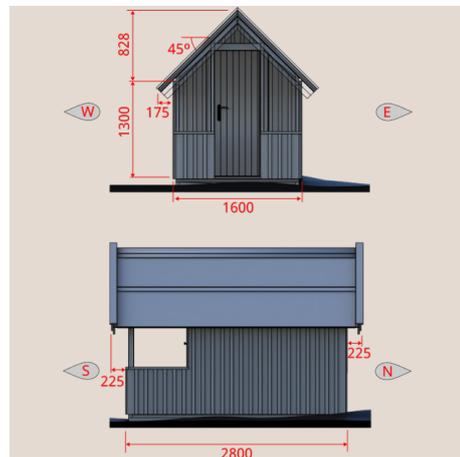


WoodLCC

Lebenszykluskostenrechnung für den Holzbau



WoodLCC – Lebenszykluskosten für den Holzbau

Endbericht für den Fachverband der Holzindustrie

Autor

Boris Forsthuber

Gefördert durch den Waldfonds der Republik Österreich

Projektmitarbeiter:innen

Brendan Nicholas Marais¹, Jonas Niklewski², Seyyed Hasan Hosseini², Richard Acquah^{3,4}, Jakub Sandak^{3,4,5}, Anna Sandak^{3,4,5}, Roja Modaresi⁶, Magnus Landaas⁶, Gry Alfredsen⁷, Villu Kukk⁸, Targo Kalamees⁸, Gerhard Grill⁹, Christian Brischke¹⁰, Philip Bester van Niekerk¹

¹Wood Biology and Wood Products, University of Göttingen, Göttingen, Germany

²Division of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, Sweden

³InnoRenew CoE, Izola, Slovenia

⁴Faculty of Mathematics, Natural Sciences and Information Technologies, University of Primorska, Koper, Slovenia.

⁵Andrej Marušič Institute, University of Primorska, Muzejski Trg 2, 6000 Koper, Slovenia

⁶Norwegian Institute of Wood Technology (NTI), Børrestuveien 3, 0373 Oslo, Norway

⁷Norwegian Institute of Bioeconomy Research (NIBIO), Division of Forests and Forest Resources, Wood Technology, 1431 Ås, Norway

⁸Department of Civil Engineering and Architecture, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, 19086 Tallinn, Estonia

⁹Holzforchung Austria - Österreichische Gesellschaft für Holzforchung, Franz Grill-Straße 7, 1030 Wien

¹⁰Thünen Institute of Wood Research, Hamburg, Germany.

Wien, 12 2024

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	3
1. Einführung	3
1.1 Verwendung von Holz im Bauwesen	3
1.2 Bisherige Möglichkeiten zur Planung der Nutzungsdauer	3
1.3 Lebenszyklus-Kostenrechnung (LCC)	7
1.4 Gebäudedatenmodellierung (BIM).....	7
1.5 Ziele des Projekts WoodLCC:	8
2. Methodik.....	8
2.1 Schätzungen der technischen Lebensdauer	8
2.2 Schätzungen der Lebenszykluskosten (LCC).....	10
2.3 Modulares Plug-in-Tool für Gebäudedatenmodellierung (BIM)	12
3. Schlussfolgerung und Ausblick	12
4. Referenzen	14

Kurzfassung

Die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) berücksichtigt alle Kosten, die während der Lebensdauer eines Produkts, eines Werks oder einer Dienstleistung anfallen und wird basierend auf der Produktlebensdauer berechnet. Das ForestValue-Projekt WoodLCC zielt darauf ab, eine robuste und möglichst präzise LCC von Holzbauteilen und Gebäuden zu ermöglichen, die mit den LCC-Berechnungsstandards EN 16627 (2015) und EN 15643-4 (2021) kompatibel ist und auf zuverlässigen und detaillierten Lebensdauermodellen basiert. Die tatsächliche Lebensdauer eines bestimmten Bauteils oder Gebäudes hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wie z.B. der Ausführungsdetails, Eigenschaften der eingesetzten Materialien, Expositionsrichtung, Intensität der Exposition, Wartung sowie der Nutzungsintensität. Dabei ist LCC einer der grundlegenden Indikatoren für die Bewertung von Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz im Bauwesen. LCC wird von immer mehr Behörden in unterschiedlichen Sektoren in der gesamten EU verlangt. Durch die Erhebung von Daten über die Kosten der Holzbauteile, Arbeits- und Installationskosten, der Abnutzung bzw. Verwitterung von Holzbauteilen und die Präferenzen der Nutzer in Bezug auf ästhetische Veränderungen wird eine ganzheitliche LCC-Schätzung für Holzbauteile ermöglicht. Angefangen von der Entwurfsphase bis hin zur End-of-Life-Phase wird durch die Ergänzung einer bereits etablierten Building Information Modelling (BIM)-Software durch ein solches LCC-Berechnungswerkzeug die Optimierung der gesamten Lebensleistung von Holzgebäuden und ihren Bauteilen ermöglicht.

1. Einführung

1.1 Verwendung von Holz im Bauwesen

Holz als Baustoff hat insbesondere hinsichtlich der CO₂-Bilanz große Vorteile gegenüber anderen Baustoffen wie Beton oder Stahl. Bäume binden während des Wachstums atmosphärisches CO₂, welches bis zur Entsorgung/Verbrennung gespeichert wird. Holz in Gebäuden hat damit einen signifikanten CO₂-Puffereffekt und kann damit auch die CO₂ Emissionen anderer Baustoffe abmildern. Insbesondere im mehrgeschossigen Hochbau wird derzeit vielfach noch immer Stahl und Beton verwendet. Angesichts der enormen globalen Herausforderungen des Klimawandels und dem wesentlichen Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen, den der Bausektor dafür leisten kann, wird die Verwendung von Holz immer mehr forciert und findet auch in Bereichen Anwendung, die bisher noch kaum in Holz ausgeführt wurden (z.B. Überkopftafeln und Mautstationen aus Holz der Firma Hasslacher). Mit einer Höhe von 86,5 m wurde kürzlich (März 2024) das aktuell höchste Holzgebäude der Welt, das Ascent MKE Building in Milwaukee, Wsconsin (USA), fertiggestellt (Forest Service und U.S. Department of Agriculture, 2022).

Neben seinen ökologischen Vorteilen verfügt Holz weiters über technologisch sehr günstige Eigenschaften, die es zu einem idealen Baustoff machen. So hat Holz ein sehr gutes Verhältnis von Festigkeit und Gewicht und verfügt über eine hohe Zug- und Druckfestigkeit. Moderne Holzbauteile erlauben auch einen hohen Vorfertigungsgrad, was besonders kurze Bauzeiten ermöglicht. Moderne Massivholzbauelemente weisen auch eine hohe Feuerbeständigkeit auf, die neue Nutzungsszenarien für den Holzbau ermöglichen. Durch die Verwendung von Holz und anderen biobasierten Baumaterialien haben Gebäude das Potenzial, als dauerhafte, vom Menschen geschaffene globale Kohlenstoffsinken zu fungieren (Churkina et al., 2020). Upton et al. (2008) haben gezeigt, dass die Netto-Treibhausgasemissionen von Häusern, die mit holzbasierten Materialien gebaut wurden, während der Nutzungsphase um 20-50 % niedriger waren als vergleichbare Gebäude aus Stahl- oder Beton.

