

# Herauswandern von Nagelplatten aus dem Holz – Identifizierung wesentlicher Einflussparameter

**T 3379**

T 3379

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0596-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

H.J. Blaß · An der Raumfabrik 33b · 76227 Karlsruhe

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstr. 30 B  
10829 Berlin

03.09.2020

1505\_Herauswandern Nagelplatten

## **Herauswandern von Nagelplatten aus dem Holz Identifizierung wesentlicher Einflussparameter**

### **1. Vorbemerkungen**

In den letzten Jahren wurden zunehmend Schadensfälle in Dachkonstruktionen mit Nagelplattenbindern beobachtet, die auch durch das Herauswandern von Nagelplatten aus dem Holz verursacht wurden. Bereits ein Herauswandern von 1 mm kann zu signifikanten Reduzierungen der Tragfähigkeit von Nagelplattenverbindungen führen. Denkbare Gründe für das Herauswandern sind:

- Verwenden von Nagelplatten mit kurzen Nägeln oder geringem Ausziehwi-  
derstand,
- Verwendung von Holz mit einer höheren Holzfeuchte als der Ausgleichs-  
feuchte,
- Wiederholtes Schwinden und Quellen des Holzes durch Feuchtigkeitsände-  
rungen im Dachraum,
- Oft vorkommende Belastungen z.B. durch Windeinwirkung,
- Überlastung von Verbindungen während der Herstellung, des Transports oder  
der Montage,
- Fehler bei der Herstellung der Nagelplattenverbindungen in Form eines nicht  
vollständigen Einpressens der Nagelplatte,
- Überlastung durch unvorhergesehene Einwirkungen, z.B. Installationen im  
Dachraum.

Das Herauswandern von Nagelplatten ist ein langsamer Prozess, der oft unbeo-  
achtet bleibt. Die genauen Ursachen des Herauswanderns sind derzeit nicht aus-  
reichend bekannt, daher sollen die wesentlichen Einflussparameter zunächst durch  
eine Auswertung verfügbarer Schadensberichte insbesondere in der Form beste-

hender Gutachten zu Schadensfällen identifiziert werden. Auf dieser Basis sollen dann diejenigen Gebäude mit einem erhöhten Schadensrisiko durch Herauswandern von Nagelplatten eingegrenzt werden.

Höhere Risiken werden z.B. in folgenden Gebäuden gesehen:

- Dächer mit schwerer Dacheindeckung. Die durch das große Eigengewicht verursachte hohe Beanspruchung der Verbindungen kann bei wiederholtem Schwinden und Quellen durch mechano-sorptive Effekte zu einem schnelleren Herauswandern führen.
- Dachkonstruktionen mit größeren Spannweiten über etwa 12 m. Größere Spannweiten können in Gebäuden ohne Zwischenwände bei einem Versagen der Dachkonstruktion zu einer größeren Gefährdung der darin befindlichen Personen führen.
- Ältere Dachkonstruktionen, in denen der Prozess des Herauswanderns über die Zeit schon weiter fortgeschritten ist.
- Gebäude mit Dachräumen, die mit der Außenluft in Verbindung stehen. Hier treten größere Amplituden der Feuchte und Temperatur auf, die den Prozess des Herauswanderns begünstigen können.
- Dächer mit undichter Dachhaut. Undichtigkeiten in der Dachhaut führen zum Wassereintritt und ebenfalls zu höherer Feuchte des Holzes.
- Nachträglich geänderte oder erweiterte Dachkonstruktionen. Umgebaute Dachkonstruktionen können ein lokales Überlasten einzelner Bauteile zur Folge haben mit der Konsequenz des beschleunigten Herauswanderns.

Ziel des Vorhabens ist die Identifizierung besonders gefährdeter Dachkonstruktionen mit Nagelplatten. Dazu sollen mögliche Parameter und ihre Kombinationen identifiziert und ihr Einfluss auf das Herauswandern von Nagelplatten abgeschätzt werden. Zusätzlich sollen Empfehlungen abgeleitet werden, wie bei der Errichtung von baulichen Anlagen mit Dachkonstruktionen in Nagelplattenbauweise im Hinblick auf Mindestanforderungen an Nagellänge oder Nagelform vorgegangen werden sollte.

## 2. Literaturquellen und Schadensgutachten

In einer Literaturrecherche zum Einfluss veränderlicher Holzfeuchte bzw. zum Herauswandern eingepresster Nagelplatten aus dem Holz konnten die folgenden verfügbaren Quellen identifiziert werden:

Blaß, HJ und Romani, M (2001) Einfluss der Holzfeuchte auf die Tragfähigkeit von Nagelplattenverbindungen. Forschungsbericht, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung Ingenieurholzbau, Universität Fridericiana Karlsruhe

Brzezniak G (2015) Pre-fabricated Timber Roof Truss Checks. Government of South Australia, Department of Planning, Transport and Infrastructure

Forest & Wood Products Australia (Undated) Improving the performance of nail-plates. Fact Sheet

