

Fundamentpfähle aus Holz – ein wertvolles Baumaterial

Geschätzt in der Vergangenheit, vernachlässigt in der Gegenwart und viel versprechend für die Zukunft

Von Dr. René K. W. M. Klaassen*, Wageningen

Seit Jahrzehnten wurden Pfahlfundamente aus Holz in Gebieten Europas, aber auch in anderen Teilen der Welt verwendet, um Gebäude zu stabilisieren, die einen instabilen Untergrund haben. Abhängig von der lokalen Bodenbeschaffenheit variieren die Pfahlgründungen nach Art der Konstruktion, Pfahllänge, verwendeter Holzart und dem gegenwärtigen Zustand der Pfähle. Nach dem Einsturz historischer Gebäude in berühmten Städten wie Amsterdam, Rotterdam und Dordrecht kamen Fragen auf im Hinblick auf die Stabilität von hölzernen Pfahlkonstruktionen und dem Prozess, der ihre Degeneration verursacht. Trotzdem sind die meisten Pfahlkonstruktionen noch immer intakt und neben der Tatsache, dass sie unser kulturelles Erbe tragen, dienen diese Pfähle als ein einzigartiges Archiv sowohl zur Studie der Baugeschichte als auch zur Analyse vergangener Holzhandelsverbindungen.

Heutzutage werden hölzerne Pfahlgründungen kaum noch verwendet. Seitdem sie in den 50er-Jahren durch Beton ersetzt wurden, stellen Rammpfähle nur noch einen Nischenmarkt dar. Beton hat den Vorteil, dass er weniger anfällig für natürliche Verrottung und, weil er ein formloses Material ist, vereinfacht er Bauingenieuren den Gebrauch im Hinblick auf statische Berechnungen.

Dennoch sollte Holz, ein erneuerbares und CO₂-neutrales Baumaterial, in einem Zeitalter, in dem der nachhaltige Gebrauch von Ressourcen ein vorrangiges Thema darstellt, nicht vernachlässigt werden. Versteckt unter der Erde, sind die Kraft und die Schönheit von Holzpahlfundamenten nicht auf den ersten Blick sichtbar.

Dieser Artikel möchte die Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von Holzpahlfundamenten aufzeigen. Zuerst wird eine Zusammenfassung der Geschichte von bestehenden Holzpahlfundamenten in Europa und besonders in den Niederlanden dargestellt. Danach werden die aktuellen Probleme der Holzpahlfundamenten beschrieben und mögliche Lösungen diskutiert. Letztlich werden Möglichkeiten für die Nutzung von Holzpahlfundamenten in der Zukunft aufgezeigt.

Geschichte der Nutzung von Pfahlgründungen aus Holz

In den westlichen Teilen der Niederlande ist der Moorboden zu instabil, um darauf schwere Steingebäude zu errichten. Darum haben bereits die Römer kurze Rammpfähle aus Eiche, Esche und Erle genutzt. Während des Mittelalters wurden holländische Häuser über-

wiegend aus Holz gebaut, die keine oder nur einfache Fundamentpfähle erforderten. Jedoch wurden die Häuser im Laufe der Zeit größer, und mit der Verwendung von Steinen als Baumaterial mussten die Gebäude auf Fundamenten aus Rammpfählen errichtet werden.

Amsterdam gilt als die Stadt, die komplett auf Holzpählen errichtet wurde. Dies gilt mit Sicherheit für das alte Stadtzentrum. Von Ausgrabungen wissen wir, dass bereits zu Beginn des 14. Jahrhunderts horizontal angeordnete Erlen-Stammabschnitte für Fundamente genutzt wurden (vgl. Abbildung 1).

Einige Zeit später wurden etwa 1 m

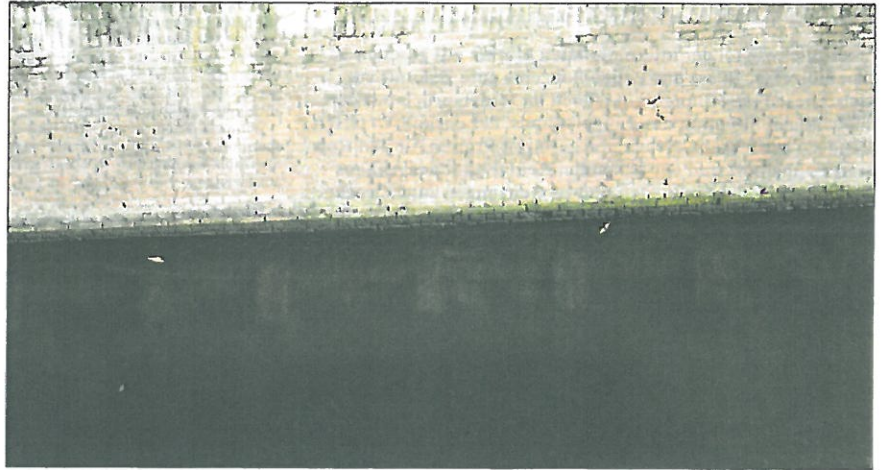


Abbildung 7 Kaiwand auf hölzernen Pfählen, die durch das Wasser erkennbar sind

Foto: Jos Creemers

lange Erlenpfähle nebeneinander angeordnet, wodurch eine Verdichtung des Untergrunds erzielt wurde (vgl. Abbildung 2). Diese Fundamente wurden weiter entwickelt, indem längere (etwa 6 m lange) und dickere Pfähle, meist aus Nadelholz, verwendet wurden, die durch einen Holzrahmen zusammengehalten wurden (vgl. Abbildung 3).