1.2 Bisherige Möglichkeiten zur Planung der Nutzungsdauer

Die Lebenszykluskostenrechnung (LCC) eines Produkts erfordert eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Nutzungsdauer, der erwarteten Wartungsintervalle sowie der Material- und Arbeitskosten. Die Nutzungsdauer hängt dabei insbesondere von der klimatischen Umgebungsbedingungen ab. Die Einordnung der Exposition in eine Gebrauchsklasse gemäß EN 335 (2013) erfolgt hauptsächlich durch das zu erwarteten biologischen Risikos in der entsprechenden Einbausituation und Exposition. Bereits in den 1970-er Jahren wurden verschiedene Indizes und darauf aufbauende Gefährdungskarten für Holz und

Holzwerkstoffe für Nordamerika entwickelt (AWPA, 1972; REA, 1973; Scheffer, 1971). Diese Karten basierten auf den Ergebnissen verschiedener Forschungsprojekten. Auf Grundlage dieser Indizes wurde in den Folgejahren zahlreiche weitere Projekte durchgeführt, die zu einer wesentlichen Verbesserung dieser Vorhersagemodelle führten. Dazu gehören unter anderem die Projekte TimberLife (MacKenzie et al., 2013), WoodExter (Jermer, 2012; Thelandersson et al., 2011), WoodBuild (Isaksson et al., 2014), DuraTB (Pousette et al., 2017), PerformWood (Suttie et al., 2013), BIO4ever (Sandak et al., 2018), *CLICKdesign* (Suttie et al., 2019) und aktuell das Projekt Wood LCC.

Das Projekt TimberLife war zwar ein echter Meilenstein zur Verbesserung der Lebensdauervorhersage von Holzbauteilen, die Handhabung des Modells war allerdings noch recht umständlich und zeitaufwändig. Wie auch die Modelle der Nachfolgeprojekte bestand das Modell im Wesentlichen aus einem Designfehlerkatalog sowie einem Entscheidungsbaum, der dann die Lebensdauer der Nutzungsklasse weiter beeinflusste. Die gesamte Prozedur ist allerdings ein sehr zeitintensiver Prozess, da in der Entwurfsphase alle Details auf Komponentenebene zu prüfen sind. Das Nachfolgeprojekt *CLICKdesign* hat diesen Prozess bereits wesentlich vereinfacht, da nun auf Basis einer interaktiven Website (Niklewski, 2022) individuelle Schätzungen der Lebensdauer von Bauteilen vorgenommen werden konnten.

Holz ist wie alle biologischen Materialien durch Mikroorganismen abbaubar und wird daher allgemein als wenig dauerhaft angesehen. Es gibt jedoch zahlreiche Möglichkeiten, die Witterungs- und Fäulnisstabilität von Holzbauteilen zu verbessern. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Holzarten mit hoher natürlicher Dauerhaftigkeit. Andere Möglichkeiten beinhalten die Verwendung von Beschichtungen sowie Holzschutzmitteln mit biozider Wirksamkeit, aber auch Holzmodifikationsmethoden.

Die meisten in den zuvor genannten Forschungsprojekten entwickelten Lebensdauervorhersagemodelle basieren auf Dosis-Wirkungs-Modellen. Für Holzfäule wird so das Ausmaß des Pilzwachstums in Abhängigkeit der Expositionszeit unter verschiedenen Fäulnisinflüssen (z.B. kritische Feuchtigkeit und Temperatur) berechnet. Die Methodik hat ihren Ursprung in den klassischen bautechnischen Grundsätzen, wonach die auf ein Bauteil einwirkenden (statischen und dynamischen) Kräfte die Tragfähigkeit des Bauteils nicht übersteigen dürfen. Nach demselben Prinzip funktionieren auch die Dosis-Wirkungsmodelle: Auch hier darf die Widerstandsdosis des Materials die Expositionsdosis nicht übersteigen. Die Lebensdauer eines Bauteils wird berechnet, indem die Widerstandsdosis des Materials zum Erreichen eines bestimmten Grenzzustandes durch die jährliche Expositionsdosis geteilt wird (weitere Einzelheiten in Abschnitt 2.1). Hinsichtlich der Fäulnismodellierung wird davon ausgegangen, dass bei Luftkontakt die Pilzsporen immer vorhanden sind und sich bei geeigneten atmosphärischen Klimabedingungen mit einer vorhersehbaren Geschwindigkeit vermehren (Brischke und Rapp, 2008). Die Beziehung zwischen Holzfeuchte, Holztemperatur und dem daraus resultierenden oberirdischen Holzabbau ist in Abbildung 1 beschrieben. Eine ähnliche Methodik für Holz, das dem Bodenkontakt ausgesetzt ist, wurde von Marais et al. (2023) entwickelt, wobei die Bodenfeuchte und die Temperaturbedingungen als Dosis für ein Modell gegen Holzfäule verwendet wurden.

$$D_E \leq D_R \quad (1)$$

D_E = Expositionsdosis

D_R = Materialwiderstandsdosis

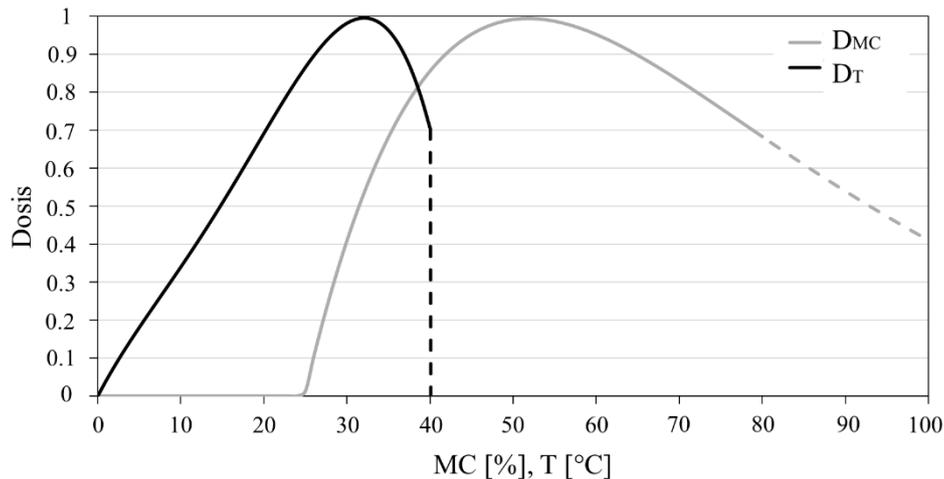


Abbildung 1: Beziehung zwischen der Holzfeuchtigkeit MC [%] und der täglichen Feuchtedosis-Komponente D_{MC} sowie zwischen der mittleren Holztemperatur T [°C] und der täglichen Temperatur-Dosis-Komponente D_T . Gestrichelte Linien bedeuten, dass die Kurve aufgrund fehlender Daten außerhalb der durch durchgezogene Linien dargestellten Bereiche unsicher ist. Die Grafik basiert auf Brischke und Rapp (2008).

