollte also bei jeder Erkundung sehr wachsam und gründlich gearbeitet und keine schnellen Rückschlüsse gezogen werden.

Da hier in diesem Teil des Leitfadens sich ausschließlich mit der Erkundung im Sinne einer Sichtung beschäftigt wird, muss man ganz klar Grenzen zur Materialschadensanalyse von Holzgründungen ziehen. Untersuchung von Holz, wie die Entnahme von Bohrkernen mit Zuwachs³⁹ oder Teuchelbohrern⁴⁰, die Bestimmung der Eindringtiefe mit einem Pilodynmessgerät⁴¹, die Erfassung des Bohrwiderstands oder die Probenentnahme und

³⁸ Zum Beispiel Schwefelbakterien die Sulfate zu Schwefelwasserstoff umwandeln.

³⁹ Das ist ein aus dem Bereich der Forstwirtschaft stammendes Handbohrgerät zur Probeentnahme.

⁴⁰ Das ist ein mittelalterliches Handbohrgerät, speziell für Holz, um es auszuhöhlen.

⁴¹ Das ist ein Messgerät, was über eine Nadelspitze beim Piecksen in das Holz den Eindringwiderstand misst.

anschließende Bestimmung von Holzeigenschaften gehören zur Materialschadensanalyse und sollen in der Fortsetzung dieser Arbeit aufgefasst werden [56].

Ein Hinweis ist noch in Sachen Sicherheit bei der praktischen Ausführung zu geben. Sollte bei einer Sichtung der Holzgründung ein sehr starker Verfall zutage kommen, wie zum Beispiel bei der Staatsbibliothek in Berlin, und führen die darauffolgenden Lastumlagerungen zu starken Setzungen oder ist ein möglicher Lasteintrag erst gar nicht mehr möglich, so sind Sofortsicherheitsmaßnahmen an dem jeweiligen Bereich durchzuführen. Diese können beispielsweise so aussehen, dass man den Schürf sofort wieder verschließt [55] und Stützmaßnahmen errichtet.

3.2.2 Zur Pfahllängenbestimmung

3.2.2.1 Allgemein

Neben dem Erhaltungszustand des Holzes, den man durch eine Materialschadensanalyse erhält, ist es für die weitere Abschätzung der Tragfähigkeit einer Holzpfahlgründung wichtig, die Pfahllänge genau zu wissen. Diese erlaubt nämlich, nach Abschnitt 3.1.1.2 (Echte Pfahlgründung, statische Wirkungsweise), die aufnehmbare Kraft des Tiefenpfahls zu ermitteln. Vorausgesetzt des Idealfalles, dass die Holzgründung keine größeren Schäden durch Bakterien bzw. Pilzbefall und Hydrolyse erfahren hat. Da diese historischen Gründungen meist schon vor dem 19. Jahrhundert ausgeführt wurden, ist es größtenteils schwierig, Unterlagen mit Vermerken oder Pläne mit genauen Pfahllängen zu erhalten. Um Letzteres zu ermitteln bedarf es eines Verfahren, das zerstörungsfrei, unkompliziert, wirtschaftlich, zuverlässig und quantitativ die Länge von Holzpfählen ermitteln kann (Abbildung 28). Dieses Verfahren wird üblicherweise mit der allgemein bekannten Hammerschlagmethode⁴² durchgeführt. Sie wird in der Geotechnik und behandelten Fachliteratur auch „Low-Strain“-Integritätsprüfung genannt. Der Begriff „Low-Strain“ ergibt sich, wie der Name schon vermuten lässt daher, dass ein Schwingungssignal im Pfahl mit einem relativ kleinen Gewicht erzeugt wird, welches keine bleibenden Relativverschiebungen zwischen Pfahl und Boden hervorruft [57]. Die Hammerschlagmethode fand anfangs ihre Bedeutung in der Integritätsprüfung und Qualitätskontrolle von Betonbohrpfählen [58]. Unter einer Integritätsprüfung wird verstanden, dass die Messergebnisse in keinem Widerspruch

⁴² Auch bekannt unter der Sonic Prüfung, Impuls Echo Prüfung oder Transient Response Prüfung.

zur gewollten Ausführung des Pfahls stehen. Man erhofft sich also konsistente Ergebnisse, die redundanzfrei⁴³ sind. Unter der Qualitätskontrolle versteht man das Prüfen der Betonqualität, das konstant Bleiben des Querschnitts, das Einhalten von Solllängen usw. In dieser Arbeit wird aber lediglich auf das vereinfachte Messprinzip, die Vorgehensweise und die Fehleranalyse einer LSI bei der Bestimmung von Holzpfahllängen eingegangen. An den jeweiligen Stellen wird ein Verweis auf vertiefende Literatur gegeben.

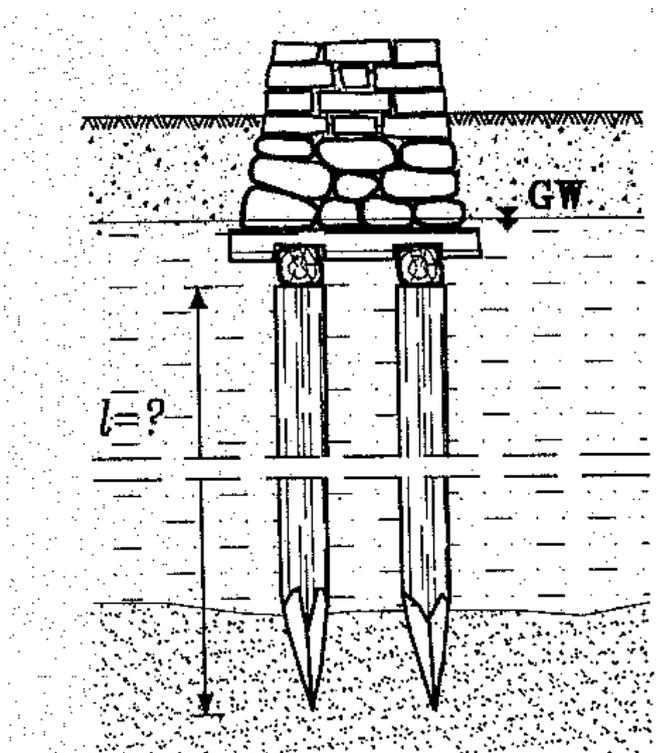


Abbildung 28 Pfahllängenbestimmung von Langpfählen [7]

⁴³ Der Betrag $r = n - u$ wird Redundanz einer Vermessung genannt, wenn n als Anzahl der Messwerte und u als Anzahl der daraus abgeleiteten Messergebnisse gilt. Die Redundanz r entspricht der Anzahl der Freiheitsgrade [59].

