



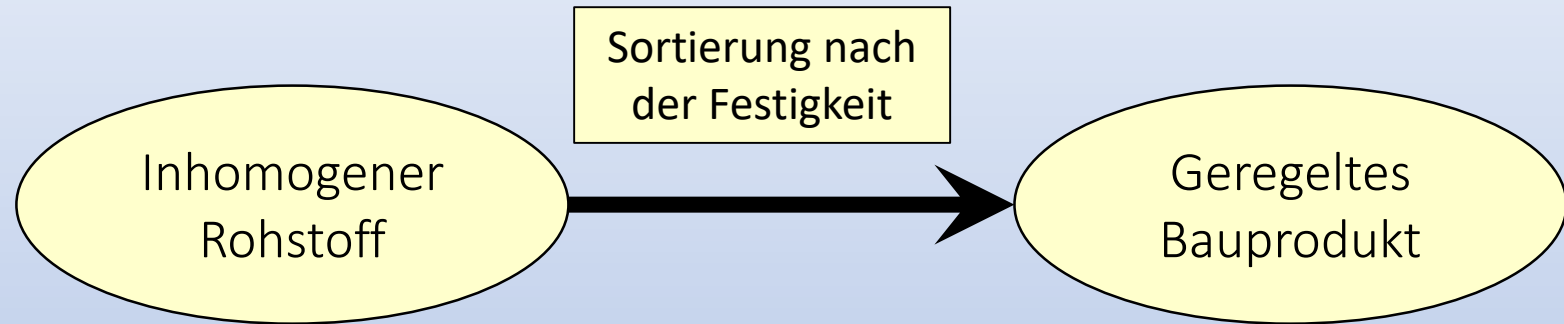
Bewertung der Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen – Festigkeitssortierung im verbauten Zustand



© SVB Rug 2020



Problemstellung



Streuung der Materialeigenschaften

- standort- & wachstumsbedingt
- strukturbedingt
- herstellungsbedingt

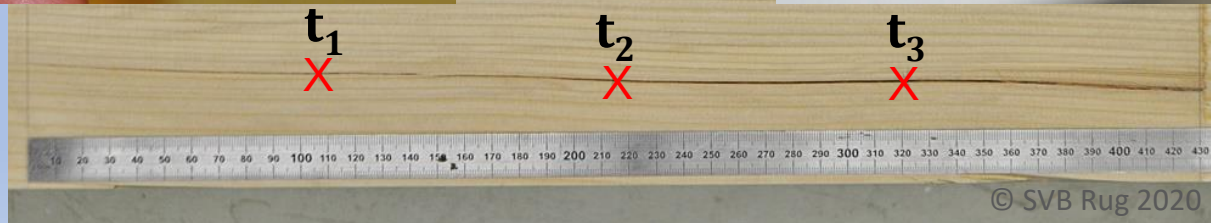
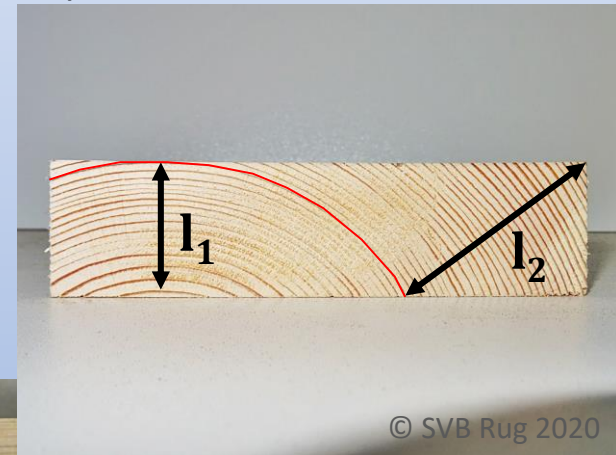
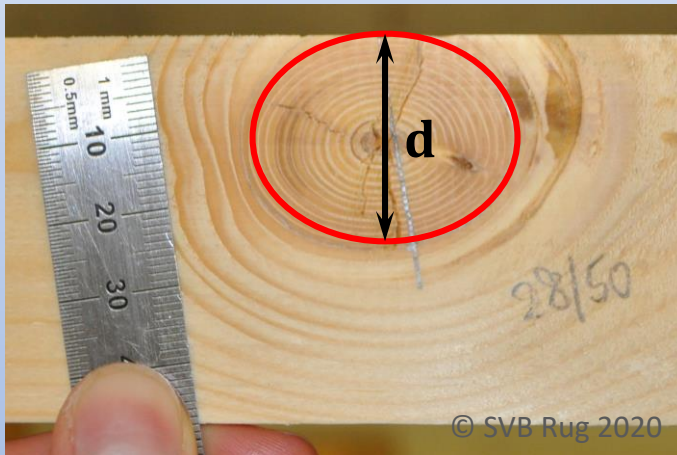
Voraussetzung:

- Abschätzung der Streuungen
- Eingrenzung der Streuungen

Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz :

- Visuelle Sortierung anhand der an der Bauteiloberfläche sichtbaren Wuchsmerkmale nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5





Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz :

- Visuelle Sortierung anhand der an der Bauteiloberfläche sichtbaren Wuchsmerkmale nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5
 - Geringe Korrelation zwischen visuell feststellbaren Merkmalen und den Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften
 - Geringe Trennschärfe
 - Bauholz mit hoher Tragfähigkeit (S13/C30 und höher) schwer bzw. nicht visuell sortierbar
 - Sortierklassen können nur in begrenztem Umfang den Festigkeitsklassen zugeordnet werden

Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz :

- Maschinelle Sortierung anhand von Festigkeits-/Steifigkeitsindikatoren nach EN 14081-2/-3



RAUTE Timbergrader – Durchbiegungsmessung
(Bildquelle: www.metriguard.com)



brookhuis mtgBATCH – Längsschwingungs-
messung (Bildquelle: www.brookhuis.com)

Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz :

- Maschinelle Sortierung anhand von Festigkeits-/Steifigkeitsindikatoren nach EN 14081-2/-3



RAUTE Timbergrader – Durch
(Bildquelle: www.metriguard.com)



Microtec Goldeneye – Röntgendurchstrahlung/
Laserabtastung (Bildquelle: www.microtec.eu)



Brookhuis – Längsschwingungs-
(Bildquelle: www.brookhuis.com)



Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz:

- Maschinelle Sortierung anhand von Festigkeits-/Steifigkeitsindikatoren nach EN 14081-2/-3
 - Apparative Messung von Materialeigenschaften, die eng mit den Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften korrelieren
 - Hohe Trennschärfe
 - Direkte Zuordnung zu Festigkeitsklassen möglich
 - Erfordert zertifizierte Technik & Personal

Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von neuem Bauholz:

- Apparativ unterstützte visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5



brookhuis Timber Grader MTG handheld– Längsschwingungsmessung (Bildquelle: www.volta.it)



Metriguard E-Computer – Längsschwingungsmessung (Bildquelle: www.metriduard.com)



Festigkeitssortierung von Bauholz

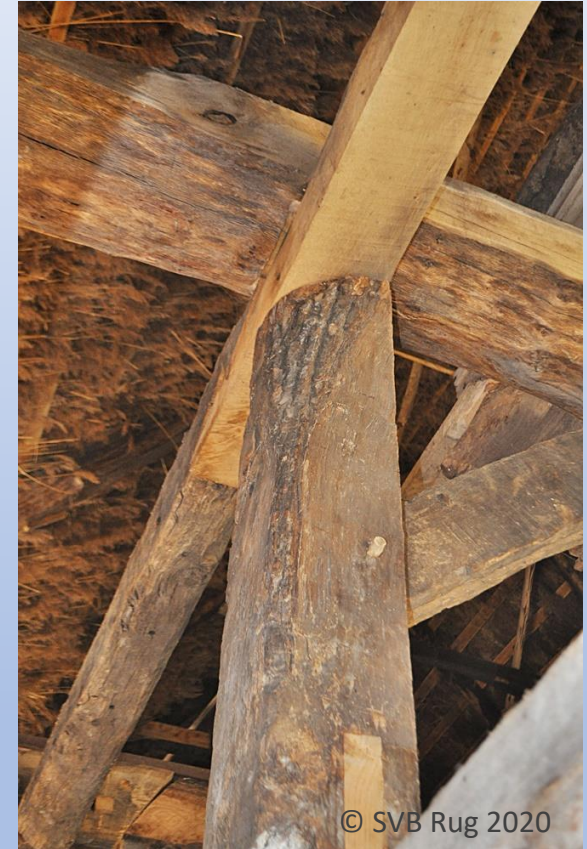
Festigkeitssortierung von neuem Bauholz:

- Apparativ unterstützte visuelle Sortierung nach DIN 4074-1/-5
 - Kombination der visuellen Sortierung mit zerstörungsfreien Prüfmethoden
 - Visuelle Messung von oberflächlich erkennbaren Wuchseigenschaften & apparative Messung von Materialeigenschaften, die eng mit den Festigkeits-/Steifigkeitseigenschaften korrelieren
 - „Mittlere“ Trennschärfe
 - Direkte Zuordnung zu Festigkeitsklassen möglich
 - Erfordert zertifizierte Technik & Personal

Festigkeitssortierung von Bauholz



Deckenkonstruktion eines Speichergebäudes
(Baujahr: 1856)



Dachkonstruktion eines Hallen-
hauses (Baujahr: um 1900)

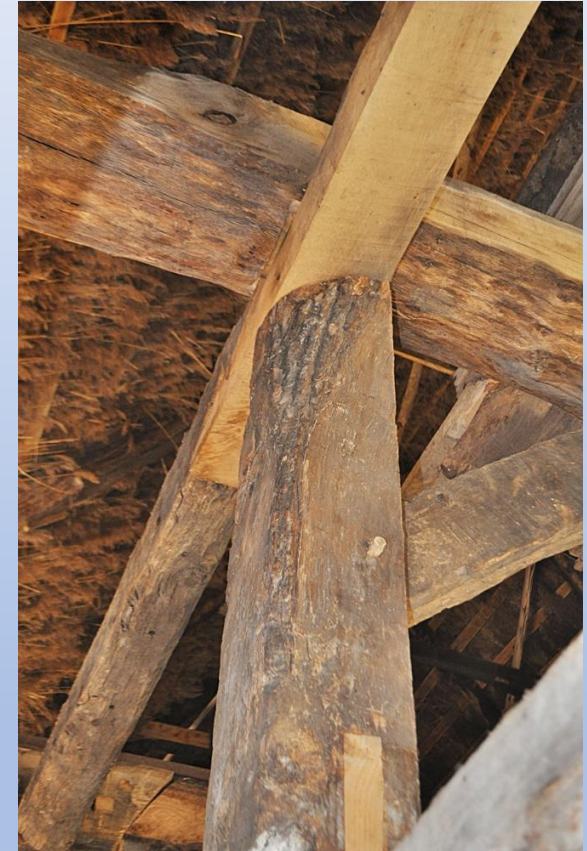
Festigkeitssortierung von Bauholz



Deckenkonstruktion
(Baujahr: 1856)



Dachkonstruktion einer ehem. Militärakademie
(Baujahr: 1904/05)



Dachkonstruktion eines Hallen-
hauses (Baujahr: um 1900)



Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Gebäuden:

- Die für **neues Bauholz** entwickelten **Sortiervverfahren** können nicht oder nur mit **großen Einschränkungen** für Holzbauteile **im eingebauten Zustand** angewendet werden.
 - Eingeschränkte Einsehbarkeit
 - Fehlende Personalqualifizierung hinsichtlich der Besonderheiten im Bestand
 - Fehlende, flexibel handhabbare & zertifizierte Gerätetechnik

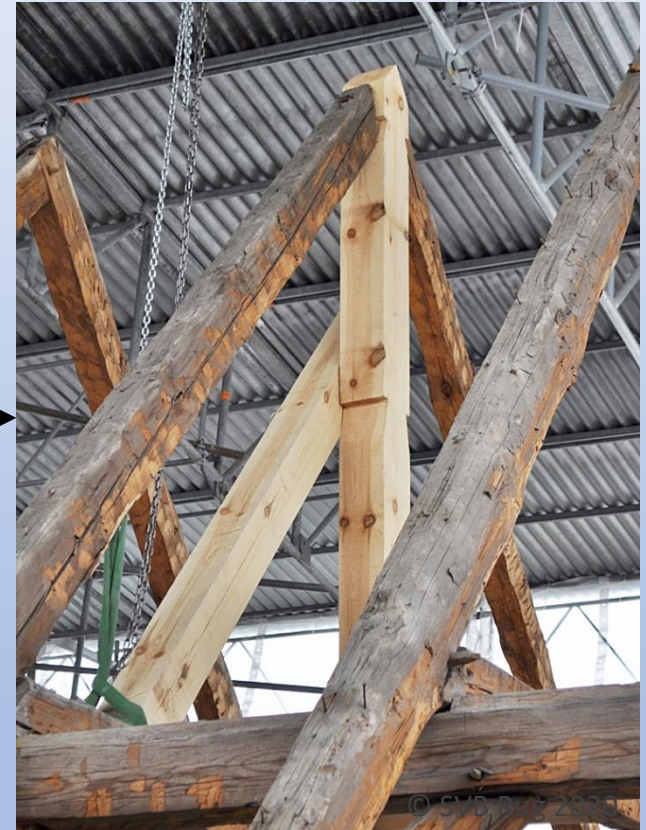


Festigkeitssortierung von Bauholz



Fachgerechte
Instandsetzung
(substanzschonend,
wirtschaftlich)

