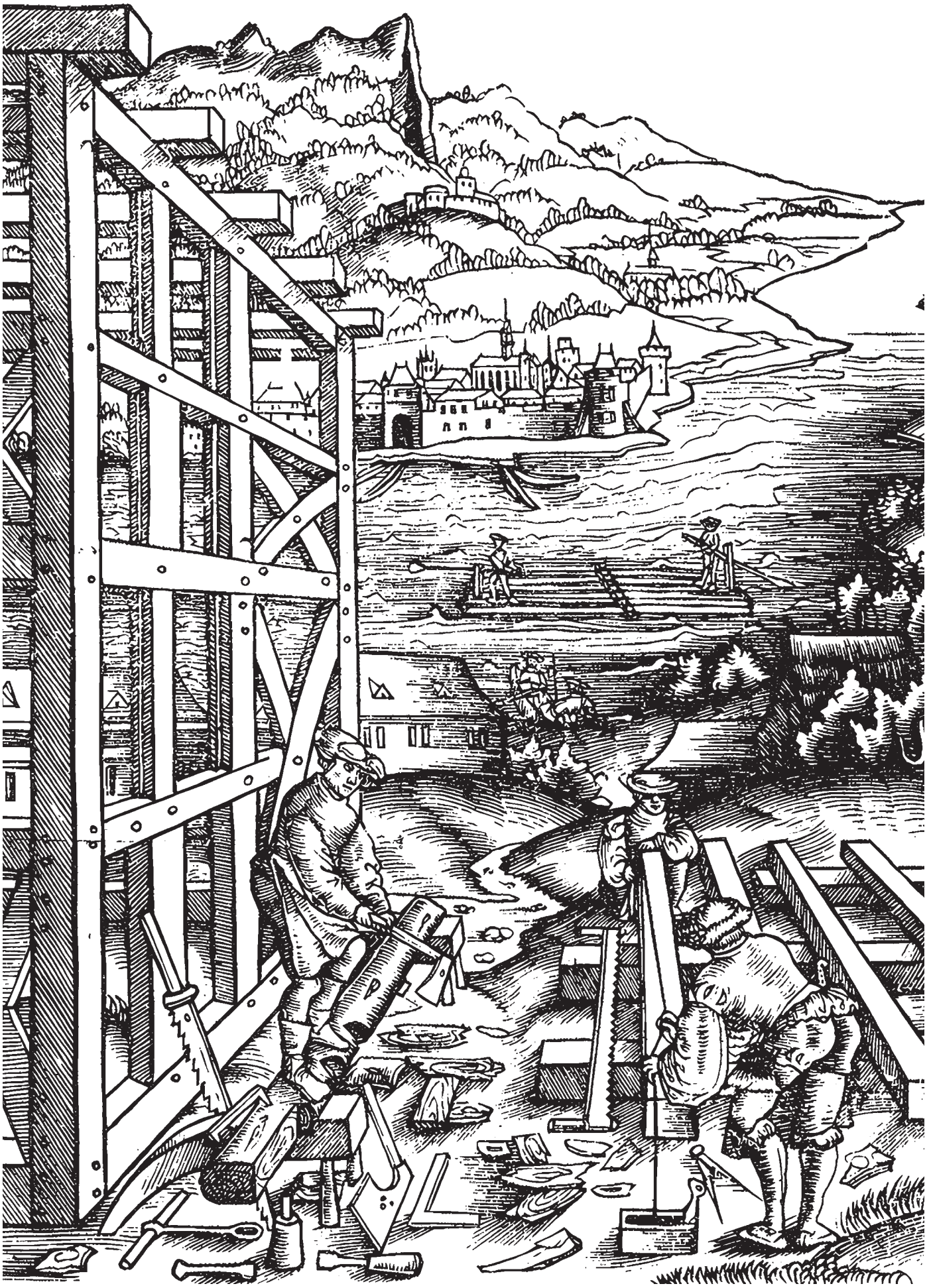
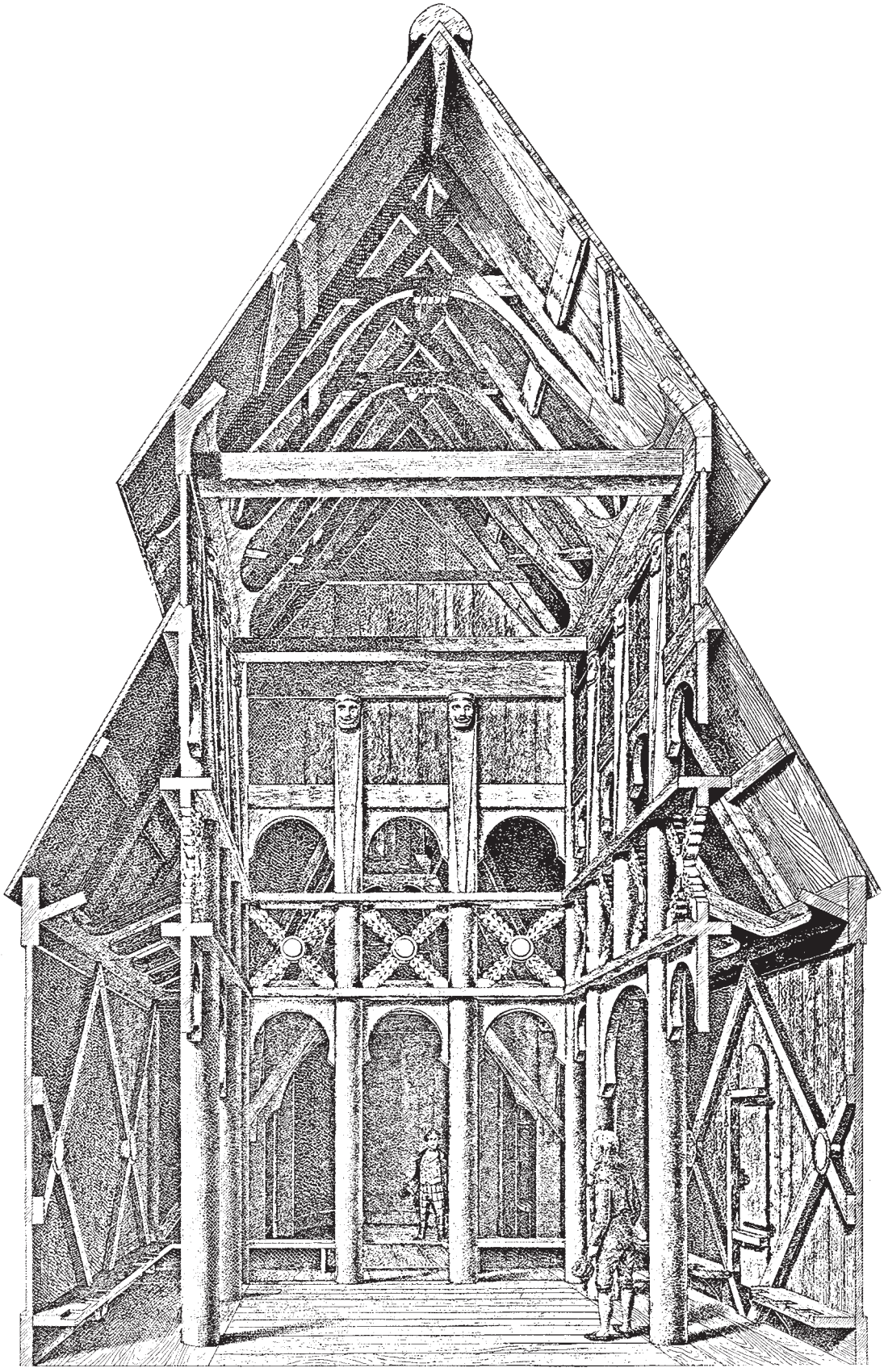
