spezial | JULI 2023



spezial

Grünbrücken

Studie zu Querungshilfen mit einem Tragwerk aus Eichen-Brettschichtholz

Impressum

Herausgeber:

Qualitätsgemeinschaft Holzbrückenbau e.V. Am Geißberg 14 71292 Friolzheim info@holzbrueckenbau.com

Autor:

B.Eng. Holzingenieurwesen Franz Büsing Ingenieurbüro Miebach, Lohmar

Redaktion:

Arnim Seidel, Düsseldorf

Zwischenlektorat:

Marc Wilhelm Lennartz, Polch-Ruitsch

Gestaltung:

Schöne Aussichten: Oliver Iserloh, Düsseldorf

gefördert durch:

Waldklimafonds

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nuklerare Sicherheit und Verbraucherschutz Die technischen Informationen dieser Schrift entsprechen zum Zeitpunkt der Drucklegung den anerkannten Regeln der Technik. Eine Haftung für den Inhalt kann trotz sorgfältigster Bearbeitung und Korrektur nicht übernommen werden.

Die Wortmarke INFORMATIONSDIENST HOLZ ist Eigentum des Informationsverein Holz e.V., Humboldtstraße 45, 40237 Düsseldorf, www.informationsvereinholz.de www.informationsdienst-holz.de

Erschienen: 7/2023 ISSN-Nr. 0446-2114



Gefördert durch:

Gefördert durch:

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages





aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Diese Broschüre ist im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt "Grünbrücken mit einem Tragwerk aus Eichen-Brettschichtholz" entstanden. Projektträger war die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR).

Anmerkung:

Wir legen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung der Geschlechter. In diesem Zusammenhang weisen wir darauf hin, dass in der vorliegenden Publikation zugunsten einer besseren Lesbarkeit von Texten und Tabellen das generische Maskulinum sowie geschlechterneutrale und feminisierte Sprachformen Verwendung finden. In jedem Fall gelten die gewählten Sprachfassungen für alle Geschlechter.

Inhalt

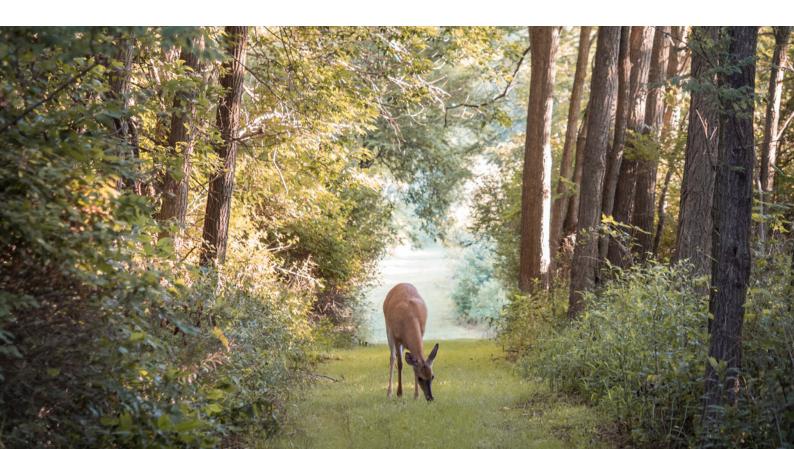
Seite 4		_ Freie Wildbahn auf grünen Brücken
6 6 7 7 8 8 8 10 10	1.1	_ Einleitung _ Die Notwendigkeit von Querungshilfen _ Die Zerschneidung der Landschaft _ Eine Lösung: Querungshilfen _ Grünbrücken und Landschaftstunnel _ Biotopvernetzung _ Bedarf an Querungshilfen _ Eine Grünbrücke aus Laubholz als Pilotprojekt _ Beispiel: Grünbrücken-Projektstandort Sankt Augustin (NRW) _ Ökologische Anforderungen an die Querungshilfe _ Technische Randbedingungen für den Entwurf
14 14 18 20 21 25 25 26 27 27 29 31 32 34	22.12.22.3	Entwicklung einer Grünbrücke mit einem Tragwerk aus Laubholz Technische Unterschiede von Laubholz (LH) und Nadelholz (NH) Festlegung einer geeigneten Holzart Variantenstudie Ermittlung der Vorzugsvarianten Ergebnis der Variantenstudie Ausbildung der Entwürfe im Detail Traglasten und Ausstattungselemente Konstruktiver Holzschutz Anforderungen des Korrosionsschutzes Leitdetails Bauwerksabdichtung und Wasserführung Leitdetail Lageranschluss Bogentragwerke Leitdetail Firstgelenk Dreigelenkbogen Leitdetails Zollinger-Schalentragwerk Sicht- und Lärmschutzwände
35 35		_ Literatur _ Bildnachweis

Vorwort

Freie Wildbahn auf grünen Brücken

Die Straße ist der dominierende Verkehrsträger in Deutschland. Stark befahrene Bundesstraßen und Autobahnen durchschneiden vielerorts die Lebensräume von Tier- und Pflanzenarten. Einen geschützten Raum zur sicheren Überwindung dieser Hindernisse bietet der Bautypus der Grünbrücke. Die in dieser Veröffentlichung vorgestellte Studie untersucht anhand bewährter Bautechniken des Ingenieurholzbaus mehrere Konstruktionsvarianten für Grünbrücken und bewertet sie hinsichtlich ihrer Praktikabilität. Neu ist hierbei die explizite Nutzung von Eichenholz für das Tragwerk. Das Ergebnis der Studie belegt das zukunftsweisende Potenzial dieser Holzart sowie im Besonderen ihre wirtschaftliche Bedeutung für die Bauaufgabe.

Die drängende Anpassung der Wälder an den Klimawandel fordert nicht nur ein Umdenken innerhalb der Forstwirtschaft, sondern auch bei der holzverarbeitenden Baubranche. Die bisher dominierende Nutzung von Nadel-Brettschichtholz (BSH) im Ingenieurholzbau zeigt angesichts dieser Herausforderung eine Schwäche auf: Nadelholz ist an vielen Standorten in Mitteleuropa anfällig und wenig klimaresistent. Eine verstärkte industrielle Nutzung von Laubhölzern würde dabei das wirtschaftliche Interesse an standorttypischen und resilienten Misch- und Dauerwäldern begünstigen, die darüber hinaus einen großen Mehrwert für die Biodiversität liefern.



Laubholz weist gegenüber Nadelholz meist bessere mechanische Eigenschaften auf und besitzt in vielen Fällen eine höhere natürliche Dauerhaftigkeit. Trotz dieser Tatsache ist die Nutzung von Laubholz im Baugewerbe derzeit noch von untergeordneter Bedeutung, da sie eher auf ästhetische Wünsche abzielt als auf konstruktive oder finanzielle Vorteile. Der aktuelle Stand von Forschung und Technik belegt hingegen gerade im Bereich des Ingenieurholzbaus das besondere Leistungsvermögen von Laubholz.

Weiterentwicklungen bei der Herstellung und bei der internationalen Normung können sich auch günstig auf die Preisstruktur auswirken. Für Fichten-Brettschichtholz existiert neben der "Sichtqualität" auch die "Nicht-Sichtqualität" oder "Industriequalität", die ein gewisses Maß an optischen Makeln ohne Beeinflussung der Festigkeiten zulässt. Sollten sich in Zukunft diese Qualitätsmerkmale auch normativ gestützt für Laubhölzer nutzen lassen, würden sich die momentan noch große Preisspanne zwischen Nadel- und Eichen-Brettschichtholz deutlich reduzieren, sodass sich Konstruktionen aus Laubholz zunehmend als finanziell konkurrenzfähig erweisen.

Die vorliegende Veröffentlichung ist im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt "Grünbrücken mit einem Tragwerk aus Eichen-Brettschichtholz" entstanden. Zu den Ergebnissen dieser Arbeit zählen mehrere umsetzungsfähige Entwurfsalternativen, die der Baubranche das zukunftsweisende Potenzial von Eichenholz aufzeigen. Sie beruhen auf Erkenntnissen aus bereits gebauten Grünbrücken, deren Tragwerk im Wesentlichen aus Lärchenholz besteht 1. Auch wenn sich die dargestellten Leitdetails und Konstruktionsweisen auf die explizite Nutzung von Eichen-Brettschichtholz beziehen, haben sie ebenso Gültigkeit für die Planung von Grünbrücken mit den bisher gebräuchlichen Holzarten.

Die Veröffentlichung dient nicht nur als Grundlage für die Arbeit von Fachplanern, sondern stellt darüber hinaus eine Entscheidungshilfe für kommunale Bauträger und begleitende Planungsbeauftragte für Landschafts- und Umweltbelange dar. Gleichzeitig dient diese Broschüre auch als Informationsquelle für die beteiligten Gremien und Ausschüsse, die üblicherweise an den Entscheidungsprozessen beteiligt sind. Betrifft die vier deutschen Grünbrücken in Holzbauweise bei Wilmshagen, Luckenwalde, Thyrow und Nettersheim

1_Einleitung

1.1 _ Die Notwendigkeit von Querungshilfen

Querungshilfen werden eingesetzt, um die wesentlichen Verbindungsachsen zwischen Lebensräumen und Schutzgebieten für Tiere und Pflanzen zu erhalten, zu revitalisieren oder zu entwickeln. Diese Lebensräume werden in der heutigen Zeit mehr denn je durch Bebauungen aller Art begrenzt und durch Verkehrswege zertrennt.

Abb. 1:
Grünbrücke in
Holzbauweise bei Thyrow



Die Zerschneidung der Landschaft

Die Verinselung von Lebensräumen durch deren Zerschneidung und Begrenzung führt zu einer genetischen Verarmung und fördert die Inzucht in den kleinen Populationen. Solche Kleinstpopulationen sind weniger resilient gegenüber plötzlich auftretenden Veränderungen, so dass sich diese zum Beispiel infolge einer Wetterkatastrophe deutlich schlechter regenerieren können. Die Folge ist, dass kleine Gruppen ohne den Austausch mit anderen Populationen oder Ausweichmöglichkeiten in andere Lebensräume zunehmend vom Aussterben bedroht sind.