Voraussetzung:
Erfassung & Bewertung
des Bauzustandes
und der Standsicherheit





Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Gebäuden:

- Aktuelle Baupraxis
 - Eine **Festigkeitssortierung** erfolgt **in den wenigsten Fällen**
 - **Tragfähigkeit** von verbautem Holz wird meist nur **intuitiv abgeschätzt**
 - Statische Berechnungen werden hauptsächlich unter der **Annahme von „normalem“ Bauholz (S10/LS10)** geführt
- Tragfähigkeitsreserven bzw. -defizite werden nicht aufgedeckt
- wenig substanzschonende und unwirtschaftliche Eingriffe in das Tragwerk
- Nicht fachgerechte Instandsetzungsmaßnahmen



Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Gebäuden:

- Eine umfassende und möglichst exakte **Erfassung und Bewertung des Bauzustandes** und der Standsicherheit ist die **Voraussetzung** für eine fachgerechte **Instandsetzung**
 - **Visuelle Sortierung/Begutachtung** allein ist **nicht ausreichend**
 - Kombination mit **zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden** erhöht die Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Festigkeitssortierung von Bauholz

Festigkeitssortierung von Holzbauteilen in bestehenden Gebäuden:

Zusammenhang zwischen zerstörungsfrei messbaren Schätzwerten der Festigkeit (Indicating properties IP) und tatsächlich zerstörend gemessenen Festigkeiten

Schätzwert der Festigkeit (IP)	Bestimmtheitsmaß (R^2)	Korrelationskoeffizient (r)
Jahringbreite	0,15 ... 0,35	0,38 ... 0,59
Ästigkeit	0,15 ... 0,35	0,38 ... 0,59
Rohdichte	0,20 ... 0,40	0,45 ... 0,63
Eigenfrequenz, Ultraschallgeschwindigkeit	0,30 ... 0,55	0,55 ... 0,74
Elastizitätsmodul, statisch	0,40 ... 0,65	0,63 ... 0,81
Elastizitätsmodul, dynamisch	0,30 ... 0,55	0,55 ... 0,74
Ästigkeit & Rohdichte	0,40 ... 0,60	0,63 ... 0,77
Ästigkeit & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,75	0,74 ... 0,87
Ästigkeit, Rohdichte & Elastizitätsmodul	0,55 ... 0,80	0,74 ... 0,89

Quelle: Sandomeer M. K., Steiger R.: Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz; Zukunft Holz – Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotential (2009)



Vergleichende Materialuntersuchungen

Zielstellung:

Untersuchung der Leistungsfähigkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit
ausgewählter, für die Bauzustandserfassung geeigneter zerstörungsfreier/-armer
Prüfmethoden

- **Quantifizierung** der methodenspezifischen **Genauigkeit/ Zuverlässigkeit** und
Ermittlung von potentiellen Fehlerquellen
- Entwicklung statistisch abgesicherter **Modelle zur Auswertung** von Ergebnissen aus
zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden
- Festlegung von **Rahmenbedingungen für die zuverlässige Anwendung** von
zerstörungsfreien/-armen Prüfmethoden



Vergleichende Materialuntersuchungen

Untersuchungsmethodik:

- Visuelle Sortierung nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5
- Zerstörungsfreie Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen
- Zerstörende Biegeversuche nach EN 408

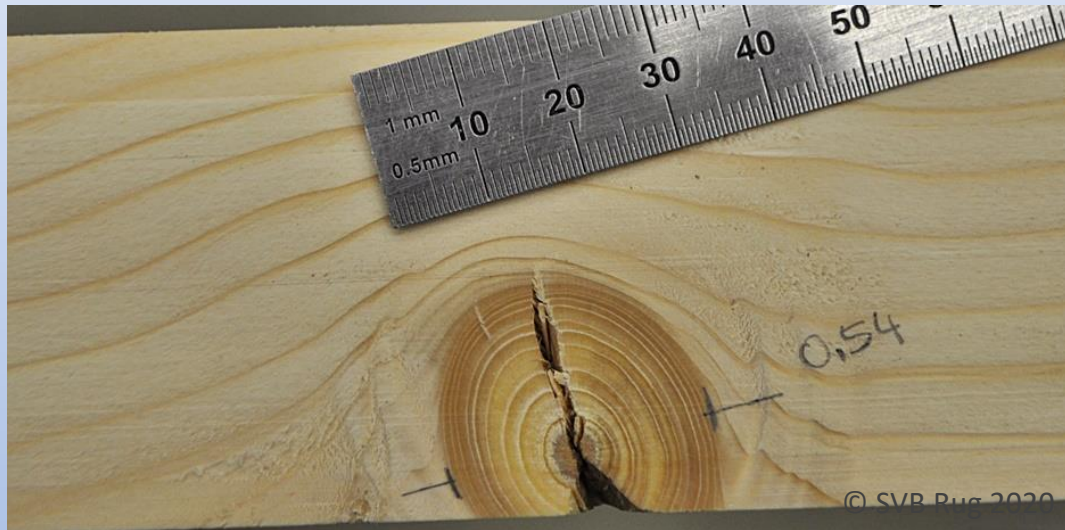
→ Entwicklung der Methodik an Proben aus Neuholz (Fichte aus MNO-Europa & Kiefer/Eiche aus NO-Deutschland; jeweils ca. 300 Stk.)

→ Verifizierung der Methodik an Proben aus Altholz (Fichte/Kiefer/Eiche aus bestehenden Konstruktionen in NO-Deutschland; jeweils ca. 40...80 Stk.)