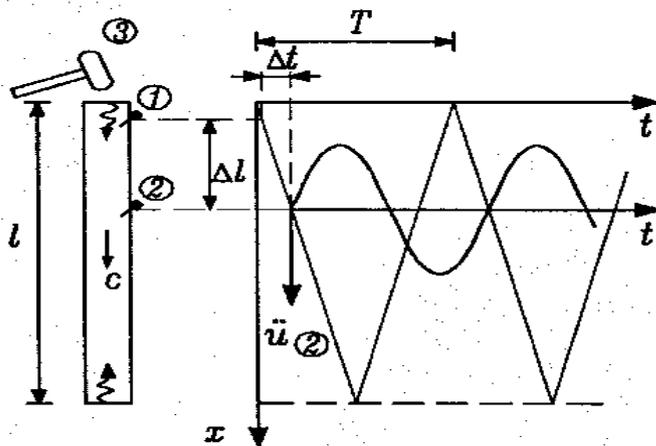


Abbildung 29 Prinzip der Pfahlängenbestimmung (Hammerschlagmethode) [7]

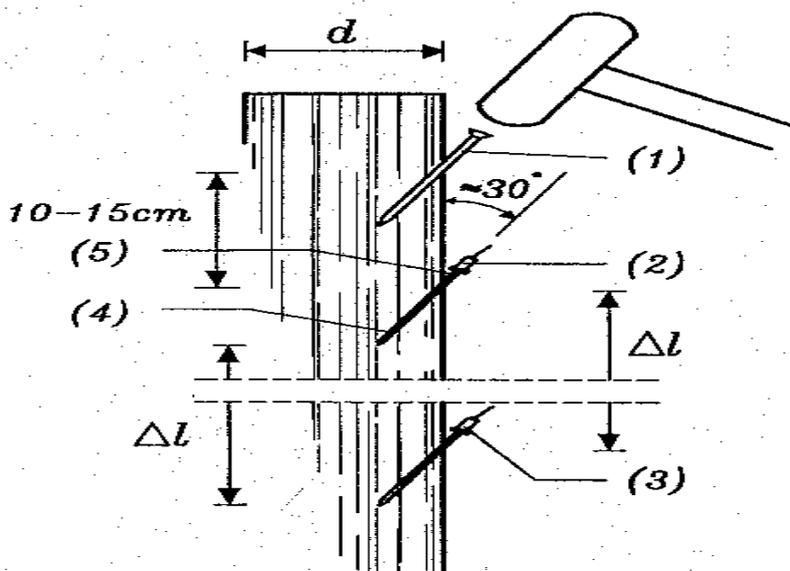


Abbildung 30 (1) Nagel, (2) oberer BM, (3) unterer BM, (4) Kernholz, (5) Verstärker [7]

3.2.2.2 Vereinfachtes Messprinzip

Bei einer normalen Anwendung der LSI zur Qualitätskontrolle von Betonpfählen ist die Pfahlänge vorher bekannt. Nun will man sie aber mit diesem Prinzip erst ermitteln und das funktioniert auch über die Theorie der Integritätsprüfung. Dies soll nun kurz erläutert werden.

Zuerst wird ein Signal in den Holzpfahl eingeleitet. Dies geschieht mit einem Schlag auf den Pfahlkopf. Das durch einen Hammer oder ein Fallgewicht erzeugte Signal wird am Pfahlfuß reflektiert und gelangt wieder zum Pfahlkopf zurück (Abbildung 29). Das Signal selber breitet sich in Form einer Welle mit einer Wellengeschwindigkeit c aus. Wie aus der Physik bekannt ist, wird die Periodendauer $T=2l/c$ berechnet. Stellt man diese Formel nach der gesuchten Länge um, so ergibt sich $l=T*c/2$. Somit ist die Länge des Holzpfahles abhängig von der Periodendauer T und der Wellengeschwindigkeit c . Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ist eine charakteristische Größe und hängt bei festen Körpern⁴⁴ vom Elastizitätsmodul E und der Dichte ρ ab. Die Formel lautet $c=\sqrt{E/\rho}$. Bei Holz kommt diese jedoch nicht zum Einsatz, weil das E -Modul als auch die Dichte ρ über die Pfahllänge variieren können. Dies hat viele Ursachen, wie beispielsweise unterschiedliche Wachstumsbedingungen, der Feuchtegehalt μ , Astaustrieb, aber auch der Erhaltungszustand und die unterschiedliche Ausbildung von Kern- und Splintholz. Zusammengefasst besitzt Holz also keine einheitliche und aus der Literatur bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals. Als Beispiel, das diese Aussage belegt, ist die Wellengeschwindigkeit c einer frischen Buche. Diese kann zwischen 2000 und 6500 m/s variieren [60]. Um diese trotzdem individuell für jeden Pfahl zu ermitteln, behilft man sich mit dem Grundsatz der Geschwindigkeit $v=\Delta l/\Delta t$. Man bringt am Pfahl zwei Beschleunigungsaufnehmer an. Den Längenabstand Δl der beiden kann man manuell messen. Den zeitlichen Abstand Δt erhält man, indem nach der Einleitung des Signals die Beschleunigungen der beiden Aufnehmer (2) und (3) gemessen werden (Abbildung 30). Die Laufzeit Δt ist die Zeit vom Anfang der Schwingung im Aufnehmer 1 bis zum Anfang der Schwingungen im Aufnehmer 2. Somit ergibt sich $c=\Delta l/\Delta t$. Theoretisch braucht es nur zwei Messvorgänge, um die Holzpfahllänge $l=T*c/2$ zu bestimmen. Mit dem Ersten, wird wie eben beschrieben, die Ausbreitungsgeschwindigkeit c ermittelt und mit dem Zweiten die Periodendauer T . Es handelt sich hierbei um die Laufzeit, welches das Signal vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß und wieder zurück braucht. Sie kann zwischen zwei Maxima, Minima oder Nullpunkten der sinusähnlichen Funktion am Aufnehmer (2) oder (3) abgelesen werden. Vollständiger halber muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass auch die Dämpfung im Boden mit einbezogen werden muss. Sie spielt eine relativ geringe Rolle bei der "Low-Strain" Methode und geht in das Ergebnis der Pfahllänge mit nur 1,4 Prozent ein. Die verbesserte Formel der Pfahllänge mit dem Absorptionskoeffizient $\alpha=2\Delta lna/T$ lautet dadurch:

$$l=\frac{c}{2\sqrt{\left(\frac{1}{T}\right)^2+\left(\frac{\alpha}{4\pi}\right)^2}} [1].$$