Frese M (2020) Trocknungsbedingte Verformungen in Nagelplattenverbindungen. FE Analyse eines Stoßes zwischen Untergurt und Füllstab. Persönliche Kommunikation

- Leicester R H, Goldfinch J, Paevere P, Foliente G C (2003) Truss Trouble. Paper 36-14-3, Proceedings, CIB-W18 Meeting, Estes Park, Colorado, USA
- Mainey, J A (2019) THE MECHANISMS OF MOISTURE DRIVEN BACKOUT OF NAILPLATE CONNECTIONS. SOLUTIONS FOR OUTDOOR ENVIRONMENTS AND NUMERICAL MODELLING AND PREDICTIONS OF MOISTURE DRIVEN BACKOUT GIVEN CLIMATIC DATA. PhD dissertation, Griffith Sciences, School of Engineering and Built Environment
- Mainey J A, Gilbert B, Bailleres H, Gunalan S, Smith M (2016) Mechanical and artificial improvement of nailplate connected timber truss joints. Proceedings, 14th World Conference on Timber Engineering WCTE2016, Vienna, Austria
- Mainey J A, Gilbert B, Bailleres H, Gunalan S, Smith M (2019) Solutions to reduce moisture driven backout and improve withdrawal strength of nailplates: experimental investigations. European Journal of Wood and Wood Products: Volume 77, Page 257-269
- Nguyen M, Paevere P (2006) Mechano-Sorptive Plate Backout in Nail-Plated Timber Trusses. PNB036-0607 Literature Review and Document Scan, CSIRO Sustainable Ecosystems
- Nguyen M, Paevere P, Leicester R H, Syme M (2008) Models for Prediction of Microclimate and Timber Moisture Content within the Building Envelope. Proceedings, 10th World Conference on Timber Engineering WCTE2008, Miyazaki, Japan
- Paevere P, Leicester R H, Goldfinch J, Foliente G C (2004) Performance of Plated Trusses. Proceedings, 8th World Conference on Timber Engineering WCTE2004, Lahiti, Finland
- Paevere P, Nguyen M, Syme M, Leicester R H (2008) Nailplate Backout – is it a Problem in Plated Timber Trusses? Proceedings, 10th World Conference on Timber Engineering WCTE2008, Miyazaki, Japan
- Paevere P, Nguyen M, Syme M, Leicester R H, Ho K (2009a) Mechano-Sorptive Nailplate Backout in Nailplated Timber Trusses. Report No. PNB036-0607, Forest & Wood Products Australia
- Paevere P, Nguyen M, Syme M, Leicester R H, Ho K (2009b) Mechano-Sorptive Plate Backout in Nail-Plated Timber Trusses. PNB036-0607 Final Report & Recommendations, CSIRO Sustainable Ecosystems
- Rossiter T (2011) GN Guidelines No.170
- Sieder M (2019) Mechano-sorptives Herauswachsen von Nagelplatten in Nagelplattenbindern – Übertragbarkeit eines australischen Berichts über ein Forschungsvorhaben des CSIRO auf Anwendungen von Nagelplattenkonstruktionen in Deutschland. Sachstands-Bericht B2019.11-02, Zentrum für Baukonstruktion und Holzbau in der Innovationsgesellschaft Technische Universität Braunschweig GmbH
- Die bisherige Forschung zum mechano-sorptiven Herauswandern wurde vorwiegend an zwei Forschungsstätten in Australien durchgeführt, einmal an der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) in Highett, Victoria und später an der Griffiths University in Surfers Paradise. Die wesentlichen Forschungsergebnisse werden in Abschnitt „3. Identifizieren möglicher Einflussparameter“ zusammengefasst.

Außer den öffentlich zugänglichen Literaturquellen liegen insgesamt 61 Berichte über die systematische Begehung von Dachkonstruktionen von Einkaufsmärkten und Fertighäusern mit Dachkonstruktionen in Nagelplattenbauweise vor. Für 20 Einkaufsmärkte liegen Berichte aus Begehungen sowohl im Jahr 2010 als auch aus einer Wiederholungsbegehung im Jahr 2017 vor. Für diese Konstruktionen lässt sich daher ein möglicher Unterschied im Schadensbild nach einer Zeit von sieben Jahren ermitteln.

Die Berichte stellen ausdrücklich keine repräsentative Auswahl von Dachkonstruktionen in Nagelplattenbauweise dar. Ein Teil der Berichte bezieht sich ausschließlich auf schadensauffällige Dachkonstruktionen, ein anderer Teil umfasst sowohl auffällige als auch unauffällige Bauwerke. Die Begehungen fanden zwischen 2010 und 2020 statt, das Baujahr der Konstruktionen lag zwischen 1995 und 2010. Die Konstruktionen waren bei der Begehung zwischen 0 und 22, im Mittel 10 Jahre alt. Die Hölzer waren zwischen 45 mm und 70 mm breit, die Holzfeuchte betrug dort wo sie angegeben war, zwischen 6,0 % und 15,6 %, im Mittel 10,5 %. In über 30 Fällen konnten nicht vollständig im Holz eingepresste Nagelplatten festgestellt werden, teilweise befanden sich die Nägel vollständig außerhalb des Holzes. Nur ein Teil der Berichte identifiziert die Art der Nagelplatte.