Vergleichende Materialuntersuchungen

Visuelle Sortierung nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5:



Vergleichende Materialuntersuchungen

Visuelle Sortierung nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5:



Vergleichende Materialuntersuchungen

Visuelle Sortierung nach EN 14081-1 & DIN 4074-1/-5:

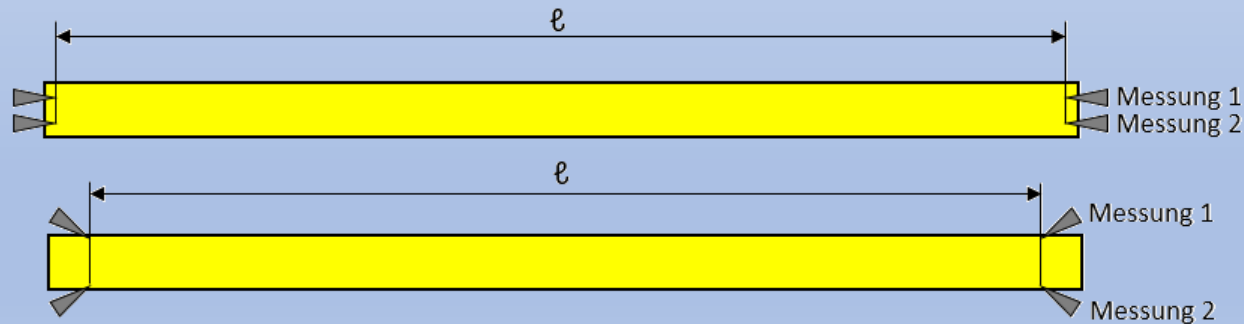


Vergleichende Materialuntersuchungen

Zerstörungsfreie Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen:



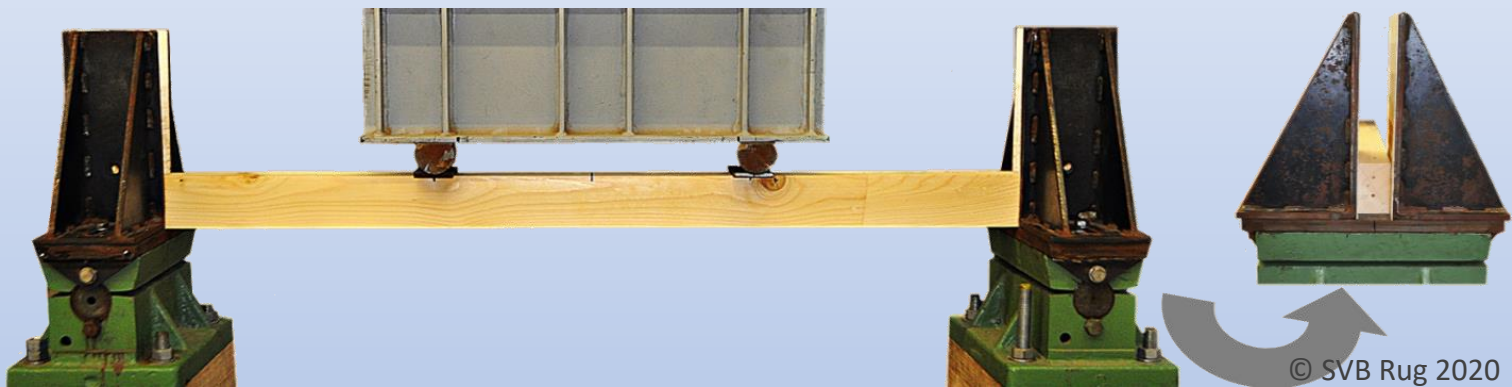
Direkte & Indirekte Messung der Schallgeschwindigkeit (Messgerät: Sylvatest Trio)



Prüfschema Ultraschall-Impulslaufzeitmessungen

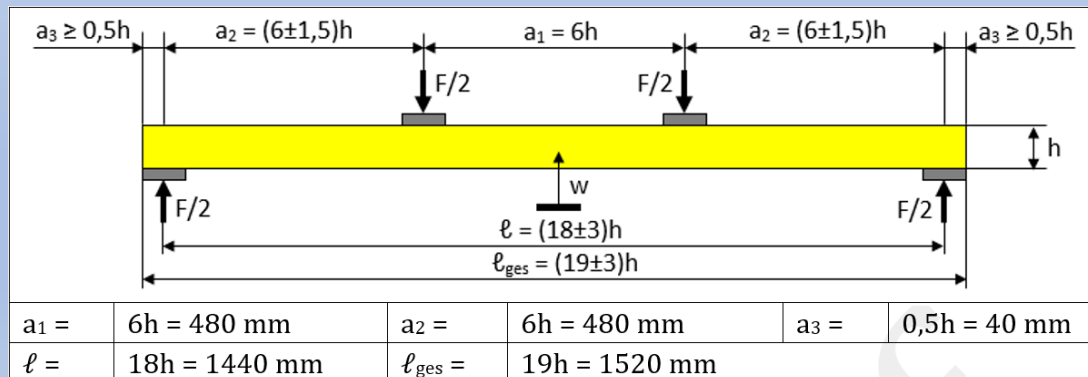
Vergleichende Materialuntersuchungen

Zerstörende Biegeversuche nach EN 408:



© SVB Rug 2020

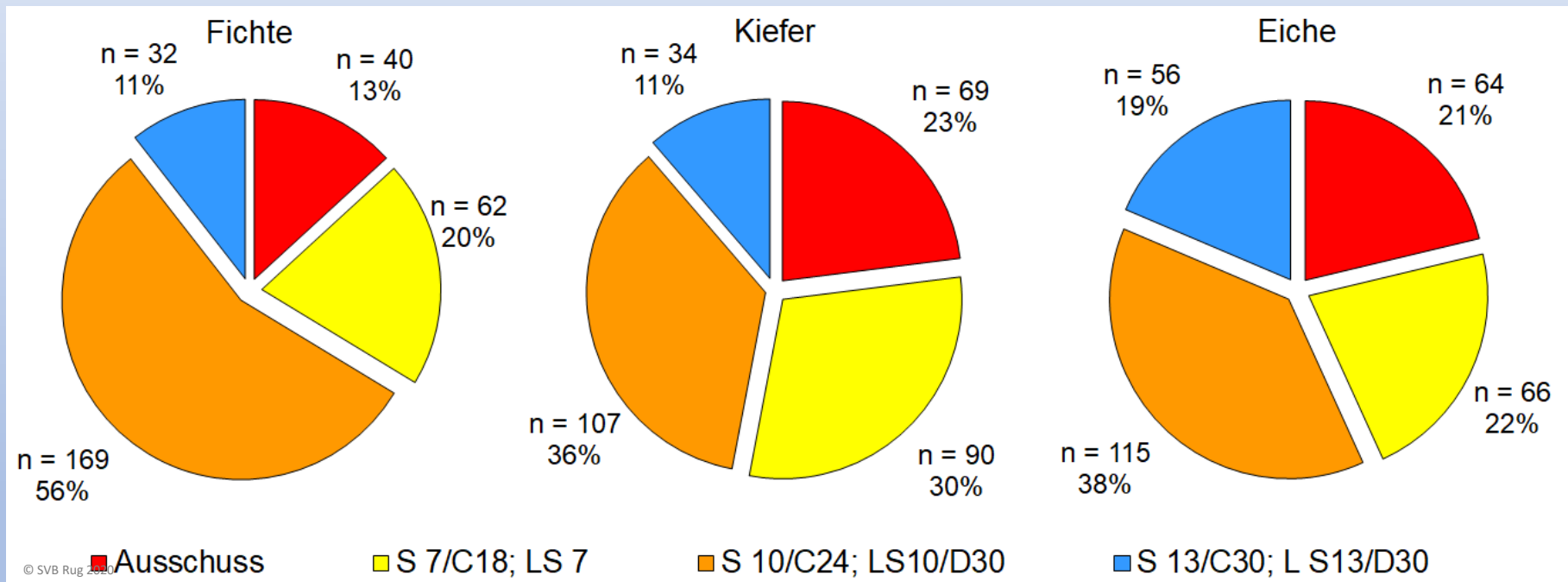
Versuchsaufbau



Schematischer
Versuchsaufbau
nach EN 408,
Abschnitte 10 & 19

Vergleichende Materialuntersuchungen

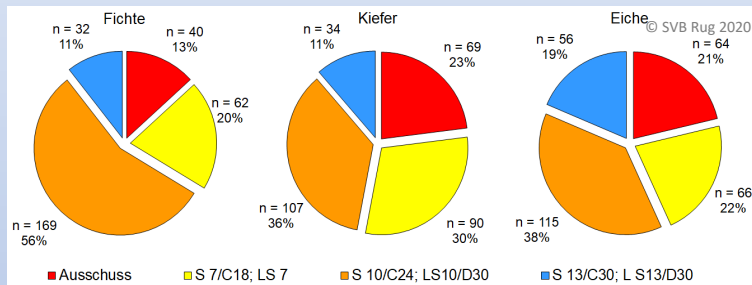
Ergebnisse & Auswertung: *visuelle Sortierung*



Ausschlaggebende Wuchsmerkmale: Äste, Faserneigung, Risse

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *visuelle Sortierung*



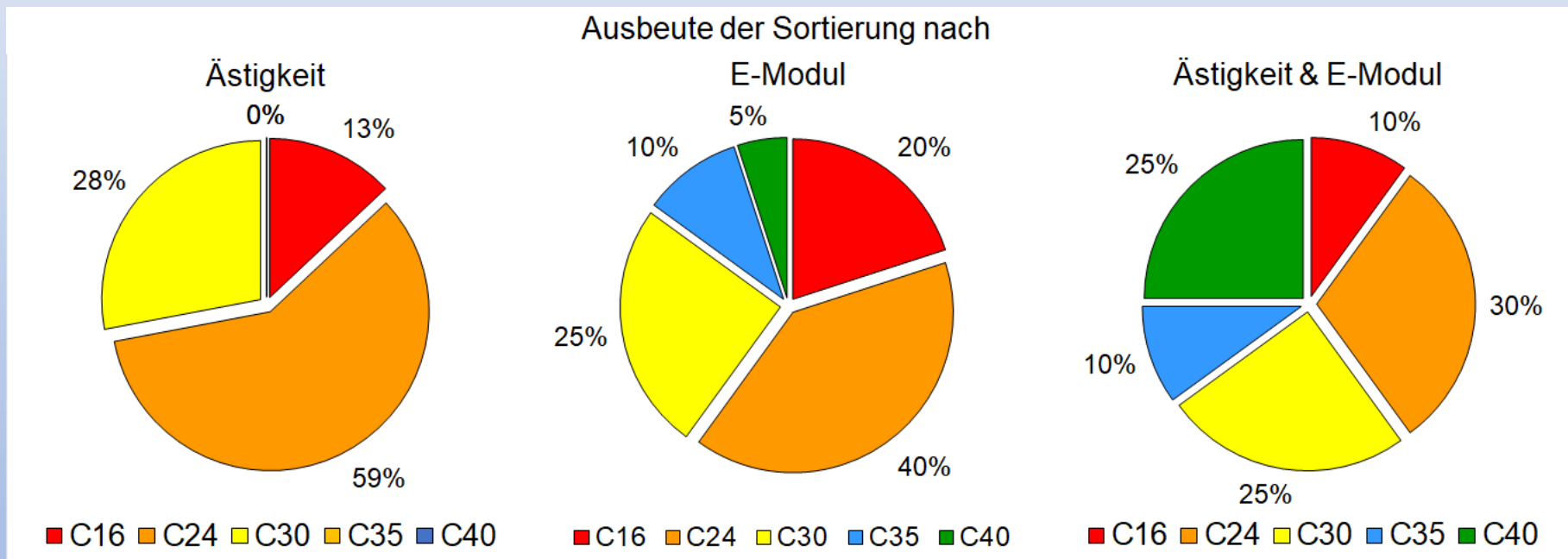
- Relativ großer Anteil „Ausschuss“
- Überwiegender Anteil S7/LS7 (geringe Tragfähigkeit) und S10/LS10 (normale Tragfähigkeit)
- Relativ geringer Anteil S13/LS13 (hohe Tragfähigkeit)

Die **Übereinstimmung** zwischen dem Ergebnis der visuellen Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen beträgt nur **ca. 25 %!**

→ Die tatsächliche **Tragfähigkeit** wurde **überwiegend falsch abgeschätzt!**

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *visuelle Sortierung*



Verbesserung des Sortierergebnisses durch Verwendung verschiedener Sortierkriterien

Quelle: Görlacher R.: Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz; In: Holz als Roh- und Werkstoff 42 (1984), S. 219-222



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*

Sortierung anhand der Ultraschall-Geschwindigkeit:

- Aufstellung von **Regressionsbeziehungen** zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem im Biegeversuch ermittelten statischen Elastizitätsmodul
- **Ableitung von Grenzwerten** mit Hilfe der normativ geregelten Elastizitätsmoduln (EN 338)
- **Überprüfung der Grenzwerte** anhand der Übereinstimmung zwischen Ultraschall-Impulslaufzeitmessung und Biegeversuchen
- Empirische **Anpassung der Grenzwerte** zum Erreichen einer höheren Übereinstimmung