Der theoretische Hintergrund ist, dass durch Schubspannungen an der Mantelreibung die Schwingung im Pfahl eine Dämpfung erfährt. Genauer betrachtet, kommt

⁴⁴ Beispielsweise Körper aus Stahl oder Beton.

es beim "Low-Strain" Verfahren zur Energieabstrahlung am Pfahlmantel durch den Schubwiderstand bei alternierenden⁴⁵ plastischen Verformungen. Der Absorptionskoeffizient, der die Schwingungsbeschleunigung a beinhaltet, drückt dies mit aus. Vertiefte Informationen zur Dämpfung im Baugrund durch "Low Strain" -und "High Strain" Verfahren gibt es in [57] und [60].

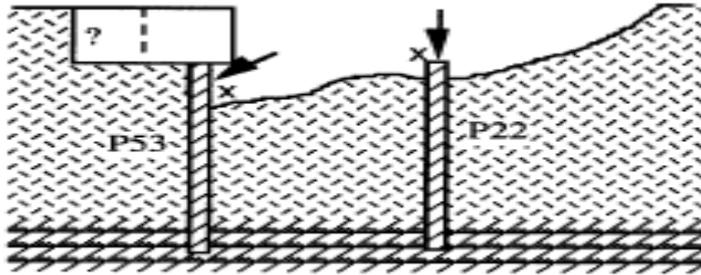


Abbildung 31 links: Seitliche Signaleinbringung rechts: Axiale Signaleinbringung [7]

3.2.2.3 Vorgehensweise

Prinzipiell kann man zwei Arten der Schlageinbringung differenzieren, zum einen seitlich des Pfahls am Mantel, zum anderen von oben am Kopf (Abbildung 31). Dabei sollte die axiale Signaleinbringung bevorzugt werden, da dabei das Anfallen von Querschwingungen geringer ausfällt. In den meisten Fällen ist das aber gar nicht möglich, da man aus statischen bzw. ökonomischen Aspekten das Gründungsmauerwerk bzw. den Schwellenrost vom Pfahlkopf nicht entfernen kann. Wichtig ist bei der Ausführung einer seitlichen Schürfgrube, dass der Pfahlkopf mindestens 50 cm freigelegt wird [60]. Dies liegt darin begründet, dass Platz zum Einbringen des Schlages benötigt wird und zudem zwei Beschleunigungsabnehmer angebracht werden müssen. Es gibt zwei übliche Methoden, wie ein Schwingungssignal im Pfahl erzeugt werden kann. Zum einen mit einem Hammer und zum anderen mit einem Fallgewicht von 5-20kg⁴⁶. Ist der Pfahlkopf nicht zugänglich, so sollte man am Pfahlmantel eine Kerbe als Aufschlagfläche für das Fallgewicht ausbilden. Ansonsten wird es problematisch, damit ein brauchbares Signal zu erzeugen. Die gängigere Methode bei der

⁴⁵ wechselnden

⁴⁶ Größere Gewichte werden bei einer "Low-Strain"-Methode in der Regel nicht verwendet.

seitlichen Einbringung des Signals ist vorher einen Nagel schräg einzuschlagen und auf diesem dann mithilfe eines Hammers den Pfahl zum Schwingen zu bringen. Aufgrund der Eigenschaften des Holzes ist es von Vorteil, das Splintholz an der Stelle der Signaleinbringung, wenn möglich, bis zum Kernholz zu entfernen. Dies hat den Grund, dass die Fasern des Kernholzes das Signal deutlicher und konstanter transportieren als das Splintholz. Außerdem wird die Laufzeit im Bereich des höheren E-Moduls bestimmt. Für die optimale Signalerzeugung ist ein klarer, kurzer einmaliger Schlag des Hammers oder des Fallgewichts ratsam. Vor allem ist, wenn möglich, die Schlageinbringung direkt am Holz zu bevorzugen, wobei das Verwenden von Unterlagen zu vermeiden ist. Dies hat den Grund, dass sonst größere hochfrequente Störschwingungen entstehen [60]. Die Frage, wie stark man mit einem Hammer den Pfahl in Schwingung versetzen soll, lässt sich folgendermaßen beantworten. Es gilt schwach anzufangen und seine Schlagkraft soweit zu erhöhen, bis der Holzpfahl zum ersten Mal komplett in Längsrichtung anfängt zu Schwingen. Erkennbar ist dies an der sich nicht mehr ändernden Periodendauer T . Es kann passieren, dass es bei feuchtem Holz zur Zerstörung der Aufschlagfläche kommt und man eine neue ausbilden bzw. die alte nacharbeiten muss. An dieser Stelle ist es vielleicht noch interessant zu erwähnen, dass es aus technischer Sicht folgende Geräte zur Holzpfahllängenbestimmung bedarf: zwei Beschleunigungsaufnehmer, zwei Messkabel und einen Verstärker, ein Oszilloskop⁴⁷ und einen Rechner [60].

3.2.2.4 Fehleranalyse

Interessant scheint die Frage zu sein, wo Fehler bei dieser Methodik auftreten und Streuungen entstehen können und inwieweit diese Einfluss auf die Genauigkeit der Pfahllänge haben. Schließlich geht diese in die Tragfähigkeitsabschätzung mit ein. Da von Baum zu Baum gleicher Holzart sich Kern und Splintholz, nasses und trockenes Holz und viele andere Eigenschaften unterscheiden können, gibt es auch große Unterschiede in der Dichte und dem E-Modul. Deshalb kann es zu deutlichen Schwankungen bei der Ausbreitungsgeschwindigkeit c kommen. Die somit für den Pfahlkopf ermittelte Wellengeschwindigkeit kann sich am Pfahlfuß ganz anders verhalten. Demzufolge kann das Ergebnis Schwankungen bis zu über 10 Prozent aufweisen, was in der Praxis auch schon nachgewiesen wurde [60]. Da es meist seitlich am Pfahl zur Pfahllängenbestimmung kommt, sind die beiden Beschleunigungsmesser häufig an einem schräg eingetriebenen Nagel

⁴⁷ Das ist ein elektrisches Messgerät zur optischen Darstellung von Schwingungen.