Ein Bericht stellt zusammenfassend die Ergebnisse von Wiederholungsprüfungen an Märkten dar, die im Jahr 2010 schon einmal begangen wurden. Diese Konstruktionen hatten Nagelplattenverbindungen mit 1 mm dünnen Blechen und kurzen Nagellängen zwischen etwa 8 mm und 10 mm. Bei etwa 15 Konstruktionen wurde ein Ablösen der Nagelplatten in verschiedenen Stadien, teilweise bis zum völligen Ablösen festgestellt. Da diese Konstruktionen bereits einmal überprüft worden waren, ist davon auszugehen, dass die Schäden innerhalb eines Zeitraums von 2 bis 7 Jahren entstanden sind. In den betroffenen Konstruktionen waren die Schäden keine Einzelfälle, sondern wiederholten sich an 30 % bis 70 % der Nagelplattenbinder der Dachkonstruktion. Die Holzfeuchte lag meist zwischen 7 % und 12 %. Es wurden Schadensbilder entsprechend Bild 1, Zeilen 1, 2, 5, 6, 7 und 9 festgestellt.

Von denjenigen Berichten, in denen die Nagelplatten mit Hersteller und Bezeichnung identifiziert werden konnten, konnten nicht (mehr) vollständig eingepresste Platten für fünf Nagelplattentypen festgestellt werden.

Tabelle 1: Abmessungen ausgewählter Nagelplatten

Typ	Blechdicke in mm	Nagellänge in mm
1	2,0	Etwa 20
2	1,5	Etwa 20
3	1,0	Etwa 8
4	1,5	8 bis 10




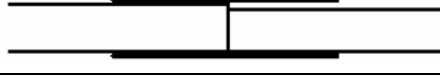
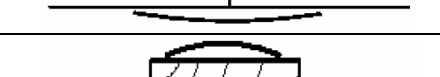





Während bei der Nagelplatte Typ 1 nur in einem einzigen Fall ein Spalt der Breite 2 mm bis 3 mm über einen Teil der Anschlussfläche beobachtet wurde, kam diese bei der Nagelplatte Typ 2 mehrfach bis zu Spaltbreiten von etwa 5 mm vor. Für diese Nagelplatten mit etwa 20 mm langen Nägeln ist die Häufigkeit nicht vollständig eingepresster Nagelplatten als gering zu bezeichnen. Im Gegensatz dazu traten nicht vollständig eingepresste oder gar vollständig abgelöste Nagelplatten sehr viel häufiger, insbesondere bei Typ 3, aber auch bei Typ 4 auf. Dies deutet darauf

hin, dass eine Nagellänge unter etwa 10 mm keine Gewähr für ein dauerhaftes Anliegen am Holz während der Nutzungsdauer der Konstruktion bietet.

### 3. Identifizieren möglicher Einflussparameter

#### 3.1 Allgemeines

Mögliche Einflussparameter auf das Verhalten von Nagelplatten im Hinblick auf das Herauswandern aus dem Holz werden u.a. in den oben genannten Literaturquellen aus Australien identifiziert. Umfassende Darstellungen finden sich in Paevere et al. (2009b) und Mainey (2019). Bild 1 zeigt schematisch unterschiedliche Schadensbilder nicht (mehr) vollständig eingepresster Nagelplatten aus Paevere et al. (2009b).

	Art der Trennung zwischen Nagelplatte und Holz	Mögliche Ursache
1	Abheben parallel 	Herstellung: geringer Pressdruck, Wiederholtes Quellen und Schwinden
2	Abheben geneigt 	Herstellung: ungleichmäßiger Pressdruck, Wiederholtes Quellen und Schwinden
3	Abheben gekrümmt, Abgeschält 	Überlastung, Wiederholtes Quellen und Schwinden
4	Dickenunterschied 	Herstellung
5	Abheben gekrümmt 	Herstellung, Schließen des Spalts zwischen Hölzern
6	Wölben 	Schwinden
7	Ausrichtung Hölzer 	Herstellung, Krümmen des Holzes, Transport und Montage
8	Hohlraum 	Örtliches Schwinden
9	Wölben 	Herstellung, Schließen des Spalts zwischen Hölzern
10	Biegung 	Transport und Montage