$$D_E(n) = \sum_1^n D_i = \sum_1^n (f(D_T(T_i), D_{MC}(MC_i))) \quad (2)$$

$D_E(n)$ = kumulative tägliche Gesamtexpositions-dosis für den betrachteten Expositionszeitraum, n [Tage]

D_i = tägliche Gesamtdosis

D_T = temperaturbedingte Dosiskomponente

T_i = mittlere Holztemperatur an einem bestimmten Tag [°C]

D_{MC} = feuchtigkeitsinduzierte Dosiskomponente

MC_i = Holzfeuchte für den jeweiligen Tag [%]

Dieselbe Dosis-Wirkungsmodellierung können auch hinsichtlich der ästhetischen Veränderung von Holz- und Holzwerkstoffen angewendet werden. Dabei werden die Farbänderung bzw. auch die Vergrauung der Holzoberfläche modelliert. Die relevanten Variablen sind hierbei insbesondere die UV-Strahlung, relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur (Sandak et al., 2018). Dies ist auch im Zusammenhang mit Oberflächenbehandlungen wichtig, die wesentlich die ästhetische Komponente beeinflussen (Sandak et al., 2017). Neben der Verhinderung des Pilzbefalls ist auch die Aufrechterhaltung und Stabilisierung des optischen Erscheinungsbildes wesentliches Ziel. Dabei soll sich das Erscheinungsbild gegenüber dem Ausgangszustand möglichst lange nicht verändern. Die Oberflächenbehandlung mit Lacken und Lasuren sind hier ein möglicher Lösungsweg, da sie die Farbe und das Erscheinungsbild über lange Zeit erhalten können. Allerdings benötigen auch Lacke und Lasuren regelmäßige Wartung (Abbildung 2).



Abbildung 2: Links: Transparent beschichtete Lärchenholzfassade; Rechts: dieselbe Fassade 10 Jahre später nach Applikation eines Wartungsanstriches. Die Beschichtung ist aufgrund der Wartung nach 10 Jahren noch vollständig intakt.

Die im Rahmen des Projekts WoodLCC durchgeführten Befragungen an Privatpersonen zeigten die Wichtigkeit der Ästhetik von Holzbauteilen wie z.B. Fassaden auf ihre Kaufentscheidung. Es zeigten sich allerdings klar erkennbare Unterschiede hinsichtlich der Präferenzen der verschiedenen Nutzergruppen. Im Projekt Wood LCC wurde daher auch ein Modell zur Vorhersage der visuellen Veränderung von Holzgebäuden aufgrund der Bewitterung entwickelt (Abbildung 3).



Abbildung 3: Simulation der ästhetischen Veränderung von Holzgebäuden. Links: Holzgebäude im unbewitterten Zustand; Rechts: Holzgebäude nach einem Jahr simulierter Bewitterung

Die bisherigen Methoden zur Abschätzung der Lebensdauer erfolgen zwar noch manuell, haben aber bereits das Potential einer Automatisierung aufgrund eines entsprechend standardisierten Prozessablaufes. Dies bedeutet, dass eine gesamte Struktur oder ein ganzes Produkt in einem ganzheitlichen Prozess untersucht werden kann, wodurch problematische Punkte in der Konstruktion eines Gebäudes unter dem Gesichtspunkt der Lebensdauerkosten kategorisiert und die zukünftige ästhetische Veränderung visualisiert werden kann.

1.3 Lebenszyklus-Kostenrechnung (LCC)

Nach ISO 15686-5 (2017) sind die Lebensdauerkosten (LCC) jene Kosten eines Vermögenswerts („Asset“) oder dessen Teile während der Nutzungsphase. Das Konzept der Lebensdauerprognose ist in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung, da damit die während der Nutzungsphase anfallenden Instandhaltungskosten berechnet werden können.

Ein klassischer Lebenszyklus eines Produkts umfasst die Entwicklungsphase (Erfassung des Ist-Zustandes eines Gebäudes sowie die zu erwartenden Belastungen), die Konstruktionsphase (technische Analyse und Vorfertigung der Bauteile), die Bauphase, die Nutzungsphase (Zustandsüberwachung) und die Phase der Kreislaufwirtschaft (Rückbau, Wiederverwendung). Im Falle des Projekts WoodLCC steht Holz als Baustoff im Mittelpunkt. Die wirtschaftliche Leistung wird in verschiedenen Stufen für den Bausektor standardisiert. Ein Überblick über die für die europäischen Normen zur Bewertung der Gebäudeleistung relevanten Stufen ist in Abbildung 4 dargestellt. Zu den LCC-Normen mit Gebäuden im Fokus gehören 1) EN 16627 (2015) - Bewertung der wirtschaftlichen Leistung von Gebäuden, inspiriert von ISO 15686-5 (2017) und angepasst für die Nachhaltigkeitsbewertung im europäischen Kontext, und 2) EN 15643-4 (2021) Wirtschaftliche Leistung auf Rahmenebene.

Concept Level	Integrated Building Performance		
	Environmental	Social	Economic
Framework Level	EN 15643-1 Sustainability assessment of buildings: general framework		
	EN 15643-2 environmental performance	EN 15643-3 Social performance	EN 15643-4 economic performance
Building Level	EN 15978 Assessment of environmental performance of buildings	EN 16309 Assessment of social performance of buildings	EN 16627 Assessment of economic performance of buildings
	EN 15804 environmental Product Declaration		

Abbildung 4: Überblick über die europäischen Normen zur Bewertung der Gebäudeleistung auf verschiedenen Ebenen. Die wirtschaftliche Leistung wird durch EN 15643-4 (2021) und EN 16627 (2015) erfasst.

LCC ermöglicht die Optimierung der gesamten Lebensdauer von Gebäuden und anderen Strukturen und Produkten, wird aber derzeit noch nicht in vollem Umfang genutzt. Der Hauptgrund für die noch verhaltenen Nutzung ist hauptsächlich der Mangel an genauen und zuverlässigen Eingabedaten, die von Fall zu Fall eine hohe Variabilität aufweisen können. Nichtsdestotrotz erfährt LCC eine zunehmende Akzeptanz und die EU-Richtlinie 2014/24/EU über die öffentliche Auftragsvergabe fördert die Verwendung von LCC. Die Richtlinie besagt insbesondere, dass LCC bei der Vergabe von Aufträgen auf der Grundlage des Kriteriums des wirtschaftlich günstigsten Angebots (MEAT) berücksichtigt werden müssen. Das wachsende Interesse in der Baubranche und das Verständnis für die Vorteile der LCC haben dazu geführt, dass immer mehr Unternehmen des privaten Sektors die Methode anwenden, um auf standardisierte Weise über Nachhaltigkeit zu berichten. LCC wird auch von einer zunehmenden Anzahl öffentlicher Behörden in der Europäischen Union angewandt. Da LCC auf breiter Ebene angenommen wird, werden die Leitlinien derzeit verfeinert.