befestigt. Beim Erzeugen des Schlagsignals kommt es bei den Nägeln zur Ausbildung von Eigenschwingungen, die sich mit dem Hauptsignal überlagern können. Diese stören das Messsignal und erzeugen Streuungen. Die Berechnung der LSI, die bei der Holzpfahllängenbestimmung verwendet wird, liegt einer eindimensionalen Wellentheorie zugrunde. Eine genaue Erläuterung zu dieser Annahme ist in [57] zu finden. Ebenheit des Querschnitts sowie ein konstantes E-Modul sind Grundlagen dieser Theorie. Konische Pfähle sowie Astaustriebe und die eventuelle chemische und biologische Schädigung des Pfahles lassen diese Bedingung nur in den seltensten Fällen erfüllen. Auch starke Durchfeuchtung und Zersetzung lassen die Wellenfronten selten eben bleiben. Zusätzlich kommt es bei der Eintragung des Signals über einen schrägen Nagel zu sogenannten Querschwingungen, die mit bemessen werden, und so eine Rechenannahme der eindimensionalen Wellentheorie entkräften. Mit diesem Ansatz kann man auch erklären, wie es in der Praxis schon zu falschen Messergebnissen kam. Zwei weitere Gründe, die das Messergebnis verfälschen können, sollen hier noch näher betrachtet werden. Zum einen erfährt das Signal bei Pfählen, die im Grundwasser gegründet sind, eine stärkere Dämpfung im Boden, die in der Formel nicht extra Berücksichtigung gefunden hat. Zum anderen wird diese Dämpfung gerade bei geschädigtem Holz noch verstärkt [60]. Somit stören und beeinflussen systematische Fehler das Messverfahren, was folglich zu einer großen Streuung der Ergebnisse führen kann.

3.2.2.5 Zusammenfassung

Holzschäden, Anisotropie und Inhomogenität des Holzes, Quer- und Eigenschwingung der Aufnehmer und Nägel sowie die Nichteinhaltung der Randbedingungen der eindimensionalen Wellentheorie bieten Grundlagen für ein ungenaues Messergebnis. Auch aus der Praxis ist bekannt, dass für Δt oft unterschiedliche Werte erhalten werden, sodass empfohlen wird, einen Mittelwert zu bilden, um so Messspitzen herauszufiltern. Sollte in Betracht gezogen werden, dass die berechneten Pfahllängen für weitere Berechnungen verwendet werden, wird empfohlen erhöhte Sicherheitsbeiwerte zu benutzen. Im Allgemeinen wird bei dieser Methode von einer möglichen Längenabweichung von 10-11 Prozent gesprochen. Dies ist auch durchschnittlich an den in [60] aufgeführten Beispielen zuerkennen.

4 Zusammenfassung und Analyse der Ergebnisse

An dieser Stelle sollen die einzelnen Erkundungs- und Untersuchungsmethoden mit ihren Ergebnissen, in Bezug zum Erhaltungszustand des Holzes, der Tragfähigkeit der Gründung und den angepassten Sanierungsmethoden, zusammengefasst und bewertet werden.

Aus den in der Praxis der Gründungserkundung hervorgehenden fünf Schritten, die in Abschnitt 2 vorgestellt wurden, lassen sich gewisse Erkenntnisse gewinnen, die in ihrer Aussagekraft entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Sanierungskonzeptes haben. Die Interpretation des Schadenbildes gibt Informationen zu Art und Verteilung der Setzung. Eine genaue Auswertung von sichtbaren Schäden wie Rissen, Verbiegungen und Verzerrungen erlaubt Gründungsschwachstellen zu identifizieren und mögliche Standorte für Schürfstellen festzulegen.

Das Einbeziehen von Geologen, Historikern, Archäologen und Anwohnern bei der Betrachtung der Bauwerksgeschichte kann in manchen Fällen zu vielversprechenden Ergebnissen führen. Ein Geologe kann aus topographischen und geologischen Karten im Vorhinein schon eine Einschätzung der Baugrundverhältnisse und ihrer Entstehung geben. Es ist somit festzustellen, in welcher Tiefe mit welcher Mächtigkeit tragfähige Bodenschichten anzutreffen sind. Historiker und Archäologen können mittels geschichtlicher Aufzeichnungen und ihrem regionalen Wissen eventuell Rückschlüsse auf die Ausführungsformen der Holzgründung und somit Lastabtragungsbesonderheiten in Erfahrung bringen. Wenn historische Dokumente des Gebäudes über Bauausführung und Umbaumaßnahmen vorhanden sind, die zum Beispiel Angaben über die Ausführung der Gründung und dem Aufbau des Gebäudes beinhalten, erlauben diese Erkenntnisse zu einem vorliegenden Kräftefluss im Objekt bis hin zu einer Entwicklung von passenden Sanierungskonzepten. Meist ist das aber nur die Ausnahme, sodass mit den Informationen der eigenen Untersuchungen auskommen werden muss.

Eine langzeitliche Setzungsermittlung, soweit dies möglich ist, und deren exakte Auswertung können einen hohen Informationsgehalt besitzen. Zum einen kann ein Fachmann aufgrund der über Jahre sich einstellenden Setzungslinie die Art einer Holzschädigung eingrenzen. Konstante über Jahre geringe Senkungen sind ein Indiz für das Vorhandensein von Bakterien und der Schädigung durch Hydrolyse, wo hingegen nach einer Grundwassersenkung ein plötzlich starkes Ansteigen der Setzungen ein Anzeichen für den Pilzbefall sein kann. Natürlich sind dabei immer bodenmechanische Effekte mit zu

berücksichtigen. Zum anderen ist möglicherweise auch die Erstellung einer Prognose der weiteren Setzungsbewegungen ausführbar. Neben den sich eventuell einstellenden Senkungen und den damit entfallenden Handlungsbedarf, kann bei einem langfristig konstanten Verlauf, der jeweilige Sanierungsbedarf ermittelt werden. Ergibt sich aufgrund der Messungen ein periodisches Heben und Senken des Gebäudes, sollte die Jahrgangslinie des Grundwasserstandes sowie der monatliche Feuchtegehalt des Bodens und seine Schrumpf- und Quelleigenschaften genauer untersucht werden. Bei der, nach den beschriebenen Verfahren, einmaligen Ermittlung der Setzungsdifferenzen in situ, können wie schon bei der Schadensbildanalyse die Bereiche größter Setzungen lokalisiert werden.

Eine Baugrundanalyse kann je nach Komplexität, Beiträge zu denkbaren Holzschädigungen sowie Informationen zum Anwendungsbereich einzelner Sanierungsmethoden liefern. Ersteres trifft auf das Vorhandensein von aggressiven organischen Böden (Bakterienbefall), sauren Böden (Hydrolyse), anoxischen Böden wie Faulschlamm (anaerobe Bakterien) zu. Wird eine Sanierung der Gründung angestrebt, da die Setzungen des Gebäudes nicht mehr tragbar sind, so liefert ein Baugrundgutachten Aussagen über die Schichtung und die Tragfähigkeit des sich unter dem Gebäude befindenden Bodens. Aufgrund dessen kann der beauftragte Ingenieur Entscheidungen zur Sanierungsmethode, wie beispielsweise eine konventionelle Unterfangung, eine Pfahlgründung in tieferliegende tragfähigere Schichten oder eine Baugrundverbesserung durch Bodeninjektion oder Düsenstrahlverfahren treffen. Des Weiteren erlauben die ermittelten Widerstände einer Sondierung die Resttragfähigkeit von vorhandenen Holzpfählen, aufgrund von Probelastungen, zu bestimmen.

Der Grundwasserstand dient prinzipiell erst einmal der Entscheidung, ob sich die Holzgründung unter Sauerstoffabschluss befindet oder nicht. Sollte Ersteres die vorhandene Situation charakterisieren, darf bei einer eingetretenen Gründungsschädigung der Befall durch Pilze oder aeroben Bakterien ausgeschlossen werden. In diesem Fall wird bei einer Materialschadensanalyse eine Holzschädigung durch aerobe Bakterien oder Hydrolyse diagnostiziert werden. Liegt die Gründung über dem Grundwasserspiegel, ist ein Ausschluss möglicher Schadensursachen komplexer. Hierbei spielen vor allem holzanatomische und bodenmechanische Eigenschaften mit ein. Es ist zu klären, inwieweit ein Boden durch seine Kapillarität und der damit vorhandenen Saugspannung das Wasser im Baugrund halten kann, es aber der Holzgründung nicht entzieht. H. Wichert gibt dazu an, dass keine Wasserbewegung vom Holz zum Boden aufgrund von zu hohen Wasserbindungskräften im Holz stattfinden. Bindige Böden wie Tone können aufgrund ihrer hohen Kapillarität weit über einem Meter des gesunkenen Grundwasserstandes noch eine volle Sättigung besitzen. Hierbei wäre wieder ein Befall durch die aggressive Moderfäule oder anderen Pilzen

ausgeschlossen. Genauso verhält es sich mit Gründungen, die sich in der Wasserwechselzone befinden. Letztendlich liefert aber nur eine auf spezifischen Holzproben basierende Materialschadensanalyse eine genaue Diagnose.

Neben der eben erwähnten Materialanalyse, die genaue Untersuchungen des verbauten Holzes auf seine Eigenschaften, wie Dichte, Wassergehalt, Art, Alter, Zerstörungsgrad und Verursacher vorsieht, kann auch vor Ort durch mechanische Probelastungen der noch vorhandene Grad der Tragfähigkeit ermittelt werden. Diese Methoden stellen aber nicht den Fokus dieser Arbeit dar. Die Dichte, der Wassergehalt und der Zerstörungsgrad des Holzes stehen dabei ähnlich, wie die Kapillarität und die Saugspannung des Bodens, in Wechselbeziehungen zueinander und sind die Hauptaussagekriterien zur vorhanden Tragfähigkeit. Die durch Materialschadensanalysen und Probelastungen ermittelten Resttragfähigkeiten können aber erst dann zu Prognosen des möglichen Sanierungsaufwandes herangezogen werden, wenn das Gesamtkonzept der Gründung erkundet wurde. Hierbei ist es unerlässlich, sich mit den möglich anzutreffenden Holzgründungsarten auseinanderzusetzen, um bei der Erkundung eine Zuordnung zu treffen und festzustellen, wo welche Lasten wie abgetragen werden.

Echte Pfahlgründungen wurden dazu benutzt Lasten über den Spitzenwiderstand in tieferliegende tragfähigere Schichten abzutragen oder die eingeleiteten Kräfte über den Mantelreibungswiderstand an die nur teilweise tragfähigen Böden abzugeben. Kommt es aufgrund einer Grundwassersenkung zu einer folgenden Holzschädigung, können sich Lastumlagerungen einstellen, wobei Kräfte auch auf den Boden zwischen den Pfählen abgeleitet werden. Dieser kann dadurch, neben einer grundwassersenkungsbedingten Schrumpfung, zusätzlich durch eine Lasterhöhung Sekundärsetzungen erfahren. Durch das Setzen des Bodens kann ein, auf einer tieferliegenden tragfähigen Bodenschicht, gegründeter Holzpfahl negative Mantelreibung erfahren, wodurch er im schlimmsten Szenario in seiner Tragwirkung versagt. In diesem speziellen Fall müsste eine Gründungserneuerung stattfinden. Des Weiteren gilt festzustellen, ob die Pfähle Ausmittigkeiten besitzen und wenn ja, diese bei einer Probelastung zu berücksichtigen.

Spickpfähle dienen aufgrund ihrer verdichteten Wirkung zur Baugrundverbesserung und besitzen normalerweise keine Lastabtragungsaufgaben.

Horizontale Balkenroste haben die Aufgabe Gebäudelasten aufzunehmen, weiterzuleiten und zu verteilen. Da sie sich in der Wasserwechselzone befinden, ist bei ihnen meist mit einer starken Schädigung zu rechnen.

Die Erkundung der Gründung dient zur Feststellung der eben genannten und am Gebäude vorhandenen ausgeführten Holzgründungsvariante. Je nach Art kann eine passende Sanierungsmethode festgelegt werden. Gerade wenn es sich um Maßnahmen handelt, die nur einen teilweisen Ersatz der Pfahlgründung vorsehen ist eine genaue Analyse der vorhandenen Holzgründung von Nöten. Es ist darauf zu achten, dass bei der Erwägung einer teilweisen Neugründung immer genau überlegt wird, ob Wechselwirkungen und Verformungsverträglichkeiten der Alt- und Neugründung in Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen gegeben sind. Eine solche mögliche Maßnahme wär zum Beispiel, wenn aus Gründen einer Grundwassersenkung sowie einer folgenden Pilzschädigung, die Pfahlköpfe einen Großteil ihrer Tragfähigkeit eingebüßt haben und deshalb beschlossen wird, den oberen Bereich des Pfahles zu entfernen, worauf eine, auf den Rest der Pfähle, betonierte Unterfangung entstehen soll.

Bei der Feststellung der Holzart einer unbeschädigten Holzgründung kann aufgrund der Einteilung in Resistenzklassen und der damit verbundenen abgeschätzten weiteren Lebensdauer sowie den Erfahrungen aus der Praxis eine Weiterverwendung unter gleichen bodenmechanischen und hydrologischen Bodenverhältnissen vorausgesetzt werden. Sollte sich jedoch herausstellen, dass eine Schädigung vorliegt, ist in Bezug auf die vorhandene Holzart eine Prognose zu erstellen, inwiefern sie die benötigte Tragfähigkeit zur sicheren Abtragung der Lasten noch besitzt. Dabei ist Eichen- und Robinienholz eine höhere Resistenz gegen Zerstörung anzurechnen, als beispielsweise Erlen -, Pappeln- oder Lärchenholz. Letztendlich stellt aber eine erhöhte Zerstörung der Holzstruktur ein zu hohes Risiko dar, als das sie keine Sanierung bedarf. Des Weiteren kommt hinzu, dass dieses Gebiet der Bodenmechanik zu wenig erforscht ist, als das genaue Prognosen mit hohen Sicherheiten erstellt werden können. Aus Beispielen in der Praxis wird berichtet, dass es innerhalb weniger Jahre zu einer kompletten Zerstörung der Holzgründung kommen kann und wiederum andere Pfähle nach Hunderten von Jahren eine fast komplette Tragfähigkeit noch besitzen, und dies Holzart unabhängig.

Das Holzalter spielt bei der Gründungserkundung nur soweit eine Rolle, inwiefern ihr eine genaue Gründungsausführung und somit ein Lastabtragungskonzept zugeordnet werden kann. Ansonsten kann aus dem bisherigen Alter des Holzes und dessen Zustand eine zukünftige Angabe zur Weiterverwendung abgeschätzt werden.

Wenn aufgrund der Anordnung bzw. der Querschnittsgröße der Pfähle noch keine Zuordnung der Pfahlart möglich ist, lässt sich durch die Pfahllängenbestimmung vor Ort mit der Hammerschlagmethode feststellen, ob es sich um Spick- oder Tiefenpfähle handelt. Diese Information dient wiederum zur Einordnung der Gründungsart und gibt Schlüsse über deren Tragverhalten. Zusätzlich kann über die Länge einer echten Pfahlgründung geklärt

werden, in welche Schichten sie gründet und somit ihre Lasten schwimmend oder stehend abträgt. Des Weiteren ist es von großer Bedeutung herauszufinden, ob die einzelnen Pfähle sich von der Länge unterscheiden, da hinsichtlich ihrer Abmessungen die Beanspruchbarkeit berechnet und somit ihre ausreichende Dimensionierung geprüft werden kann. Diese kann dann bei der Entscheidung einer Sanierung von großer Wichtigkeit sein.

5 Fazit und Ausblick

Die hier dargestellte Arbeit sieht sich als Bestandteil eines umfassenden Leitfadens zur Behandlung von Schäden an historischen Holzgründungen sowie deren Untersuchungs- und Sanierungsmethoden. Den anfangs aufgeführten Abschnitten der Voruntersuchung und der anschließend aufgezeigten Erkundungsmethoden der Gründung in situ, sollte nun eine ausführliche Schilderung von Materialschadensanalysen in Beziehung zu deren Machbarkeit und Effektivität, eine daraus resultierende Bewertung des Gesamtbildes unter der Einbeziehung statischer Aspekte der Tragfähigkeit sowie eine Entscheidungstreffung mit angepassten Sanierungsvorschlägen folgen.

Eine zutreffende Analyse einer Holzgründung, die sich mit der Schädigung der Tragfähigkeit und dem Sanierungskonzept befasst, ist nur dann möglich, wenn die statischen und konstruktiven Gegebenheiten richtig erfasst werden. Dies geschieht vor allem im Prozess der Erkundung. Durch diese und den vorangegangenen Schritten einer kompletten Gründungsanalyse einer Gründung gilt es als Ziel schon teilweise eine Antwort zu der Frage zu bekommen, ob eine alte Gründung als weiter tragende Konstruktion ausreicht, sie zu verstärken oder komplett zu ersetzen ist. Vervollständigt wird diese aber erst durch die in der Schadensanalyse des Holzes festgestellten Eigenschaften, der Dichte (Festigkeit), der Holzfeuchte und der vorhandenen Schadensorganismen. Erst dann können die weiteren Schritte des aufgezeigten Leitfadens fortgesetzt werden.

Meistens empfiehlt es sich aber, wie die Praxis zeigt, infolge eines vorangegangenen Gründungsschadens durch eine Grundwassersenkung, und der damit in Verbindung stehenden ungewissen Vorhersage des Tragfähigkeitsverhaltens, die umfassende Sanierung der Gründung zu bevorzugen. Allemal es sich in den meisten Fällen um historisch bedeutsame Gebäude handelt deren Dauer und Art der Nutzung nicht infrage gestellt wird. Dabei drängt sich eher die Frage des angepassten Sanierungskonzeptes in den Vordergrund, welche Maßnahme zu welcher Schädigung der spezifischen Holzgründungsart passt.

Interessant scheint es, inwiefern die Weiterentwicklung geophysikalischer Verfahren das Vorhandensein und letztendlich eine genaue Bestimmung der Holzgründung von der Oberfläche aus erlauben, um so den Aufwand einer Gründungserkundung zu reduzieren.

Durch ein von der EU in das Leben gerufene Programm Bacpoles, ist in nächsten Jahren zu erwarten, inwieweit mit Viren gegen holzerstörende Bakterien im Baugrund vorgegangen werden kann.

Zusätzlich wäre noch interessant in Erfahrung zu bringen, welche ökonomischen Varianten der Grundwasserausgleichsmaßnahmen an einem Gebäude stattfinden könnten, wenn eine Senkung des Grundwasserspiegels konzipiert wird.

Eher utopisch erscheint es hingegen ohne Lastversuche bzw. einer vollständigen Materialschadensanalyse und den vorangegangenen Schritten des Leitfadens, aufgrund einer spezifisch vorliegenden Holz- und Bodenart und deren Feuchtegehalt eine präzise Tragfähigkeits- und Lebensdauerabschätzung zu geben, bedingt durch den unkalkulierbaren Einfluss zahlreicher bodenmechanischer Effekte.

Literaturverzeichnis

[1] Fraunhofer Institut Holzforschung (WKI): *Holzkundliche Untersuchung und Beurteilung von Pfahlgründungen*, 2007

[2] Müller, Christian: *Nachgründung und Fundamentverbesserung*, Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit 2009

[3] Goldscheider, Michael ; Eckert, Hannes: *Baugrund und historische Gründungen: Untersuchen, Beurteilen, Instandsetzen*, Karlsruhe: Sonderforschungsbereich 315, 2003 (Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke). - ISBN 3-934540-07-4

[4] RWE Power - Abteilung Bergschäden Bau, *Sanierung einer historischen Gründung einer Wassermühle*, (<http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/de/88042/data/88072/6079/rwe/verantwortung/im-dialog/publikationen/fakten-kompakt/tagebaueundbergschaeden.pdf>)

[5] Sperling, Gerhard: *Zur Sanierung der Gründung historischer Gebäude* in Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Leipzig (1992), Jg. 16, Nr. 1/2, S. 25-42, ISSN 0323-6129

[6] Bilz, P. ; Haufe, F. ; Kothe, E.: *Ergebnisse zur Untersuchungen zum Zustand des Holzrostes eines Pfeilers der Marienbrücke in Dresden* in Technische Hochschule Leipzig – Wissenschaftliche Zeitschrift, Jahrgang 16/1992, Heft 1/2, S. 91-98

[7] Goldscheider, Michael ; Ladjarevic, Mitjana ; Krieg, Stefan ; Uricher, Christoph: *Der Rieselspeicher „Krakauer Mühle“ in Brandenburg an der Havel* in Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Bauefüge, Konstruktionen, Werkstoffe, Jahrbuch 1994, Berlin Ernst und Sohn, 1996, S. 331-356, ISBN 978-3-433-01259-8

[9] Witt, Karl Josef (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch Teil1 Geotechnische Grundlagen*, Berlin, Ernst & Sohn 2008. – ISBN 978-3-433-01843-9

[10] Torge, Wolfgang: *Geodäsie Lehrbuch 2. Auflage*, Berlin, de Gruyter Lehrbuch 2003 - ISBN 3-11-017545-2

[11] Möser/Müller/Schlemmer/Werner: *Handbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen 2. Auflage*, Heidelberg, H. Wichmann Verlag 2000, -ISBN-13: 978-3879072958

[18] Knödel, Klaus ; Krummel, Heinrich ; Lange, Gerhard: *Geophysik-Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, 2. Auflage*, Berlin, Springer Verlag 2005, – ISBN 3-540-22275-8

[23] Böttcher, P.: *Untersuchung zur Dauerhaftigkeit von Gründungspfählen in Holz als Roh- und Werkstoff* 1989, Jg. 47, Nr. 5, S. 179-184, ISSN:0018-3768

[24] Wichert, Hans-Wilhelm: *Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit von historischen Spickpfahl-Gründungen*, Braunschweig, Selbstverlag Technische Universität Braunschweig, 1988, Heft Nr. 27

[26] Kothe, Eberhard: *Pfahlgründungen-Holzpfahlgründungen tragen häufig nach 100 Jahren noch* in der Prüfingenieur, April 1996, S. 30-38

[28] Smettan , Kl., Dipl. Geologe: *Holzpfahlgründungen-auch heute noch eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Gründungsart* in Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 71 (Pfahlsymposium 2003) S. 95-114, ISBN 3-927-610-62-3

[30] Pottgiesser, Uta: *Prinzipien der Baukonstruktion*: Fink, 2009 –ISBN 978-3-7705-4485-1

[31] Witt, Karl Josef, Vorlesungsunterlagen Grundbau

[32] o. V.: *Auswechslung der Holzpfahlgründung des Turms der St. Martin in Landshut durch Betonfertigteile* in Fachzeitschrift Element + Bau, 1990, Jg. 27, Nr. 5, S. 27-28, ISSN: 0934-5914

[33] Chambosse, G. ; Sondermann, W.: *Unterfangung der Kirche St. Jodok, Landshut* in Technische Hochschule Leipzig – Wissenschaftliche Zeitschrift, Jahrgang 16/1992, Heft 1/2, S. 109-113

- [34] Grede, R. ; Groß, T.: *Die Nach Gründungsmaßnahmen am historischen Rathaus Zweitbrücken unter besonderer Berücksichtigung der historischen Bausubstanz* in Bauen in Boden und Fels 3. Kolloquium 2002, S. 227-237, ISBN 3-924813-49-3
- [35] Franke, E. ; Lutz, B. ; El-Mossallamy, Y.: *Pfahlgründungen und die Interaktion Bauwerk Baugrund* in Geotechnik (1994), Jg. 17, Nr. 3, S. 157-172, ISSN 0172-6145
- [36] Norm DIN-EN 350-1 und 2: 1994. *Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz*
 Teil1: *Grundsätze für die Prüfung und Klassifikation der natürlichen Dauerhaftigkeit von Holz*
 Teil2: *Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten mit besonderer Bedeutung in Europa*
- [39] Andrä, H.-P. ; Fink, R.: *Untersuchungen an der historischen Holzpfehlgründung und am historischen Mauerwerk beim Umbau des Reichstagsgebäudes zum Sitz des deutschen Bundestages in Berlin* in Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Nr. 4, Technische Akademie Esslingen vom 17.-19. Dez. 1996, S. 1065-1088, ISBN 3-931681-10-6
- [40] Bühler, S. ; Dieterichs, U. ; Haruske, G. ; Steinfurth, A.: *Einfluss des Bakterienbefalls auf die Resttragfähigkeit der Westkai-Holzpfehlgründung-Umplanung des Westhafens in Wismar zum Freizeithafen* in Fachzeitschrift Hansa (2005), Jg. 142, Nr. 11, S. 62-65, ISSN 0017-7504
- [42] Schweinburger, Fritz H. ; Schoch, Werner H.: *Holz, Jahrringe und Weltgeschehen*, Baufachverlag Lignum Schweizer Baudokumentation (S. 12-18), ISBN 978-3-85565-235-8
- [43], Porter, Terry: *Holz bestimmen und benutzen-Nachschlagewerk für die Praxis*, Verlag Th. Schäfer, (S. 9-13), ISBN 387870996X
- [50] Simmer, Konrad: *Grundbau, Bodenmechanik und erdstatistische Berechnungen*, Stuttgart, Teubner, 1944 –ISBN -10-3519452317
- [51] Grabe, Jürgen ; Schwarz, Heli Natalie: *Aus Sand erbaut-Saugspannungen infolge Teilsättigung ermöglichen scheinbar unmögliches* in Bautechnik 81 (2004), Heft 12, S. 974-979

[54]] Witt, Karl Josef (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch Teil3 - Gründungen und geotechnische Bauwerke*, Berlin, Ernst & Sohn 2009. – ISBN 3433018464

[56] Bernatowicz, Grzegorz ; Kucera, Ladislav J. ; Niemz, Peter; Zürcher, Ernst: *Prüfung von vor 160 Jahren unter Wasser verbauten Holz* in Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 48, 27. November 1997, S. 991-994

[60] Goldscheider, Michael ; Ladjarevic, Mirjana: *Bestimmung der Länge historischer Holzpfähle mit einer Hammerschlagmethode* in Zeitschrift Bautechnik 73 (1996), Heft 6

Internetadressen

[8] GuD Consult: Quick, H. ; Prof. Katzenbach ; Hoffmann, H. ; Richter, Th. ; Savidis, S.: Reichstag Berlin: Baugrund-Tragwerk-Interaktion bei der Gründungsertüchtigung der Holzpfahlgründung. Weimar2010-06-25
(www.gudconsult.de/bilder/00015_d.pdf)

[12] Hochschule RheinMain: o. V.: Planung geotechnischer Untersuchungen. Weimar:2010-07-01(<http://www.fab.fh-wiesbaden.de/~kuntsche/Modul%2012071%20Bodenmechanik/Studienunterlagen/Kapitel%202%20-%20Planung.pdf>)

[13] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, Fachsektion 6: o. V.: E1-3 Geophysikalische Standortuntersuchung – Stand Bautechnik 2004. Weimar:2010-07-26
(<http://www.gdaonline.de/download/E1-03.pdf>)

[14] BU München: Prof. C. Boley: Baugrunderkundung. Weimar:2010-07-01
(<http://www.unibw.de/geotechnik/lehre/skripte/skripte/skriptboley/2-baugrunderkundung.pdf>)

[15] HTW Dresden: o. V.: Geotechnik. Weimar:2010-07-01
(http://www.bau.htw-dresden.de/geotechnik/1LE/gt_ig_vrl_6.pdf)

- [16] TU München: o. V.: Baugrunderkundung. Weimar:2010-07-01
(<http://www.gb.bv.tum.de/download/skript/vorl-g-d.pdf>)
- [19] Uni Kiel: Forer, Schmalz: Hydrology. Weimar:2010-07-03
(http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/vorlesung/ss06/269_gw1_2006.pdf)
- [21] Geotechnisches Ingenieurbüro: Prof. Fecker: Piezometer. Weimar2010-08-02
(http://www.gif-ettlingen.de/pdf/deutsch/Kap._05.1.pdf)
- [22] o. V.: Bau von Grundwassermessstellen. Weimar2010-08-02
(<http://www.s-line.de/homepages/hydrogeologie-homepage/messst1.htm>)
- [25] Heinze: o. V.: Baulexikon. Weimar2010-07-24
(http://www.heinze.de/hbo/typID_528/obID_1828516/module_1000/modulePageID_3/context_1/pfahlgruendungen.html)
- [27] Baumarkt.de: o. V.: Holzlexikon. Weimar2010-07-11
(<http://www.baumarkt.de/holzabc.php?&suchbuchstabe=p>)
- [29] Uni Bochum: Prof. Willems: Skript Baukonstruktion. Weimar2010-07-11
(http://www.ruhr-uni-bochum.de/bauko/downloads/bauko_gruendungen.pdf)
- [37] Holzfragen.de: o. V.: Gefährdungsklassen/Resistenzklassen. Weimar2010-08-10
(<http://www.holzfragen.de/seiten/gefaehrdungsklassen.html>)
- [38] Robinienholz.de: o. V.: Dauerhaftigkeit des Robinienholzes. Weimar2010-08-10
(<http://www.robinienholz.de/holz/dauer.html>)
- [41] HNE Eberswalde: o. V.: Holzkunde. Weimar2010-08-10
(http://www6.fheberswalde.de/forst/forstnutzung/diplom_fowi/homepage/dokumente/Vorlesungen/vorlesung%202.pdf)
- [44] ETH Zürich: Prof. Bachmann: Dendrochronologie. Weimar2010-08-10
(http://www.wsl.ch/forest/waldman/vorlesung/images/ww_fig38_7.gif)

[45] schule.at: o. V.: teaching art. Weimar2010-08-11

(<http://home.schule.at/teaching/art/images/image004.jpg>)

[46] Architektur für die Tropen: o. V.: Kernholz. Weimar2010-08-11

(<http://www.payer.de/tropenarchitektur/troparch041.htm>)

[47] Geschichteinchronologie: o. V.: Stammquerschnitte. Weimar2010-08-11

(<http://www.geschichteinchronologie.ch/natur/baum/baumentwicklung-allgemein-d/014-stammquerschnitte-kern-splint-reifholz.gif>)

[52] Humboldt-Uni zu Berlin: o. V.: Saugspannung-Wassergehalt-Bez. Weimar2010-07-16

(http://www2.hu-berlin.de/agrar/boden/EinfBoku/pcboku10.agrar.hu-berlin.de/cocoon/boku/sco_6_wasserhaushalt_127cf8.html?section=N100CL)

[53] Umweltbundesamt: o. V.: Wechselwirkung zwischen gesättigter und ungesättigter Bodenzone. Weimar2010-07-16 (<http://www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/altlast/web1/berichte/HEEV/HEEV-4.2.html>)

[55] GuD Consult: Patron, J.-A. ; Savidis, S.: Neue Füße fürs alte Gemäuer – Ersatzpfahlgründungen in Berlin. Weimar2010-07-03

(www.gudconsult.de/bilder/00155_d.pdf)

[57] TU Braunschweig: J. Stahlmann, F. Kirsch, M. Schallert, O. Klingmüller, K. Elmer: Pfahltests. Weimar2010-07-16 (http://www.igb.tu-bs.de/veroeff/tae_2.pdf)

[58] GUD Consult GmbH: F. Kirsch, O. Klingmüller: Pfahlintegritätsprüfung.

Weimar2010-07-14 (http://www.gudconsult.de/bilder/00114_d.pdf)

[59] Mimi.hu: o. V.: Erklärungen. Weimar2010-06-22 (<http://de.mimi.hu/gis/redundanz.html>)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ferner erkläre ich, dass die Arbeit noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung verwendet wurde.

Ort, Datum

Unterschrift