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*

Regressionsbeziehungen zwischen Schallgeschwindigkeit und statischem Biege-Elastizitätsmodul

Beziehung	Fichte	Kiefer	Eiche
$v_{\text{dir}} \leftrightarrow E_m$	$E_m = 4.6v_{\text{dir}} - 14267$ ($r = 0.543$)	$E_m = 2.8v_{\text{dir}} - 1688$ ($r = 0.284$)	$E_m = 6.04v_{\text{dir}} - 15374$ ($r = 0.829$)
$v_{\text{ind}} \leftrightarrow E_m$	$E_m = 4.4v_{\text{ind}} - 12467$ ($r = 0.564$)	$E_m = 2.9v_{\text{ind}} - 2026$ ($r = 0.317$)	$E_m = 6.2v_{\text{ind}} - 15629$ ($r = 0.844$)

- Geringe Unterschiede zwischen direkter und indirekter Messung
- Ausprägung der Beziehungen schwach bis stark

Vergleichende Materialuntersuchungen

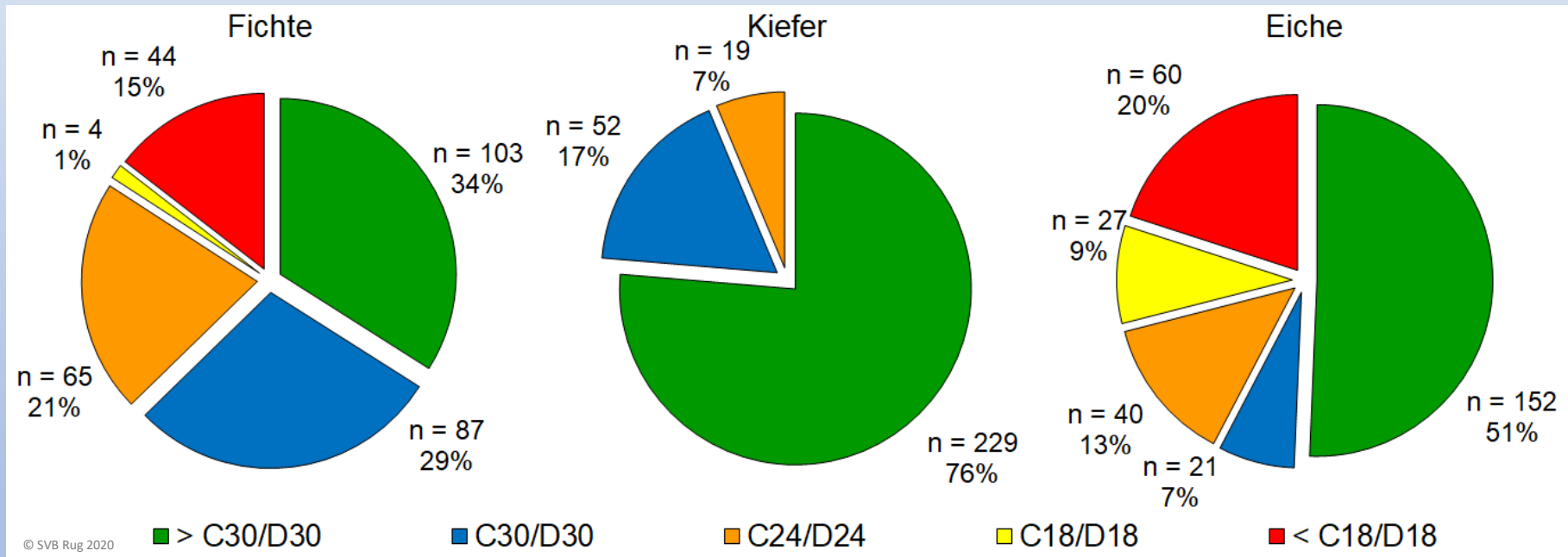
Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*

Grenzwerte für die Ultraschallgeschwindigkeit

Festigkeits- klasse	Fichte		Kiefer		Festigkeits- klasse	Eiche	
	Direkte Messung	Indirekte Messung	Direkte Messung	Indirekte Messung		Direkte Messung	Indirekte Messung
C18	5100	4900	3900	3900	D24	4300	4200
C24	5500	5350	4600	4600	D30	4500	4400
C30	5750	5550	5000	4900	D35	4600	4600
C35	5950	5800	5300	5200	D40	4800	4700
C40	6150	6050	5700	5600	D50	5000	4900

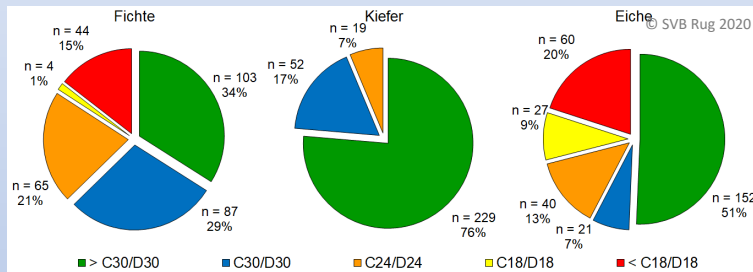
Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*



- Relativ geringer Anteil <C18/D18
- geringerer Anteil C18/D18 – C24/D24
- Überwiegender Anteil $\geq$ C30/D30
- Insgesamt deutliche Verbesserung der Ausbeute

Die **Übereinstimmung** zwischen dem Ergebnis der Ultraschall-Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen beträgt **ca. 75 %!**

→ Die tatsächliche **Tragfähigkeit** wurde **zu einem großen Teil richtig abgeschätzt!**



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*

Schlussfolgerung:

- Ultraschallgeschwindigkeit **prinzipiell** als Sortierkriterium **anwendbar**
- Ultraschall-Impulslaufzeitmessung sollte **nur in Kombination mit anderen** zerstörungsfreien/-armen **Mess- und Prüfmethoden** verwendet werden
- **Verbesserung** der Zuverlässigkeit durch **Kombination mit weiteren Kriterien** ist anzunehmen



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

- Herangehensweise analog der maschinellen Festigkeitssortierung (**Sortierparameter = Schätzwert für Zielgröße**)
- Aufstellung von **multiplen Regressionsbeziehungen** (Einbeziehung mehrerer Mess-/Prüfmethoden)
- **Ableitung, Überprüfung und Anpassung der Grenzwerte** analog der Sortierung über die Ultraschallgeschwindigkeit
- Aufstellung eines **mehrstufigen Regressionsmodells**, um den **Möglichkeiten angepasster Standsicherheitsnachweise** Rechnung zu tragen