Gegen Ende des 16. Jahrhunderts wurden zum ersten Mal lange Pfähle

durch das weiche Moor hindurch in die stabile Sandschicht getrieben (Janse 2000). Da die Tiefe dieser stabilen Untergrundsicht von Ort zu Ort variiert, brauchte jede der holländischen Städte Pfähle verschiedener Länge für ihre Fundamente. In Amsterdam mussten die Pfähle 10 bis 12 m lang sein, in Rotterdam benötigte man längere Pfähle von bis zu 18 m und in Haarlem und Den Haag wurden kürzere Pfeiler von 2 bis 6 m für eine stabile Untergrundkonstruktion benötigt (vgl. Abbildungen 4 und 5).

Mit der Pfahllänge variierten auch die Holzart und die Herkunft des Holzes. Kurze Pfähle wurden häufig aus Kiefernholz hergestellt, während längere Pfähle meist aus importierten Fichten- oder Tannenstämmen hergestellt wurden. Diese langen Fichten- und Tannenstämmen waren erst durch den Anstieg der Holzimporte seit dem 16. Jahrhundert verfügbar.

Zu der Zeit war vor allem die Nachfrage nach Eichenholz aufgrund der wachsenden Gebäude- und Schiffsbauaktivitäten besonders groß; ermöglicht wurde dieses Wachstum durch die Erfindung von Sägewerken, die durch Windmühlen angetrieben wurden (Bonke et al. 2002). Die Flößerei von schweren, wassergetränkten Eichenholzstämmen wurde ermöglicht durch die Kombination des schweren Eichenholzes und leichter Nadelholzstämmen in einem Floß (van Prooijen 1990). Zusätzlich wurde Holz für die langen Pfähle auch aus Skandinavien, Polen, Deutschland und Belgien importiert.

Einige Gebäude aus dem 17. Jahrhundert, wie z. B. der Königliche Palast am Amsterdamer Dam-Platz (1640, 14 000 Fichtenpfähle, 11 m lang), das Maritim Museum in Amsterdam (1656, Fichten- und Kiefernpfähle, die aus Südschweden stammen, Abbildung 6) und der Turm der Rotterdamer Sankt-Laurens-Kirche (1655, 500 Kiefernpfähle, 14 m lang) haben ein Fundament aus solchen Pfählen.

Der Transport der Stämme in die Stadt und die Aktivitäten rund um den Bau der Holzfundamente werden anschaulich beschrieben von Wennekes & Grijp (2002). Rund 40 Männer wurden benötigt, um die Pfähle in den Untergrund zu rammen, indem sie einen Holzpflock von 200 bis 400 kg auf die Pfähle schmetterten.

Eine große Menge von Pfählen wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts benötigt, als viele niederländische Städte expandierten. Es wird geschätzt, dass etwa 25 Mio. Holzpfähle in den Niederlanden noch in Gebrauch sind. Die Hälfte dieser Pfähle bilden das Fundament von Gebäuden, während die andere Hälfte für Konstruktionen unter Wasser verwendet wurde, wie z. B. Kaiwände (vgl. Abbildung 7) und Brückenköpfe.

Aber die Niederlande sind nicht das einzige Land, in dem Pfahlfundamente aus Holz verwendet werden. In vielen Städten, die an der Küste gelegen sind, wie z. B. Stockholm, Göteborg, Helsinki und Kopenhagen, aber auch in den Flussmündungsgebieten von Russland (z. B. die Eremitage in St. Petersburg), im Ostseegebiet und Polen sind Holzpahlfundamente sehr häufig zu finden. In Deutschland findet man Holzfundamente nur in Städten wie Hamburg, Bremen, Leipzig und Berlin (der Reichstag, Grinda, 1997). In Großbritannien werden Häuser an Flussbetten auf Pfahlgründungen gebaut und in Frankreich wird von Holzpählen unter Brückenköpfen berichtet. Sogar in den USA werden Beispiele von Holzpahlfundamenten erwähnt, z. B. unter einer Kirche in Boston (über 100 Jahre alt, auf 4 800 Pfählen, <http://christianscience.com>).

Das berühmteste Beispiel ist natürlich Venedig, wo bereits im 13. Jahrhundert Eichen- und Erlenholzpfähle (Ø 120 bis 200 mm, 2 bis 4 m lang) verwendet wurden (Abrami, 2005). Auch unter der etwa 300 Jahre alten Balbi-Brücke wurden kurze Eichenpfähle zur Verdichtung des Untergrunds verwendet.

Rammpfähle als Archiv

Fundamente sind unter der Erdoberfläche versteckt und dadurch als Konstruktionselemente weniger anerkannt im Vergleich zu Konstruktionen, die sich über dem Erdboden befinden. Dennoch ist es offensichtlich, dass sie ent-



Abbildung 4 Das weit verbreitete, sogenannte Amsterdamer Fundament

Foto: Fugro

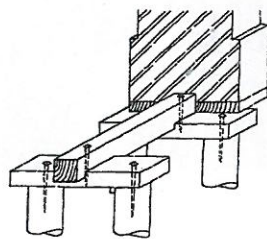


Abbildung 5 Eine Zeichnung des Amsterdamer Fundaments

Quelle: Janse 2000

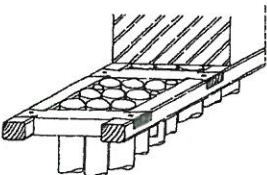


Abbildung 3 Fundament mit längeren Pfählen, die durch einen Rahmen zusammengehalten werden