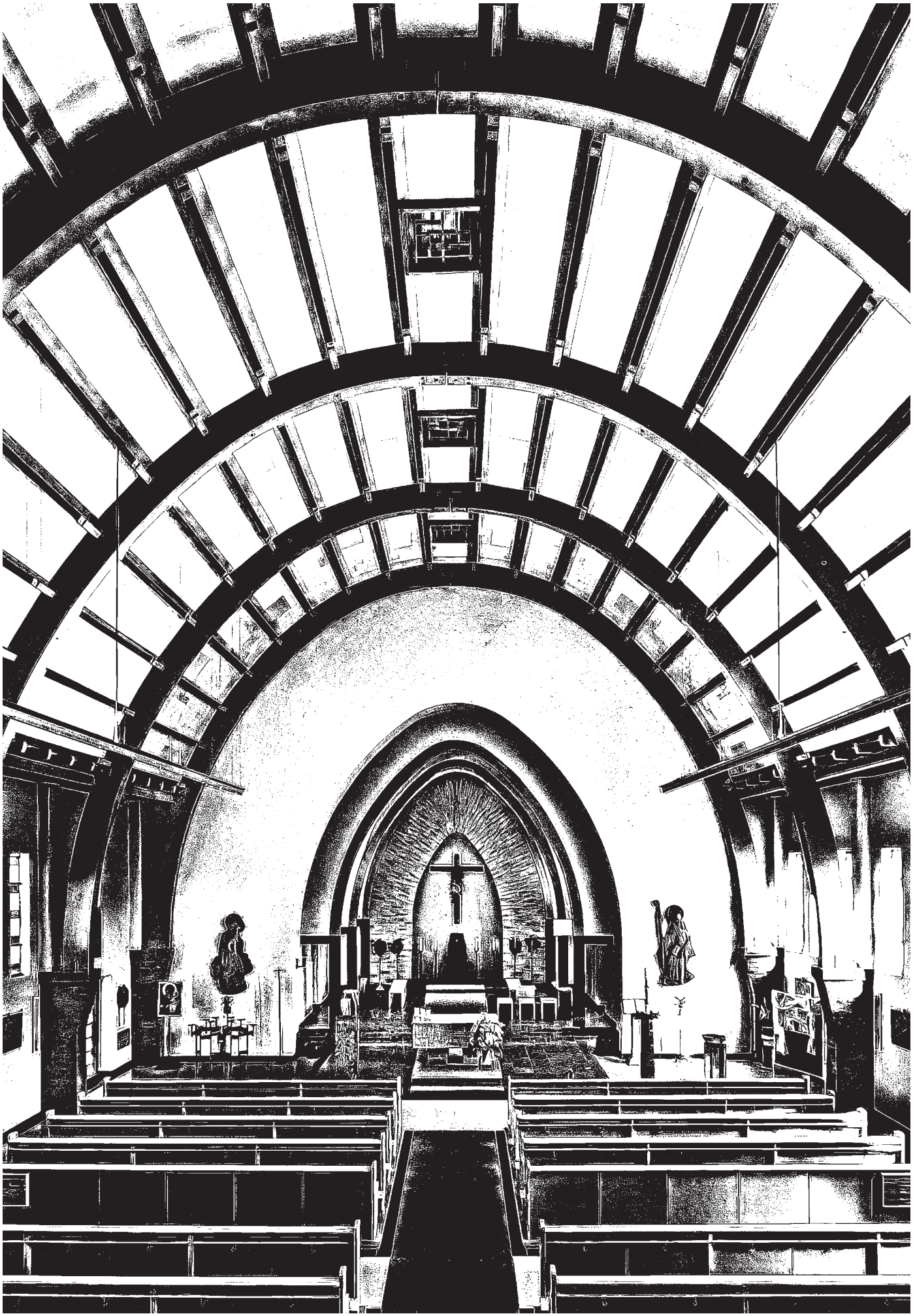
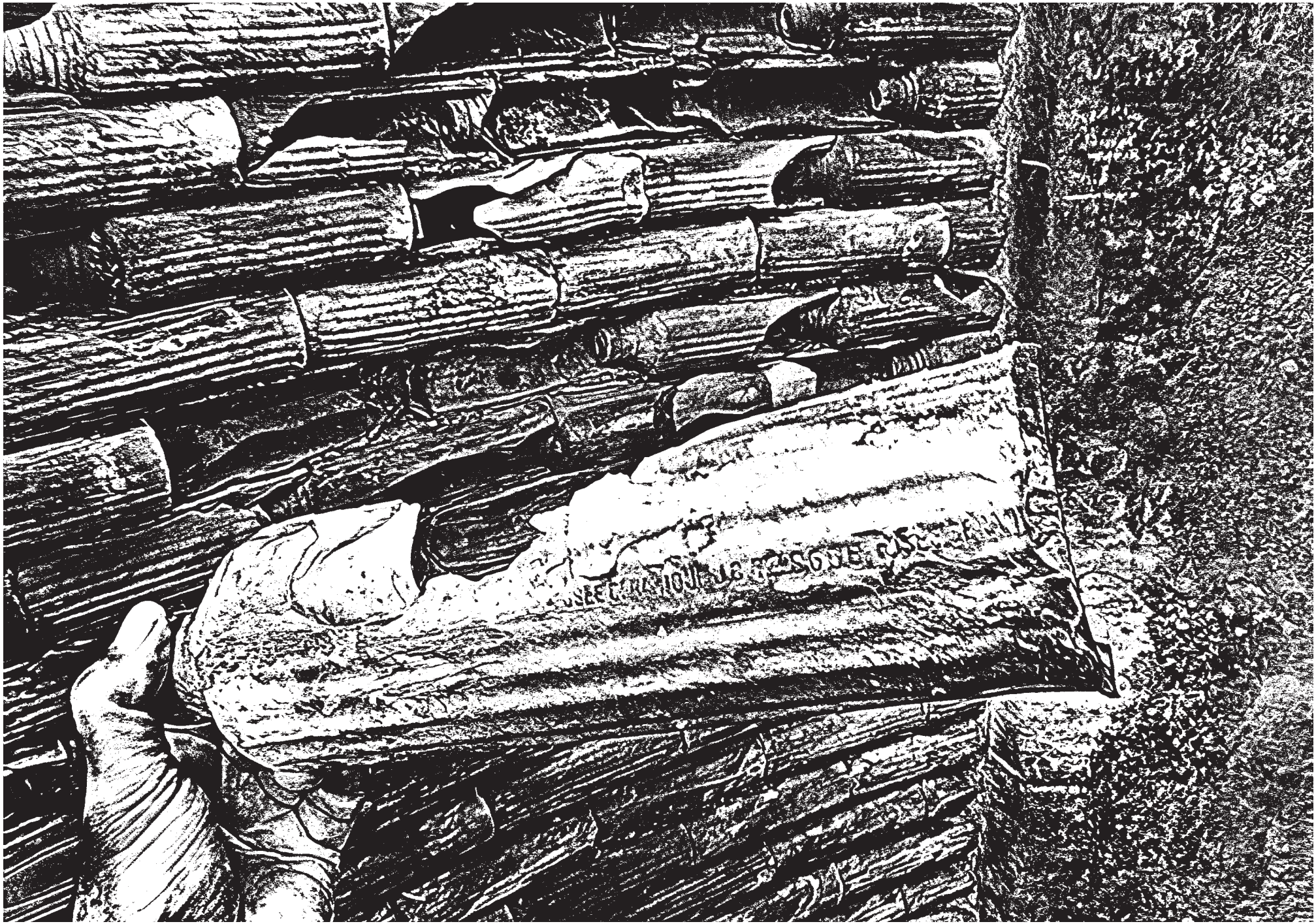