1.4 Gebäudedatenmodellierung (BIM)

Die Gebäudedatenmodellierung (Building Information Modelling, BIM) ist ein Prozess, der die Erstellung, Verwaltung und Nutzung digitaler Darstellungen von physischen Bauobjekten umfasst (Turk, 2016). BIM ermöglicht die Speicherung von Metadaten, den Zugriff darauf und die Interaktion damit auf Komponentenebene innerhalb eines digitalen Modells. Das Modell kann dann in eine umfassendere digitale Zwillingeanwendung für eine verbesserte Simulation und Analyse der realen Welt integriert werden. Es ist davon auszugehen, dass BIM in der Zukunft zum Standard für die Durchführung von Bauprojekten wird (Acquah et al., 2018). In Europa wird zum Beispiel für die Inspektion und Genehmigung

der Einhaltung von Bauvorschriften durch die Behörden die Integration von BIM durch die Planer erforderlich sein, um den Inspektions- und Genehmigungsprozess zu beschleunigen sowie weiters auch zu Dokumentationszwecken. Der Interoperabilitätsaspekt von BIM macht die plattformübergreifende Kompatibilität (sowohl bei der Hardware als auch bei der Software) zu einer unabdingbaren Voraussetzung für seine universelle Einführung, was bedeutet, dass der Prozessablauf unabhängig von proprietären Softwarelizenzen weiterhin erfolgreich durchgeführt werden kann.

Die Lebensdauervorhersage kann auf Komponentenebene durchgeführt werden (z.B. Eckverbindungen, Auflager usw.). Dieser Umstand macht die Integration dieser Methode in ein BIM-System ausgesprochen attraktiv, da hiermit die Lebensdauer auch von sehr komplexen Bauvorhaben rasch und zuverlässig auf Komponentenebene durchgeführt werden kann. In BIM-Modellen können überdies Umweltszenarien simuliert werden. Damit können zuverlässige Vorhersagen auf Komponentenebenen in verschiedenen Szenarien untersucht werden. BIM ermöglicht damit das Design von Gebäuden mit möglichst hoher Lebensdauer.

1.5 Ziele des Projekts WoodLCC:

Die folgenden Ziele werden im ForestValue-Projekt WoodLCC verfolgt:

- Entwicklung und Verwendung von statistischen Modellen zur Lebensdauervorhersage. Diese sollen eine zuverlässige Lebensdauerschätzungen für einzelne Holzbauteile und in weiterer Folge das gesamte Gebäude ermöglichen, die die Grundlage für das LCC ist.
- Quantifizierung der Auswirkungen unterschiedlicher Wartungs-, Reparatur- und Ersatzpläne auf die Lebensdauer und die Auswirkungen auf die LCC von Gebäuden.
- Identifizierung und Analyse potenzieller Risiken im Zusammenhang mit der Verwendung von Massivholz in der Gebäudehülle und anderen vom Außenklima beanspruchten Holzbauteile sowie der mit Schäden und Abhilfemaßnahmen verbundenen Kosten.

2. Methodik

2.1 Schätzungen der technischen Lebensdauer

Für die Abschätzung der Lebensdauer von Holzbauteilen wurde die Methoden von Niklewski et al. (2023) angewandt. Die Expositionsdosis für oberirdischen Pilzbefall (D_E) wird dabei nach Gleichung (2) auf der Grundlage der mit dem geografischen Standort verbundenen Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen für ein Referenzbrett aus Fichte (*Picea abies*) für eine bestimmte Expositionszeit in Tagen (n) berechnet. In dem von Niklewski et al. (2023) und van Niekerk et al. (2023) beschriebenen Berechnungsverfahren kann ein initialer Expositionswert (D_0) bereits einzelne Holzbauteile als exponiert oder geschützt von geographisch lokalen Regenereignissen unterscheiden. Berücksichtigt ist dabei bereits der Schutz vor direkter Bewitterung (z.B. durch Vordächer sowie der Schlagregenexposition in Abhängigkeit der Himmelsrichtung) im Parameter D_0 . Die tatsächliche Lebensdauer wird anschließend mit Hilfe von Faktoren gemäß Gleichung (3) modifiziert. In diesen Faktoren ist der Abstand der Bauteile zum Boden (k_{s1}) und ein Faktor k_{s2} der die Konstruktionsdetails berücksichtigt (z.B. Lebensdauerverkürzender Feuchtigkeitseinschluss in Anschlüssen). Diese Faktoren wurden (unter anderer Bezeichnung) bereits im Projekt DuraTB implementiert (Pousette et al., 2017, S. 30-33). Dieser Prozess kann als „virtuelle Inspektion“ verstanden werden. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 5 dargestellt. Hier ist klar zu sehen, wie die Umwelteinflüsse mit der Konstruktion interagieren und damit die Lebensdauer beeinflussen.

$$D_E = D_0 * k_{s1} k_{s2} \quad (3)$$

D_E = Expositions-dosis

D_0 = jährliche Expositions-dosis, die sich aus dem geografischen Standort für ein Referenzbrett aus Fichte ergibt

k_{s1} = Faktor, der den Abstand zum Boden berücksichtigt

k_{s2} = Faktor zur Berücksichtigung von Konstruktionsdetails (z. B. Feuchtigkeitseinschluss an Kontaktflächen)

Das Gegenstück zur Expositions-dosis (D_E) ist die Materialbeständigkeits-dosis (D_R). D_R wird durch Gleichung (4) nach Isaksson et al. (2014) berechnet, wobei D_{crit} die kritische Dosis (Tage) ist, die einer Fäulnisbewertung von 1 gemäß EN 252 (2015) entspricht, k_{wa} (-) ist ein Faktor, der die Wasseraufnahmekapazität des Materials berücksichtigt. k_{inh} (-) ist der Faktor, der die materialspezifische Fäuleresistenz (z.B. natürliche Dauerhaftigkeit bestimmten Holzarten) berücksichtigt. Es gibt aus Vorprojekten bereits einen umfangreichen Datensatz zur Materialbeständigkeit (D_R), der eine lange Liste von Holzarten und Behandlungen (Brischke et al., 2021), in der die jeweilige Fäulnisresistenz in Dosistagen angegeben. Bei diesem Datensatz handelt es sich um die aggregierten Ergebnisse zahlreicher Versuche, bei denen die Resistenz die Anzahl der Tage unter idealen Pilzbedingungen ist, bis Fäulnisgrad 1 gemäß EN 252 (2015) erreicht wird.