**Bild 1:** Klassifizierung und mögliche Ursachen des Herauswanderns von Nagelplatten nach Paevere (2009b)

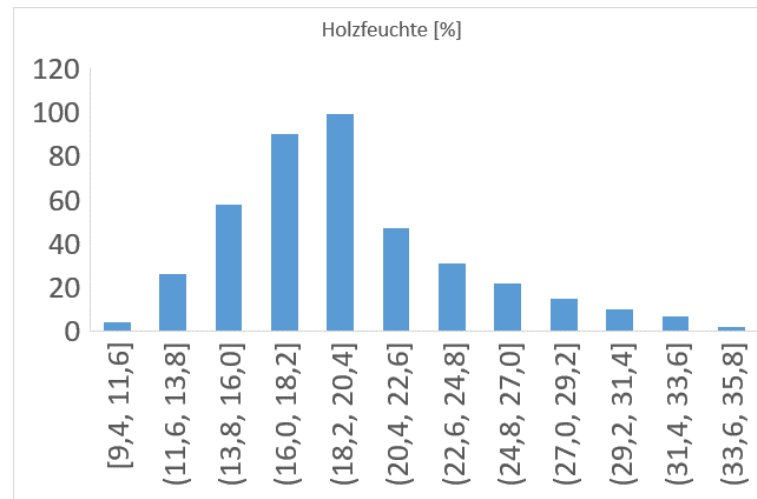
### 3.2 Herstellung

Bereits unmittelbar nach der Herstellung von Holzbauteilen mit Nagelplattenverbindungen werden nicht vollständig am Holz anliegende Nagelplatten beobachtet. Nicht vollständig eingepresste Nagelplatten können verschiedene Ursachen haben: unterschiedliche Holzdicken oder Holzrohndichten, Äste im Verbindungsbereich, ungleichmäßiger oder zu geringer Pressdruck oder Zusammendrücken des Holzes ohne vollständiges Eindringen der Nägel und Zurückfedern.

Eine nicht vollständig eingepresste Nagelplatte weist eine geringere Nageltragfähigkeit und damit eine höhere spezifische Nagelbeanspruchung auf. Paevere et al. (2009b) geben einen Tragfähigkeitsverlust von 25% bereits bei einem Abstand von 1 mm an. Bei gleichem Abstand zwischen Innenseite der Nagelplatte und Holzoberfläche ist der Verlust an Tragfähigkeit umso größer, je kleiner die Nagellänge ist. Im Zusammenhang mit klimatischen Einwirkungen ist ein weiteres Herauswandern von nicht vollständig eingepressten Nagelplatten daher wahrscheinlicher als bei vollständig eingepressten Nagelplatten und ausgeprägter bei Nagelplatten mit kurzen Nagellängen. EN 14250 erlaubt Abstände zwischen der Holzoberfläche und der Unterseite der Nagelplatte von höchstens 1 mm und bei keinem der zu verbindenden Bauteile auf mehr als 25 % der einzelnen Anschlussfläche. Diese Anforderung ist in der Praxis nur außerordentlich schwierig zu überprüfen.

Eine weitere Ursache für nicht vollständig eingepresste Nagelplatten sind unterschiedlich dicke Hölzer im Bereich einer Nagelplatte (Bild 1, Zeile 4), nicht in einer Ebene liegende Hölzer (Bild 1, Zeile 7) oder Hölzer mit Querkrümmung. Erstere können durch unterschiedliche Dicken im Rahmen der Toleranzklasse 2 nach EN 336 oder auch durch unterschiedliche Holzfeuchten entstehen, da die Iststicken von Bauholz feuchtekorrigiert den Sollmaßen entsprechen müssen. Wird z.B. ein Bauteil mit einer Sollstärke von 60 mm und einer Holzfeuchte von 22 % in einem Nagelplattenknoten an ein Bauteil mit einer Holzfeuchte von 10 % angeschlossen, dürfen sich die Iststicken beim Einpressen bei Berücksichtigung einer Messbezugsfeuchte von 20 % um bis zu 2,8 mm unterscheiden. In diesem Beispiel weist das Bauteil mit 22 % Holzfeuchte eine Dicke von 61,3 mm und das Bauteil mit der Feuchte von 10 % eine Dicke von 58,5 mm auf. Die theoretische Dickendifferenz von 2,8 mm lässt sich nicht schadlos durch das elastische Zusammendrücken des dickeren Holzes ausgleichen. In der Praxis treten durchaus noch höhere Holzfeuchten als der Grenzwert von 22 % nach EN 14250 bei der Herstellung von Nagelplattenbindern auf. Damit verbunden ist eine höhere Wahrscheinlichkeit für Fehlpressungen. Eine Auswertung von 411 Holzfeuchtemessungen, die im Rahmen stichprobenartiger Bauwerksüberwachungen bei der bautechnischen Prüfung von Nagelplattenbindern ermittelt wurden, resultierte in einer mittleren Holzfeuchte von 19,5 % und einer Bandbreite zwischen 9,4 % und 34,0 %. 94 von 411 Werten lagen oberhalb der nach EN 14250 angegebenen Grenze von 22 % Holzfeuchte.