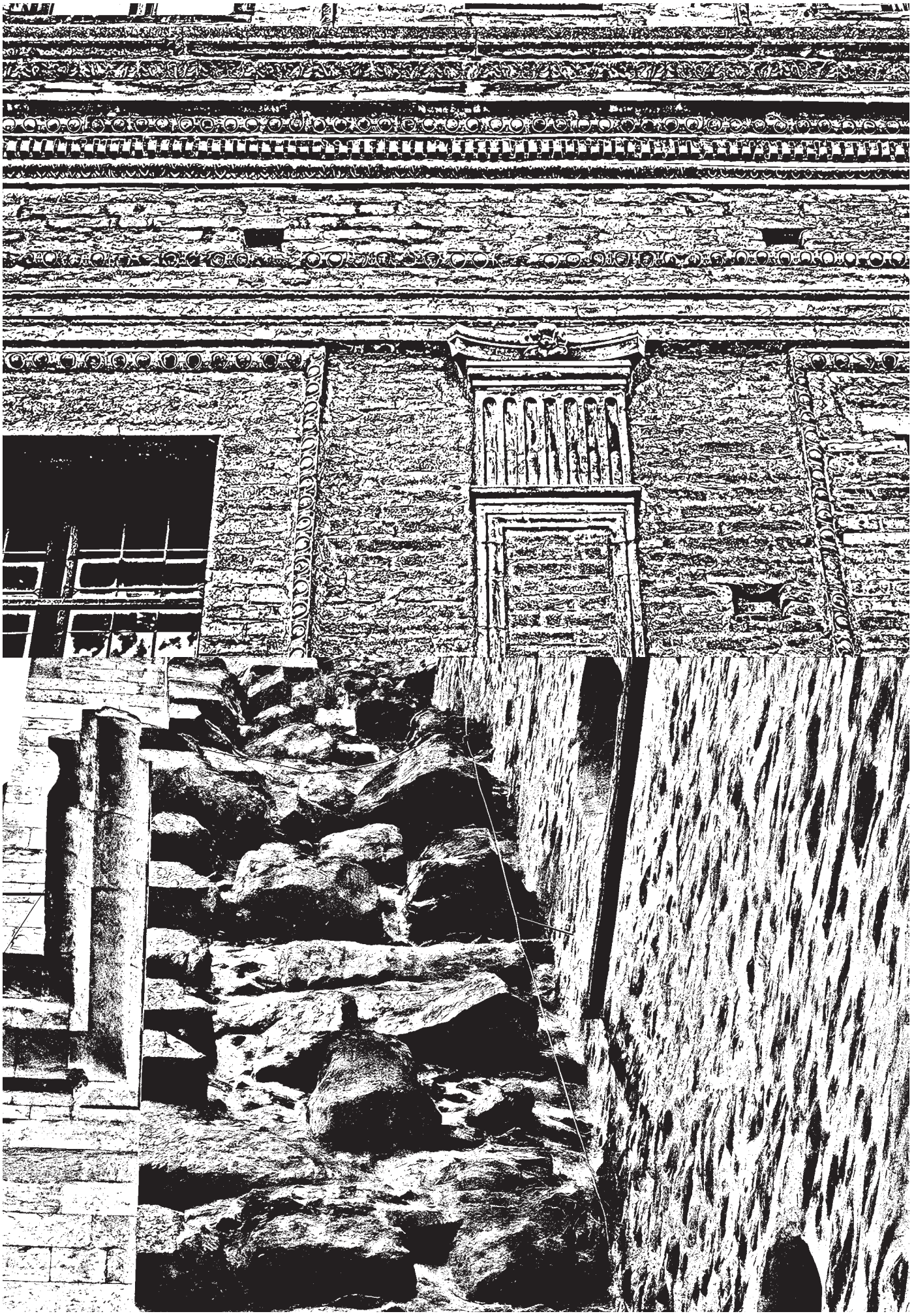
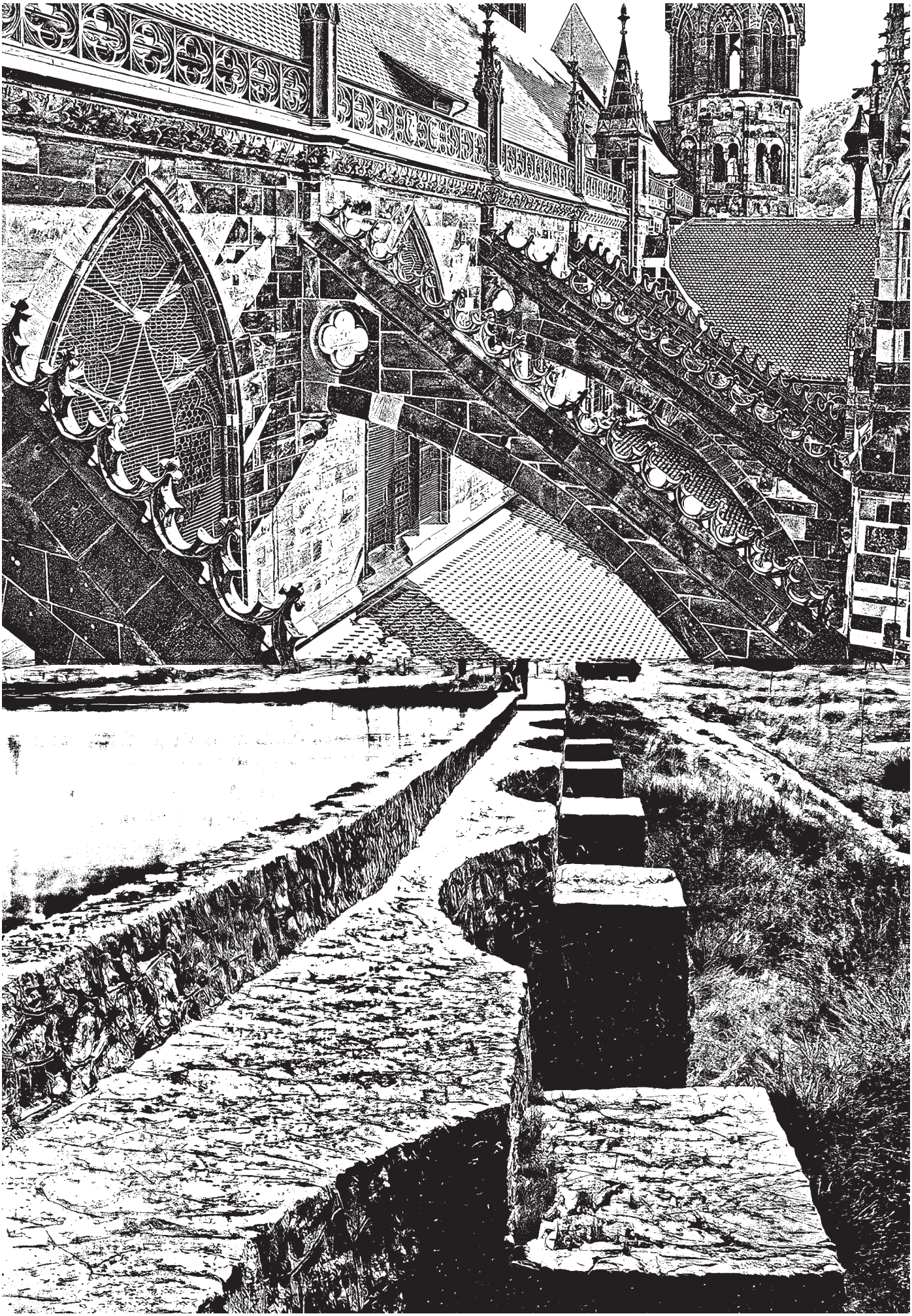