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

Möglichkeiten angepasster Standsicherheitsnachweise:

- Hintergrund: **Kenntnisstufen der Nachweisführung** (bspw. vorgeschlagen in Loebjinski, et al., 2018)
- „Kenntnisstufe“ = **Grad der Untersuchung** und der daraus resultierenden **Informationen** über die Konstruktion
- **Vier Stufen** der Kenntnis über die bestehende Konstruktion („sehr gering“/ „Knowledge Level 0“ bis „hoch“/„Knowledge Level 3“)
- **Voraussetzung:** Feststellung der vorhandenen **Materialqualität**

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

Kenntnisstufen (KL ... Knowledge Level) für den Standsicherheitsnachweis bestehender Konstruktionen

Kenntnisstufe	Mögliche Nachweismethoden
KL 0 sehr geringer Kenntnisstand	Semi-Probabilistische Nachweismethoden
KL 1 geringer Kenntnisstand	Semi-Probabilistische Nachweismethoden
KL 2 normaler Kenntnisstand	Semi-Probabilistische & probabilistische Nachweismethoden
KL 3 hoher Kenntnisstand	Probabilistische Nachweismethoden

Quelle: Loebjinski, M., Köhler, J., Rug, W., & Pasternak, H. (2018). Development of an optimisation-based and practice orientated assessment scheme for the evaluation of existing timber structures. In R. Caspeele, L. Taenve, & D. Frangopol (Eds.), Proceedings of IALCCE. Ghent, Belgium.

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

Sortierstufen (SGL ... Strength Grading Level) & entsprechende Kenntnisstufen (KL ... Knowledge Level)

Sortier- stufe	Erforderliche Sortiermethode	Entsprechende Kenntnisstufe
SGL 0	Keine Festigkeitssortierung erforderlich (Annahme von Materialkennwerten)	KL 0
SGL 1	Visuelle Sortierung nach EN 14081-1	KL 1
SGL 2	Apparativ unterstützte visuelle Sortierung (visuelle Sortierung & zerstörungsfreie Prüfmethoden)	KL 2
SGL 3	Apparativ unterstützte visuelle Sortierung (visuelle Sortierung, zerstörungsfreie & -arme Prüfmethoden)	KL 2/3

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

Sortierstufen (SGL ... Strength Grading Level) & entsprechende Kenntnisstufen (KL ... Knowledge Level)

Sortier- stufe	Erfordernisse	Entsprechende Kenntnisstufe
SGL 0	Keine Festlegungen (Annahme)	KL 0
SGL 1	Umfassende Regelungen in vorhandenen Sortiervorschriften	KL 1
SGL 2	Visuelle Sortierung nach EN 14081-1	KL 2
SGL 3	Apparativ unterstützte visuelle Sortierung (visuelle Sortierung & zerstörungsfreie Prüfmethode)	KL 2/3
	Apparativ unterstützte visuelle Sortierung (visuelle Sortierung, zerstörungsfreie & -arme Prüfmethode)	

Grundlegende Regelungen in vorhandenen
Sortiervorschriften, aber keine konkreten
Festlegungen zur letztendlichen Durchführung



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

Verwendete Sortierkriterien:

- Visuelle Sortierung: **Ästigkeit, Faserneigung, Risse**
→ *Übrige Sortierkriterien entweder in-situ nicht/schwer messbar (z.B. Jahrringbreite, Markröhre) oder in der Nachweisführung direkt zu berücksichtigen (bspw. Baumkante als Fehlfläche oder Krümmungen als Außermittigkeit)*
- Zerstörungsfreie Prüfmethoden: Ultraschall-Impulslaufzeitmessung
(Schallgeschwindigkeit, übertragene elektrische Spannung, dynamischer E-Modul)
- Zerstörungsarme Prüfmethoden: an kleinen fehlerfreien Proben ermittelte **Rohdichte** (bspw. Bohrkerne)

Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*

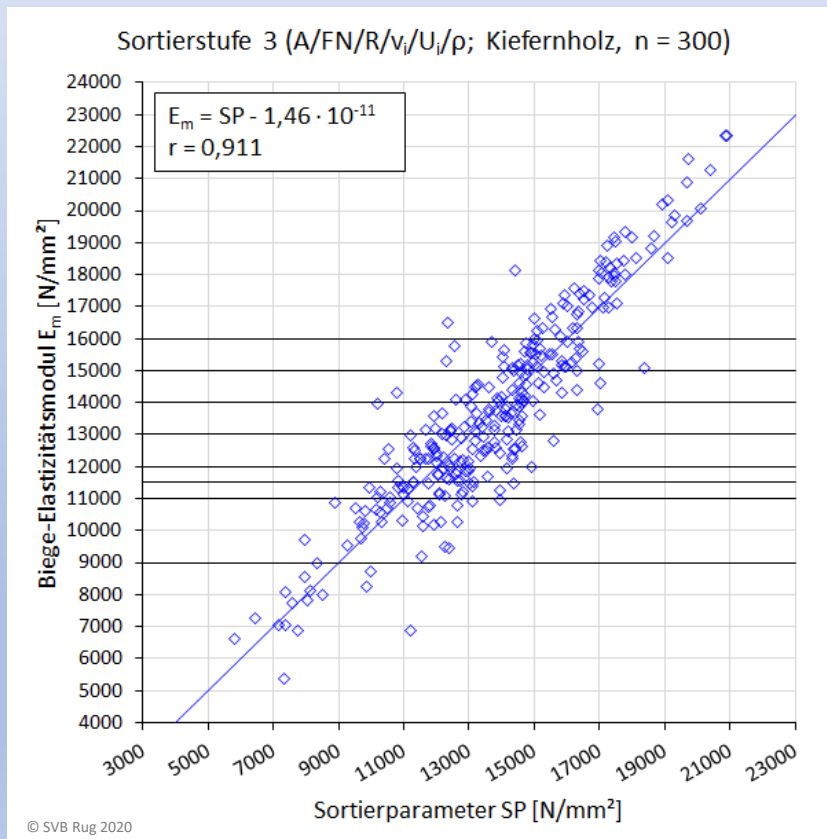
Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse

Sortier- stufe	Sortierkriterien	Korrelationskoeffizienten r		
		Fichte	Kiefer	Eiche
SGL 1	Ästigkeit/Faserneigung/Risse	0,294	0,535	0,310
SGL 2	Ästigkeit/Faserneigung/Risse/Ultraschallgeschwindigkeit/ übertragene Spannung (direkte/indirekte Messung)	0,790/ 0,799	0,817/ 0,816	0,869/ 0,878
SGL 3	Ästigkeit/Faserneigung/Risse/dyn. E-Modul/ Rohdichte (direkte/indirekte Messung)	0,803/ 0,815	0,931/ 0,916	0,885/ 0,899



Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*



- Aufstellen linearer Regressionsbeziehungen zwischen Sortierparameter (IP) und Zielgröße (MOE)

$$MOE = a_{MOE} \cdot IP + b_{MOE}$$

- Berechnung der Grenzwerte mit Hilfe der Materialkennwerte nach EN 338

$$S_{MOE} = \frac{MOE_{req} - b_{MOE}}{a_{MOE}}$$



Vergleichende Materialuntersuchungen

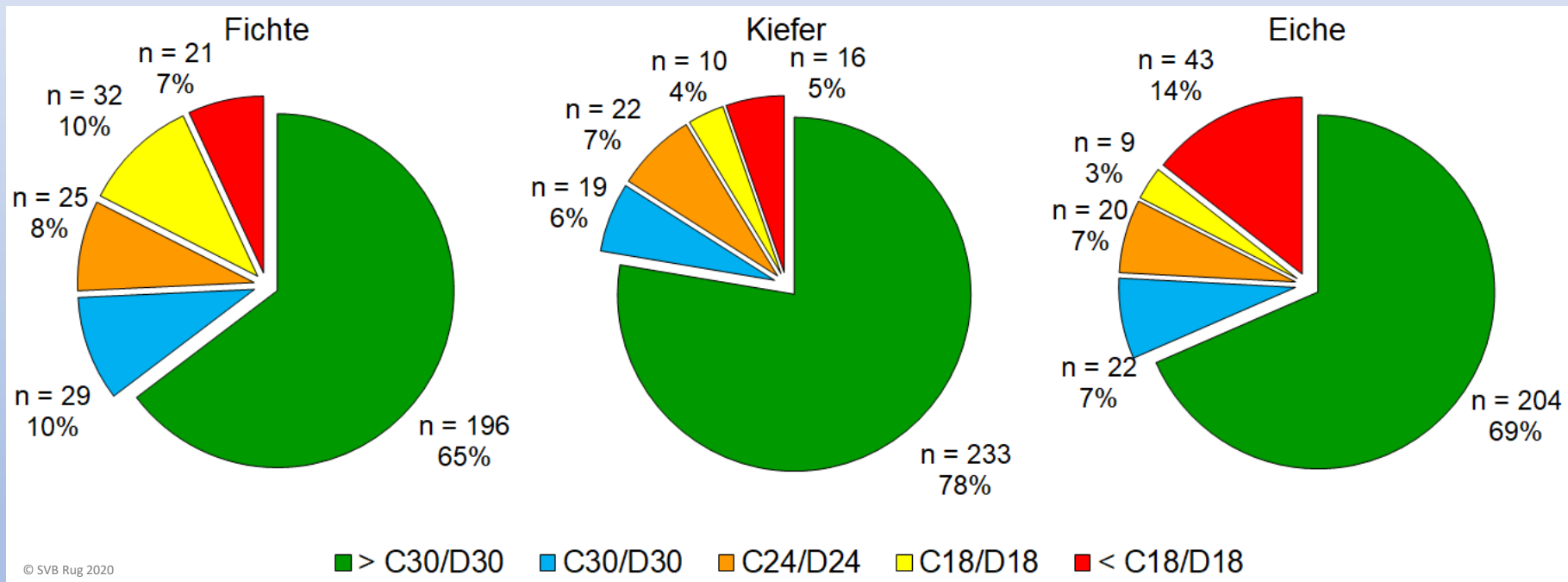
Ergebnisse & Auswertung: *Ultraschall-Impulslaufzeitmessung*

Grenzwerte für den Sortierparameter

Festigkeitsklasse n. EN 338	Fichtenholz [N/mm ²]	Kiefernholz [N/mm ²]	Festigkeitsklasse n. EN 338	Eichenholz [N/mm ²]
<C18	<9000	<9000	<D18	<9500
C18	9000	9000	D18	9500
C24	11000	11000	D24	10000
C30	12000	12000	D30	11000
C35	13000	13000	D35	12000
C40	14000	14000	D40	13000

Vergleichende Materialuntersuchungen

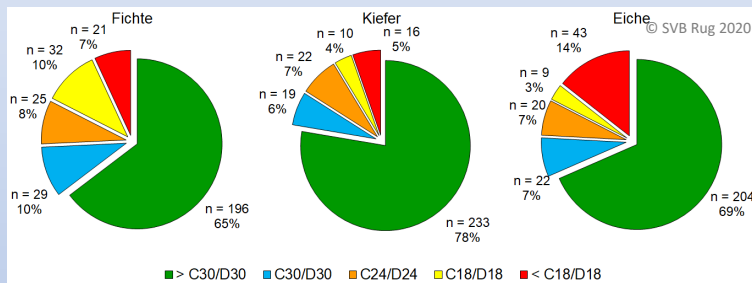
Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*





Vergleichende Materialuntersuchungen

Ergebnisse & Auswertung: *Sortierung mittels Sortierparameter*



- Relativ geringer Anteil <C18/D18
- geringerer Anteil C18/D18 – C24/D24
- Sehr großer Anteil $\geq$ C30/D30
- Insgesamt deutliche Verbesserung der Ausbeute

Die **Übereinstimmung** zwischen dem Ergebnis der Ultraschall-Sortierung und den zerstörenden Biegeversuchen beträgt **ca. 90 %!**

- Die tatsächliche **Tragfähigkeit** wurde **überwiegend richtig abgeschätzt!**
- **Kombination** mehrerer Mess- & Prüfmethoden führt zu einer deutlichen **Verbesserung der Zuverlässigkeit**



Zusammenfassung

- Die **Ultraschall-Impulslaufzeitmessung** ist für die „in-situ Festigkeitssortierung“ **anwendbar**
- Eine **zuverlässige Anwendung** ist nur bei **kombiniertem Einsatz** mit weiteren Prüfmethoden gegeben
- Eine **Erprobung** der Sortiermethode an bestehenden Holzkonstruktionen sowie in Laborversuchen an Altholz ist **erforderlich**



Bewertung der Tragfähigkeit historischer Holzkonstruktionen – Festigkeitssortierung im verbauten Zustand

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit