

Lastpfad-Anordnung eingeklebter Stahl-stangen bei Durchbrüchen im Holzbau

Load path configurations for glued steel rods for
openings in wood construction

Règles de mise en oeuvre de chevêtres métalliques
collés pour la construction bois

Thomas Strahm
neue Holzbau AG
CH-Lungern



Lastpfad-Anordnung eingeklebter Stahlstangen bei Durchbrüchen im Holzbau

1. Einleitung

Durchbrüche können den Tragwiderstand bei Trägern aus BSH entscheidend reduzieren und sollten deshalb schon beim Entwurf der Konstruktion vermieden werden. Das Versagen ist spröde und tritt plötzlich ein, ohne vorangehende grosse Verformungen oder sichtbare Ankündigung (Lignum Holzbautabelle Beispielsammlung).

In der Praxis sind Durchbrüche in Vollholzträger kaum zu vermeiden. Die Haustechnik nimmt im modernen Holzbau eine immer wichtigere Rolle ein, insbesondere bei mehrgeschossigen Wohn- und Bürobauten. Um nicht unnötig Raumhöhe zu verlieren ist es wünschenswert, trotz grösserer Spannweiten und Beanspruchungen möglichst geringe Bauhöhen zu erhalten. Daraus resultieren für den Träger im Verhältnis immer grössere Durchbrüche.



Abbildung 1: Durchbruch in Unterzug (SANO Bern)

2. Normative Behandlung von Trägern mit Durchbrüchen

Durch die Anordnung von Durchbrüchen wird das Tragvermögen des Trägers, insbesondere bezüglich Querkraft vermindert, und zwar stärker als aufgrund des Restquerschnittes zu erwarten ist. Mit dem einfachen Nachweis am Nettoquerschnitt werden die am Rand des Durchbruchs örtlich höheren Beanspruchungen nicht erfasst. Statt die örtlich höheren Beanspruchungen zu erfassen, gehen die meisten Tragmodelle von reduzierten Widerständen aus bzw. führen reduzierte Bemessungsspannungen σ_d bzw. $\tau_d = k_{red} f_d$ ein.

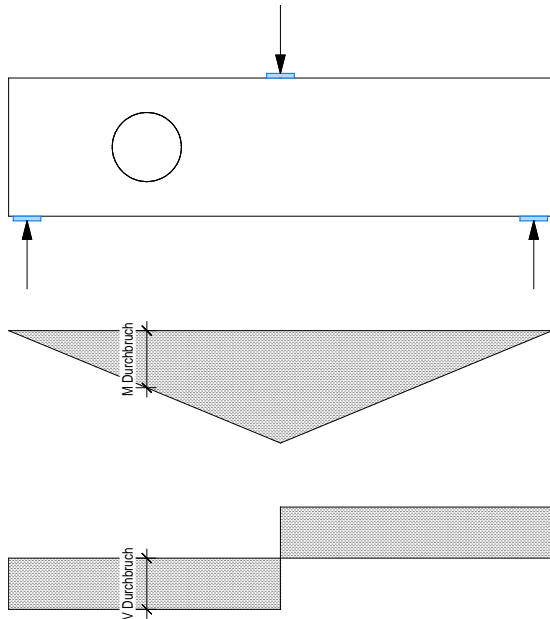


Abbildung 2: Schnittkräfte im Schnitt „Durchbruch“

Somit wird der Nachweis für $M_{\text{Durchbruch}}$ und $V_{\text{Durchbruch}}$ am Nettoquerschnitt (Restquerschnitt) mit den um k_{red} reduzierten Festigkeitswerten durchgeführt.

Um diese Reduktion zu vermeiden, sind in den EN-Normen Grundsätze für die Verstärkung derartiger Durchbrüche festgeschrieben. Festgelegt werden die wirkende Querkzugkraft und die Anordnung der Verstärkungselemente.

Die Durchbruchgrößen sind (gemäß Norm) auch verstärkt recht eingeschränkt (Innenliegende Durchbruchhöhen nicht mehr als 30%; bei aussenliegenden Verstärkungen nicht mehr als 40%). Auch muss der Nachweis $M_{\text{Durchbruch}}$ und $V_{\text{Durchbruch}}$ weiterhin am Nettoquerschnitt (Restquerschnitt) durchgeführt werden.

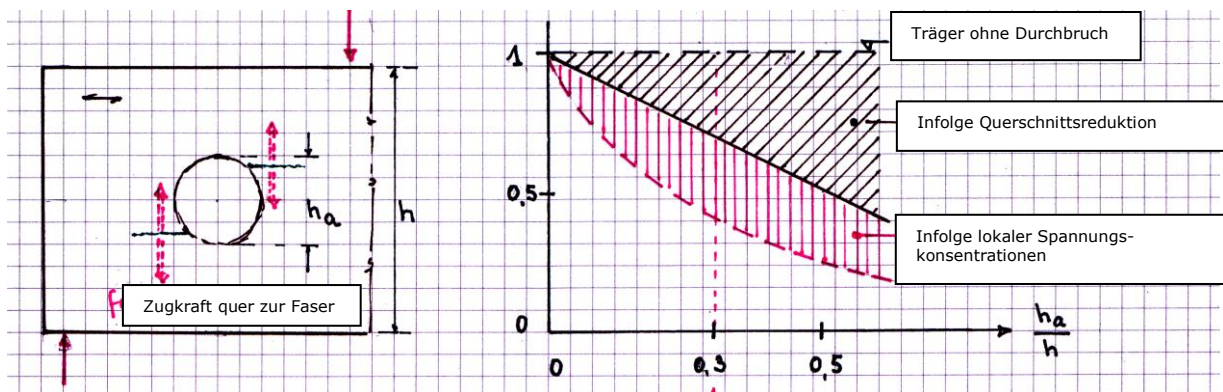


Abbildung 3: Abfall des Wirkungsgrades bezüglich Querkraft (Vergleich: unverstärkt/verstärkt/ohne Durchbruch)

3. ALP-GSA®-Verfahren

3.1. Idee

ALP steht für **a**lternative **l**oad **p**ath, auf Deutsch **a**lternatives **L**ast**p**fad-Verfahren. Dabei geht es darum, die auf den Durchbruch anfallenden Beanspruchungen bzw. resultierenden Schnittkräfte direkt durch die GSA-Verstärkung aufzunehmen. Im Bereich der Öffnung wird der Träger um das fehlende Material verstärkt. Dabei werden die im Durchbruch anfallenden Kräfte umgeleitet.



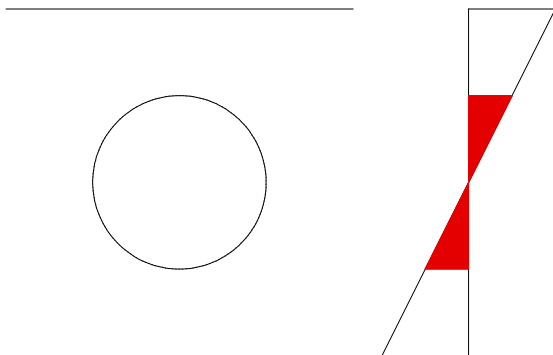
Abbildung 4: Ausfallast

Das ALP-GSA-Verfahren ist der Natur abschaubar. Ein Baum produziert „verstärkte“ Zonen um den Astbereich herum (dichteres Holz). Angestrebt wird, neben einem deutlich duktileren Bruchverhalten, eine Wiederherstellung des ursprünglichen Tragvermögens.

3.2. Grundsatz

Ausgehend vom Grundsatz: „Die auf den Durchbruchbereich (auf dem entfernten Holz) anfallenden Beanspruchungen bzw. resultierenden Kräfte sind durch anderweitige Elemente (alternative Wege) zu übernehmen“ sind den nachstehenden Schnittkraftanteile anderen Lastpfaden zuzuweisen:

△ M Durchbruch



△ V Durchbruch

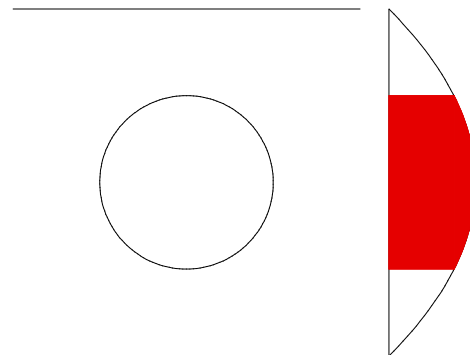


Abbildung 5: Moment- und Querkraftanteil des Durchbruchs

3.3. Betrachtungen zum Schubmodell

Der Nachweis auf Schub erfolgt traditionellerweise über einen Schnitt senkrecht zur Trägerachse. Die in diesem Schnitt wirkende Querkraft V soll im Gleichgewicht mit der Resultierenden der Schubspannungen sein.

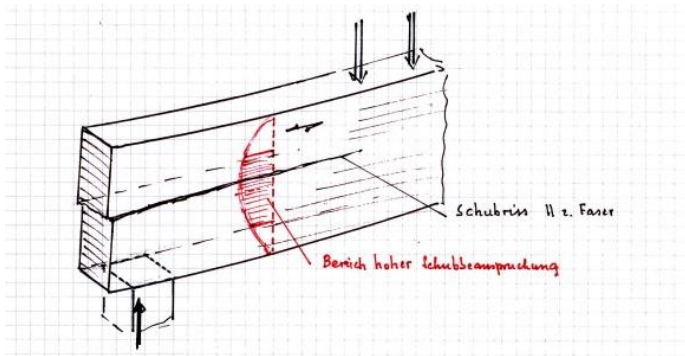


Abbildung 6: Typischer Schubriss (parallel zur Faser)

Das Versagen erfolgt jedoch entlang einer Scherfläche, die sich mehr oder weniger parallel zur Faser einstellt. Die Grösse dieser Scherfläche ist übrigens auch massgebend für die Festlegung der Schubfestigkeit (Grösseneinfluss). Die so ermittelte rechnerische Scherfläche stimmt dann auch gut überein mit der tatsächlichen Bruchfläche. Ein derartiges Vorgehen – an sich gleichwertig wie der klassische Nachweis (siehe Abb.7) – ist zielgerichteter und fördert zudem das Verständnis für die eigentliche Ursache des Schubversagens. Der Schubfluss wird im Bereich des Durchbruchs unterbrochen. Über alternative Wege ist somit diese „Störung“ im Schubfluss zu kompensieren.

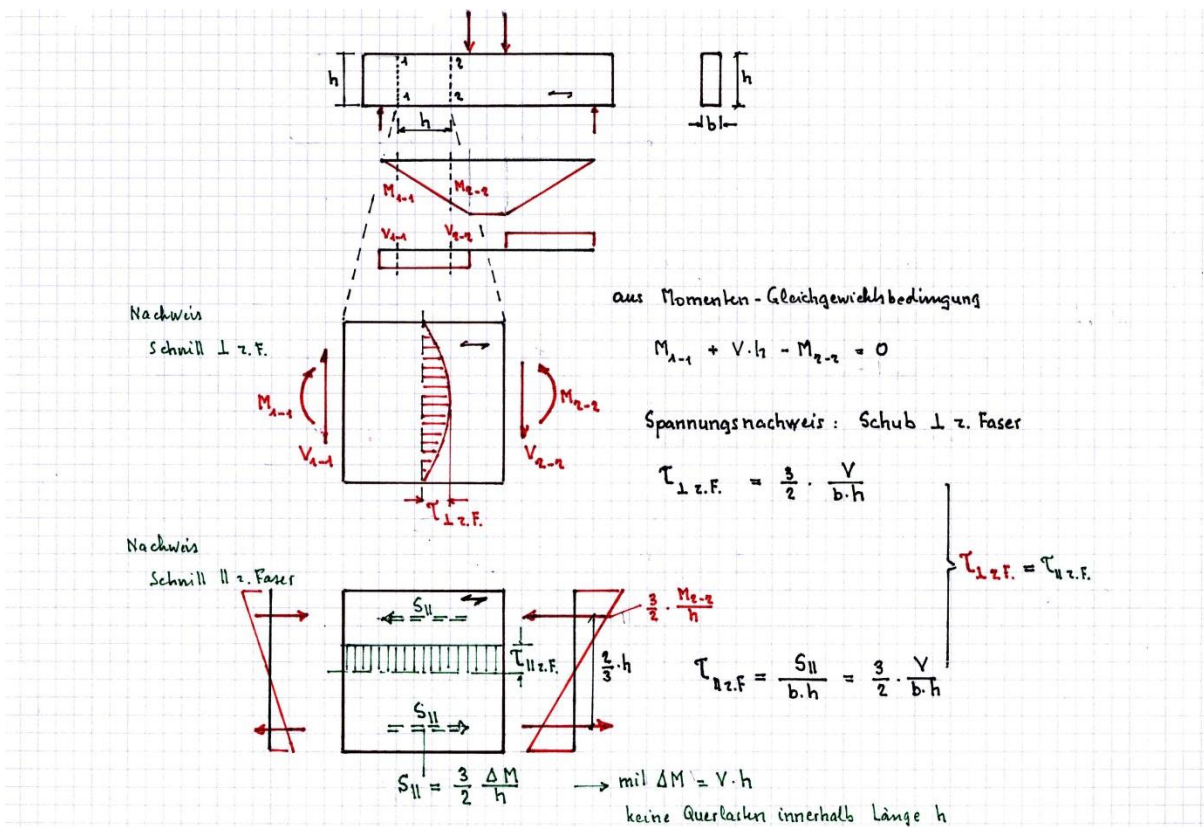


Abbildung 7: Gleichwertigkeit der Schubnachweise parallel bzw. senkrecht zur Faser

Somit tritt hier an Stelle des Querkraftanteils $\Delta V_{\text{Durchbruch}}$ neu der zu kompensierende Schubflussanteil $\Delta S_{\text{Durchbruch}}$.

4. GSA® Technologie

Zusammen mit Herr Professor Ernst Gehri forscht und entwickelt die neue Holzbau AG seit bereits 15 Jahren im Bereich eingeklebter Gewindestangen. Unter dem Markennamen „GSA-Technologie“ sind dabei die verschiedensten Anschlussteile entstanden, die erfolgreich in diversen Holztragwerken eingesetzt werden. Verbindungen mit eingeklebten Gewindestangen zählen zu den leistungsfähigsten Verbindungsmitteln im modernen

Ingenieurholzbau. Auf kleiner Fläche können grosse Kräfte eingeleitet werden. Es ist uns im Lauf der Jahre gelungen, verschiedene Verbindungsmittel für die unterschiedlichsten Anwendungen zu entwickeln. Es handelt sich um Teile, die durch eine Serienherstellung im Preis günstig sind und auf der Baustelle einfach, nur mit wenigen Bolzen verbunden werden. Unsere GSA Technologie eignet sich ebenfalls für komplexe Bauteile. Angefangen im Fachwerkbau über zugverstärkte Bauteile (Holzarmierung) bis hin zu Holzbetonverbund und Querkug-, Querkdruck- und Schubverstärkungen, überall finden sich leistungsfähige Lösungen.

Die GSA-Technologie erweist sich auch als alternativer Lastpfad bei Durchbrüchen geeignet. Die prinzipielle Anordnung ist aus Abb.8 ersichtlich.

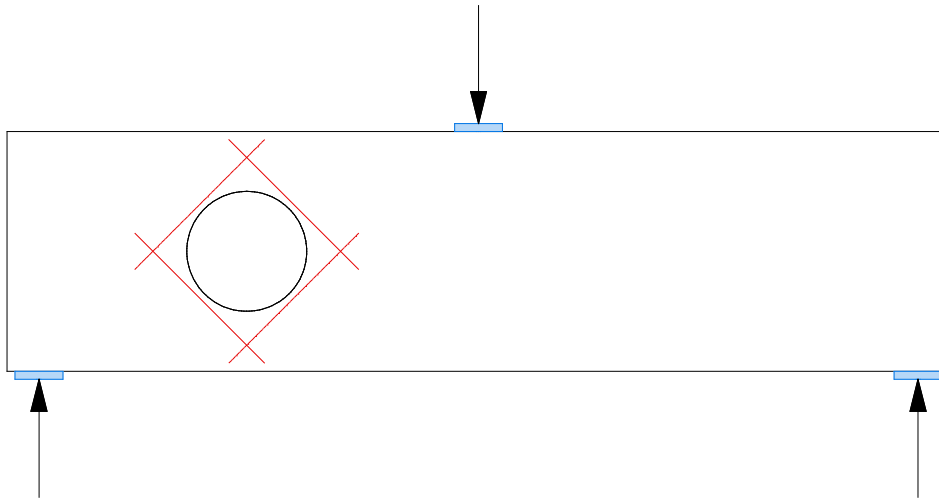


Abbildung 8: Prinzipielle Führung

Die GSA-Stäbe werden auf die umzuleitenden Kräfte $\Delta M_{\text{Durchbruch}}$ und $\Delta S_{\text{Schubfluss}}$ ausgelegt. Die Anordnung erfolgt jeweils so, dass die zu übertragenden Kräfte möglichst optimal um den Durchbruch herumgeleitet werden. Auf eine Mitwirkung des Holzes (Verbundwirkung) wird dabei verzichtet (konservativer Ansatz).

5. Versuche

Die Idee des GSA-ALP-Verfahrens stammt von Herrn Professor Ernst Gehri. Aus seiner Sicht sind die heute angewendeten Verstärkungen unzureichend, denn sie dienen nur zur Vermeidung des Queraufreissens; die Nachweise sind weiterhin am Restquerschnitt durchzuführen. Eine Verstärkung mit GSA-Technologie versprach hier eine deutliche Verbesserung.

Erste Versuche erfolgten 2011 an 3 Trägern mit Querschnitt 140/600 und kreisförmigen Durchbrüchen mit Durchmesser 260 mm. Diese zeigten bereits ein erstaunlich gutes Verhalten auf. Die Brüche erfolgten im gelochten Feld bei Schubfestigkeiten von rund $2,70 \text{ N/mm}^2$ (auf den vollen Querschnitt bezogen!). 2012 wurde ein ähnlicher Versuch – jedoch an einem BSH-Buchenträger mit Querschnitt 120/600 und Durchbruch $\varnothing 240$ durchgeführt. Das Versagen erfolgt hier auf dem Feld ohne Durchbruch (!) bei einer Schubspannung von $6,50 \text{ N/mm}^2$.

Um die neue Technologie zu perfektionieren, entschieden wir uns zur Erstellung einer umfangreichen Prüfserie. Herr Gehri hat das Versuchsprogramm konzipiert und zusammen mit seinem Assistenten Peter Haas die Träger im Labor Lungern geprüft und ausgewertet. In Abb.9 ist ein typischer Prüfkörper dargestellt. Die Spannweite betrug jeweils 2,22m, die Trägerbreite 140 mm; die Last wurde mittig eingeleitet. Variiert wurden die Trägerhöhe (600 oder 720 mm) sowie die Holzart (Fichte oder Esche).

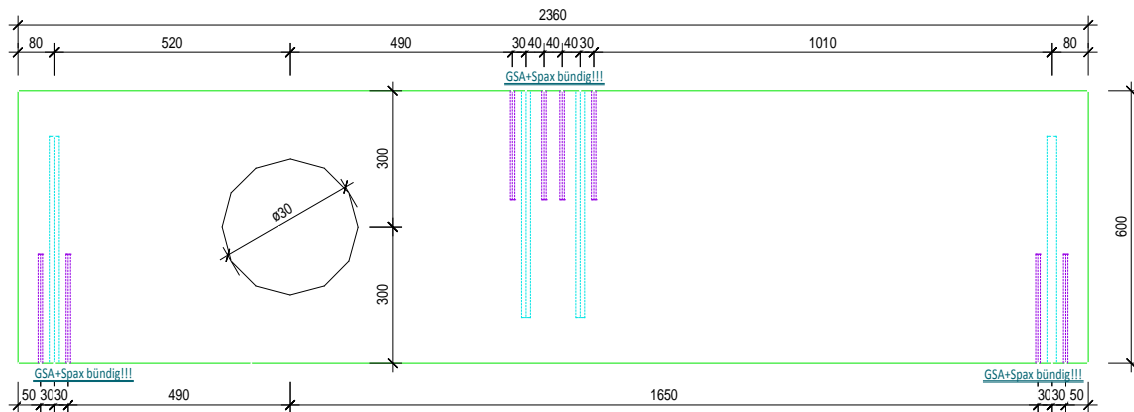


Abbildung 9: Prüfkörper mit Querschnitt 140/600, Durchbruch ø 300

Nachstehend die Ergebnisse der in der ersten Versuchsserie durchgeführten Prüfungen:

Tabelle 1: Ergebnisse der ersten Versuchsserie

Holzart	BSH-Qualität	Trägerhöhe mm	Durchbruch mm	Prüflast kN	Schubfestigkeit N/mm ²	Bruchursache Bruchort
Fichte	GL 28 k	600	ø 260	424	3,79	Schub im unverstärkten Feld
	GL 28 k	600	ø 260	364	3,25	Schub im unverstärkten Feld
	GL 28 k	600	ø 300	437	3,90	Schub im unverstärkten Feld
	GL 28 k	720	ø 360	454	3,38	Schub im unverstärkten Feld
	GL 28 k	720	260/410	419	3,12	"duktiler" Schubbruch im Durchbruch
	GL 28 k	720	260/320	519	3,86	"duktiler" Schubbruch im Durchbruch
Esche	GL 40 k	600	ø 300	840	7,50	kein Versagen Abbruch Versuch
	GL 40 k	600	ø 300	868	7,75	

Aus der Zusammenstellung wird ersichtlich, dass bei kreisförmigen Durchbrüchen in Fichtenträgern der Bruch stets im unverstärkten Feld auf Schub erfolgte, bei Schubwerten die üblicherweise zu erwarten sind. Bei den rechteckigen Durchbrüchen erfolgte das Versagen im Durchbruchbereich, allerdings bei ausreichend hohen Werten (bezogen auf den Vollquerschnitt!); zudem lag ein „duktiler“ Bruch vor und die Restlast betrug noch rund 80% des Bruchwertes. Als Vergleichsgrösse ist der charakteristische Wert gemäss Norm SIA 265 heranzuziehen: $f_{v,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$ (für die geprüften Abmessungen liegt unter Berücksichtigung des Grösseneinflusses der Vergleichswert etwas höher bei $2,75 \text{ N/mm}^2$).

Bei den Durchbrüchen in Eschenträgern erfolgte ein Abbruch der Versuche bei einer Schubbeanspruchung von rund $7,5 \text{ N/mm}^2$, dies zur Schonung von Mensch und Maschine. Beachte: die örtlich einzuleitende Last betrug rund 850 kN! Die Durchbrüche zeigten dabei nur einen kleinen Anriss.

Die zweite Versuchsserie (zurzeit in Vorbereitung) umfasst Träger in Fichte von 1,0 m Höhe (mit einem Durchbruch ø500), sowie Träger (in Fichte und Esche) mit Höhe 720mm und doppelten Durchbrüchen. Bedingt durch die Anordnung von zwei Durchbrüchen in einem Feld wurde die Spannweite auf 3,84 m vergrössert. Die Ergebnisse der Prüfungen sollen bis Januar 2014 vorliegen.

6. Fazit

Das ALP-GSA[®]-Verfahren ist geeignet, um Durchbrüche wirksam zu verstärken; dank der GSA-Verstärkung kann auf eine Abminderung des Schubvermögens (bezogen auf den Vollquerschnitt) verzichtet werden. Erfolgt der Bruch dennoch im durchbrochenen Bereich ein, so stellt sich ein weitgehender duktiler Bruch mit hoher Restlast (rund 80%) ein.

Das Bemessungsmodell hat sich als geeignet und zuverlässig erwiesen. Die bei jeder Prüfung jeweils durchgeführten Verformungs- und Dehnungsmessungen entsprachen dem erwarteten Kraftverlauf. Die gewählten Verstärkungsmassnahmen haben sich somit als sehr effizient erwiesen.

Um die Vorteile des GSA-ALP Verfahrens aufzuzeigen, zwei Beispiele:

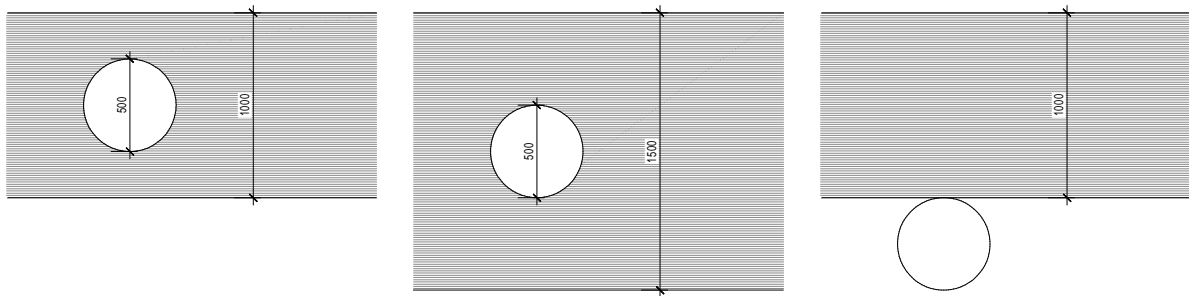


Abbildung 10: Beispiel 1

Ausgangslage: In einen BSH Träger von 1000 mm Höhe soll ein runder Durchbruch von 500 mm gefräst werden. Der Träger bleibt sichtbar. Dank GSA-ALP Technologie kann das volle Schubvermögen des Trägers ausgenutzt werden. Muss der Nachweis jedoch nach Norm geführt werden, ist mit innenliegenden Verstärkungen nur ein Durchbruch von $d = 0.3 \times h$ möglich ($d = 330$ mm). Für das $d = 500$ mm Loch müsste der Träger demnach auf $h = 1500$ mm vergrößert werden. In diesem Fall wäre es wohl intelligenter, das Rohr unter den Träger zu setzen!

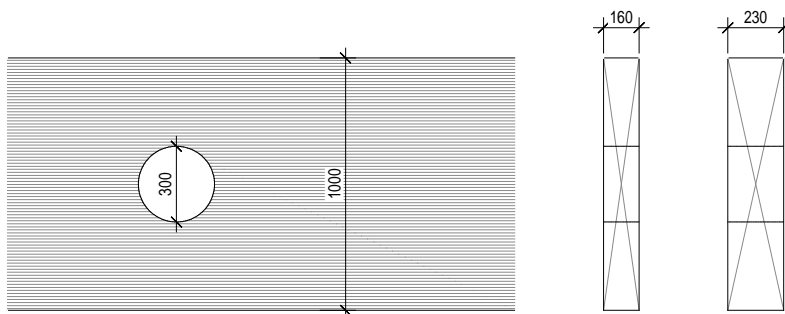


Abbildung 11: Beispiel 2

Ausgangslage: Loch $d = 300$ mm in einem Träger von 140/1000 mm. Im Bereich des Durchbruchs ist eine volle Leistung des Schubvermögens nötig. Nach normativer Bemessung muss der Nachweis des Trägers trotz Verstärkung des Durchbruchs mit dem Restquerschnitt geführt werden. Wird die Konstruktionshöhe nicht geändert, bedeutet dies eine Verbreiterung des Trägers von 160 auf 230 mm. Mit dem GSA-ALP Verfahren besteht eine wesentliche Einsparung bezüglich Holzvolumen, falls das Biegeversagen nicht massgebend wird.