**Bild 2:** Holzfeuchten, die im Rahmen stichprobenartiger Bauwerksüberwachungen bei der bautechnischen Prüfung von Nagelplattenbindern ermittelt wurden

Werden Nagelplattenverbindungen hergestellt, darf nach EN 14250 die durchschnittliche Breite der Fuge zwischen zwei zu verbindenden Teilen des vorgefertigten Holzbauteils innerhalb der Nagelplatte 1,5 mm nicht überschreiten. In der Praxis werden häufig deutlich größere Fugenbreiten festgestellt. Treten in einer solchen Verbindung Druckkräfte rechtwinklig zur Fuge auf, neigen insbesondere die dünnen Bleche der Nagelplatten zum Knicken mit der Folge des Herausziehens der Nägel im Fugenbereich (Bild 1, Zeile 5). Alternativ können durch das Ausknicken der Nagelplatte auch Nägel aus einem der beiden Bauteile herausgezogen werden (Bild 1, Zeile 9).

### 3.3 Transport und Montage

Beobachtungen bei der Herstellung, dem Transport und der Montage von Nagelplattenbindern insbesondere mit größeren Längen zeigen, dass nennenswerte unplanmäßige Beanspruchungen vor allem rechtwinklig zur Binderebene auftreten. Diese Beanspruchungen treten z. B. beim Hochheben der Binder vom Presstisch oder beim Verladen horizontal transportierter Nagelplattenbinder auf und führen zu Biegeverformungen und Querkräften der im allgemeinen sehr schlanken Binder aus der Binderebene heraus. Dadurch werden insbesondere die Ober- und Untergurte, die in der Regel über die ganze Bauteillänge durchlaufen bzw. biegesteif gestoßen sind, durch Biegemomente und Querkräfte beansprucht. Bei einer Überbeanspruchung durch Biegemomente treten Versagensbilder nach Bild 1, Zeile 10, bei einer Überbeanspruchung durch Querkräfte nach Bild 1, Zeile 7 auf. Ungewollte Beanspruchungen in der Binderebene treten zwar gleichfalls auf, die Binder sind jedoch wegen der Dimensionierung für vertikale Lasten in der Lage, große Beanspruchungen in Binderebene aufzunehmen.

Als Grundlage für eine Abschätzung der bis zum Einbau auftretenden unplanmäßigen Beanspruchungen rechtwinklig zur Binderebene und den entsprechenden Nachweis nach den Gleichungen (NA.151) bis (NA.153) der DIN EN 1995-1-1/NA wurde der Fall eines symmetrischen Dreieckbinders angenommen, der auf einer horizontalen Unterlage aufliegt und am Firstpunkt angehoben wird. Damit wird der Binder nur noch kontinuierlich entlang des Untergurtes und konzentriert am Firstpunkt unterstützt, insbesondere der Obergurt erhält aus den Eigenlasten

beträchtliche Biegemomente und Querkräfte quer zur Binderebene. Wird ein Knoten durch Biegemomente rechtwinklig zur Binderebene überlastet, treten Lochleibungsverformungen unter den im Holz gebetteten Nägeln auf, damit sinkt auch der Widerstand gegen Herausziehen signifikant ab.

Die Biegetragfähigkeit im Bereich der Knoten für Beanspruchungen rechtwinklig zur Binderebene (Bild 1, Zeile 10) lässt sich mit den Nagel- und Plattentragfähigkeiten bestimmen, die Querkrafttragfähigkeit mit den charakteristischen Tragfähigkeiten  $f_{ax,k}$  rechtwinklig zur Nagelplattenebene, die in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen bzw. Bauartgenehmigungen pro mm Fugenlänge angegeben sind. Bei einer Biegebeanspruchung (Bild 1, Zeilen 5 und 10) wie auch bei einer Querkraftbeanspruchung wirkt sich eine Fuge zwischen den Bauteilen weiter traglastmindernd aus.

### 3.4 Schwinden des Holzes

Beim Schwinden des Holzes ist zu unterscheiden zwischen dem einmaligen Schwinden wegen der Herstellung der Bauteile mit höheren Holzfeuchten auf die mittlere Ausgleichsfeuchte im Bauwerk und dem wiederholten Schwinden und Quellen (siehe Abschnitt 3.5). Ein alleiniges Austrocknen und damit verbundenes Schwinden des Holzes ohne gleichzeitige Beanspruchung durch äußere Lasten wirkt sich nicht signifikant auf die Tragfähigkeit der Nagelplattenverbindung aus. Eine Studie von Blaß und Romani (2001) zeigt einen von der Einpressfeuchte, der Prüffeuchte, der Nagelplattenart und der Beanspruchungsrichtung abhängigen Einfluss der Holzfeuchte. In dieser Studie wurden vier unterschiedliche Nagelplattentypen in Hölzer unterschiedlicher Holzfeuchte eingepresst und danach durch Konditionieren auf eine Zielholzfeuchte gebracht. Anschließend wurde die Tragfähigkeit der Nagelplattenverbindungen im Versuch bestimmt. Als Basiswerte dienten die zum Zeitpunkt der Studie vorgegebene Einpressfeuchte von 18 % und die Prüffeuchte von 12 %. Bezogen auf diese Basiswerte 18/12 reduzierte sich die mittlere Tragfähigkeit der Verbindungen über alle Nagelplatten und Beanspruchungsrichtungen wie folgt:

Herstellfeuchte 12 %	Prüffeuchte 12 %	Tragfähigkeits <b>steigerung</b> um 4,3 %
Herstellfeuchte 12 %	Prüffeuchte 18 %	Tragfähigkeitsminderung um 11,1 %
Herstellfeuchte 32 %	Prüffeuchte 12 %	Tragfähigkeitsminderung um 3,6 %
Herstellfeuchte 32 %	Prüffeuchte 18 %	Tragfähigkeitsminderung um 14,1 %
Herstellfeuchte 32 %	Prüffeuchte 32 %	Tragfähigkeitsminderung um 26,5 %

Offensichtlich hat die Holzfeuchte bei der Prüfung der Verbindungen einen deutlich höheren Einfluss auf die Tragfähigkeit als die Holzfeuchtedifferenz zwischen Herstellen und Prüfen. Ein Aufwölben (Bild 1, Zeile 6) der Nagelplatten mit einer geringeren Prüffeuchte als Herstellfeuchte wurde nicht beobachtet, allerdings waren die Nagelplatten rechtwinklig zur Faser nur zwischen 76 mm und 120 mm breit.

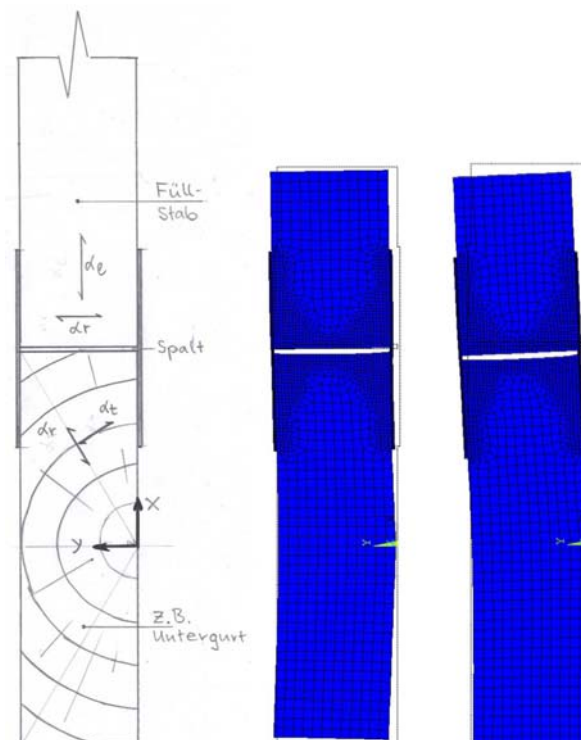
Mainey (2019) zitiert eine Studie von Wright (1977) an der University of Toronto, in der die Nagelplatten bei 15 % bis 30 % Holzfeuchte eingepresst und die Tragfähigkeiten bei 8 % Holzfeuchte bestimmt wurden. Im Vergleich zu Verbindungen mit gleicher Einpress- und Prüffeuchte von 8 % wird eine Abnahme der Tragfähigkeit von etwa 23 % festgestellt.

Schwinden des Holzes quer zur Faser bedeutet nur rechnerisch eine gleichmäßige Verringerung der Querschnittsmaße. Wegen der in Tangential- und Radialrichtung sehr unterschiedlichen Schwind- und Quellmaße werden die Querschnitte der Vollholzstäbe beim Trocknen verformt (Bild 3).



**Bild 3:** Schwindverformungen abhängig von Querschnittsform und Einschnitt

Frese (2020) hat beispielhaft den Einfluss des Schwindens auf die Verformung des Holzes in einer Nagelplattenverbindung zwischen Untergurt (200 mm x 60 mm) und Füllstab (80 mm x 60 mm) durch FE-Berechnung simuliert (Bild 4).



**Bild 4:** Schwindverformungen in einer Nagelplattenverbindung (Frese, 2020). Anatomische Haupttrichtungen in den Bauteilen (links) und Verformung (Skalierung: 1,0) nach dem Schwinden bzw. einer Holzfeuchteabnahme um 15 % (Mitte bzw. rechts). Fixierung Mitte: keine Verdrehung der  $y$ -Schwerpunktachse; Fixierung rechts: keine Verdrehung der Unterkante des Untergurts

Die resultierenden Verformungen zeigen, dass durch das Schrägstellen des oberen Teils des Untergurtquerschnitts die Diagonale ebenfalls schräg gestellt wird. Dies wird in einer wirklichen Konstruktion zu Zwängungsbeanspruchungen führen, die das Herausziehen der Nägel aus dem Holz ähnlich wie in Bild 1 Zeile 7 begünstigen.

Durch etwaigen Drehwuchs des Holzes und das nachfolgende Austrocknen können weitere Zwängungsbeanspruchungen auftreten, die den in Bild 4 gezeigten Effekt noch verstärken.

### 3.5 Wiederholtes Schwinden und Quellen des Holzes

Paevere et al. (2009a) beschreiben das Herauswandern der Nägel durch wiederholtes Schwinden und Quellen wie folgt: eine vollständig in feuchtes Holz eingepresste Nagelplatte wird durch das erstmalige Schwinden auf die Ausgleichsfeuchte im Bauwerk abhängig von der Nagellänge herauswandern. Nimmt man eine Einpressfeuchte von 22 % (Grenze nach EN 14250) und eine häufig beobachtete Ausgleichsfeuchte von etwa 10 % an, wird die Nagelplatte rechnerisch um  $(22-10) \cdot 0,25 \% = 3 \%$  der Nagellänge herauswandern. Dies bedeutet für Nagellängen zwischen 8 mm und 20 mm ein Herauswandern um 0,24 mm bis 0,60 mm. Das Schwinden rechtwinklig zur Achse des Nagels verringert außerdem die Reibung zwischen Nagel und Holz. Steigt die Holzfeuchte von der Holzoberfläche her wieder an, verursacht die Reibung zwischen Holz und Nagel an der Oberfläche eine Kraft, die den Nagel aus dem Holz herauszieht, in der Nähe der Nagelspitze entsteht eine Reibungskraft in Richtung des Holzinners. Da das Quellen außen in Richtung der Nagelachse und rechtwinklig dazu beginnt, ist die Reibung zwischen Nagel und Holz dort größer als im Innern des Holzes und die nach außen gerichtete Reibkraft überwiegt. Dies bedeutet ein - wenn auch geringes - Herausziehen der Nägel. Beim erneuten Schwinden drehen sich die Reibkräfte um und wegen der höheren Holzfeuchte im Innern und der dort jetzt größeren Reibkraft zwischen Nagel und Holz kann der Nagel nicht mehr vollständig in das Nagelloch eindringen. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jedem Zyklus und vergrößert das Ausmaß des Herauswanderns.

Mainey (2019) zitiert eine Untersuchung von Groom (1995). Danach spielt die Feuchtehysterese beim Austrocknen und Befeuchten eine zusätzliche Rolle. Außerdem spielt nach Groom (1995) die Feuchteamplitude eine signifikante Rolle beim Herauswandern. Nach acht Feuchtezyklen zwischen 9 % und 15 % mittlerer Holzfeuchte wurde ein Herauswandern von 0,32 mm – dies entspricht etwa 4 % der Nagellänge – beobachtet. Nach ebenfalls acht Feuchtezyklen zwischen 5 % und 19 % mittlerer Holzfeuchte wurde ein Herauswandern von 17 % der Nagellänge, also 1,32 mm beobachtet. Nach dem Herauswandern wurde die Tragfähigkeit und Steifigkeit für größere Feuchtwechsel bestimmt. Für Nagelplatten mit Nagellängen von 8 mm, die um 1,5 mm herausgewandert waren, war die Tragfähigkeit um 31 % und die Steifigkeit um 66 % reduziert.

Ebenfalls in Mainey (2019) werden Ergebnisse von Mackenzie und McNamara (1994) dargestellt. Abhängig von der Nagelplattenart wurden Tragfähigkeitsverluste zwischen 34 % und 80 % in Gurtstößen festgestellt, wenn die Verbindungen nach dem Herstellen nicht direkt geprüft, sondern noch für sechs Tage bewittert wurden, d.h. dem Außenklima ausgesetzt waren. Dies bedeutet, dass auch vergleichsweise

kurze Montagezeiten bis zum Schließen des Daches bereits große Verluste an Tragfähigkeit bewirken können.

#### 4. Abschätzen ungünstiger Parameterkombinationen

Neben der Nagellänge von unter etwa 10 mm, die bereits als alleiniger Parameter im Hinblick auf das Herauswandern kritisch zu betrachten ist (siehe Abschnitt 2), können auch Kombinationen weiterer Parameter zu nennenswerten Tragfähigkeitsminderungen durch nicht vollständig im Holz eingebettete Nägel führen.

Mainey (2019) zitiert eine Untersuchung an Deckenträgern in Wohnhäusern in den USA (Melton 2000), in der über das Herauswandern von Nagelplatten berichtet wird. Das Herauswandern wurde dabei überwiegend an hochbeanspruchten Verbindungen beobachtet, weniger beanspruchte Verbindungen waren unauffällig. Als Folge des Herauswanderns nimmt die Tragfähigkeit der Verbindungen ab, das Verhältnis aus Beanspruchung zu Tragfähigkeit steigt. Bei der Suche nach den Ursachen des Herauswanderns kam der Autor zu der Schlussfolgerung, dass die hohen Gebrauchslasten und die damit hohe Ausnutzung der Nagelplattenverbindungen die wichtigste Ursache darstellen.

Da in den weniger beanspruchten Verbindungen kaum ein Herauswandern festzustellen war, kann zumindest gefolgert werden, dass Gründe wie wiederholtes Schwinden und Quellen, die alle Verbindungen in der Konstruktion betreffen, noch nicht zu einem signifikanten Schadensbild führen müssen. Es ist offensichtlich, dass die Kombination mehrerer, das Herauswandern begünstigender Parameter besonders schadensträchtig ist.

Auch Paevere et al. (2009b) stellten fest, dass belastete Nagelplattenverbindungen eine höhere Geschwindigkeit und ein höheres Ausmaß des Herauswanderns zeigten. Nach 19 Feuchtezyklen zeigten Verbindungen mit einer Ausnutzung der Last von bis zu 40 % ein Herauswandern von 0,7 mm, diejenigen mit 100 % Ausnutzung bereits 3,5 mm. Dies bedeutet, dass Konstruktionen mit hohen Dauerlasten besonders gefährdet sind, insbesondere, wenn während der Herstellung, während des Transports oder der Montage oder im fertigen Bauwerk ein Herauswandern auftritt. Sobald das Blech der Nagelplatte nicht mehr vollständig am Holz anliegt, nimmt die Tragfähigkeit ab, die spezifische Beanspruchung (Ausnutzung) steigt und das Herauswandern wird beschleunigt.

Sind Nagelplatten von Beginn an nicht vollständig in das Holz eingepresst oder werden durch Transport und Montage überbeansprucht, ist der Ausnutzungsgrad von Beginn an höher und das Herauswandern erfolgt schneller als bei ursprünglich korrekt hergestellten Nagelplattenverbindungen. Das gleichzeitige Auftreten einzelner Ursachen ist für das Herauswandern damit kritischer zu betrachten als das Aufaddieren der Folgen einzelner Ursachen.

#### 5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Bestehende Nagelplattenkonstruktionen sollten nach den „Hinweisen für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten“ der Bauministerkonferenz vom September 2006 als Bege-

hung, Sichtkontrolle oder eingehende Überprüfung ohnehin regelmäßig überprüft werden. Im Hinblick auf das Herauswandern von Nagelplatten aus dem Holz sollten dabei insbesondere Nagelplattenverbindungen mit Nagelplatten mit kurzen Nägeln besonders sorgfältig begutachtet werden. Vorrangig sollten bestehende Konstruktionen mit Nagelplatten mit Nägeln unter 10 mm Länge überprüft werden sowie Dachkonstruktionen mit Spannweiten über 12 m, auf die mindestens einer der folgenden Punkte zutrifft:

- Dächer mit schwerer Dacheindeckung, bei denen das Verhältnis von ständiger Last zur Gesamtlast größer als 50% ist;
- Dachkonstruktionen, bei denen seit der letzten Überprüfung mehr als fünf Jahre vergangen sind;
- Gebäude mit Dachkonstruktionen, die mit der Außenluft in Verbindung stehen;
- Gebäude mit Undichtigkeiten in der Dachhaut;
- Gebäude, bei denen die Dachkonstruktion in Nagelplattenbauweise umgebaut oder erweitert wurde.

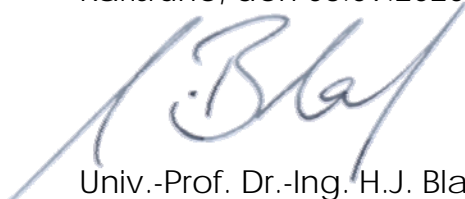
Für neu zu errichtende bauliche Anlagen in Nagelplattenbauweise gelten folgende Empfehlungen:

- Verwendung von Nagelplatten mit Nagellängen größer als 10 mm;
- Verwendung von Hölzern, deren Feuchtegehalt beim Herstellen der Verbindung nicht mehr als 15 % beträgt;
- Verwendung von Hölzern für Bauteile in Nagelplattenbauweise, deren Feuchtegehalt sich nicht um mehr als 5 % unterscheidet;

Die Bemessung von Nagelplattenverbindungen sollte wie folgt geändert werden:

- Berücksichtigung eines Luftspalts von mindestens 1 mm zwischen Innenseite der Nagelplatte und Holzoberfläche bei der Bestimmung der charakteristischen Werte der Nageltragfähigkeit; dies kann entweder bereits bei der Prüfung von Nagelplattenverbindungen berücksichtigt werden oder durch eine Abminderung der charakteristischen Werte der Nageltragfähigkeit um z.B. 25 %;
- Druckkräfte rechtwinklig zur Fuge sollten rechnerisch ausschließlich über die Nagelplatte übertragen werden, ein Druckkontakt zwischen den Hölzern sollte nicht angesetzt werden;
- Der Beiwert  $k_{mod}$  für ständige Lasten sollte beim Nachweis der Nageltragfähigkeit reduziert werden;
- Die Bemessung für den Lastfall Transport und Montage - Nachweis nach Gleichung (NA.153) der DIN EN 1995-1-1/NA sollte auf Anschlüsse der Nagelplatten an Füllstäbe erweitert werden;

Karlsruhe, den 03.09.2020



Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.J. Blaß