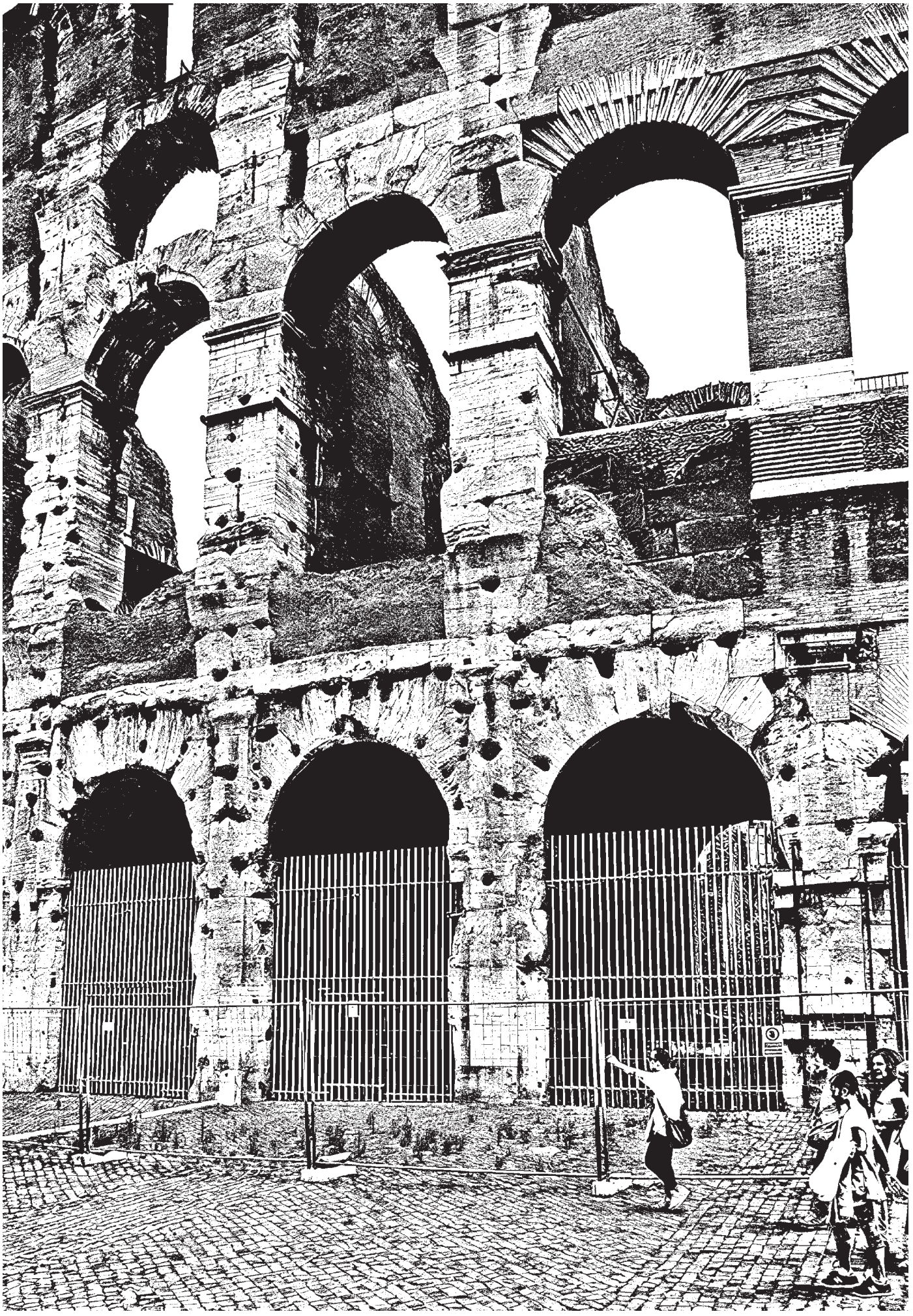


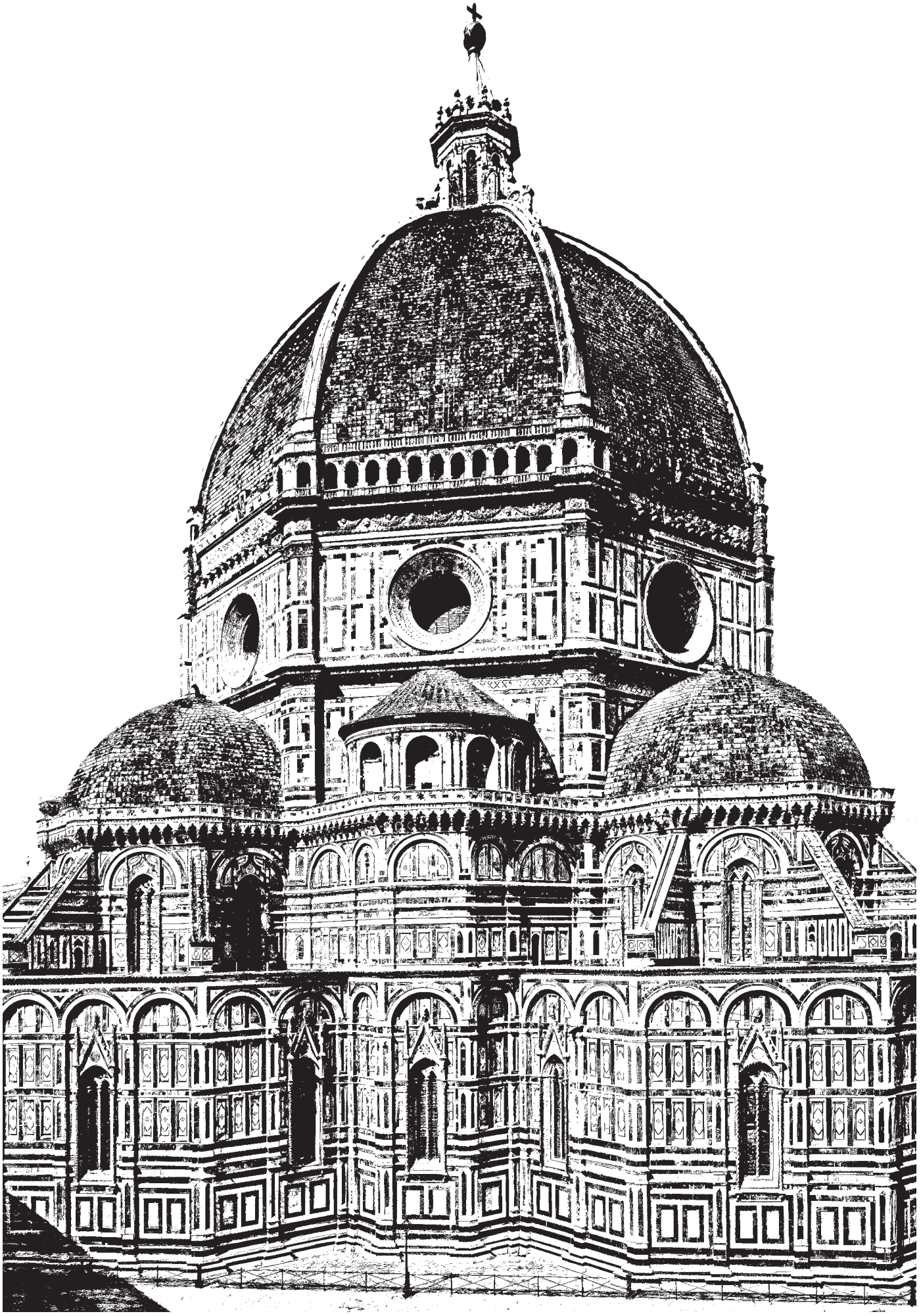












HISTORISCHE TRAGKONSTRUKTIONEN

Jörg Rehm

BIRKHÄUSER

VON DER ANTIKE BIS ZUR MODERNE

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort [Florian Nagler] 21
Einleitung 23

HOLZBAU

1. EINFÜHRUNG 26

2. WERKSTOFFE 31
Eigenschaften 31
Verfügbarkeit 32
Industrialisierung 34

3. FÜGETECHNIK 35
Bearbeitung 35
Verbindungsmittel 35

4. TRAGMECHANISMEN 40
Volumentragwerke (masseaktive Systeme) 41
Stabtragwerke (vektoraktive Systeme) 44
Bögen (formaktive Systeme) 46
Gewölbe (flächenaktive Systeme) 47

5. TRAGWERKSTYPEN 47
Hausgerüste 49
Deckenkonstruktionen 56
Dachtragwerke 56
Gewölbe 58

6. GEFÄHRDUNGEN 66
Bauzeitliche Ausführungsmängel 66
Allgemeine Schadensbilder und deren Ursachen 69

7. BEISPIELHAFTE BAUWERKE 70

MAUERWERKSBAU

1. EINFÜHRUNG 82

2. WERKSTOFFE 83
Ziegel, Natur- und Kunststein 83
Mörtel 84
Mechanische Eigenschaften 86
Transport, Versetzen 87

3. FÜGETECHNIK 88
Wandstrukturen 88
Skelettartige Konstruktionen 93
Gewölbe 93

MAUERWERKSBAU

4. TRAGMECHANISMEN [mit Matthias Jagfeld] 99
Stützlinie 99
Mauerwerkswände 100
Bögen und Tonnengewölbe 101
Kreuzgratgewölbe 102
Kreuzrippengewölbe 102
Kuppelgewölbe 102

5. TRAGWERKSTYPEN 106
Ebene Bautypen 110
Einfach gekrümmte Typen 110
Zweifach gekrümmte Typen 110
Sonderformen 112

6. GEFÄHRDUNGEN 113
Umwelteinflüsse 113
Statische Beeinträchtigungen 114

7. BEISPIELHAFTE BAUWERKE 116

EISENBAU

1. EINFÜHRUNG 132

2. WERKSTOFFE [Jürgen Villain] 136
Gewinnung und Herstellung 136
Mechanische Eigenschaften 139
Jüngere Entwicklung 141
Korrosionsschutz 142

3. FÜGETECHNIK [mit Jürgen Villain] 143
Stecken, Schrauben 143
Nieten 144
Löten, Schweißen 147

4. TRAGMECHANISMEN 147
Volumentragwerke (masseaktive Systeme) 148
Bögen (formaktive Systeme) 148
Stabtragwerke (vektoraktive Systeme) 150
Gewölbe (Schalen bzw. flächenaktive Systeme) 151

5. TRAGWERKSTYPEN 154
Profile 154
Frühe Rahmenkonstruktionen im Hochbau in Großbritannien, Frankreich und Deutschland [Bill Addis] 156
Stab- und Rahmentragwerke allgemein 165
Fachwerke 170
Seiltragwerke 174
Schalen 177

6. GEFÄHRDUNGEN [mit Jürgen Villain] 177
Korrosion 177
Ermüdung, Kriechen und Relaxation 180
Überlastung 180

7. BEISPIELHAFTE BAUWERKE 182

EISENBETONBAU

1. EINFÜHRUNG 194

2. WERKSTOFFE 195
Bewehrung 195
Beton 196

3. FÜGETECHNIK 199
Vorbilder 199
Baustellenorganisation 200
Abgrenzung zu anderen Bauweisen 200
Bewehrungseinlage 203

4. TRAGMECHANISMEN 204
Modellbildung 205
Früheste Bemessungsmethode 205
Rahmentragwerke 207
Flächentragwerke 207

5. TRAGWERKSTYPEN 209
Schwerlastmauern 209
Behälter 209
Ebene Deckensysteme 210
Fertigteilsysteme 211
Skelettkonstruktionen 213
Ein- und zweifach gekrümmte Konstruktionen 216
Spannbeton 220
Auswirkungen auf die Architektur 220

6. GEFÄHRDUNGEN 222
Bauzeitliche Ausführungsmängel 222
Alterung des Betons 223
Besondere Konstruktionen 224

7. BEISPIELHAFTE BAUWERKE 226

EXKURSE

1. TRAGWERK UND INNOVATION [Eberhard Möller, Juan María Songel] 236
Rahmenbedingungen 236
Höhepunkte der Antike 236
Aufbruch der Wissenschaft 236
Naturgesetze 236
Modernes Bauwesen 236
Wegweisende Entwicklungen und Bauten 238
Evolution und Optimierung 241
Bewahren und Nutzen 241

2. GRAPHISCHE STATIK [Pierluigi D'Acunto, Giulia Boller] 242
Harmonie zwischen Form und Kräften im Tragwerksentwurf 242
Erste historische Entwicklungen 242
Formalisierung der graphischen Statik als eigenständige Disziplin 242
Beziehung zwischen graphischer Statik und projektiver Geometrie 244
Anwendungen im Bauingenieurwesen und Tragwerksentwurf 244
Computergestützte und dreidimensionale graphische Statik 247

3. UNTERSUCHUNGS- UND DOKUMENTATIONSMETHODEN [Christian Kayser] 248
Methoden der Bauaufnahme 248
Erfassung semantischer Daten 250

EXKURSE

4. ALLGEMEINE VORGEHENSWEISEN BEI INSTANDHALTUNGS- UND INSTANDSETZUNGSMASSNAHMEN [Sabine Kuban] 254
Das Bauwerk als Patient: Anamnese, Diagnose, Therapie 254
Anamnese: Voruntersuchung, Grundlagenermittlung 255
Diagnose: Analyse und Schadenserfassung 258
Therapie: Schadensbehebung und Wartung 260
Dokumentation: Bewahren der Erkenntnisse 260

ANHANG

Autoren und Autorinnen 264
Abbildungsverzeichnis 266
Tabellenverzeichnis 269
Literaturverzeichnis 270
Orts-/Personen-/Projektregister 282
Sachregister 289

„Es gibt keine Architektur ohne Konstruktion“, sagte der Architekt und Kollege an der TU München Victor López Cotelo einmal treffend im Diskurs über eine Abschlussarbeit an unserer Fakultät. Diese zunächst eher unspektakuläre Aussage ruft uns jedoch die ungeheure Bedeutung von Konstruktion für die Architektur in Erinnerung. Frei Otto verwies in seinem wunderbaren kleinen Text „Geschichte des Konstruierens. Was könnten die alten Steinbaumeister gewußt haben, um entwerfen und bauen zu können?“ darauf, dass es in den Stilepochen aller Zeiten „Moden“ gab, also „Formen und Formensprachen, die besonders beliebt waren. Die ‚Moden‘ entstanden auf jenen Gebieten des Bauens, die eine weitgehend ‚freie‘ Formgestaltung erlaubten. Freiheitsgrade gewähren solche Bauelemente, welche nicht oder nur wenig mit der bautechnischen Konstruktion zu tun haben, die ein Gebäude trägt und sicher macht. Mit tragenden Konstruktionen lässt sich nicht beliebig spielen.“ Im Weiteren kam er zum Schluss: „Die Konstruktionen sind zugleich die wichtigsten Architekturformen. Sie prägen die tragende Baukunst. Dies gilt ausnahmslos, gleichgültig ob es sich nun um Stützen, Säulen, Pfeiler, Balken, Platten, Bögen, Gewölbe, Kuppeln, Schalen, Zelte, Netze, Membranen oder Lufthallen handelt.“ Besser kann man nicht erläutern, wie wichtig das Wissen über Prinzipien, Geschichte, Anwendung, Mängel und Vermittlung des Konstruierens ist.

In diesem Buch, das mit dem Titel „Historische Tragkonstruktionen. Von der Antike bis zur Moderne“ den Bogen sehr weit spannt, entführen uns Jörg Rehm und seine Mitautoren und Mitautorinnen auf eine spannende Reise durch die Geschichte der Tragkonstruktionen, die bis heute nichts von ihrer Faszination eingebüßt hat. Dabei zeigen sie eindrucksvoll, wie Bauweisen, die in einer Zeit ohne Normen und standardisierte Verfahren entstanden sind, Jahrhunderte überdauert haben und bis heute Gültigkeit besitzen. Das Buch gliedert sich – entsprechend den für die jeweiligen Tragkonstruktionen eingesetzten Materialien – in die Hauptkapitel Holzbau, Mauerwerksbau, Eisenbau und Eisenbetonbau. Daran schließen noch Exkurse zu Prinzipien und Philosophie des Ingenieurwesens, Untersuchungs- und Dokumentationsmethoden und die Vorgehensweise bei Bestandserhaltung an. Überraschenderweise ist es trotz dieses fast lexikalischen Aufbaus ein Buch, das man von vorne bis hinten durchlesen kann und dies auch gerne und mit Gewinn tut, auch wenn man bereits über umfangreiche Erfahrung im Konstruieren verfügt. Es gibt viel zu entdecken in der Geschichte der Tragkonstruktionen und in diesem Buch.

Die Hauptkapitel führen zunächst die Baumaterialien und ihre für das Konstruieren wesentlichen Eigenschaften ein und zeigen dann eine Entwicklung der auf großer Kenntnis des Materials beruhenden Tragkonstruktionen von den einfachsten Anfängen bis hin zur virtuosen Anwendung. Dabei wird deutlich, dass viele der heute bewunderten Bauwerke aus einem Prozess des Versuchens und Scheiterns hervorgingen. Sie entstanden aus der Beobachtung natürlicher Vorgänge und der Erfahrung von Handwerkern, die ihr Wissen mündlich weitergaben und so das Fundament für die Weiterentwicklung der jeweiligen Konstruktionen legten. Die ausgewählten Beispiele illustrieren dabei nicht nur umfassend die konstruktiven Herausforderungen und Lösungen, sondern veranschaulichen vor allem auch das vielfältige gestalterische Potenzial von Konstruktion – es gibt keine Architektur ohne Konstruktion …

Eigentlich ist es wunderbar, dass die Betrachtung der Tragkonstruktionen in diesem Buch im frühen 20. Jahrhundert endet. Denn dort setzt eine Entwicklung im Bauwesen ein, die uns heute bisweilen zweifeln lässt, ob wir den Herausforderungen unserer Zeit mit den Methoden und Bauweisen, die wir in den letzten hundert Jahren praktiziert haben, wirklich gerecht werden können. Denn anstatt ungebremst einem „Höher, Größer, Weiter“ zu frönen, müssen wir den Flächenverbrauch bei allen Baumaßnahmen in der Stadt und auf dem Land reduzieren, den Gebäudebestand als Raum- und Materialressource nutzen und Materialien verwenden, die so wenig graue Energie wie möglich verbrauchen, einfach zu recyceln sind oder wieder in den Kreislauf der Natur zurückgeführt werden können. Wir müssen Gebäude bauen, die im Betrieb so wenig Energie verbrauchen wie möglich, dabei aber den Einsatz von Technik auf ein unbedingt erforderliches Minimum reduzieren und die Verwendung architektonischer statt technischer Elemente forcieren. Es sind robuste Gebäude zu entwickeln, die mit einfachen Mitteln an sich ändernde Lebensumstände der Nutzer angepasst werden können. Dabei gilt es auch, überzogene Ansprüche infrage zu stellen und sich auf das Wesentliche zu konzentrieren – auf das, was wir als Gesellschaft, aber auch als Einzelner wirklich zum Leben brauchen, ohne dabei die Grundlagen unserer Existenz zu zerstören.

Ein solches Bauen steht selbstredend in starkem Kontrast zur generellen Baupraxis der letzten Jahrzehnte. Es steht aber nicht im Kontrast zu den Bauten und den Konstruktionen in „Historische Tragkonstruktionen. Von der Antike bis zur Moderne“. Dieses Buch steht für eine kontinuierliche Entwicklung von Materialien und Konstruktionen, einen sparsamen Einsatz von Ressourcen und die weitgehende Verwendung natürlicher Materialien, also für Themen, an die wir eigentlich direkt wieder anknüpfen können. Das Buch könnte – oder sollte – Grundlage jeder Ausbildung in der Baukonstruktion sein. Mehr darf man vielleicht gar nicht wissen.

Florian Nagler, Juni 2025

Wir sind heute von zahllosen Bauwerken umgeben, in deren Errichtungszeit es keine Normen gab. Es handelt sich um Bauweisen, die von Versuch und Scheitern geprägt waren. Was davon erhalten ist, kann als gelungen gelten, weil es bei entsprechender Pflege Jahrhunderte oder gar Jahrtausende überdauert hat. Tragkonstruktionen wurden aus der Beobachtung natürlicher Vorgänge heraus entwickelt und ihre technische und künstlerische Gestaltung festigte sich mit der Erfahrung des Handwerkers, der sein Wissen an die nächste Generation weitergab. Innovationen benötigten Zeit, um in Versuchen zu reifen und sich von tradierten Techniken zu emanzipieren. Es wurden Regeln definiert, nach denen zu bauen Sinn ergab. Nicht immer war die Regel aber auch ideal. So dachte man in der Antike, dass die Übertragung geometrischer Grundformen auf die Architektur zur bestmöglichen Tragfähigkeit führen müsse.

Aus der Erfahrung heraus erwuchsen aber auch experimentelle Lösungen, wie wir mit Staunen bei plötzlichen Inventionen feststellen können. Als Beispiel sei die Entwicklung von Gitterschalen im ausgehenden 19. Jahrhundert erwähnt. Am Ende ermöglicht es uns die Mathematik, aus der Beobachtung nachvollziehbare Grundsätze der Bemessung abzuleiten, die heute unser Handeln im Bauwesen bestimmen. Der deduktive Ansatz, der in der Mathematik verankert ist, ist vielleicht der Grund dafür, dass wir heute Schwierigkeiten damit haben, historische Tragsysteme zu erklären, die auf der Grundlage von Erfahrung und Experiment entstanden. Wir beurteilen die Bauwerke nach aktuellen Gesetzmäßigkeiten. Bewährte Konstruktionen werden dadurch infrage gestellt, sind vom Abriss bedroht, müssen ertüchtigt werden, wenn wir kein sinnfälliges Modell für ihr Tragverhalten finden können. Die allermeisten historischen Bauwerke dürften nach aktuellen Regelwerken gar nicht existieren.

Die Ausbildung von Architekten und Bauingenieuren wurde erst vor etwa 200 Jahren in getrennte Bahnen gelenkt. Der Bauingenieur arbeitet nach wissenschaftlichen Kriterien, der Architekt dagegen häufig induktiv. Er wollte im 19. Jahrhundert von ingenieursmäßigen Innovationen nichts wissen und blieb gestalterisch konservativ. Die Bauingenieure nutzten dagegen ganz gezielt die Werkzeuge der industriellen Revolution und schufen Erstaunliches. Erst in der klassischen Moderne versuchten Architekten diese neuen Werkzeuge des Konstruierens für ihre Zwecke zu nutzen.

Es ist heute entscheidend, dass mit Blick auf die Bauwerkserhaltung beide Berufsfelder, ergänzt um weitere Disziplinen, verstärkt zusammenarbeiten. Die vorliegende Publikation versammelt Kenntnisse und Erkenntnisse über historische Tragkonstruktionen und vermittelt eine Idee davon, wie sie funktionieren bzw. welchen Blick die zeitgenössischen Protagonisten darauf hatten. In der Bautechnikgeschichte finden wir ausschließlich Beispiele dafür, dass Baumeister induktiv vorgegangen sind. Waren bauliche oder gestalterische Aufgaben zu lösen, wurden die technischen Schwierigkeiten untersucht und man tastete sich aus der gegebenen Erfahrung heraus an eine Lösung heran.[1] Dieser Dreiklang führte zu ganz wunderbaren Ergebnissen. Es ist unsere Aufgabe, Wege zu finden, um diese Zeugnisse in die Zukunft zu führen und zugleich festzustellen, was wir aus diesem Erfahrungsschatz für unsere eigene Arbeit lernen können.

1 Frei nach Stefan Polónyi. „Der Einfluß des Wissenschaftsverständnisses auf das Konstruieren“. In: Graefe 1989, S. 237–245.

Lassen Sie sich auf eine faszinierende Entdeckungsreise mitnehmen, bei der exemplarisch historische Tragkonstruktionen – vornehmlich des mitteleuropäischen Raums – aus der Zeit bis etwa 1920 vorgestellt werden! Die verwendeten Werkstoffe werden genauso erläutert wie die zeitgenössische Fügetechnik. Typische Bauweisen werden anhand von anschaulichen Beispielen und mithilfe von Skizzen erklärt und die entsprechenden Tragmechanismen schematisch aufgezeigt. Ausgeführte Beispiele aus der Bautechnikgeschichte werden herausgegriffen und in kurzen Monografien dokumentiert. Darüber hinaus werden Risiken für den Erhalt historischer Tragkonstruktionen aufgezeigt und allgemein aktuelle Verfahren zur Dokumentation und Instandhaltungsplanung vermittelt.

1

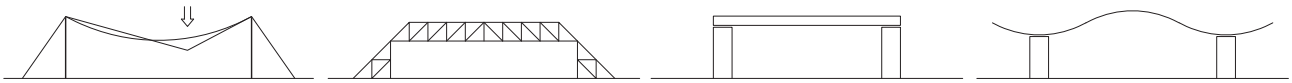


Abb. 1 Vier Tragsysteme nach Heinrich Engel (von links nach rechts): formaktiv, vektoraktiv, masseaktiv, flächenaktiv.

Schließlich ist es für unseren täglichen Umgang mit Bestandsbauwerken wichtig, eine gemeinsame Sprache für die Definition von Tragsystemen und deren Tragverhalten zu finden. Eine mögliche Einteilung von Tragkonstruktionen erfolgt anhand ihrer Reaktion auf äußere Einwirkungen, wie sie Heinrich Engel definierte.[2] Diese Systematik kann auf alle hier angeführten Bauweisen angewendet werden. So können Tragsysteme, die nur unter Gleichlast verformungsarm bleiben, formaktiv genannt werden. Solche Systeme erfahren eine konstante Normalkraft. Darunter fallen Membranen, aber auch verformungsanfällige Bögen. Tragsysteme, die durch ihre Massivität auffallen und Biegungen bewältigen können, bezeichnet man als masseaktiv oder als Volumentragwerke. Dagegen nennt man Träger, die aus stabförmigen Bauteilen zusammengesetzt sind und in denen näherungsweise nur Normalkräfte in Stabrichtung wirksam werden, vektoraktiv. Schließlich brachte uns u. a. die Möglichkeit, zwei Werkstoffe wie Stahl und Beton zu gemeinsamer Tragwirkung gelangen zu lassen, sogenannte flächenaktive Tragsysteme. Seit Tausenden Jahren werden solche Schalen aber auch in gemauerter Form hergestellt, während feine Gitterstrukturen aus Holz oder Stahl als durchbrochene Schalen angesprochen werden. Immer bringen dabei Wölbung und Faltung Stabilität. (Abb. 1) Damit lässt sich eine breit gefächerte, weitaus feinere Typologisierung von Tragkonstruktionen in wenigen übergeordneten Systemen zusammenfassen, ohne einen Anspruch auf Endgültigkeit oder Vollständigkeit erheben zu wollen.[3]

Jörg Rehm, Mai 2025

2 Engel 1967.
3 Möller 2021, S. 95–97. Tragwerkstypologien. Dabei unterscheidet Möller z. B. Fachwerkträger von Rahmen, Bögen und seilverspannten Konstruktionen.

HOLZBAU

1. Einführung
2. Werkstoffe
3. Fügetechnik
4. Tragmechanismen
5. Tragwerkstypen
6. Gefährdungen
7. Beispielhafte Bauwerke

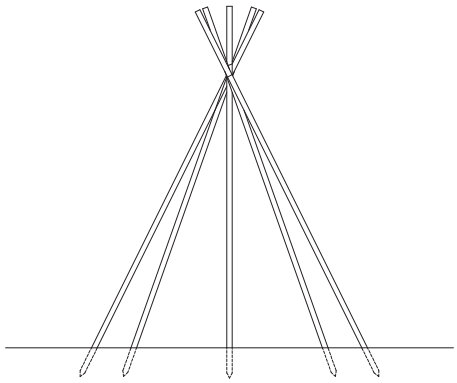
2

1.

EINFÜHRUNG

Behausungen aus nachwachsenden Rohstoffen errichteten die Menschen schon, bevor sie sesshaft wurden. Der leichte Auf- und Abbau und damit die Einfachheit waren für ein nomadenhaftes Dasein von Vorteil. Ein Blick auf die Lebensweise solcher Völker heute lohnt sich. Archäologische Befunde gibt es dafür aber nur wenige. Geprägt wurde das Bauen schon immer davon, welche Werkzeuge zur Verfügung standen, um die Werkstoffe bearbeiten und fügen zu können. Aus einfachen Halmen bzw. dünnen, frischen Zweigen ließen sich Flechtwerke herstellen, die, mit Tierhäuten belegt oder mit Lehm bestrichen, einen gewissen Witterungsschutz boten. (Abb. 2) Etwas komplexer sind Zeltkonstruktionen, die aus wenigen geraden Holzstangen als Traggerüst bestehen. (Abb. 3) Als Verbindungsmittel dienten dünne Zweige, Gräser oder aber Seile und Lederriemen. Die Werkzeuge der Steinzeit waren Feuersteine oder Tierknochen. Ein Stück Holz abzuschneiden ist damit möglich, es längsseitig zu behauen und zuzurichten eher nicht.

3



Um sich eine Vorstellung davon zu machen, wie einfach und provisorisch eine steinzeitliche Behausung sein kann, muss man sich nur an die eigene Kindheit zurückerinnern. Alle Objekte, die man so finden kann, ob im Wald, auf dem Feld oder zu Hause, können zur Herstellung eines Gebäudes dienlich sein. Kinder erlernen ganz spielerisch, wie ein Unterstand errichtet werden kann. Ein paar Stangen als Gerüst und eine Bekleidung, beispielsweise ein Tuch, um die Zwischenräume zu schließen, genügen.

Von Interesse für die vorliegende Arbeit ist tatsächlich die Sesshaftwerdung des Menschen, die sich gebietsweise in der Jungsteinzeit vor etwa 10 000 Jahren vollzog. Um ortsfeste Behausungen zu schaffen, wurden Gebäude mit größerem Aufwand errichtet. Die Wahl des Grundstücks spielte dabei sicher eine große Rolle. Ist der Ort geeignet, um Landwirtschaft zu betreiben? Ist er sicher und bietet ausreichenden Schutz vor äußeren Gefahren? Die Menschen waren dabei noch immer auf steinerne Werkzeuge angewiesen. Mit den erforderlichen Überlegungen zur Herstellung eines tragenden Hausgerüsts gingen dann auch Fragen zum Witterungsschutz einher. Welche Werkstoffe stehen zur Verfügung, um das Dach zu decken? Wie

Abb. 2: Foto: Adam Harangozó

Abb. 2 Traditioneller Jurtenbau.
Abb. 3 Prinzip einer Zeltkonstruktion.
Abb. 4 Nachbau einer traditionellen Pfahlbausiedlung, Unteruhldingen.
Abb. 5 Artemistempel im Delion auf Paros, Steinplan.

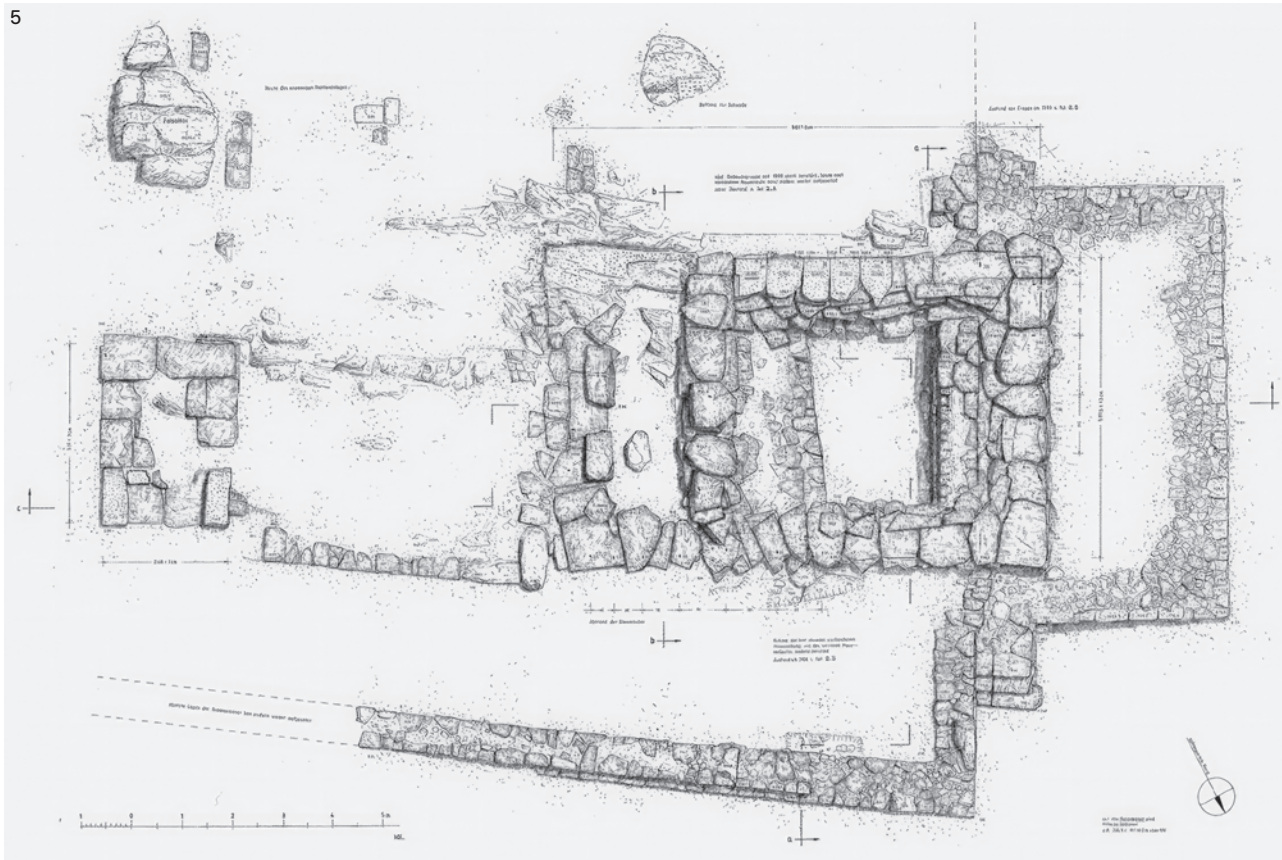


Abb. 4: Foto: H. Zell

können wandbildende Gerippe verschlossen werden, um Wind und Kälte abzuhalten? Älteste Überreste von Behausungen, die archäologisch nachweisbar sind, sind Pfostenlöcher oder sogar unter Wasser verbliebene Baumstämme. „Nichts ist haltbarer als ein Loch", sagte der berühmte Archäologe des 19. Jahrhunderts Heinrich Schliemann (1822–1890). Tatsächlich sind es Verwitterungsprodukte, die uns heute Hinweise auf Grundrisse steinzeitlicher Gebäude geben. Vielleicht findet sich noch eine mit Feldsteinen befestigte Feuerstelle oder eine Art Einfriedung. Wie Pfosten- oder Pfahlbauten ausgesehen haben könnten, ist, wie erwähnt, eventuell anhand noch gepflegter Bauweisen festzustellen. (Abb. 4) So wird in Ost- und Südostasien noch heute recht traditionell gebaut. Der Pfostenbau trägt dabei auch der Gefahr von Überschwemmungen in regenreichen Gebieten Rechnung.