Die Zerschneidungswirkung von Verkehrswegen führt darüber hinaus zu hohen Verlusten durch Unfälle mit Wildtieren, wobei stark befahrene Fernstraßen und Autobahnen diese Problematik besonders für größere Säugetiere und letztlich auch den Menschen verschärfen.

So summierten sich die Fallwildzahlen (Tod durch andere Einwirkungen als Jagd) im Jahr 2019/20 auf ca. 238.000, wovon der überwiegende Teil im Straßenverkehr zu Tode gekommen ist [1]. Diese Zahl ist im Vergleich zum gleichen Zeitraum 2014/15 um ca. 12 % gestiegen. Auf der anderen Seite stehen ca. 2.000 – 3.000 leicht bis schwer verletzte und ca. 10 – 15 getötete menschliche Verkehrsteilnehmer. Zu diesen Unfällen mit größeren Säugetieren kommt der sogenannte Vogelschlag, bei dem die Opferzahlen schwer zu erfassen sind und Schätzungen zufolge bereits vor 18 Jahren im zweistelligen Millionenbereich lagen [2].

Neben der direkten Gefahr durch Kollisionen im Straßenverkehr ist auch der bauliche Eingriff in die Naturkorridore von Bedeutung. Die mehrere Meter breiten Asphaltstreifen stellen für einige Tiere eine fast unüberwindbare Hürde dar. Hinzu kommen Schadstoffbelastungen [3] sowie Hindernisse innerhalb des Verkehrsraums, die zur Falle werden können, wie zum Beispiel Bordsteine und Rinnen, ebenso Gullys oder geschlossene Betonmittelleitplanken. Für wandernde Amphibien oder Kleinsäuger führen schon geringe Verkehrsfrequenzen auch auf kleineren Straßen zu erheblichen Einschränkungen bzw. zu hoher Mortalität, die sogar eine ganze Population bedrohen können [4].

Eine Lösung: Querungshilfen

Solche vermeidbaren Verluste sind vor dem Hintergrund des weltweiten Artensterbens [5] besonders kritisch zu betrachten. Sie unterstreichen die Notwendigkeit, die Zerschneidungswirkung von Straßen zu mindern. Dies kann durch Querungshilfen an strategisch wichtigen Punkten erfolgen. Je nach Situation und den zu schützenden Tierarten bieten sich verschiedene Arten von Querungshilfen an, um den Konflikt zwischen Straßenverkehr und der Natur kollisionsfrei zu entschärfen [6].

Als gezielte Maßnahme für kleinere Tierarten wie Kleinsäuger und Amphibien eignen sich sogenannte Kleintierdurchlässe. Talbrücken sind dagegen eine Möglichkeit das darunterliegende Ökosystem in seiner Gesamtheit zu überbrücken um den menschlichen Einfluss zu minimieren.

Grünbrücken und Landschaftstunnel

Grünbrücken bedienen vornehmlich die Wanderungsbedürfnisse von Tieren der Lebensräume Wald und Halboffenland und sind von direkter menschlicher Mitnutzung möglichst freizuhalten. Auf einer Breite von 30-50 m wird eine habitatähnliche, lineare Biotopstruktur mit einzelnen Hecken aus Büschen und Sträuchern erzeugt, die sich an der angrenzenden Vegetation orientiert. Die konkrete Gestaltung hängt sehr von den Zielarten, die sowohl Groß- und Kleinsäuger, bodenorientierte Vögel und Fledermäuse, aber auch Amphibien und Reptilien und Laufkäfer umfassen können.

Zielart sind aber vor allem wandernde große Säugetierarten wie Rotwildhirsche. Je breiter die überführenden Landschaftsstreifen sind, desto besser gelingt ein Austausch für viele Arten.

Abb. 2: Grünbrücke bei Nettersheim/ Eifel, BAB 1



Biotopvernetzung

Die Vernetzung von Biotopen durch geeignete Querungshilfen zu einem Biotopverbund wirkt sich positiv auf den langfristigen Erhalt der darin lebenden Tier- und Pflanzenpopulationen aus. Geeignete Standorte müssen dabei viele Kriterien erfüllen, denn die Verbundwirkung einer Grünbrücke hängt von der Biotopqualität auf der Brücke selbst wie auch von der Anbindung an die umliegenden Biotope ab. Die zu vernetzenden Lebensräume sollten möglichst in ihrer ganzen Vielfalt über die Brücke geführt werden, um den Wanderwiderstand für die Tiere gering zu halten. So lassen sich einige Großsäuger von offenen Flächen in die richtige Richtung lenken, während Leitstrukturen wie Büsche, Steinhaufen oder Wasserstellen eine starke Lockwirkung für kleinere oder bodenorientierte Arten entfalten können.

Bedarf an Querungshilfen

Der Bedarf an Querungshilfen lässt sich schwer in konkrete Zahlen fassen. Im Bundeswildwegeplan von 2007 wurden 125 Standorte vordringlichen Bedarfs aufgezeigt, an denen die schwerwiegendsten Wanderungsbarrieren bis zum Jahr 2020 abgebaut sein sollten. Darüber hinaus wurden 785 weitere Konfliktpunkte ermittelt, an denen der konkrete Bedarf geprüft werden sollte.

An ca. 50 % der Standorte vordringlichen Bedarfs wurden bislang Querungshilfen errichtet, zu den 785 weiteren Konfliktpunkten liegen keine Zahlen vor.

Im Umkehrschluss kann der Bedarf am Zustand der Naturschutzgebiete abgeschätzt werden. Knapp 15,5 % der deutschen Landesfläche sind vom europäischen Schutzgebietssystem Natura-2000 bedeckt (Stand: 2019), welches sich in Deutschland aus rund 5.200 Gebieten zusammensetzt [7]. Diese Schutzgebiete sind vielfach durch Verkehrswege zerschnitten, wodurch ihr Wert für die Natur stark beeinträchtigt ist. Die Bedarfszahlen aus dem Bundeswildwegeplan stellen aus der Perspektive des Naturschutzes daher einen unteren Schwellenwert dar. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Verkehrs und des wachsenden Straßennetzes wird der Bedarf an Querungshilfen tendenziell steigen.

Eine Grünbrücke aus Laubholz als Pilotprojekt

Die markantesten Querungshilfen bilden Grünbrücken, da sie die menschlichen Verkehrswege überspannen. Sie sind für die Öffentlichkeit weithin sichtbar und mit ihrem unmittelbaren Nutzen erfassbar. Die Ausführung mit dem nachwachsenden Rohstoff Holz verbindet den ökologischen Zweck mit einer ökologisch wertvollen Bauweise, was die Akzeptanz dieser Bauwerke signifikant erhöht. In Summe erfüllen Grünbrücken mit einem Tragwerk aus Laubholz die Kernkriterien für ein Forschungsprojekt, bei dem die verschiedenen Aspekte von klimagerechter Forstwirtschaft, innovativer Holzbautechnik, nachhaltigem Bauen und Naturerhaltung untersucht werden können.

Die Entwicklung einer Grünbrücke mit einem Tragwerk aus Eichen-Brettschichtholz wird in Kapitel 2 erläutert und zeigt die technische Machbarkeit auf. Darüber hinaus stellt sich aber gleichzeitig die Frage nach den Kosten für solch eine neuartige Bauweise. Diese lassen sich grob durch einen Vergleich ermitteln, für den die Grünbrücke bei Luckenwalde von 2010 als vergleichbare Konstruktion herangezogen wird. In einem ersten Schritt werden dazu die heutigen Kosten des damals verwendeten Materials abgeschätzt und im zweiten Schritt mit den Mehrkosten durch den Einsatz von Eichen-BSH verglichen.

Da der Markt für Eichen-BSH derzeit von wenigen Herstellern bedient wird und die Anforderung an die optischen Eigenschaften normalerweise sehr hoch ist, liegt der Preis für einen Kubikmeter Eichen-BSH derzeit bei 2.000 – 2.500 € für einfache, gerade Stäbe. Für komplexere Bauteile, die gebogen oder blockweise verklebt werden, steigt der Preis schnell auf 5.000 €. Dagegen liegt der Preis für ein Kubikmeter gebogenes Lärchen-BSH, wie es in Luckenwalde verbaut wurde, heutzutage bei etwa 1.600 €/m³.

Tabelle 1: Kostenvergleich anhand einer realisierten Grünbrücke in Holzbauweise aus Nadelholz (Luckenwalde nord)

	Kosten bei Submission (2010)	Lärche 2023	Steigerung zu Submission	Eichen-BSH	Steigerung zu Lärche, 2023
Gesamtkosten	2.330.000€	2.780.000€	+ 20 %	4.380.000 €	+ 60 %
davon Holzbau	930.000€	1.378.000 €	+ 50 %	2.980.000€	+ 120 %
davon Bogenbinder (Haupttragwerk) 465 m³	340.000 €	744.000 €	+ 120 %	2.330.000€	+ 220 %
davon Querschotts (Nebentragwerk) 41 m³	38.000 €	100.000€	+ 160 %	105.000 €	+ 5 %
Gesamtkosten, bezogen auf die Brückenfläche (38,90 x 32,00 m)	1.870 €/m²	2.230 €/m²		3.520 €/m²	

Preise gerundet, netto

Preisanpassungen berücksichtigen ausschließlich Kostenanteile des Holzbaus

Unter heutigen Gesichtspunkten scheint der Einsatz von Eichen-BSH nicht konkurrenzfähig, allerdings werden sich aller Voraussicht nach viele Einflussfaktoren zugunsten der Eiche verschieben. Dazu zählt ein leichter Rückgang von Nadelholzflächen als Folge von Kalamitäten und erschwerten Anbaubedingungen und deren Neubepflanzung mit fördernswerten und resilienten Mischwäldern mit hohem Anteil an Buchen und Eichen. Zudem findet bereits eine Weiterentwicklung in der Sortierung von Eichenbrettern für das BSH statt, die größere Festigkeiten und geringeren Ausschuss ermöglichen. Ebenso bietet eine differenzierte Sortierung die Möglichkeit, neben den heutzutage sehr hohen Sichtqualitäten auch Industriequalitäten zu liefern, die gleiche Festigkeitseigenschaften besitzen, aber in gewissem Maße optische Mängel aufweisen dürfen. Durch diese Entwicklungen lässt sich der Preis für Eichen-BSH in Zukunft deutlich reduzieren, so dass er zunehmend konkurrenzfähig gegenüber Nadelholz-BSH wird.