$$D_R = D_{crit} * k_{wa} * k_{inh} \quad (4)$$

k_{wa} = Faktor für die Wasseraufnahme, der als arithmetisches Mittel der Faktoren für die Flüssigwasseraufnahme, die Dampfaufnahme, die Wasserabgabe und die Kapillarwasseraufnahme berechnet wird

D_{crit} = kritische Dosis entsprechend einer Zerfallsrate von 1 nach EN 252 (2015)

k_{inh} = Faktor, der die dem Material innewohnenden Zerfallseigenschaften berücksichtigt

Schließlich kann die Lebensdauer in Jahren eines Holzbauteils an einem bestimmten geografischen Ort nach der folgenden Gleichung (5) berechnet werden, wobei die Materialbeständigkeit (D_R) in Dosis-Tagen geteilt wird durch die Expositionsbedingungen (D_E). Dieses Grundprinzip ist auch auf andere Degradationsmechanismen wie z.B. der Bewitterung von Holzbauteilen anwendbar, die lediglich zu einer ästhetischen Änderung der Oberfläche führen. Die Expositions-dosis (D_E) und die Material-dosis (D_R) könnten je nach den jeweiligen Szenarien (Technische Lebensdauer oder ästhetische Lebensdauer) angepasst werden.

$$SL = D_R / D_E \quad (5)$$

SL = Nutzungsdauer [Jahre]

D_R = Widerstands-dosis, die das Holzmaterial benötigt, um einen bestimmten Grenzzustand zu erreichen [Dosistage]

D_E = Expositions-dosis [Dosistage]

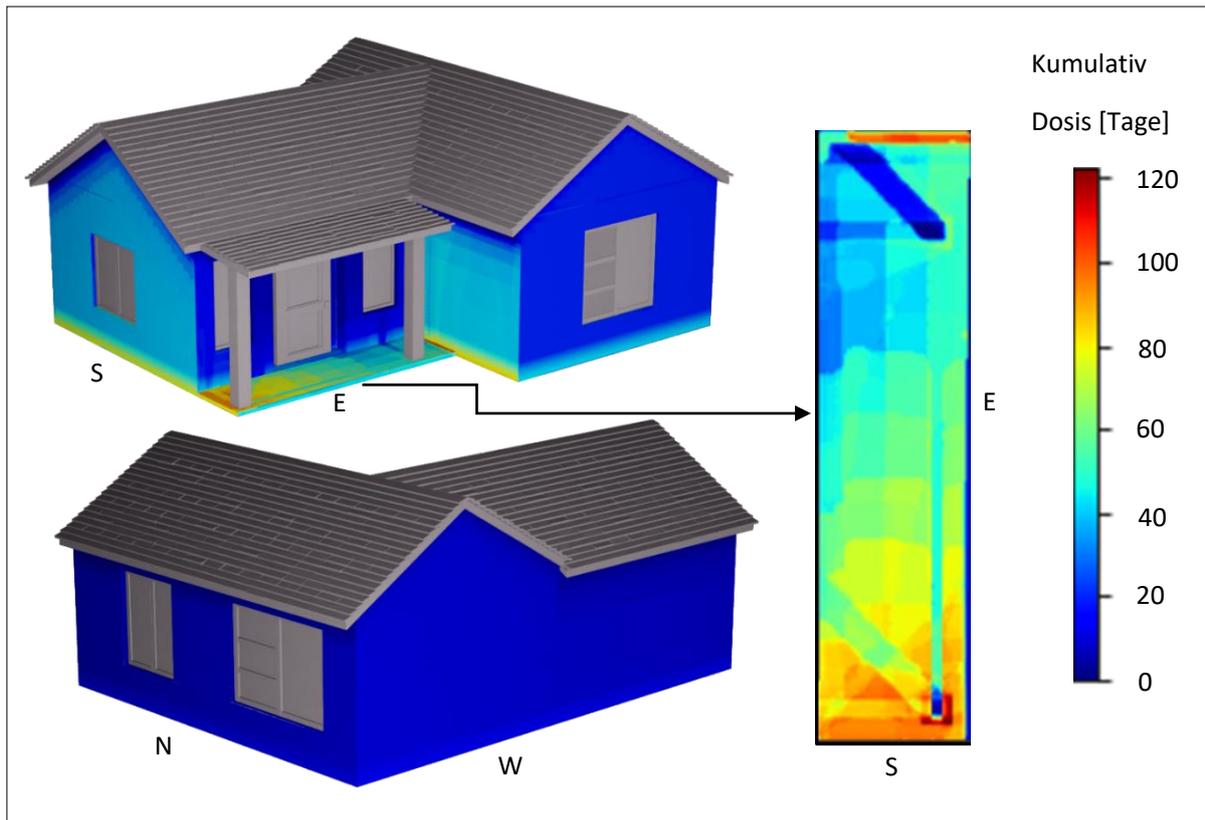


Abbildung 5: Illustration des Konzepts der virtuellen Inspektionsdosiskarte (Farbskala), die über eine importierte Gebäudegeometrie gelegt wird, wobei die Vorderseite des Hauses (d. h. die Haustür) in Richtung Osten zeigt und den Expositionsbedingungen ausgesetzt ist, die mit der Ausbreitung von Pilzbefall einhergehen. Der für dieses Beispiel gewählte geografische Expositionsort wurde willkürlich gewählt und dient nur der Veranschaulichung. Die Auswirkung unterschiedlicher Konstruktionsdetails auf die Dosis ist an der Farbskala zu erkennen, wobei Effekte wie Feuchtigkeitseinschluss in der Nähe von Schichtverbindungen, Schutz vor Schlagregen und Abstand zum Boden berücksichtigt werden. Die vordere Belagsfläche ist in der Draufsicht dargestellt. Abkürzungen: N=Nord, E=Ost, W=West, S=Süd.

2.2 Schätzungen der Lebenszykluskosten (LCC)

LCC erfordert eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Lebensdauer, der zu erwarteten Wartungsintervalle sowie der Kosten für Baumaterialien und Arbeit. Gleichungen (6) - (9) werden im Projekt WoodLCC verwendet, um die LCC für beliebige Komponente des Gebäudebestands zu errechnen. Bei der Berechnung wird nur das Holz der Gebäudehülle und Tragstruktur berücksichtigt. Die folgenden Bauelemente werden in der LCC-Berechnung definiert:

- Tragsystem
- Außenwände
- Fassade
- Türen
- Fenster
- Außendach (flach oder geneigt)
- Tragsystem der Dachterrasse
- Reetdach
- Balkon

Alle Preisdaten und Montagezeiten für jedes Produkt werden einem jährlich aktualisierten Preiskatalog entnommen. Für Versuchszwecke zur Durchführung von LLC-Berechnungen in WoodLCC wurden diese Preisdaten von Norsk Prisbok (2023) übernommen. Diese Daten werden dann für das ausgewählte europäische Land mit Hilfe von länderspezifischen Arbeitskosten- (Eurostat, 2021a) und Materialkostenindizes (Eurostat, 2021b), umgerechnet in die interessierende Währung, modifiziert.