Quelle: Janse 2000

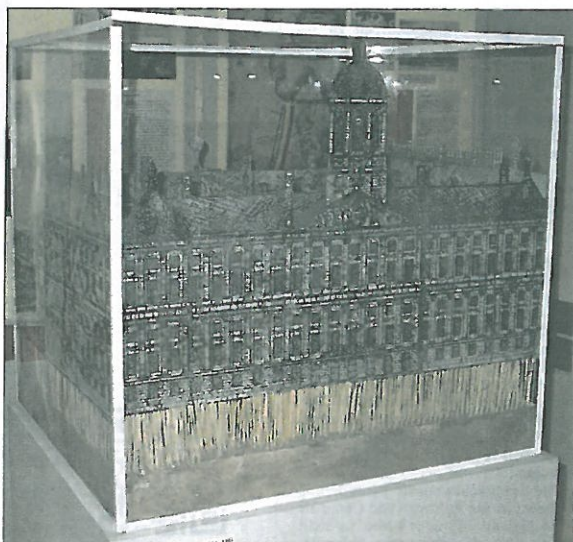


Abbildung 6 Modell des Königlichen Palais am Amsterdamer Dam-Platz

Modell: Museum von Flekkefjord, Foto: Niels Bonde

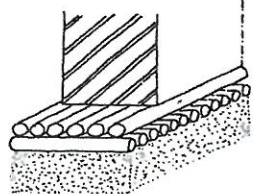


Abbildung 1 Fundament aus horizontal geschichteten Erlen-Stammabschnitten

Quelle: Janse 2000



Abbildung 2 Erlenpfähle (Gitter-Fundament - roosterfundering), Oudezijds Voorburgwal, Amsterdam Foto: Fugro

* Dr. René K. W. M. Klaassen ist Mitarbeiter von SHR Timber Research Wageningen.

Fundamentpfähle aus Holz – ein wertvolles Baumaterial

Fortsetzung von Seite 920

scheidend sind für die Stabilität und dadurch auch für die Lebensdauer eines Gebäudes. Holzfundamente erfüllen ihre Funktion länger als 350 Jahre, wie z. B. im Fall des Königlichen Palais in Amsterdam oder des Turmes der Sankt-Laurens-Kirche, außerdem sind sie auch beständiger als Konstruktionselemente über dem Boden. Die Pfähle

len Aspekte wie CO₂-neutrale Herstellung, die Verwendung von erneuerbarem Material, Niedrigenergie-Hausbaukonzepte und „Cradle to Cradle“ (von der Wiege bis zur Wiege, d. h. die Entwicklung kreislauffähiger, öko-effektiver Produkte) eine zentrale Rolle und es wird hier eine Menge Geld in Innovationen investiert. Holzfundamenten er-



Abbildung 8 Spuren auf über 100 Jahre alten, herausgezogenen Pfahlspitzen.

können manchmal über tausende von Jahren in ihrer nassen und sauerstoffreichen Umgebung erhalten bleiben.

Dies bedeutet, dass ein großes Archiv von Daten über Baugeschichte in nassen Böden erhalten ist und darauf wartet, erforscht zu werden. Die alten Pfähle können uns sowohl über den Fortschritt in der Baukunst Auskunft geben, als auch über die Art und Qualität der Holzarten, die verwendet wurden. Spezifische Hinweise auf den Pfählen, die von Handwerkern, Händlern oder Verkäufern hinzugefügt wurden (vgl. Abbildung 8), können Informationen über die Herkunft und den Transportweg des Holzes liefern.

Jahrringanalysen an den Holzpfählen, die für die Fundamente benutzt wurden, ermöglichen eine genaue Bestimmung des Datums des Holzeinschlags oder die Bestimmung der Herkunft des Holzes, was wiederum Rückschlüsse ermöglicht über das ungefähre Alter des Fundaments; ebenso können wichtige Informationen über den Holzhandel im Laufe der Jahrhunderte gewonnen werden. (Sass-Klaassen et al., 2008). Diese Informationen werden wiederum vervollständigt durch Daten aus historischen Archiven (z. B. Tussenbroek 2008).

Verwendung in der Gegenwart und Gefahren

Ab dem Zweiten Weltkrieg ging man dazu über, bei der Auswahl des Materials für Pfahlgründungen Holz durch Beton zu ersetzen. Bei Beton geht man davon aus, dass es ein Material ist, das über eine lange Lebensdauer verfügt und in Abmessungen jeglicher Art hergestellt werden kann. 2009 wurde der längste Fundamentpfeiler aus Beton auf der niederländischen Autobahn A15 für eine Lärmschutzwand in den Boden eingelassen. Der Pfeiler war 39 m lang und wog 20 t. Solche Abmessungen können mit Holz nicht erzielt werden.

Gegenwärtig werden Holzpfähle nur noch in Nischenmärkten verwendet, wie z. B. für Gewächshäuser, Abwasser-systeme, kleinere Bauprojekte und Restaurierungsprojekte in historischen Stadtzentren. Es werden jährlich noch immer 200 000 Pfähle in den niederländischen Erdboden eingebracht.

Um die Lebensdauer eines Holzfundaments zu gewährleisten, werden die Qualität und die verwendete Holzart (Douglasie, Lärche, Fichte, Tanne) in einer Norm geregelt (NEN 5491, BRL 2302) und in Gebieten, in denen die Pfahlspitzen die obere Schicht des Grundwasserpegels erreichen können, werden für die oberen Teile Betonspitzen verwendet (BRL 1721).

Im Hinblick auf Baurichtlinien spie-

füllen wesentliche Elemente der heutigen Umweltauflagen: Holz stammt aus nachhaltigen Forstwirtschaft und es stellt somit eine große und anhaltende Kohlendioxidsenkung dar. Trotzdem ist die Verwendung von Holzfundamenten rückläufig.

Die Verwendung von Holzfundamenten beschränkt sich nicht nur darauf, Bauwerken Stabilität zu verleihen, ihre Verwendung eröffnet noch andere Möglichkeiten. Der Deltares Kyotoway gewährleistet durch die Verwendung von Holzpfählen die Stabilität des Untergrunds einer Autobahn oder die Van-Biezen-pinning-Methode verbessert die Stabilität von Deichen durch die Verwendung von Holzpfählen.

Dass Konstruktionen mit hölzernen Rammstapeln für innovative Baukonzepte nicht gebaut werden, liegt an ihrem schlechten und altmodischen Image. Ein innovatives Fundament, das im Boden verborgen und somit nicht sichtbar ist, kann kaum als Prestigeobjekt öffentlich präsentiert werden. Folglich ist es schwierig zu erkennen, dass alte Bautechniken durchaus mit Innovationen des 21. Jahrhunderts konkurrieren können.

Das Image von Holzfundamenten wird geprägt von negativen Ereignissen. Jahr 1902 stürzte der Turm auf dem Markusplatz in Venedig ein, jedoch nicht aufgrund von vermoderten Holzpfählen, sondern vielmehr durch eine mangelhafte Bauweise. Deshalb wurde der Turm wieder aufgebaut, wobei für das neue Fundament eine größere Zahl von Holzpfählen verwendet wurde. (Abrami 2005).

Die beim Bau der Beurs van Berlage (ehemaliges Gebäude der Amsterdamer Börse) im niederländischen Amsterdam verwendeten Pfähle (1898, 4 880 Fichten- und Kiefernpfähle von 13 m Länge, Kramer 2003) zeigten bereits acht Jahre nach der Errichtung des Gebäudes schwere Risse und es waren eine Reihe von Reparaturmaßnahmen erforderlich, um dem Gebäude genügend Stabilität zu verleihen. Schließlich wurden im Jahr 2001 nochmals 713 Betonpfeiler von 15 m Länge installiert.

In den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts stürzten mehrere Häuser in der Stadt Haarlem in der Nähe von Amsterdam aufgrund von vermoderten Fundamenten ein. Dieses Problem erwies sich als typisch für weite Teile dieser Gegend und ganze Häuserblocks mussten neu gebaut werden oder erhielten ein neues Betonfundament. Die Kosten für ein neues Fundament variierten zwischen 40 000 und 100 000 Euro pro Haus.

In den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts entdeckte man in der Stadt Dordrecht bei einigen Häuserfundamenten

ernsthafte Probleme. Bezeichnend für diese Stadt ist, dass dort Häuser mit und ohne Fundamentpfähle zu finden sind. Im Laufe der Zeit wurde der wasser-durchtränkte Boden verdichtet (etwa 2 bis 10 mm Absenkung pro Jahr). Die Häuser ohne ein Pfahlfundament passten sich dieser Bodensenkung oft ohne Probleme an, es zeigten sich keine Risse oder Verformungen.

Eine Folge der Bodensenkungen ist ein niedrigerer Grundwasserpegel, was bei den Häusern mit einem Holzfundament ein Vermodern der Pfahlköpfe verursachte. In dieser Stadt wurden die Probleme des zu niedrigen Grundwasserpegels so akut, dass ein Verein gegründet wurde, in dem sich die Besitzer von Häusern mit einem schlechten Holzfundament vereinigten (Stichting platform funderingen, www.platformfundering.nl).

In Rotterdam gibt es einige Häuser, die schwere Folgen von Bodensenkung aufweisen, obwohl diese Häuser auf einem Pfahlfundament stehen, in anderen Gebieten von Rotterdam weisen hölzerne Pfahlfundamente aufgrund von zu niedrigen Grundwasserpegeln gravierende Schäden auf.

Da die Gründe für diese verschiedenen Probleme bei Fundamenten aus Holz bekannt sind, können sie bei neuen Projekten vermieden werden, wenn bestimmte Kriterien beachtet werden, wie z. B. die Verwendung der richtigen Holzart, der richtigen Holzqualität, korrekte Konstruktionsberechnungen und die Beachtung spezifischer Boden- und Grundwasserparameter beim Bau des Fundaments (Anzahl der Pfähle, Verwendung von Betonanteilen für die oberen Teile). Viele der bereits existierenden Konstruktionen wurden jedoch gebaut, ohne ein Bewusstsein für diese Gefahren, die die Qualität des Fundaments beeinflussen.

Um die Stabilität zu gewährleisten ist es wichtig, die Qualität des Fundaments zu beurteilen und eine Bestandsaufnahme der aktuellen Gefahren durchzuführen. Diese Gefahren können in drei Hauptgruppen eingeteilt werden:

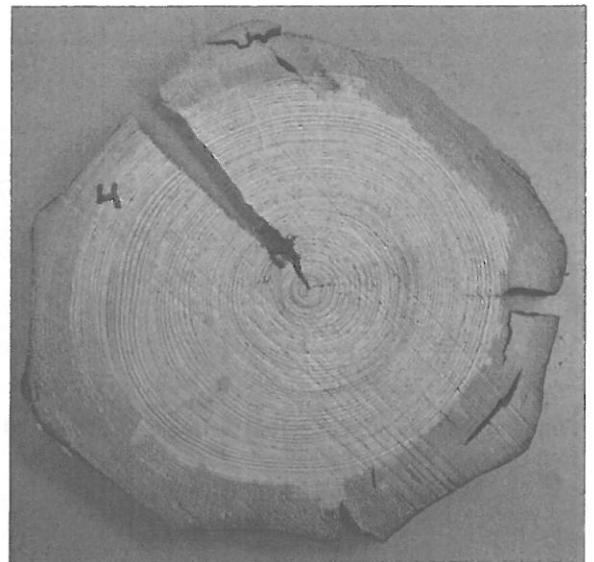


Abbildung 9 Querschnitt eines 350 Jahre alten Fichtenpfahls (Ø 16 cm), der nur im Splintholz einen Bakterienbefall aufweist

1. zu geringer Grundwasserpegel
2. zu hohe Belastung und
3. Abbau des Holzes unter Wasser.


Zu geringer Grundwasserpegel

Wenn die Köpfe der Pfähle sich über dem Grundwasserpegel befinden, wird der Befall von Holz zersetzenden Pilzen durch die hohe Sauerstoffzufuhr in der Luft ermöglicht. Die Geschwindigkeit der Zersetzung ist abhängig von der Zeitdauer, in der die Pfahlköpfe sich über dem Grundwasserpegel befinden, sowie von der Länge des Pfahlkopfes, der über den Grundwasserpegel hinausragt. Der Holzabbau wird ferner vom Wassergehalt des Bodens und letztlich

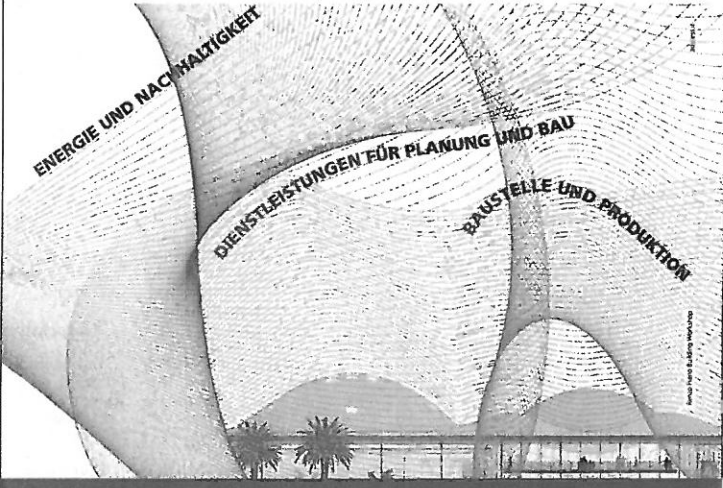
auch von der verwendeten Holzart entscheidend beeinflusst. Schätzungen zufolge beträgt die maximale Geschwindigkeit, mit der Pilze wasser-durchtränktes Holz (softrot) befallen und eine Zersetzung verursachen können, etwa 10 mm/Jahr beträgt. Im Gegensatz dazu sind solche Pilze, die Holz mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 25 bis 100 % befallen, mit einer maximalen Geschwindigkeit von 100 mm/Jahr viel schneller.

Zu geringe Grundwasserpegel sind häufig eine Folge von mangelhaftem Wassermanagement der lokalen Behörden. Die westlichen Teile der Nieder-


Fortsetzung auf Seite 922




SAIE 2010
International Building Exhibition
Bologna, 27.-30. Oktober




SAIE INTEGRATION AM BAU



Mittelbau-Trenche
für Holzbaubau
Pfl. Konstruktion



BolognaFiere



SAIE

Viale della Fiera, 20 - 40127 Bologna (Italia) - Tel +39 051 262111 Fax +39 051 6374013 - www.saie.bolognafiere.it - saie@bolognafiere.it

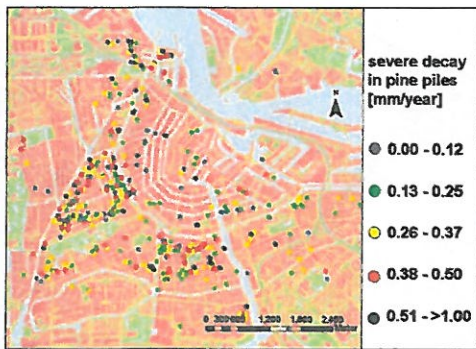


Abbildung 10 Verteilung von Kiefernspfählen in Amsterdam und die Geschwindigkeit ihrer bakteriellen Zersetzung

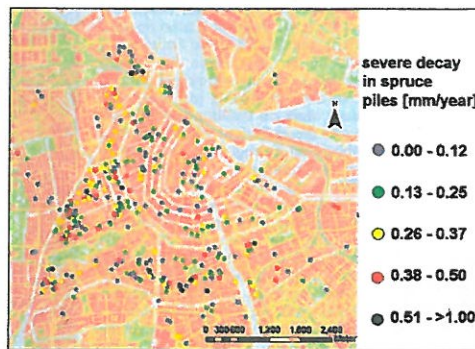


Abbildung 11 Verteilung von Fichtenspfählen in Amsterdam und die Geschwindigkeit ihrer bakteriellen Zersetzung



Abbildung 12 Verteilung von Fichten- und Kiefernspfählen auf kleinem Raum in Amsterdam im Hinblick auf die unterschiedliche bakterielle Zersetzung der Pfähle

Fundamentpfähle aus Holz – ein wertvolles Baumaterial

Fortsetzung von Seite 921

lande bestehen aus einem Flickenteppich von Poldern und Marschgebieten, wobei jedes über ein eigenes Pumpsystem sowie individuelle Straßenniveaus und Grundwasserpegel verfügt. Aus Sicherheitsgründen wird darauf geachtet, dass der niedrigste Grundwasserpegel mindestens 50 cm über dem Pfahlkopf sein muss, aber in einigen Gebieten beträgt der Höhenunterschied zum Straßenniveau weniger als 20 cm, wodurch das Wasser-Management extrem schwierig wird. Die niederländische Gesetzgebung weist einige Lücken auf, wenn es darum geht, Hausbesitzer ausreichend zu schützen im Hinblick auf zu geringe Grundwasserpegel. Derzeit läuft ein großer Gerichtsprozess zu diesem Thema zwischen der Stadt Dordrecht und dem Verein Stichting platform funderingen.

Zu geringe Grundwasserpegel können lokal auch als Folge von beschädigten Abwassersystemen auftreten. Wenn sich diese unter dem Grundwasserpegel befinden, können sie aufgrund von Defekten als Drainage wirken. Andere Ursachen von zu geringem Grundwasserpegel sind z. B. die Verdunstung durch Bäume im Frühling und im Sommer. Aber auch das Ausheben von Gruben (mit Tiefen über 10 m) kann einen Wasserzug über mehrere Monate verursachen. Straßenarbeiten, bei denen das Abwassersystem erneuert wird, können ebenfalls dieses Problem verursachen.

Bei der aktuellen Planung von Grundwasserentnahmen ist es ratsam, die Qualität der nächstgelegenen Holzfundamente zu prüfen, um einen Einsturz aufgrund von Pilzbefall zu vermeiden.

Zu hohe Belastung

Bei den meisten Gebäuden, die auf Holzfundamenten stehen, wird die Tragfähigkeit überbewertet. Hinzu kommt, dass zusätzliche Belastungen durch Gebäudeneubauten oder zusätzliches Gewicht aufgrund von nahe gelegenen Sandschichten nicht berücksichtigt wurden. Speziell die so genannte „Negative Skin Friction“ (negative Oberflächenreibung) ist ein Phänomen, das erst nach dem Zweiten Weltkrieg bei Konstruktionsberechnungen Beachtung fand. Die Probleme, die beim Beurs von Berlage auftauchten, stehen im Zusammenhang mit diesem Phänomen.

Hierbei wurde ein Teil des Flusses Amstel trockengelegt und mit Sand aufgefüllt. Auf dieser Sandschicht wurde dann die Beurs von Berlage errichtet. Der aufgeschüttete Sand verdichtet den instabilen Amsterdamer Untergrund aus Moor und Lehm. Innerhalb von fünf Jahren stieg die Last auf den Fundamentpfähle so stark, dass Probleme auftraten. Die Beurs von Berlage ist nur ein Beispiel für die weit verbreiteten Probleme, die entstehen, wenn vor allem im Westen der Niederlande, Sandaufschüttungen dazu verwendet werden, neue Baugebiete zu erschließen.

Abbau des Holzes unter Wasser

Bis zu den 80er-Jahren ging man davon aus, dass Vermoderung nicht möglich ist, wenn das Holz sich unter Was-

ser befindet. Der Bakterienbefall bei Holz, das unter Wasser gelagert war, wurde nicht als richtige Holzzerstörung betrachtet (Jutte 1971). Diese Bakterien verursachen eine gesteigerte Durchlässigkeit, indem sie die Zellmembranen befallen, man war jedoch der Ansicht, dass sie die hölzerne Zellwand nicht angreifen. Professor Nilsson von Uppsala (Schweden), war einer der ersten Wissenschaftler, der zeigte, dass es auch Bakterien gibt, die eine Zersetzung der hölzernen Zellwand verursachen. Gruppen von verschiedenen Arten dieser Bakterien besiedeln und zersetzen Holz und sind immer dort anwesend, wo Holz in Berührung mit dem Erdboden kommt. Ihre Zersetzungsgeschwindigkeit ist gering, aber sie können auch ohne Sauerstoffversorgung aktiv sein (Björdal & Nilsson, 2008a, 2008b, Nilsson et al. 2008).

In allen niederländischen Fundamentpfählen aus Holz, die untersucht wurden, hat man eine Zersetzung durch Bakterien in der ganzen Länge vorgefunden, wobei die Intensität variiert. In einigen Pfählen war nur die äußere Schicht im Laufe eines Zeitraums von 100 Jahren 1 mm tief angegriffen, während andere Pfähle im Laufe von 50 Jahren auf ganzer Länge von den Bakterien befallen waren und Befall und Zersetzung 50 mm und tiefer in den Pfahl hineinreichte.

Obwohl der Prozess der bakteriellen Holzzerstörung noch nicht in allen Punkten erforscht wurde, konnten im Laufe der letzten 15 Jahre viele neue Erkenntnisse gewonnen werden (Klaassen 2005, 2008a, 2008b, 2009a, 2009b, Overeem & Klaassen 2009). Da Holz zersetzende Bakterien an sich unbeweglich sind, benötigen sie fließendes Wasser, um das Holz zu befallen, und sich mit verschiedenen Gruppen von Spezies auszutauschen. Die Durchlässigkeit des Holzes und fließendes Grundwasser gelten hierbei als Schlüsselparameter, die für die Schnelligkeit der bakteriellen Zersetzung ausschlaggebend sind.

Durchlässige Holzstrukturen, die ein Wassereindringen zulassen, findet man z. B. bei Erle, Pappel und dem Splintholz von Kiefer und Eiche. Dadurch zählen diese zu den typischen Holzarten, die anfällig sind für bakterielle Zersetzungen. Der Splintholzanteil bei Eiche und speziell bei Kiefer ist entscheidend für die Qualität des Holzes bei seiner Verwendung für Fundamentpfähle, weil das Splintholz innerhalb weniger Jahrzehnte völlig zersetzt werden kann, während das Kernholz über Hunderte von Jahren intakt bleibt. Dies wurde aufgeführt in Untersuchungen eines Kiefernkerndholz-Fundaments des 350 Jahre alten Königlichen Palais in Amsterdam.

In den unzähligen Fundament-Analysen, die in den Niederlanden durchgeführt wurden, erwiesen sich Pfähle aus Fichte als weniger anfällig den bakteriellen Abbau im Vergleich zu Kiefernspfählen. Man geht davon aus, dass dies zusammenhängt mit der geringen Wasserdurchlässigkeit des Fichtensplintholzes. Obwohl die Unterschiede zwischen Splint- und Kernholz bei der Fichte – im Vergleich zur Kiefer – nur schwierig im Holz selbst zu bestimmen sind oder in Abhängigkeit vom Alter des Baumes

und seines Stammumfangs (z. B. Sallin 1996), gibt es Nachweise dafür, dass man auch bei Fundamentpfählen aus Fichte häufig eine klare Abgrenzung zwischen gesundem Kernholz und stark bakteriell zersetztem Splintholz findet (vgl. Abbildung 9).

Das SHR verfügt über eine Datenbank, die während der letzten 15 Jahre erstellt wurde und die Informationen über mehr als 5000 Fundamentpfähle enthält. Die Daten beinhalten Angaben über Ort, Holzart, Bauzeit sowie Art und Intensität des Zerfalls. Diese Datenbank zeigt, dass es große Unterschiede gibt hinsichtlich der Geschwindigkeit der bakteriellen Zersetzung innerhalb der Städte, z. B. sind die Geschwindigkeiten in Rotterdam niedrig, während sie in Amsterdam hoch sind (Klaassen 2008).

Eine Fallstudie der Situation in Amsterdam hat ergeben, dass die lokalen Unterschiede im Hinblick auf Hydrologie oder Bodenchemie nicht in Zusammenhang stehen mit bakteriellen Holzzerstörungsaktivitäten. Man fand heraus, dass Pfähle gleicher Herkunft, am gleichen Ort und von der gleichen Holzart sich enorm unterscheiden können im Hinblick auf den Grad der bakteriellen Zersetzung (vgl. Abbildungen 10 und 11) und man schloss daraus, dass neben dem Splintholzanteil auch Kriterien wie die Art des Holzeinschlags entscheidend sein könnten für den Grad der bakteriellen Zersetzung. Mit zunehmender Zeit zwischen Einschnitt und Einbringung in die Erde, können die Pfähle trocknen und sind dem Bakterienbefall ausgesetzt, was ihre Diffusionsfähigkeit direkt beeinflusst (Klaassen 2009 und Overeem & Klaassen 2009).

Die laufende Forschung sollte das Verständnis vom Zusammenhang zwischen Holzeinschlag und Zersetzung durch Bakterien verbessern, sowie den Zersetzungsprozess transparenter machen.

Ein Teil der niederländischen Gebäude, die auf hölzernen Pfählen stehen, sind durch einen fortschreitenden Prozess der bakteriellen Zersetzung gefährdet. Im Moment ist unklar, wie viele Häuser genau betroffen sind, aber konservativen Schadensberechnungen zufolge beläuft sich der Schaden auf mehrere Milliarden Euro Reparaturkosten. Basierend auf dem gesamten verfügbaren Wissen hat das SHR Ideen für praktische Vor-Ort-Erhaltungsmethoden entwickelt und sucht nun nach Gelegenheiten, um diese in Feldstudien zu realisieren.

Perspektiven für die Zukunft

Das Baurecht ist eine direkte Bedrohung für viele der bestehenden, meist eindrucksvollen Gebäude, weil diese die Auflagen nicht erfüllen. Das SHR Forschungsinstitut hat spezielle Touren in Amsterdam (2009) und Rotterdam (2010) durchgeführt, um den Zusammenhang aufzuzeigen zwischen den Holzfundamenten, der Stabilität und der Lage der Gebäude. Durch Besiedlung und ungleiche Setzungen hat sich die Lage vieler Häuser – besonders im Zentrum von Amsterdam – im Laufe der Zeit um viele Zentimeter sichtbar verändert. Nichtsdestotrotz sind viele Häuser stabil und die Grachten-Gegend (grachtengordel) ist so einzigartig, dass sie im Jahr 2010 von der Unesco ausgezeichnet wurde. Um dieses kulturelle

Erbe zu bewahren und die Sicherheit ihrer Fundamentkonstruktionen zu gewährleisten, werden derzeit von F3O (www.F3O.nl) Richtlinien zur Überprüfung und Bewertung dieser Fundamente entwickelt. F3O ist eine Organisation von Wissenschaftlern, die alte Holzpfahl-Fundamente überprüfen. Die Richtlinien orientieren sich soweit wie möglich an der bestehenden Baugesetzgebung wie z. B. dem Eurocode 5, aber es werden hier noch spezifische Informationen hinzugefügt. So basiert z. B. die Druckbelastung, die im Eurocode 5 verwendet wird, auf trockenem Splintholz, wohingegen in Fundamentkonstruktionen der Wert von Wasser durchtränktem Rundholz benötigt wird.

Da alle Gebäude auf Holzfundamenten eine Senkung aufweisen (unter normalen Bedingungen 1 bis 2 mm/Jahr), benötigt man eine Methode, die diese spezifischen Gegebenheiten berücksichtigt. Die F3O-Richtlinie „houten paalfunderingen onder gebouwen“ wird am 19. Januar 2011 auf dem Niederländischen Tag der Holzpfahl-Foundamente (Nationale houten heipalpfandag) erstmals präsentiert werden.

Im Rahmen der Cost Action IE 0601 „Erhaltung von Kulturgütern aus Holz“ ist ein zentrales Meeting in Venedig geplant. Auf diesem zweitägigen Symposium, das zum Teil vom SHR organisiert wird, werden Experten Informationen austauschen zum Thema Konservierung und Schutz der Qualität von Holzpfahl-Fundamenten. Das Symposium ist Bestandteil des Corilla-Programms (Corilla – Forschungszusammenschluss Lagune Venedigs), im Rahmen dessen derzeit ein groß angelegtes Programm durchgeführt wird, um die Sicherheit der venezianischen Lagune zu gewährleisten. Der Zugang zu dem Symposium ist frei und es ist von großem Interesse für alle diejenigen, die sich mit dem Thema Holz im Erdboden auseinandersetzen. Interessant ist das Symposium aber daher nicht nur Fachleute, die sich mit Fundament-Konstruktionen beschäftigen, sondern auch etwa für Archäologen, die nach Holz konservierenden Strategien suchen oder die daran interessiert sind, die Zerfallsmechanismen des Holzes zu verstehen.

Das Symposium ist ebenfalls interessant für Dendrochronologen, Kunsthistoriker und Umweltschutzexperten, weil Jahrringanalyse, Baugeschichte und Nachhaltigkeit Themen sind, die sich auf der Agenda des Symposiums wiederfinden.

Man geht davon aus, dass durch die ganze Arbeit, die auf dem Gebiet der Holzfundament-Forschung durchgeführt wurde, und durch den Know-how-Austausch zum Verhalten von Holzpfählen im Erdboden, sich das allgemeine Bewusstsein im Hinblick auf die Wertschätzung von hölzernen Fundamentkonstruktionen erweitern wird, was letztlich zu einer Wiederentdeckung dieser erneuerbaren natürlichen Ressource führen wird.

Literatur

- Abrami, G. 2005. Decay in wooden foundations, the Italian situation. In Klaassen 2005 (ed.) final report EU project EVK4-CT-2001-00043: Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation piles and archaeological sites, chapter 2: 34–45.
- Björdal, C. & T. Nilsson, 2008. Culturing wood-degrading erosion bacteria. *International*

- Biodegradation and Biodegradation* 61 (1): 3–10.
- Björdal, C. & T. Nilsson, 2008. The use of kapok fibres for enrichment cultures of lignocellulose-degrading bacteria. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 11–16.
- Bonke, H., Dobber, W., Groot, P., Hoving, de Jong, A., Kingma, J., Kingma, V., de Munck, E., Porius, N., de Vries, G. & A. Zonje. 2002. *Cornelis Corneliszoon uitvinder aan de basis van de goeden eeuw*. Walburg Press.
- Grinda, M., 1997. Some experiences with attack of micro-organisms on wooden constructions supporting foundations of houses and bridges. *International Research Group for Wood Preservation* No. 10232.
- Janse, H. 2000. *Amsterdam gebouwd op palen*. De Brink.
- Jutte, S.M., 1971. Wood structure in relation to excessive absorption – a literature survey – Houtinstituut TNO, Delft.
- Klaassen, R. K. W. M. (ed.) 2005. Final report EU project BACPOLES EVK4-CT-2001-00043: Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation piles and archaeological sites, Wageningen.
- Klaassen, R. K. W. M., 2008. Bacterial decay in wooden foundation piles: patterns and causes. A study on historical pile foundations in the Netherlands. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 45–60.
- Klaassen, R. K. W. M., Eaton, R. N., Lamersdorf, 2008. Editorial special issue on bacterial wood degradation. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 1–2.
- Klaassen, R. K. W. M., 2008. Water flow through wooden foundation piles – a preliminary study. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 61–68.
- Klaassen, R. K. W. M., 2009. Velocity of bacterial decay in wooden foundation piles. In: Stratkern, K. & D. J. Huismann. 2009. *Proceedings of the 10th ICOM Group on wet organic archaeological materials conference, Amsterdam 2009*. Nederlandse archeologische rapporten 57: 69–78.
- Klaassen 2009 Factors that influence the speed of bacterial wood degradation. Full report. *Proceedings Cost Action IE 0601 meeting* Hamburg.
- Kramer, W. 2003. *De Beurs van Berlage – historische en herstel – Waanders drukkers, Zwolle*.
- KIWA. 2003. *Nationale beoordelingsrichtlijn voor het KOMO-productcertificaat betonnen opslagers*, BRL 1721.
- Nilsson, T., Björdal, C. & E. Fällman, 2008. *Culturing erosion bacteria: Procedures for obtaining pure cultures and pure strains*. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 17–23.
- NNI. 1999. *NEN 5491 Quality requirements for timber – piles – coniferous timber*.
- Overeem, B. & R. K. W. M. Klaassen. 2009. *De onderwereld van Amsterdam, Monumenten oktober*.
- Prooijen van L. 1990. *De invoer van Rijns hout per vlot 1650–1795. Economisch- en sociaal-historisch jaarboek*, deel 53: 30–79.
- SKH. 1997. *Nationale beoordelingsrichtlijn voor het KOMO-productcertificaat van houten heipalen (Europese naaldhout)*, (BRL 2302).
- Sass-Klaassen U., Vermimmen T. & C. Baitinger, 2008. *Dendrochronological dating and provenancing of timber used as foundation piles under historic buildings in the Netherlands*. *International Biodegradation and Biodegradation* 61(1): 96–105.
- Sellin, A. 1996. *Sapwood amount in Picea abies (L.) Karst. Determined by tree age and radial growth rate*. *Holzforschung* (4): 291–296.
- Tussenbroek van, G. 2008. *Geheimschrift in de oude constructies – Amsterdam en de internationale houthandel in de 17de en 18de eeuw*. *Nieuwsbrief stichting bouwhistorie Nederland* 45.
- Vermimmen, T. & D. J. Huismann. 2005. *Sie 10 Borselo-Ellewoijsdijk, the Netherlands, Appendix 1*. In Klaassen, R. K. W. M. (ed.) 2005. *Final report EU project BACPOLES EVK4-CT-2001-00043: Preserving cultural heritage by preventing bacterial decay of wood in foundation piles and archaeological sites*, Wageningen.
- Wennekes, E. Grijp, L.-P. 2002. *De hele dag maar op een neer, over heien, heiliedjes en hoofdelijke muziekgebouwen*. *Muziekgebouw aan het I Amsterdam*.