1.2 _ Beispiel: Grünbrücken-Projektstandort Sankt Augustin (NRW)

Für die oben erwähnte Studie wurde ein Standort gewählt, an dem die zunehmende Zerschneidung der Landschaft besonders deutlich erkennbar ist und für den ein Verbund besonders positive Effekte auf die umliegenden Biotopflächen entwickeln kann. Dieser Standort ist in der bundesweiten Bedarfsliste für Wildtierbrücken der Naturschutzverbände und des Deutschen Jagdverbandes erfasst. Ebenso ist der Querungsstandort als prioritärer Wiedervernetzungsabschnitt im "Bundesprogramm Wiedervernetzung" der Bundesregierung von 2012 enthalten. Eine Grünbrücke an diesem Standort würde dabei in erster Linie den lokalen, schützenswerten Arten dienen [4], darüber hinaus würde aber auch ein regionaler Verbund zwischen mehreren Naturschutzgebieten entstehen. Das Projekt eignet sich ganz besonders als Beispiel für viele weitere Standorte, an denen verschiedenste Tierarten auf eine Querungshilfe über Autobahnen oder Fernstraßen und Schienen angewiesen sind.

Ökologische Anforderungen an die Querungshilfe

Die bautechnische Aufgabenstellung besteht im Wesentlichen aus dem Brückenschlag über den zu überquerenden Verkehrsweg. Im vorliegenden Fall befindet sich der Planungskorridor in der Nähe einer Abfahrt der Autobahn 560 weshalb der Verkehrsweg 4 bzw. 6 Fahrspuren hat. Um die Aufgabenstellung allgemein zu formulieren, wird ein vierspuriger Regelquerschnitt gemäß "Richtlinie zur Anlage von Autobahnen" RAA [8] berücksichtigt. Damit ist die Aufgabenstellung repräsentativ für eine Großzahl an Konfliktpunkten.



Abb. 3:
links: Luftbild mit
Planungskorridor (rot) und
Bestandsbrücke (türkis);
rechts: Skizze des naturnah gestalteten Verbundkorridors mit Grünbrücke [4]

Ein erster Entwurf für den Verbundkorridor zeigt eine mögliche Ausgestaltung der angrenzenden Flächen.

Der Planungskorridor wird zudem von mehreren Grundstücken tangiert, die schrittweise in den Verbund eingegliedert werden müssten. Westlich des gewählten Planungskorridors für die Grünbrücke befindet sich eine Geh- und Radwegbrücke. Diese wird aus planerischen

Gründen in ihrem Zustand erhalten und bleibt unbeeinflusst. Aus Sicht des Naturschutzes ist darauf zu achten, dass keine Sichtbeziehung zwischen der Bestandsbrücke und dem Lebensraum auf der Grünbrücke entsteht.

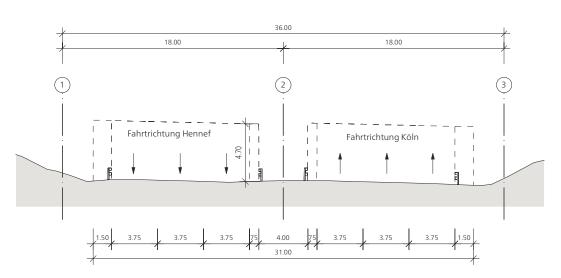


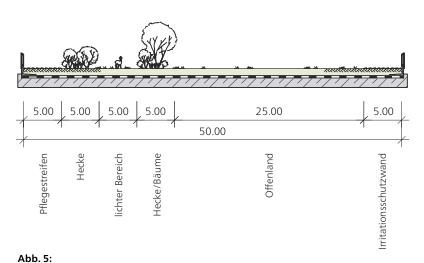
Abb. 4:
Querschnitt durch das
Bestandsgelände im
Planungskorridor mit maßgebenden Spannweiten
Spannweiten und Regelquerschnitt RQ31 aus RAA

Für den Entwurf einer Grünbrücke gelten gegenüber Straßen- oder Geh- und Radweg-brücken besondere Rahmenbedingungen, die im Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen (MA Q) von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen zusammen-

gefasst sind. Die Grünbrücke ist demnach entsprechend der Bedürfnisse der Zielarten auszuformulieren, während gleichzeitig die "günstigste Ausführung den ökologischen Anforderungen genügt". Es gilt also, den Zweck vor allen gestalterischen Fragen in den Mittelpunkt zu stellen.

Tabelle 2:Maßgebende Angaben für den Entwurf einer Grünbrücke am Projektstandort

Nutzung / Zielarten	Querungshilfe für Amphibien, Vögel und Säugetiere
Nutzbreite	Mindestens 30 m zwischen den Irritationsschutzwänden
Gradiente	Maximal 14 % = Steigungsverhältnis 1:7
Verkehrsprofil	RQ 31; lichte Höhe ca. 4,70 m
Station (km)	A560, km 6+000.00



schematischer Querschnitt einer Grünbrücke für mehrere Zielarten (nach MA Q)



Abb. 6: Beispiel eines Gestaltungsplanes für eine Grünbrücke: der neue Waldsaum und das neue Offenland werden an bestehende Strukturen angebunden (MA Q)

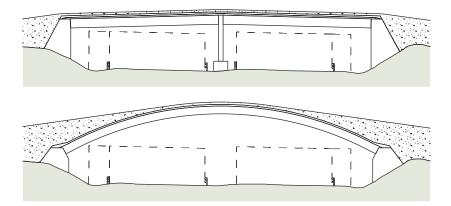
Technische Randbedingungen für den Entwurf

Bei Grünbrücken war es bislang üblich, dass die Tragwerke (Rahmen sowie Bögen) in Stahlbeton- oder Stahl-Beton-Verbundbauweise errichtet wurden. Dies wandelte sich mit der im Jahr 2004 nahe Wilmshagen gebauten Grünbrücke, deren Bogentragwerk in reiner Holzbauweise ausgeführt wurde – damals eine Weltneuheit. Dabei lag das zentrale Augenmerk auf einer Lebensdauer, die den konventionellen Bauweisen ebenbürtig ist. Die gelungene Umsetzung basiert auf einer geschützten Bauweise mit Brettschichtholz aus dauerhaftem Lärchenholz. Die hohe zu erwartende Lebensdauer wird durch die Klassifizierung der Bauteile in Nutzungsklasse 2 gemäß DIN EN 1995 bzw. Gebrauchsklasse 0 – 2 gem. DIN 68800 sichergestellt.

Weitere Grünbrücken, so in Luckenwalde, Thyrow oder Suhr (CH), sind diesem Beispiel gefolgt und wurden ebenfalls mit Bogentragwerken aus Brettschichtholz errichtet. Die Erfahrung zeigt, dass diese Bauweise in der Lage ist, die bautechnischen Vorteile von Holz zu nutzen und gleichzeitig energieintensive Baustoffe wie Stahl und Beton in Teilen zu ersetzen. Zudem wirkt das verbaute Holz als CO₂-Senke, was einen zusätzlichen ökologischen Mehrwert generiert.

Überaus wichtig für jede Grünbrücke, unabhängig von der Bauart und dem verwendeten Material, ist eine dauerhafte Abdichtung gegenüber Feuchtigkeit und deren Schutz gegen mechanische Einwirkungen. Für den Aufbau der Bauwerksabdichtung finden sich Vorgaben in der RE Ing Teil 2 Abschnitt 2. Hier wird zwischen Rahmentragwerken mit ebener Oberfläche und Bogenbauwerken mit geneigter Oberfläche unterschieden (vgl. Abb. 7). Je nach Tragwerk gelangen unterschiedliche Elemente zur Abdichtung des Bauwerks gegen Wasser wie auch zum Schutz der Abdichtung zum Einsatz, um zum Beispiel Beschädigungen durch grabende Tiere dauerhaft zu verhindern. Dieser Schutz wird bei Rahmentragwerken z. B. durch eine 10 cm starke Schicht bewehrten Schutzbetons erreicht. Hingegen werden bei stark gekrümmten Bogentragwerken zu diesem Zweck mehrere Lagen Geotextile und Packungen aus Filtersteinen eingesetzt.

Abb. 7:
Darstellung Rahmenund Bogentragwerke,
schematisch



2 Grünbrücken aus Laubholz

Entwicklung einer Grünbrücke mit einem Tragwerk aus Laubholz

2.1 _ Technische Unterschiede von Laubholz (LH) und Nadelholz (NH)

Die Festigkeiten und Steifigkeiten von Laubholz sind im Allgemeinen höher als die von Nadelholz. Dieser grundlegende Unterschied wird in der Norm für Festigkeiten von Schnittholz für Bauzwecke DIN EN 338 abgebildet. Gleichzeitig ist die Normung zur Herstellung von Brettschichtholz auf die Verarbeitung von Nadelholz beschränkt, eine vergleichbare Regelung für Laubholz existiert noch nicht. Die aktuell für den Einsatz im Ingenieurholzbau anwendbaren Laubholz-Produkte verfügen über bautechnische Einzelzulassungen. Dies führt zu spezialisierten Produkten, die die Bandbreite der zur Verfügung stehendenden Holzarten nicht ausnutzen.

Die Herstellung von Brettschichtholz erfolgt dabei im Wesentlichen identisch für Laub- und Nadelholz und könnte problemlos auf weitere Laubholzarten ausgeweitet werden. Die Sortierung der Rohlamellen bildet die Grundlage für den Aufbau des Brettschichtholzes. Die visuelle Sortierung (manuell durch Menschen) eignet sich bei Nadelholz bis zu einer Güteklasse der Rohlamellen nach DIN EN 1912 in C35, das entspricht einer BSH-Festigkeit von GL 30. Höhere BSH-Festigkeiten lassen sich nur noch mittels maschineller Sortierung der Rohlamellen erzielen. Hierbei steigen jedoch, bedingt durch strengere Anforderungen, die Ausschussmengen an Lamellen niedrigerer Festigkeitsklassen.

Das Potenzial der Laubholznutzung lässt sich in der DIN EN 338 ablesen. Hier erlaubt die visuelle Sortierung eine Qualität bis D50, woraus aufgrund der allgemein höheren Festigkeit ein geringerer Ausschuss resultiert. Die bereits zugelassenen Laubholzprodukte verfügen über Eigenschaften, die vergleichbar mit Nadel-BSH der Klasse GL 32 oder besser sind, wobei diese Sortierklasse sich aufgrund der fehlenden Normung regeltechnisch (noch) nicht einer normierten BSH-Festigkeit zuordnen lässt.

Festlegung einer geeigneten Holzart

Um eine geeignete Holzart für das Forschungsprojekt festzulegen, ist neben den technischen Merkmalen auch die ökologische Relevanz und die regionale Verfügbarkeit zu betrachten. Die Daten der letzten Bundeswaldinventur von 2012 geben dabei Aufschluss über den Flächenanteil und den Holzvorrat verschiedener Holzarten in Deutschland.

Es zeigt sich, dass die gesondert aufgeführten Buchen und Eichen vorherrschend unter den Laubbäumen sind, sowohl im Flächenanteil wie auch im Vorrat. Der Flächenanteil der Eiche liegt bei etwa 10 % der gesamten Waldfläche, der Vorrat beläuft sich ebenfalls auf ca. 10 % des Gesamtvorrats auf deutschem Boden. Die Buche liegt im Flächenanteil um die Hälfte, im Vorrat um 2/3 über der Eiche und stellt damit die häufigste Art der Laubbäume dar. Im Vergleich dazu liegen die wichtigsten Nadelhölzer Fichte und Kiefer um den Faktor 2–3 über der Fiche

Für die Ermittlung einer geeigneten Holzart wurde eine Bewertungsmatrix (s. Tabelle 3) mit den wichtigsten Rahmenbedingungen in ökologischer und technischer Hinsicht erstellt. Die aufgeführten Arten spiegeln den Stand der aktuellen Zulassung für ingenieurmäßige Bauprodukte aus Laubholz wider. Über die

Gewichtung der Kriterien wie Verfügbarkeit oder Festigkeit und die Bewertung (1 = sehr gut; 6 = schlecht) wird die am besten geeignete Holzart ermittelt. Eine Übersicht über den Vergleich der wichtigsten technischen Eigenschaften von BSH aus Laubund Nadelholz liefert Tabelle 4.

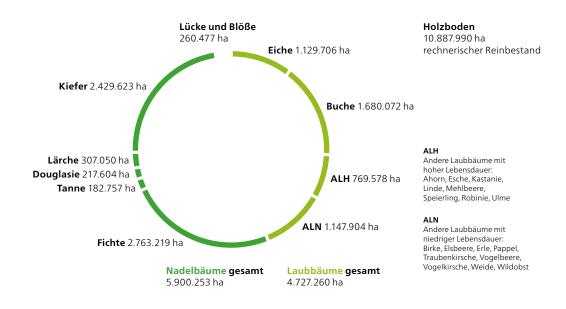
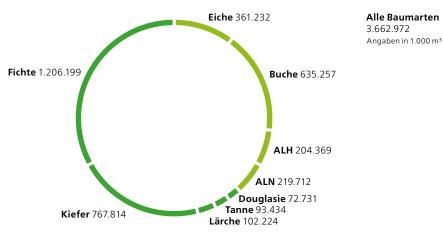


Abb. 8:
Flächenanteil der
Baumartengruppen
(Bundeswaldinventur 2012)



Laubbäume gesamt

1.420.570

Nadelbäume gesamt

2.242.402

Baumartengruppen
(Bundeswaldinventur 2012)

Abb. 9:

Holzvorrat nach

Basis: Holzboden alle Bestandesschichten Die Eiche zeigt sich bei diesem Vergleich als Vorzugsholzart, da durch ihren großen Flächenanteil und Holzvorrat bereits jetzt eine gute Verfügbarkeit gesichert scheint. Zusammen mit der Buche ist die Eiche aus ökologischer und forstwirtschaftlicher Sicht daher für einen verstärkten Einsatz im Holzbau prädestiniert.

In technischer Hinsicht weist die Buche eine vergleichsweise geringe Maßhaltigkeit auf. Zudem gestaltet sich die Verarbeitung von Buchenholz zu einem dimensionsstabilen Bauteil im Vergleich zu den anderen Laubhölzern deutlich aufwendiger. Gleichzeitig ist Buchenholz von Natur aus sehr anfällig gegenüber dem Befall durch Pilze und Insekten.

Tabelle 3: Bewertungsmatrix für die Ermittlung einer Vorzugsholzart

		Bud	he	Eic	he	Edelka	astanie	Es	che	В	irke
Kriterium	Gewichtung	Bewertung*	[%]	Bewertung *	[%]	Bewertung*	[%]	Bewertung*	[%]	Bewertung*	[%]
Anteil Waldfläche BRD	20 %	1	20	2	16	4	8	4	8	4	8
Menge Holzvorrat BRD	10 %	1	10	2	8	4	4	4	4	4	4
Resilienz der Baumartgruppe	10 %	1	10	1	10	2	8	2	8	2	8
Maßhaltigkeit (Quell- /Schwindverhalten)	20 %	4	8	1	20	1	20	1	20	1	20
Steifigkeiten und Festigkeiten	20 %	1	20	2	16	2	16	2	16	2	16
natürliche Dauerhaftigkeit	20 %	6	0	1	20	1	20	6	4	6	0
	100 %		68		90		76		60		56

^{*} Schulnoten

Die Vorzüge von Eichen-Brettschichtholz liegen in dessen vergleichsweise hohen Festigkeiten. Die Beanspruchbarkeiten für Biegung sowie für Druck parallel zur Faser liegen bei den aktuellen Zulassungen im Bereich von GL 32h. Darüber hinaus birgt das Eichen-BSH noch großes Potenzial. Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, lässt sich die Biegefestigkeit

beinahe verdoppeln, wenn die äußeren Lamellen ohne Keilzinkenverbindungen ausgeführt werden. Der Schwachpunkt liegt offenbar in der Längsverbindung der Lamellen, woraus sich ein unmittelbarer Forschungsbedarf zur Weiterentwicklung der Fügetechnik ableiten lässt.

Tabelle 4:Vergleich der bauüblichen Festigkeitsklassen GL 24h – GL 32h mit Laubholz-BSH nach Zulassungen

		Nadelholz-E Nach DIN EN		Laubholz-BSH Nach Zulassung	gen			
Eigenschaft		Fi/Ta	Lärche	Edelkastanie ETA-13/0646	Eiche ETA 13-0642	Eiche Z-9.1-821	Buche ETA 14-0354 ETA 18-1018	Birke ETA 19-0031
Dichte [kg/m³]	$ ho_{mean}$	420 -	- 490	540	690	650	800	600
Steifigkeit [N/mm²]	E _{0,g,mean}	11.500 -	- 14.200	13.000	14.400	14.000	16.800	15.000
	E _{90,g,mean}	30	00	_	800	800	470	650
Festigkeit [N/mm²]	Biegung	24 -	- 32	30	33,5	31,5/591	75	32/362
	Druck parallel	24 -	- 32	45³	45³	48 ³	49,54	30 4
	Druck senkrecht	2,	,5	_	8	9	12,3	4,5
	Schubfestigkeit	3,	.5	5	4	5,5	4,5	4,9
Dauerhaftigkeit ⁵	Pilze	schlecht	mäßig	gut	gut ⁶	gut ⁶	schlecht	schlecht
	Käfer	schlecht	gut	gut	gut ⁷	gut ⁷	schlecht	gut
Maximal	B x H [mm]	Beschrär	nkungen	220 x 400	160 x 400	70 x 280	600 x 2.500	240 x 1.200
zulässige Maße	L [mm]		Beschränkungen produktionsbedingt		12,00	12,00	36,00	45,00

¹ Biegezugfestigkeit des Eichen-Brettschichtholz vom Typ "Premium";

dieses Produkt ist auf eine maximale Länge von 4 m beschränkt, da die Decklamellen ohne Keilzinkenstöße ausgebildet werden

² Unterscheidung zwischen Flachkant- und Hochkant-Biegebeanspruchbarkeit

³ Abminderung um 1/3 für Nutzungsklasse 2

 $^{4\ \} Abminderung\ um\ 20\%\ für\ Nutzungsklasse\ 2$

^{5~} nach DIN EN 350:2016-12, Kriterien "schlecht, mäßig, gut" gelten sinngemäß

⁶ nicht bei Erdkontakt

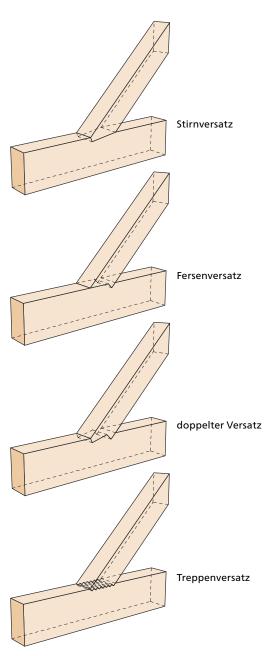
⁷ Splintholz ist nicht beständig gegenüber Lyctus und Trichoferus Holosericeus

Die Druckfestigkeit von Eichen-BSH senkrecht zur Faser liegt mit 8,0 – 9,0 N/mm² sogar um den Faktor 3,5 über der von Nadelholz-BSH mit 2,5 N/mm², zudem zeigt sich auch die Schubfestigkeit leicht erhöht. Diese beiden Festigkeiten begünstigen eine schlanke Dimensionierung der Bauteile, besonders im Bereich

Abb. 10:

Zimmermannsmäßig

Verbindungen – Versätze



der Anschlüsse und Auflagerpunkte. Ferner können durch die sehr hohe Querdruckfestigkeit traditionelle Zimmermanns-Anschlüsse wie Versätze in hochbelasteten Anschlusssituationen materialsparend geplant werden.

So gelingt es dank moderner Abbundtechnik, den klassischen Stirn- bzw. Fersenversatz zum sogenannten Treppenversatz anzupassen. Durch die Nutzung von Eichen-BSH kann die Tragfähigkeit dieser Verbindung wegen der besonderen Festigkeit des Eichenholzes bei gleichbleibender Geometrie etwa um den Faktor 2 – 3 erhöhen. Die natürliche Dauerhaftigkeit und die Tatsache, dass es sich um eine heimische Holzart handelt, unterstreichen die Wahl von Eichen-BSH für das Tragwerk einer Grünbrücke als Pilotprojekt.

2.2 _ Variantenstudie

Nach der Festlegung einer geeigneten Holzart für das Tragwerk steht als nächstes die Entwicklung einer geeigneten Tragwerksform für die Bauaufgabe an. Die in Kapitel 1.2 beschriebenen Randbedingungen geben die maßgebenden Spannweiten, Anschlusshöhen und Verkehrsprofile vor. Die Vorzugsvariante wird über eine ergebnisoffene Studie zu bauüblichen Tragwerksformen mit anschließender Auswertung ermittelt.

Die Fokussierung auf Eichen-BSH bedeutet dabei keine Einschränkung, denn erst bei geschickter Kombination der verschiedenen Baustoffe entsteht ein dauerhaftes, effizientes und nachhaltiges Tragwerk. Unter Berücksichtigung des konstruktiven Holzschutzes, vermag das Holz mit seiner geringen Dichte und hohen Leistungsfähigkeit zu punkten. Gleichzeitig bietet die Nutzung von block-

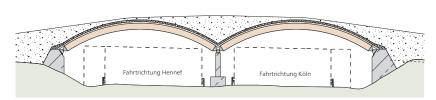
verleimtem Brettschichtholz eine große Freiheit bei der Wahl der Trägerform und der Querschnittsgeometrien. Es bleibt anzumerken, dass hochbelastete Knotenbereiche und Gelenke häufig als Stahlverbindungen ausgebildet werden und erdberührende Bauteile wie z. B. Gründungskörper typischerweise aus Stahlbeton bestehen.

Tabelle 5:Vorentwurfsskizzen für den Projektstandort Sankt Augustin und wesentliche Bauteilmerkmale (Holzanteil beige)



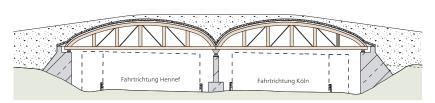
Rahmentragwerke

Integrale (biegesteif angeschlossene) Biegeträger, die eine sehr flache Gradiente ermöglichen und einen besonders geringen Wartungsaufwand erzeugen, da Verbindungspunkte durch den Betonanschluss am Widerlager geschützt werden.



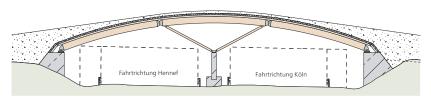
Zweigelenkbögen

Der Druckbogen ist eine traditionelle und effiziente Struktur für Brücken und bietet die Möglichkeit, die Belastung mit sehr geringem Materialeinsatz abzutragen. Dabei bestimmt die Scheitelhöhe maßgeblich die Effizienz des Bogens.



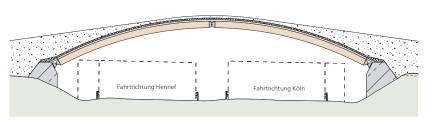
Fachwerkträger

Das Fachwerk ist optimal für die Verwendung von kurzen Stäben mit kleinen Querschnitten. Die zugbeanspruchten Stahlglieder ergänzen das Tragwerk zu einer effizienten Hybridbauweise.



Sprengwerke

Als Mischform zwischen Bogen und Fachwerk bietet das Sprengwerk den Vorteil kürzerer Bauteillängen durch Reduzierung der Spannweiten, wodurch die Querschnitte kleiner ausfallen können.



Dreigelenkbögen (einfeldrig)

Bei diesem Vorentwurf entfällt die Mittelstütze. Durch das Gelenk im Firstpunkt können die Bauteilmaße reduziert werden, was den Transport deutlich erleichtert.

Ermittlung der Vorzugsvarianten

Die Tragwerksskizzen dienen als Grundlage der Vorbemessung mit anschließender Evaluierung einer Vorzugsvariante. Dabei wurde der Fachwerkträger im Zuge der Vorbewertung ausgeschlossen, da durch die zahlreichen Verbindungspunkte ein signifikant höherer Aufwand bei der Wartung und Prüfung zu erwarten ist. Da das Bauwerk eine Autobahn quert und nur von unten erreichbar ist, würde eine Bauwerksprüfung mit einer enormen Beeinträchtigung des Verkehrs einhergehen. Dies erscheint an dieser Stelle nicht vertretbar.

Die Ergebnisse der Vorstudie fließen in eine Bewertungsmatrix ein, die sich in folgende Kategorien gliedert:

Tabelle 6:Bewertungskriterien für die Bewertungsmatrix

Ingenieurbauwerk:	Die bautechnische Bewertung berücksichtigt die statische Funk- tionalität des Tragwerks, verkehrs- technische Gestaltungsmerkmale wie z.B. Durchfahrtshöhe und Tunnel- wirkung und die Möglichkeiten für	Instandsetzungen sowie für eine spätere Verbreiterung des Tragwerks. Da die günstigste Ausführung den ökologischen Anforderungen genügt (s. RE-Ing 2-2), steht hier die Effizienz des Tragwerks im Vordergrund.
Ökologie:	Die ökologischen Ansprüche an den neugeschaffenen bzw. vernetzten Lebensraum stellen den Kern der geforderten Eigenschaften des Bauwerks dar. Flache Steigungen	mit Möglichkeiten für Wasserstellen begünstigen dabei die Lock- wirkung und die Biotopqualität auf der Brücke.
Ökobilanz:	Im aktuellen wissenschaftlichen, gesellschaftlichen und technischen Kontext sind die Klimafolgen bei der Verwendung von Baustoffen von besonderer Bedeutung. Dabei wird der Einsatz endlicher, ressourcenund energieintensiver Baustoffe (Beton, Stahl) der Nutzung des nachwachsenden Baustoffes Holz gegen-	übergestellt. Ebenso findet auch das Einsparpotential an Material durch eine Laubholznutzung gegenüber dem Einsatz von Nadelholz Berück- sichtigung. Des Weiteren wird auch der erforderliche Eingriff in die Umgebungsflächen durch die Bauform bewertet.
Herstellung und Montage:	Da das Projekt eine Bauwerkserrich- tung über eine bestehende Bundes- autobahn darstellt, werden das Bau- verfahren und die damit verbundene Bauzeit als wesentliche Faktoren der	Realisierbarkeit definiert. Im Zuge dessen werden auch die voraussichtlichen Bau- und Montagekosten berücksichtigt.
Betrieb:	Die Prüfbarkeit und Unterhaltung des Bauwerks bilden wichtige Kosten- faktoren und beeinflussen ebenso die Zuverlässigkeit wie auch die Lang- lebigkeit des Bauwerks.	

Tabelle 7:Matrix zur Bewertung der Vorentwürfe

		Variar Integrales (zweife	Tragwerk	Z	Variaı weigelei (zweife	nkbögen		Variar Spreng (zweife	werk		Variar Oreigele n	
Ingenieurbauwerk	40 %		14%		++	32%		+	27 %		+	28%
Ökologie	20 %	++	20%		+	15 %		0	12 %		0	11%
Ökobilanz	15%	+	10%		++	13 %		++	12 %		+	11%
Herstellung und Montage	15%	O	7 %		++	14%		+	11 %		+	13 %
Betrieb	10 %	++	9 %		+	6 %		+	6 %	===	+	8 %
	100%		60 %			80 %	_		68 %			71%

%-Werte = Gewichtung

Ergebnis der Variantenstudie

Für die Aufgabenstellung einer Grünbrücke in Holzbauweise zeigt sich das Bogentragwerk mit Mittelstütze als Vorzugsvariante.

Die effiziente Bogenform, verbunden mit der flachen Ebene über der Mittelstütze, vereint die meisten bautechnischen und ökologische Vorteile und bildet damit eine ebenso kostengünstigen wie auch ökologisch wertvolle Lösung. Zudem weist dieser Vorentwurf im Gegensatz zum Rahmentragwerk und zum Sprengwerk keine wesentlichen Schwachstellen auf.

Im Sinne einer allgemeingültigen und innovativen Herangehensweise wurden im Rahmen des Forschungsprojektes zusätzlich zur Vorzugsvariante zwei weitere Optionen untersucht. Um eine größere Zahl an Anwendungsfällen abzudecken, findet der Dreigelenkbogen, der die Autobahn als einzige Variante einfeldrig überspannt, auch bei den weiteren Untersuchungen Berücksichtigung. Bei der Recherche zu Grünbrücken an deutschen Verkehrswegen hat sich gezeigt, dass von 54 Bauwerken über vierspurige Autobahnen insgesamt 38 ohne und 16 mit Mittelstütze ausgeführt wurden. Von 8 Grünbrücken, die sechsspurige Autobahnen überspannen, wurden 2 ohne und 4 mit Mittelstütze ausgeführt.

Es ist also erkennbar, dass die Anordnung einer Mittelabstützung nicht nur von der Anzahl der Fahrstreifen abhängt. Vielmehr nehmen auch die Umgebungsbedingungen des Bauortes Einfluss darauf, welches Gründungskonzept realisierbar und zweckdienlich ist. Mit der Einbeziehung sämtlicher Parameter lässt sich dann ermitteln, ob eine Überspannung in einem Zug die ökologischere und wirtschaftlichere Lösung ist oder ob eine Zwischenabstützung sinnvoller ist.

Da die aktuellen, in Tabelle 4 beschriebenen Zulassungen nur sehr begrenzte Querschnittsmaße und Bauteillängen umfassen, wurde als Alternative zum Doppelbogen das Schalentragwerk der Zollinger-Bauweise untersucht. Dieses bietet die Möglichkeit, sehr kurze Stäbe mit geringen Querschnittsdimensionen zu verwenden, für die das Eichen-BSH laut Zulassung eine deutlich höhere Biegefestigkeit besitzt. Zudem kann mit dem zuvor erwähnten Treppenversatz eine besonders tragfähige und steife Verbindung zwischen den Streben hergestellt werden. Grundsätzlich ermöglicht erst die hohe Querdruckfestigkeit des Eichen-BSH eine solche Verbindung an dieser Stelle, da die geringeren Festigkeiten von Nadelholz-BSH hier keine sinnvollen Anschlussgeometrien zulassen.

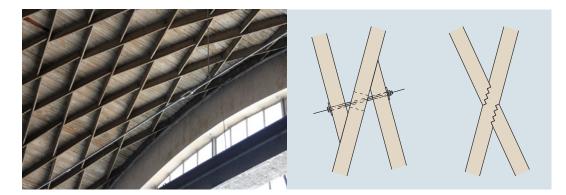
Die ausführliche
Bewertungsmatrix ist
zusammen mit weiteren
Erläuterungen im
Schlussbericht des
Forschungsvorhabens
ab Seite 29 zu finden:

Link zur FNR
 (Projektträger):
 https://www.fnr.de/
 ftp/pdf/berichte/
 2218WK01A3.pdf
 https://tinyurl.com/
 4987dket



Abb. 11 links:

Zollinger Tragwerk von
1928 im alten Schlachthof
in Regensburg, nach einem
Patent von 1922
rechts: schematische
Darstellung eines Knotens
gemäß Patent sowie
nach Modifikation mittels
Treppenversatz



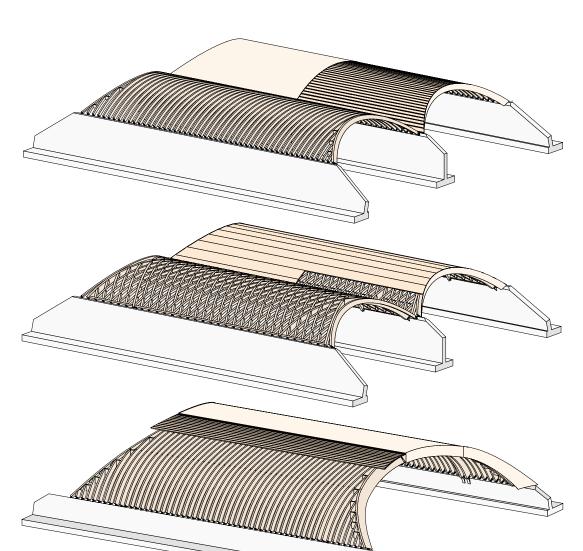


Abb. 12: Doppelbögen

Abb. 13:

Zollinger-Schalentragwerk

Abb. 14:

Dreigelenkbögen

Die oberseitigen Deckelplatten der Tragwerke sind ebenfalls dargestellt. Sie gehören als sekundäre Bauteile zum Gesamttragwerk und bilden den oberseitigen Abschluss der Tragstruktur. Auf der Deckelplatte wird die Dichtungsebene mit darüberliegender Erdüberschüttung angeordnet.

Die Vorteile von Eichen-BSH gegenüber Nadelholz-BSH lassen sich anhand eines Massenvergleiches verdeutlichen. Dazu werden die beiden Bogentragwerke und deren erforderliche Querschnitte für GL 24h und für Eichen-BSH nach Zulassung gegenübergestellt. Der Vergleich mit der Zollinger Bauweise entfällt, da sich dieses Tragwerk nicht wirtschaftlich in Nadelholz-BSH umsetzen lässt. Das Einsparpotenzial in Tabelle 8 und die Gegenüberstellung der Kubaturen in Tabelle 9 zeigen den unmittelbaren Nutzen der Substituierung von Nadelholz-BSH durch Eichen-BSH.

Die Güteklasse GL 24h stellt dabei den Standard für homogenes Brettschichtholz im Brückenbau dar. Höhere Festigkeiten sind zwar möglich, werden aber aufgrund des zunehmenden Ausschusses bei der Sortierung nur in Ausnahmefällen eingeplant. Die Gesamtkubatur des Brettschichtholzes für die drei Entwürfe liegt dabei in einer Größenordnung, in der die Mehrkosten durch die Ausschussmassen kaum zu rechtfertigen sind. Wie oben beschrieben, wird sich die derzeitige Preisspanne zwischen Eichen-BSH und Nadelholz-BSH in GL 24h zukünftig schrittweise reduzieren.

Tabelle 8:Vergleich der notwendigen Querschnitte

	Eichen-BS	Eichen-BSH			adelholz			
	B [cm]	H [cm]	A [cm²]	B [cm]	H [cm]	A [cm²]	Einsparpotenzial	
Dreigelenkbögen 1 Feld	20	80	1.600	22	100	2.200	27%	
Doppelbögen 2 Felder	20	46	920	22	70	1.540	40%	

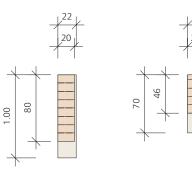


Abb. 15:

Darstellung des

Querschnittvergleichs – schraffiert: Eichen-BSH, gefüllt: Nadelholz-BSH

Abb. 16:
Visualisierungen
der Tragwerksvarianten
am Bauort:

- 1 Doppelbögen,
- 2 Dreigelenkbögen,
- 3 Zollinger-Schalentragwerk,
- 4 Vogelperspektive der Doppelbogenvariante



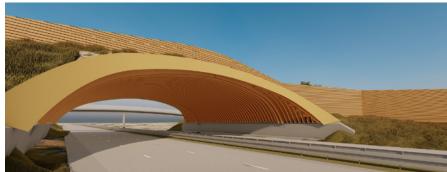






Tabelle 9:Vergleich der notwendigen Querschnitte

Bauart	Baustoff	BSH-Kubatur Hauptträger	Gesamtkubatur aller Holzwerkstoffe
Doppelbögen	Eichen-BSH	160 m³	(280 m³ inkl. Deckelplatte)
Doppelbögen	NH-BSH	225 m³	(340 m³ inkl. Deckelplatte)
Zollinger	Eichen-BSH	240 m³	(420 m³ inkl. Deckelplatte)
Dreigelenkbögen	Eichen-BSH	320 m³	(480 m³ inkl. Deckelplatte)
Dreigelenkbögen	NH-BSH	410 m³	(570 m³ inkl. Deckelplatte)

2.3 _ Ausbildung der Entwürfe im Detail

Traglasten und Ausstattungselemente

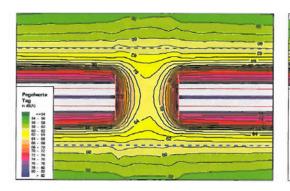
Zu den regulären Lastannahmen der DIN EN 1991 gelten für Grünbrücken weitere Vorgaben. Zusätzliche Lasten sind in der Richtlinie RE-Ing Teil 2 Abschnitt 2 beschrieben:

- 5 kN/m² für unplanmäßige Toleranz der Überschüttung (bereichsweise)
- 5 kN/m² für Bewuchs bis etwa 4 m und Befahren durch Dienstfahrzeuge (Gesamtgewicht 12 t)
- 40 kN/m² auf einer Fläche von
 3,00 x 5,00 m für unplanmäßiges Befahren durch Einsatzfahrzeuge, falls die Überschüttung kleiner als 1,0 m ist (außergewöhnlicher Lastfall)

Da die hier festgelegten Zielarten keine besonderen Anforderungen an die Überschüttungshöhen stellen und gleichzeitig einen geringen Wanderwiderstand durch "Vegetationsarmut" bevorzugen, wird im Rahmen dieser Untersuchung eine Mindestüberschüttung von 30 cm festgelegt.

Eine geringe Überschüttungshöhe verhindert dabei die dauerhafte Ansiedlung von größeren Baumbeständen und ermöglicht gleichzeitig eine strukturreiche Ausformulierung der Oberfläche mit kleineren Büschen und offenen Flächen, sodass den Bedürfnissen mehrerer Tierarten Rechnung getragen wird, da die Vegetation für etliche Zielarten eine wichtige Leit- und Lockwirkung erzeugt

Ein weiterer Aspekt für die Lastannahme auf einer Brücke sind die sogenannten Ausstattungselemente wie Geländer oder Verschalungen. Dazu zählen speziell bei Grünbrücken die Irritationsschutzwände. Diese werden auf oder an den Bauwerksrändern angeordnet und schirmen den Lebensraum auf der Brücke gegen Einblicke und Emissionen aus dem Verkehr ab. Um darüber hinaus auch den Bereich vor und hinter der Brücke gegen Lärm und Blendwirkung abzuschirmen und dadurch die Lockwirkung der Querungshilfe zu steigern, sind diese Lärmschutzwände entlang des Verkehrsweges weiterzuführen. [6].



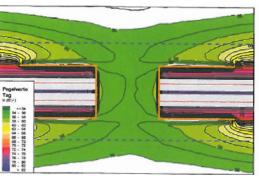


Abb. 17:
Vergleich der Schalldruckpegel auf Grünbrücken ohne (links) und mit (rechts)
einer 2 m hohen
Irritationsschutzwand [6]

Konstruktiver Holzschutz

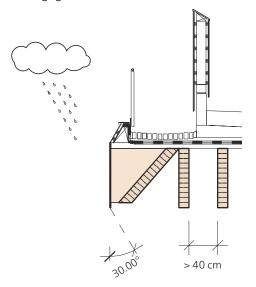
Der Holzschutz nach DIN 68800 hat zum Ziel, die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Holzbauteilen abzusichern und dadurch eine hohe Lebensdauer des Bauwerks zu garantieren. Im Wesentlichen geht es dabei um den Schutz vor unzuträglicher Beanspruchung durch Feuchtigkeit, da eine hohe Holzfeuchte eine Gefahr durch Pilzbefall bedeutet. Ebenso muss der Befall durch Insekten verhindert werden, was üblicherweise durch den Einsatz von technisch getrocknetem Holz erreicht wird. Eine umfangreiche Darstellung der bautechnischen Maßnahmen des konstruktiven Holzschutzes für Ingenieurbauwerke bieten die Schriften des Informationsdienst Holz der "Reihe 5 – Holzschutz". Die Zielsetzung der darin beschriebenen Maßnahmen ist die Einordnung der Bauteile eines Tragwerks in die Gebrauchsklasse 0, dies entsprcht einem ausreichenden Schutz gegen Feuchtigkeit sowie gegen Insektenbefall.

holzbau handbuch Reihe 5, Teil 2, Folge 2: Holzschutz – Bauliche Maßnahmen

INFORMATIONSDIENST HOLZ

< hh 5/2/2

Abb. 18:Anwendungsbeispiele für konstruktiven Holzschutz



Eine unzuträgliche Beanspruchung durch Feuchtigkeit resultiert dabei in den meisten Fällen aus direkter Bewitterung von ungeschützten Bauteilen. Im vorliegenden Fall einer Grünbrücke mit einem Tragwerk aus Eichen-BSH sind lediglich die Portalbereiche durch direkte Bewitterung gefährdet, sie lassen sich jedoch durch eine geeignete Verschalung hinreichend schützen.

Darüber hinaus liegt ein besonderes Augenmerk auf der Beanspruchung durch Spühnebel und Tauwasser. Wechselnde klimatische Bedingungen und der Verkehrsfluss unterhalb der Brücke führen zu Auffeuchtungen, die sich nicht verhindern lassen. Dabei gilt es, horizontale Flächen zu vermeiden und Fugen bzw. Spalten so auszubilden, dass eine ausreichende Belüftung stattfinden kann. In der Baupraxis hat sich ein lichter Abstand von mindestens 40 cm als förderlich erwiesen, für große Bauteilhöhen sollte der Abstand 60 bis 80 cm betragen. Dadurch wird zusätzlich eine handnahe Prüfung der Bauteile begünstigt. Um die Oberflächen der Holzbauteile gegen eine schnelle Aufnahme von Feuchtigkeit zu schützen, sind diese gehobelt auszuführen und mit einer diffusionsoffenen Beschichtung (Lasur) zu versehen.

Anforderungen des Korrosionsschutzes

In DIN EN 1993 1-4 ist im Anhang A.2 ein Verfahren zur Werkstoffauswahl aufgeführt, um geeignete Werkstoffe mit der notwendigen Korrosionsbeständigkeitsklasse zu ermitteln. In Übereinstimmung mit den Angaben aus den Empfehlungen für Technische Vertragsbedingungen für Holzbrücken (ETV-HolzBr, 2019) ergibt sich die Werkstoffauswahl für den vorliegenden Fall anhand des Verfahrens im Eurocode 3 zu folgenden, nichtrostenden Stählen:

Werkstoffnummer	Zusammensetzung
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5

Leitdetails Bauwerksabdichtung und Wasserführung

Die Bauwerksabdichtung und deren dauerhafter Schutz gegen mechanische Einwirkung ist ein zentrales Element für die Dauerhaftigkeit des Tragwerks und gilt gemäß RE-Ing Teil 2 Abschnitt 2 unabhängig von der Materialität des Tragwerks. Die Dichtigkeit gegenüber Feuchtigkeit wird über Bitumenschweißbahnen und Kunststoffdichtbahnen erreicht. Um Beschädigungen frühzeitig und lokal erfassen zu können, kann gemäß ETV HolzBr zusätzlich ein flächiges Monitoringsystem zwischen den Dichtbahnen angeordnet werden.

Um die Abdichtung gegen mechanische Einwirkung zu schützen, wird eine Gleitfolie angeordnet, die Verformungen des Tragwerks

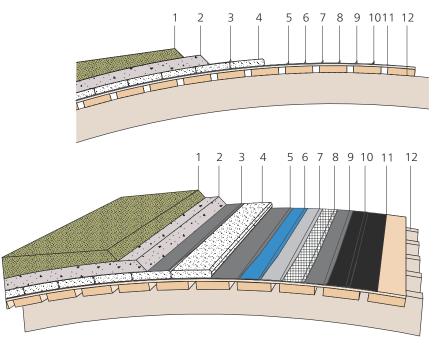
Tabelle 10:Gegenüberstellung von Umwelt- und Korrosionsfaktoren sowie geeigneter Schutzmaßnahmen

Umwelt- und Korrosionsfaktoren	Maßnahmen
 Sprühnebel mit Tausalzen Wechselnde klimatische Bedingungen Inhaltsstoffe des Eichenholzes: Gerbsäuren flüchtige Essigsäuren pH-Wert 3,9 	 Luftumspülte Bauweise zur Minderung von Kondenswasser Vermeidung horizontaler Flächen Wahl geeigneter Beschichtungssysteme für die Stahlbauteile oder Wahl geeigneter Legierungen

Abb. 19:

Schnitt und Perspektive des Abdichtungsaufbaus auf gekrümmten Tragwerken

- 1 Erdüberdeckung
- 2 grobkörniger Boden
- 3 Geotextil (Filtern)
- 4 Filtersteine 10 cm
- 5 Geotextil (Schutz und Dränen)
- 6 Gleitfolie
- 7 Kunststoffdichtbahn
- 8 flächiges Feuchtemonitoring (bei Bedarf)
- 9 Geotextil (Schutz und Dränen)
- 10 Bitumenschweißbahn 1-lagig
- 11 Deckelplatte mit bituminösem Haftgrund
- 12 Haupttragwerk



von Setzungen und Bewegungen aus der darüberliegenden Erdüberschüttung trennt. Darüber wird eine 10 cm starke Schicht aus Filtersteinen zwischen Lagen aus Geotextilien aufgebracht, um drückendes Wasser auf der Abdichtung und Ausschwemmungen von Sedimenten zu verhindern. Bei gekrümmten Oberflächen bietet sich die Ausbildung von Packungen für die Filtersteine zur Sicherung in der Lage an. Den Abschluss bildet eine Schicht aus grobkörnigem Boden zur Verankerung der Vegetation gefolgt von einer Überdeckung, mit der die endgültige Oberflächenstruktur hergestellt wird.

Leitdetail Lageranschluss Bogentragwerke

Für die Bogentragwerke eignet sich eine Lagerung, bei der die Binder einzeln über Stahlkonsolen an das Widerlager angeschlossen werden. Die Holz-Stahl-Verbindung besteht dabei aus Schlitzblechen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln für die Ableitung von Querkräften, die Druckkräfte werden über Kontaktpressung in der Stirnfläche der Binder übertragen. Aufgrund der höheren Druckfestigkeit von Eichen-BSH parallel zur Faserrichtung kann die notwendige Kontaktfläche und somit auch die Größe der Stahlplatte kleiner ausfallen als bei Nadelholz-BSH-Trägern der Klasse GL 24h.



Der Gelenkbolzen wird mit Scheiben und Splinten gesichert und während der Montage eingetrieben. Dieser Baustellenstoß ermöglicht eine zügige Montage der Einzelträger, da eine Arbeitskraft je Gelenk ausreicht, um die Binder in ihre endgültige Position zu bringen. Ein "übergroßes" Lochspiel von bis zu 8 mm kann die Montage zusätzlich erleichtern.

Der Anschluss an das Betonbauteil erfolgt ebenfalls über Kontaktpressung unter der Stahlplatte des Lagerbauteils sowie über Betonanker oder Bewehrungsanschlüsse zum Abtrag von Kräften, die parallel zur Kontaktfläche wirken. Mit Grundplatten, die bereits in der Formschalung des Lagerbalkens angeordnet werden, lässt sich zudem eine hohe Genauigkeit bei der Ausrichtung sowie eine beschleunigte Montage erzielen.

Abb. 20:
einbetonierte Grundplatten sichern eine
passgenaue und schnelle
Montage der Lagerteile
(Luckenwalde 2011)

Abb. 21:

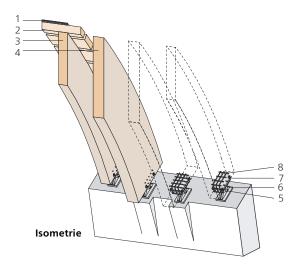
Schnitt und Axonometrie

der Lagersituation der Doppelbögen

Abb. 22:

Im Randbereich des Tragwerkes können größere Querschnitte notwendig sein, um die zusätzlichen Lasten aus der Irritationsschutzwand aufzunehmen

Längsschnitt



- 3 Hauptträger, Eichen-BSH
- 4 Gelenkbolzen

Isometrie

- 5 Augenblech
- 7 Stabdübel bzw. auszugsfestes Verbindungsmittel
- 1 Deckelplatte, Furnierschichtholz
- 2 Deckelbohle, Eichen-BSH

Längsschnitt

- Schlitzblech

- 1 Deckelplatte, Furnierschichtholz
- 2 Deckelbohle, Eichen-BSH
- 3 Hauptträger Regelquerschnitt, Eichen-BSH
- 4 Hauptträger im Randbereich zur Aufnahme zusätzlicher Lasten aus der Irritationsschutzwand
- 5 Gelenkbolzen
- 6 Augenblech
- 7 Schlitzblech
- 8 Stabdübel

Leitdetail Firstgelenk Dreigelenkbogen

Das Firstgelenk der Dreigelenkbögen wird ähnlich zu den Lagerbauteilen ausgebildet. Es besteht ebenfalls aus Schlitzblechen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln zum Abtrag von Querkräften und einer Stirnplatte für die Kontaktpressung zwischen Holz und Stahl. Diese ist zum Holz mit den Schlitzblechen und zum Gelenkbolzen mit mehreren Augenblechen verbunden. Die Augenbleche bilden mit dem Gelenkbolzen eine mehrschnittige Verbindung, die überaus leistungsfähig ist und gleichzeitig einen geringen Montageaufwand erzeugt. Auch hier bietet ein übergroßes Lochspiel von bis zu 8 mm die Möglichkeit einer deutlich leichteren Montage, ohne die Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit wesentlich zu beeinflussen. Über die gesamte Lebenszeit des Bauwerkes hinweg kann von einer andrückende Auflast ausgegangen werden. Dabei setzen sich die Gelenkbolzen nach dem Ablassen vom Kran in ihre endgültige Lage, spätere Verschiebungen reduzieren sich auf ein Minimum.

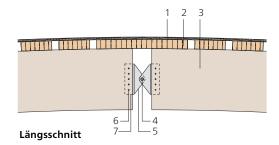
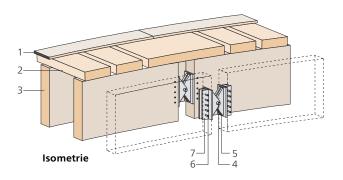


Abb. 23: Schnitt und Axonometrie des Firstpunktgelenkes der Dreigelenkbögen



- 1 Deckelplatte, Furnierschichtholz
- 2 Deckelbohle, Eichen-BSH
- 3 Hauptträger Regelquerschnitt, Eichen-BSH
- 4 Gelenkbolzen
- 5 Augenblech
- 6 Schlitzblech
- 7 Stabdübel



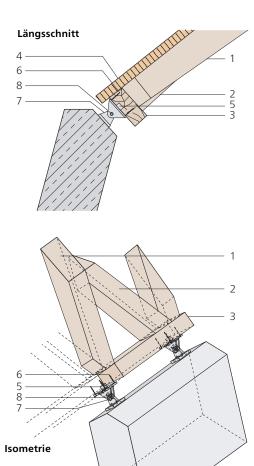
Abb. 24:
Montage der Dreigelenk-Bogenbinder
(Grünbrücke Luckenwalde 2011)

Leitdetails Zollinger-Schalentragwerk

Das Zollinger-Schalentragwerk hat seinen Ursprung in den 1920er Jahren und wurde aufgrund der besonders wirtschaftlichen Bauweise mit einer großen Zahl identischer und vor allem kurzer Bauteile vielfach eingesetzt. Die ursprüngliche Konstruktion hat im Knotendetail allerdings einen Schwachpunkt, da dieser zwar eine hohe Tragfähigkeit bietet, aber auch eine verhältnismäßig große Verformung zulässt.

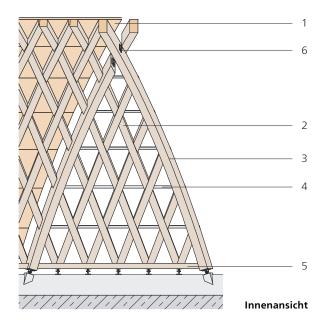
Eine Weiterentwicklung dieses Tragwerks unter Zuhilfenahme moderner Verbindungsmittel und computergesteuerter Abbundtechnik ermöglicht dagegen einen deutlich steiferen Anschluss.

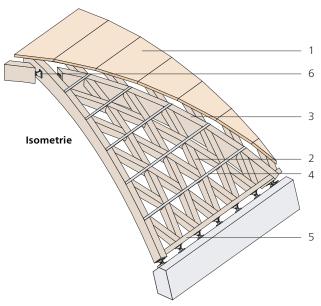
Abb. 25:Schnitt und Axonometrie der Lagersituation des Zollinger-Schalentragwerkes



- 1 Lamelle durchgehend
- 2 Lamelle gestoßen
- 3 Lagerschwelle
- 4 Deckelplatte
- 5 Schubnocke zur Übertragung der Kräfte senkrecht zur Schalenfläche
- 6 Lagersicherung / Montagehilfe
- 7 Augenblech
- 8 Gelenkbolzen

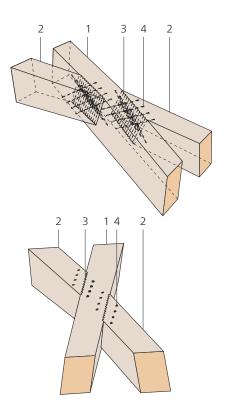
Abb. 26: Innenansicht und Axonometrie der gekreuzten Randbögen





- Deckelbohle 1
- Hauptträger kurze Fachwerkstäbe
- 3 Hauptträger durchgehende Randbögen
- 4 Zugbänder zur Aufnahme der Spreizkräfte aus den Rauten der Zollinger-Bauweise
- 5 Lagerschwelle
- 6 Kreuzungspunkt der Randbögen als gelenkige Bolzenverbindung

Abb. 27: schematische Darstellungen eines Knotens des Zollinger-Schalentragwerkes



- 1 Lamelle durchgehend
- 2 Lamelle gestoßen
- 3 Treppenversatz zur Übertragung von Druck- und Schubkräften in der Schalenfläche
- 4 Vollgewindeschrauben zur Übertragung der Kräfte senkrecht zur Schalenfläche

Abb. 28:

Anordnung der
Winkelstützelemente als
Gründungsbauteile für
die Irritationsschutzwände

Abb. 29:

Ansicht des Portalbereiches mit Irritationsschutzwand vom Verkehrsweg

Sicht- und Lärmschutzwände

Die komplette Abschirmung des Querungskorridors auf der Grünbrücke gegen Lärm und Licht aus dem Verkehr stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz der Querungshilfe durch Wildtiere dar. Damit die Bereiche vor den Brückenköpfen sowie die Grünbrücke selbst eine starke Lockwirkung erzeugen, sind die Sicht- und Lärmschutzwände entlang des Verkehrsweges weiterzuführen. Gemäß MA Q kann die Höhe der Irritationsschutzwände abseits der Brücke auf 2 m und die Länge je Richtung auf 60 m begrenzt werden.

Gemäß MA Q sollte aus Platzgründen auf Verwallungen verzichtet werden, daher bietet sich eine Ausführung mittels Winkelstützelementen an. Die notwendige Auflast für die Standsicherheit ist zumeist durch die Erdüberdeckung gegeben. Innerhalb der Irritationsschutzwände ist ein Pflegestreifen anzuordnen, sodass die Elemente ständig für eine handnahe Prüfung zugänglich sind.







Abb. 30: Weiterführung der Irritationsschutzwand zur Beruhigung des Eintrittsbereiches

Literatur

- [1] Jagdverband Wildunfallstatistik *
 www.jagdverband.de/zahlen-fakten/
 jagd-und-wildunfallstatistik/wildunfallstatistik
- [2] BUND Vogelschlag * www.bund-rvso.de/voegel-verkehr-strassen-autobahn-vogelschlag.html
- [3] BUND Emissionen der Straße **
 www.bund.net/themen/aktuelles/
 detail-aktuelles/news/tausende-tonnenmikroplastik-durch-reifenabrieb-von-derstrasse-in-unsere-lungen/
- [4] Baumgartner, Achim Verbundbvorhaben GBLaubholz – Beitrag BUND. Sankt Augustin: BUND e.V., unveröffentlicht
- [5] WWF Artensterben ** www.wwf.de/themen-projekte/artensterben
- [6] FGSV. MA Q Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen für Tiere und zur Vernetzung von Lebensräumen an Straßen Köln: Forschungsgesellschaft für Straßenund Verkehrswesen, 2008
- [7] BfN Natura 2000 Gebiete ** www.bfn.de/natura-2000-gebiete
- [8] FGSV. Richtlinie für die Anlage von Autobahnen Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2008
- [9] Umwelt Dachverband AT Ökosystemleistungen ** www.umweltdachverband.at/themen/naturschutz/biodiversitaet/oekosystemleistungen/
- [10] Umweltbundesamt Biodiversität **
 www.umweltbundesamt.de/das-uba/
 was-wir-tun/forschen/umwelt-beobachten/
 biodiversitaet#umweltschutz-und-biodiversitat
- [11] LANUV Entschneidungskonzept **
 www.lanuv.nrw.de/natur/landschaftsplanung/
 entschneidungskonzept-1

* Online, Zitat vom: 29. 8 2022 ** Online, Zitat vom: 12.10.2022

Bildnachweis:

Titelseite:

Foto der Grünbrücke über die A1 bei Nettersheim Autobahn GmbH des Bundes, Karl-Heinz Lorbach

Bild Vorwort:

aaron-burden_unsplash.com

Abb. 1, 20, 24, 28 – 30: Réne Legrand

Abb. 2:

Autobahn GmbH des Bundes, Karl-Heinz Lorbach

Abb. 3:

links: tim-online.nrw.de + Ergänzungen; rechts: A. Baumgartner, S. Golombek "Biotopverbund und Entschneidung am Beispiel der Fauna-Brücke über die BAB 560 in Sankt Augustin-Niederpleis" – BUND NRW, Düsseldorf 2023 (in Vorbereitung)

Abb. 4, 5, 7, 10, 12 – 16, 18, 19, 21 – 23, 25 – 27: Ing. Büro Miebach

Abb. 6, 17:

FGSV-Regelwerk Nr. 261, Merkblatt zur Anlage von Querungshilfen MA Q, Ausgabe 2022

Abb. 8 + 9:

nach: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. 3. korrigierte Auflage, Juli 2018

Abb. 11

Peter Burkes, Regensburg Ing. Büro Miebach (rechts)



Technische Anfragen an:

Fachberatung Holzbau
Telefon 030 / 57 70 19 95
Montag bis Freitag 9 bis 16 Uhr
Dieser Service ist kostenfrei.
fachberatung@informationsdienst-holz.de
www.informationsdienst-holz.de

Ein Angebot des Holzbau Deutschland Institut e.V. in Kooperation mit dem Informationsverein Holz e.V.