Inflations- und Indexanpassungen werden für die Berechnung der Wartungs- oder Reparaturkosten berücksichtigt, die während der gesamten Lebensdauer des Gebäudes anfallen. Ein Materialpreisindex für verschiedene Holzarten und -behandlungen, wie er in Brischke et al. (2021) aufgeführt ist, wird einbezogen.

Die Gesamtbaukosten werden für das ausgewählte Land und die ausgewählten Bauprodukte berechnet. Die Instandhaltungskosten, einschließlich der Kosten für größere Austauschmaßnahmen, werden durch Schätzung der Austauschintervalle und unter Berücksichtigung der künftigen Preiserhöhungen berechnet. Der Benutzer hat die Möglichkeit, eine Zins- und Eskalationsrate (Indexanpassung) zu wählen. Die anfänglichen Baukosten des Gebäudes sind die Summe der Gesamtkosten der einzelnen Gebäudeelemente, wie in Gleichung (6) dargestellt. Die anfänglichen Baukosten können somit einfach als die Summe der Kosten aller Gebäudeelemente ausgedrückt werden i , Gleichung (7).

$$\theta_i = p_{ISY,i} * \gamma_i * \delta_{C,i} * \tau_i + L_C \quad (6)$$

$$IBC = \sum \theta_i \quad (7)$$

θ_i = Kosten des Bauelements i

$p_{ISY,i}$ = Preis des Materials

γ_i = Variationsfaktor des Materialpreises in Abhängigkeit von der Art und Behandlung eines Elements

$\delta_{C,i}$ = relatives Preisniveau, das die Preisunterschiede zwischen den Ländern zeigt, basierend auf dem Eurostat-Preisniveauindex 2021 für Möbel unter Verwendung von Daten (Eurostat, 2021b)

τ_i = Währungsfaktor

L_C = lokale Arbeitskosten, durchschnittliche Eurostat-Arbeitskosten pro Stunde für 2021 (Eurostat, 2021a).

IBC = ursprüngliche Baukosten

Zur Abschätzung der während der gesamten Lebensdauer des Gebäudes anfallenden Instandhaltungskosten wird die geschätzte Lebensdauer jedes Elements, das in Kontakt mit dem Außenklima steht, nach Niklewski et al. (2023) berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass nicht direkt exponierte tragende Bauteile und Elemente die gleiche erwartete Lebensdauer haben wie das Gebäude selbst, was einem Standardwert von 60 Jahren entspricht.

Gegenwärtig werden Instandhaltungskosten nur im Zusammenhang mit der Beendigung oder dem Austausch des Bauteils berücksichtigt, was durch die technische Lebensdauer gemäß Gleichung (5) oben bestimmt wird. Die Bewertung der Anzahl der Bauteile, die das Ende ihrer Lebensdauer innerhalb des 60-Jahres Zeitraums erreichen, führt zu Wartungskosten. Derzeit wird daran gearbeitet, Merkmale einzubeziehen, die Wartungen (d. h. die Wiederherstellung von Funktionen, wie z. B. das Aussehen oder den Feuchtigkeitsschutz) infolge der Exposition berücksichtigen.

Zur Berechnung der Wartungskosten werden die Kostenfaktoren „Einfacher Zinseszinsseffekt“ und „Einfacher Barwert“ (SCA, SPV^*) verwendet, um die gestiegenen zukünftigen Kosten zu berücksichtigen. „Single Compound Amount“ (SCA) ist der geschätzte Preisfaktor unter Berücksichtigung der erwarteten Inflationsrate, ausgedrückt durch Gleichung (8). Der SCA -Faktor wird verwendet, um den Preis eines Elements in der Periode n zu bestimmen unter Berücksichtigung einer Eskalationsrate e . Die "Eskalationsrate" bezieht sich auf den Preisanstieg einer bestimmten Ware oder Dienstleistung (z. B. Holzprodukte). Um den Gegenwartswert zu bestimmen, der dem SCA in laufenden Preisen entspricht, wird der Zinssatz i angewandt, was zum modifizierten einzigen Gegenwartswert SPV^* führt, der durch Gleichung (9) ausgedrückt wird. In der Praxis wird dieser Prozess für jedes Element in einem Gebäudeentwurf durchgeführt.

$$SCA = (1 + e)^n \quad (8)$$

$$SPV^* = \left(\frac{1 + e}{1 + i} \right)^n \quad (9)$$

SCA = einmalig zusammengesetzte Menge

SPV = einfacher Gegenwartswert

i = Zinssatz oder Inflationsrate [%]

e = Eskalationsrate [%]

n = Jahre in die Zukunft, für die die Wartungskosten berechnet werden

2.3 Modulares Plug-in-Tool für Gebäudedatenmodellierung (BIM)

Zu Demonstrationszwecken wurde der aktuelle Prototyp des WoodLCC-BIM-Plug-in-Tools für die Verwendung in der Software Autodesk Revit (Autodesk, 2024) entwickelt. Autodesk Revit ist eine proprietäre BIM-Software für Architekten, Bauingenieure, Maschinenbau-, Elektro- und Sanitärtechniker sowie die verschiedenen Handwerker, die die Bauarbeiten vor Ort ausführen. Autodesk Revit verfügt über eine umfassende Anwendungsprogrammierschnittstelle (API). Diese API ermöglicht es, das modulare Plug-in-Tool von WoodLCC, das aus dem in diesem Artikel beschriebenen Prozessablauf besteht, zu erstellen und zu integrieren, um es auf einem Gebäudeentwurf aufzurufen und auszuführen. Abbildung 6 unten zeigt ein Beispiel für die Schnittstelle des WoodLCC-Tools, das auf einen Gebäudeentwurf in Autodesk Revit angewendet wird. Es kann mit den einzelnen Komponenten des Gebäudeentwurfs interagiert werden, und die Lebensdauer sowie die LCC-Berechnungen können dann durchgeführt werden. Als Teil der Prozessvalidierung für WoodLCC wurde ein BIM-Modell (Abbildung 6) eines Fallstudiengebäudes erstellt. Die Fallstudienstruktur wurde repliziert und an 4 verschiedenen Orten zur Überwachung bis zum Ende des Projekts ausgestellt.

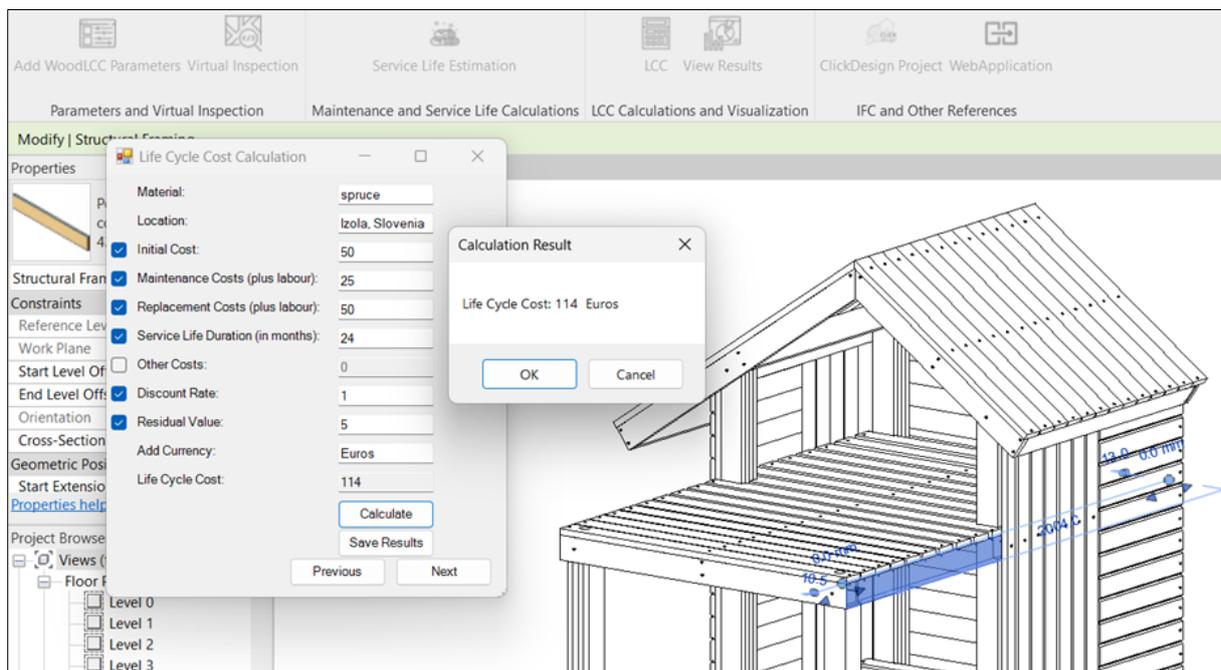


Abbildung 6: Screenshot-Beispiel für das WoodLCC-Plug-in-Tool in Autodesk Revit, mit dem die Lebensdauer und anschließende LCC-Berechnungen für einzelne Komponenten eines Gebäudeentwurfs durchgeführt werden können. In diesem Beispiel handelt es sich bei dem Gebäudeentwurf um ein BIM-Modell einer vereinfachten Spielplatzstruktur mit Beispielwerten, die für die LCC-Berechnungen verwendet werden.

3. Schlussfolgerung und Ausblick

Eine große Schwäche der LCC ist das Fehlen detaillierter und relevanter Informationen über die geschätzte Lebensdauer und die erwarteten Wartungs-, Reparatur- oder Austauschintervalle. Daher könnten LCC-Schätzungen für Holzbauteile von detaillierteren Schätzungen der Nutzungsdauer profitieren. In diesem

Bericht wurden Datenquellen, Berechnungsmethoden und ein Prozessablauf zur LCC-Berechnung für Holzgebäude vorgestellt. Der Ansatz konzentriert sich auf verbesserte Lebensdauereingangsdaten, die eine präzisere und robustere LCC einzelner Holzkomponenten eines Gebäudes ermöglichen.

Weitere Aspekte, die WoodLCC zu verbessern versucht, sind:

- Einbeziehung der ästhetischen Lebensdauer (Beschichtungen), um den Nutzern Hinweise darauf zu geben, wie sich ihre Entscheidungen bei Renovierungsarbeiten auf die aktuellen und zukünftigen Kosten auswirken könnten.
- Holzbauteile im Erdkontakt - die Modellierung der Fäulnis in der Erde weist genügend Ähnlichkeiten mit der oberirdischen Fäulnismodellierung auf, um sie in den in diesem Artikel dargestellten Prozessablauf zu übernehmen.
- Untersuchung der Grenzzustände mittels Fragebogenerhebungen - besseres Verständnis der Präferenzen der Nutzer in Bezug auf die Akzeptanz der Verschlechterung des Aussehens des Holzmaterials.
- Validierung von Lebensdauer- und LCC-Schätzungen auf der Grundlage von Inspektionen realer Bauwerke und Fallstudien, wobei ein Bauwerk das in Abbildung 4 dargestellte vereinfachte Holzgebäude ist.
- Kontinuierliche Aktualisierung der Funktionalität des BIM-Plug-in-Tools durch Hinzufügen neuer Bauelemente, wie z. B. Verbundwerkstoffe, Holz-Material-Kombinationen, wie z. B. Holz und Gips.

4. Referenzen

- Acquah, R., Eyiah, A.K., Oteng, D., 2018. Akzeptanz von Building Information Modelling: eine Umfrage unter Fachleuten in der Bauindustrie in Ghana. (ITcon) 23, 75-91.
- Autodesk, 2024. REVIT FOR ARCHITECTURE BIM-Tools für Architekten Entwerfen, dokumentieren, koordinieren, verwalten und liefern Sie Architekturprojekte mit Revit® [WWW-Dokument]. URL <https://www.autodesk.eu/products/revit/architecture>
- AWPA, 1972. Wood Preservers' Association Proceedings, in: Proceedings of the 68th Annual Meeting of the American Wood Preservers' Association. American Wood Preservers' Association, Washington, DC.
- Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Conti, E., Cookson, L., Emmerich, L., Flæte, P.O., Fortino, S., Francis, L., Hundhausen, U., Irbe, I., Jacobs, K., Klamer, M., Kržišnik, D., Lesar, B., Melcher, E., Meyer-Veltrup, L., Morrell, J.J., Norton, J., Palanti, S., Presley, G., Reinprecht, L., Singh, T., Stirling, R., Venäläinen, M., Westin, M., Wong, A.H.H., Suttie, E., 2021. Modelling the Material Resistance of Wood-Part 3: Relative Resistance in above- and in-Ground Situations-Results of a Global Survey. *Forests* 12, 18. <https://doi.org/10.3390/f12050590>
- Brischke, C., Rapp, A.O., 2008. Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen Holzfeuchte, Holztemperatur und Pilzbefall, ermittelt für 23 europäische Feldversuchsstandorte. *Wood Sci Technol* 42, 507-518. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C.P.O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B.K., Graedel, T.E., Schellnhuber, H.J., 2020. Gebäude als globale Kohlenstoffsенke. *Nat Sustain* 3, 269-276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- EN 252:2015 Feldtestverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung von Holzschutzmitteln bei Bodenkontakt, 2015. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, Belgien.
- EN 335:2013 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzwerkstoffen - Gebrauchsklassen: Definition, Anwendung auf Massivholz und Holzwerkstoffe, 2013. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, Belgien.
- EN 15643-4:2021 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung von Gebäuden - Teil 4: Rahmen für die Bewertung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit, 2021. Europäisches Komitee für Normung (CEN).
- EN 16627:2015 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der wirtschaftlichen Leistung von Gebäuden - Berechnungsmethoden, 2015. Europäisches Komitee für Normung (CEN).
- Eurostat, 2021a. Arbeitskostenindex (Ici) [WWW-Dokument]. eurostat. URL https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/EN/Ici_esqrs.htm (Zugriff am 3.7.24).
- Eurostat, 2021b. Preisniveau für Energie, Möbel, Haushaltsgeräte und Unterhaltungselektronik [WWW-Dokument]. eurostat. URL https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Comparative_price_levels_of_consumer_goods_and_services (Zugriff am 3.7.24).
- Forstdienst, U.S. Landwirtschaftsministerium, 2022. Weltweit höchstes Holzgebäude eröffnet [WWW-Dokument]. URL <https://www.fs.usda.gov/inside-fs/delivering-mission/apply/worlds-tallest-timber-building-opens#:~:text=WISCONSIN%E2%80%942025%20stories%20high,Norway's%20Mj%C3%B6sa%2018%2Dstory%20tower.>
- Hansen, R.N., Eliassen, J.L., Schmidt, J., Andersen, C.E., Weidema, B.P., Birgisdóttir, H., Hoxha, E., 2024. Umweltfolgen der Umstellung auf den Holzbau: The case of Denmark. *Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren* 46, 54-67. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.014>

- Isaksson, T., Thelandersson, S., Jermer, J., Brischke, C., 2014. Beständighet för utomhusträ ovan mark (No. TVBK-3066). Research Institutes of Sweden (RISE), Borås, Schweden.
- ISO 15686-5:2017 Gebäude und bauliche Anlagen - Nutzungsdauerplanung - Teil 5: Lebenszykluskostenberechnung, 2017. Internationale Organisation für Normung, Geneve, Schweiz.
- Jermer, J. (Hrsg.), 2012. WoodExter - Lebensdauer und Leistung von oberirdischem Holz im Außenbereich - Abschlussbericht.
- MacKenzie, C., Wang, C.-H., Leicester, R.H., Foliente, G.C., Nguyen, M.N., 2013. Timber service life design: design guide for durability. Forest and Wood Products Australia, Victoria.
- Marais, B.N., Schönauer, M., Van Niekerk, P.B., Niklewski, J., Brischke, C., 2023. Modellierung des Holzverfalls im Boden unter Verwendung von Zeitreihen aus der 5. europäischen Klimareanalyse (ERA5-Land). Europäische Zeitschrift für Fernerkundung 56, 14. <https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2264473>
- Niklewski, J., 2022. Clickdesign [WWW-Dokument]. URL <https://jklewski.github.io/CLICKdesign/>
- Niklewski, J., Acquah, R., Van Niekerk, P.B., Hosseini, S.H., Sandak, A., Sandak, J., 2024. Modellierung des Fäulnisrisikos von Außenholz anhand detaillierter 3D-Geometrien, in: Proceedings of the 5th Forum Wood Building Baltic 2024, 26-28 February 2024. Tallin, Estland, S. 138-139.
- Niklewski, J., Sandak, J., van Niekerk, P.B., Brischke, C., Acquah, R., Sandak, A., 2023. Vereinfachte Umweltanalyse der langfristigen Leistung von Holzverkleidungen und Terrassendielen. Vorgestellt auf der World Conference on Timber Engineering.
- Norconsult Digital AS, 2023. Norsk Prisbok [WWW-Dokument]. Norsk Prisbok. URL <https://www.norskprisbok.no/>
- Pousette, A., Malo, K.A., Thelandersson, S., Fortino, S., Salokangas, L., Wacker, J., 2017. Durable Timber Bridges Final Report and Guidelines (SP Rapport No. 2017:25). RISE Research Institutes of Sweden.
- REA, 1973. Rural Electrification Association Pole Performance Study (Personalbericht). US-Landwirtschaftsministerium, Washington, DC.
- Sandak, A., Sandak, J., Brzezicki, M., Kutnar, A., 2019. Bio-based building skin. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY.
- Sandak, A., Sandak, J., Dimitriou, A., Burud, I., Thiis, T., Gobakken, L.R., Ormondroyd, G.A., Kraniotis, D., 2017. Bewertung und Überwachung des ästhetischen Erscheinungsbildes von Baubiomaterialien während der Nutzungsdauer. Präsentiert bei den WIT Transactions on Ecology and The Environment, Sustainable Development and Planning, 226, Bristol, UK, S. 527-536. <https://doi.org/10.2495/SDP170461>
- Sandak, A., Sandak, J., Grossi, P., Petrillo, M., 2018. Ein Simulations- und Modellierungstool für das ästhetische Erscheinungsbild der Fassade - BIO4ever Projektansatz, in: Proceedings of the COST Action TU1403 - Adaptive Facades Network Final Conference: Facade 2018 - Adaptive! Lucerne University of Applied Sciences and Arts, 26-27 November 2018. Lucerne, Switzerland, pp. 337-346.
- Scheffer, T.C., 1971. A Climate Index for Estimating Potential for Decay in Wood Structures Above Ground. For. Prod. J. 21, 25-31.
- Suttie, E., Brischke, C., Englund, F., Heisel, E., Jermer, J., Lorenzo, D., Polášek, M., Thelandersson, S., van Acker, J., 2013. Leistungsnormen für Holz im Bauwesen - Erfüllung der Anforderungen an die Nutzungsdauer IRG/WP 13-20537. Präsentiert auf der 44. Jahrestagung der International Research Group on Wood Protection, Stockholm, Schweden.

- Suttie, E., Brischke, C., Frühwald Hansson, E., Fortino, S., Sandak, J., Kutnik, K., Alfredsen, G., Lucas, C., Stirling, R., 2019. Performance based specification of wood - Introducing project CLICKdesign, in: IRG Annual Meeting. p. 10.
- Thelandersson, S., Isaksson, T., Frühwald Hansson, E., Toratti, T., Viitanen, H., Grill, G., Jermer, J., Suttie, E., 2011. Lebensdauer von Holz in oberirdischen Außenanwendungen Konstruktionsrichtlinie (TVBK Nr. 3060). Universität Lund.
- Turk, Ž., 2016. Zehn Fragen zur Gebäudedatenmodellierung. Bauen und Umwelt 107, 274-284. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.001>
- Upton, B., Miner, R., Spinney, M., Heath, L.S., 2008. Die Treibhausgas- und Energieauswirkungen der Verwendung von Holz anstelle von Alternativen im Wohnungsbau in den Vereinigten Staaten. Biomasse und Bioenergie 32, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.07.001>
- van Niekerk, P.B., Niklewski, J., Hosseini, S.H., Marais, B.N., Frimannslund, I., Thiis, T.K., Brischke, C., 2023. Simulationen von Mikroklimata für holzerstörende Pilze in der bebauten Umwelt mit Hilfe von Umweltanalysen, in: Proceedings IRG Annual Meeting (ISSN 2000-8953). Vorgestellt auf der Internationalen Forschungsgruppe für Holzschutz, Cairns, Australien.