Die Wahl des Baugrundstücks konnte gänzlich unterschiedlich sein. Wichtig war der Zugang zu Trinkwasser oder Wasser ganz allgemein. Ein Fluss bot die Möglichkeit, sich rasch fortzubewegen, Rohstoffe zu transportieren und Handel zu treiben. Ein Hügel war dazu geeignet, in die Ferne zu sehen, um Gefahren frühzeitig zu erkennen. Die verfügbaren Rohstoffe hatten außerdem Einfluss auf die Bauweise. Naheliegend waren häufig Feldsteine und Schilf, stabile Gräser oder auch Bäume. (Abb. 5)

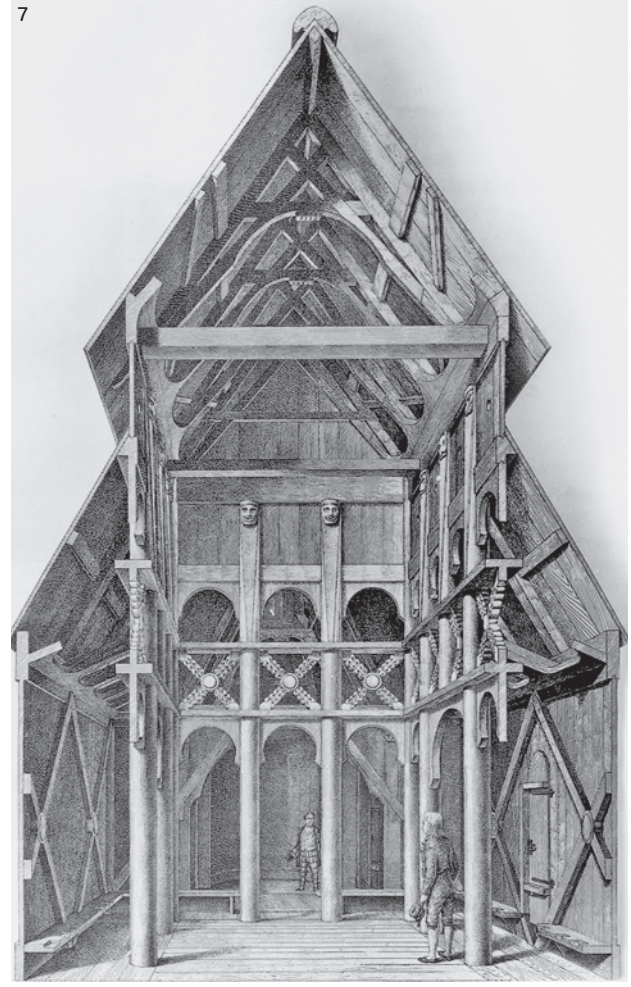


Abb. 6: Foto: Tilman2007

Mit der Möglichkeit, aus Erzen metallische Werkstoffe zu gewinnen, änderte sich das Bauen schlagartig und grundlegend. Nun konnte das Holz mit geschärften metallischen Werkzeugen bearbeitet werden. Stämme wurden zu rechteckigen Querschnitten verarbeitet. Die für Schädlinge anfällige Rinde konnte leichter abgenommen werden. Die Ausarbeitung von Verbindungen wurde möglich, um die einzelnen Hölzer zu fügen. Schließlich wurden metallische Verbindungsmittel hergestellt und zur Fügung eingesetzt. Es ist schon erstaunlich, welche Fertigkeit Zimmerer entwickelten, um Hausgerüste, aber auch weitspannende Tragwerke wie Brücken aus Holz zu konstruieren. Viel stärker als der Bau mit Steinen prägte bis ins späte Mittelalter Holz die Gestalt von Dörfern und Städten und das Zusammenleben in ihnen. Mit Steinen baute man gemeinschaftlich, wie wir im Kapitel Mauerwerk noch sehen werden, mit Holz individuell. Der Holzbau ist dennoch eng mit dem Mauerwerksbau verknüpft. War nicht die einfache Holzstütze mit einem Sattelholz Vorlage für die dorische Säule? (Abb. 6) Sind skandinavische Stabkirchen nicht einem steinernen Tempel nachempfunden? (Abb. 7) Beide Bauweisen wurden in vorindustrieller Zeit entwickelt und erlebten ihre Hochblüte vor der Neuzeit. Bereits in der Antike war die Holzbautechnik weitreichend entwickelt.[1] Beide Bauweisen sind bis heute wichtig für die Baukunst.

Abb. 6 Holzstützen mit Sattelholz im Palas der Burg von Nürnberg; Foto von 2007.
Abb. 7 Perspektive der Konstruktion der Stabkirche in Borgund.
Abb. 8 Stadtraum von Bad Tölz.
Abb. 9 Stadtraum von Burghausen.

Schließlich ist der Holzbau mit Blick auf die Tragmechanismen von großem Interesse. Wir sprechen bei allen historischen Tragkonstruktionen aus Holz von Gebilden, die aus stabförmigen Bauteilen gefügt wurden. Der Blocktafelbau, wie er heute häufig zum Einsatz kommt, ist dagegen eine sehr junge Bauweise und setzt die Möglichkeit der mehr oder weniger dauerhaften Verleimung dünner Brettschichten voraus.[2] Stabwerke wie das Fachwerk entwickelten sich von den frühesten Zeltkonstruktionen hin zu komplexen Hausgerüsten im ausgehenden Mittelalter und der Neuzeit, die weitestgehend ohne metallische Verbindungsmittel auskamen. Man kann sagen, dass Bauwerke aus Holz konstruiert werden müssen, während ein Mauerwerksbau gezeichnet werden kann.

Ein bedeutsamer Nachteil von Holz ist seine Brennbarkeit. Gerade in dicht bebauten Städten führten Feuersbrünste zu katastrophalen Zerstörungen, sodass bereits für das Mittelalter die Einführung von Brandschutzvorschriften dokumentiert ist.[3] Beschränkten sich diese zunächst auf die Herstellung von „harten Bedachungen", wie man noch heute sagt, also auf die Ablösung von mit Halmen oder Holzschindeln gedeckten Dächern durch solche aus Ziegeln oder Steinplatten, war auch bald die Art der Bebauung selbst davon betroffen. Die Inn-Salzach-Bauweise ist eine Folge solcher Vorschriften. Durch das Vorsetzen von Schildwänden verschwanden Dachvorsprünge. (Abb. 8, 9) So konnte bei einem Brand verhindert werden, dass die Dachkonstruktion von benachbarten Gebäuden auch Feuer fing. Für die Stadt Landshut sind beispielsweise bis ins 14. Jahrhundert hinein überwiegend hölzerne Bürgerhäuser nachgewiesen. Nach einem Stadtbrand im Jahr 1342 wurden die Neubauten nur noch in massiver Bauweise zugelassen.[4] Im Barock führte außerdem ein völlig neuer Gestaltungswille zur Versteinerung vieler Gebäude, wie dies in Bamberg der Fall war.

Die Industrialisierung führte zu einem weiteren Zurückdrängen hölzerner Traggerüste. Sie wurden durch eiserne Konstruktionen ersetzt, die größere Spannweiten zuließen und als haltbarer angesehen wurden, da Eisen nicht brennbar ist. Erst in krisenhaften Zeiten des Mangels, beispielsweise nach dem Ersten und Zweiten Weltkrieg, kam es zu einer gewissen Renaissance des Holzbaus. So stellen Gitterschalen[5], wie sie Friedrich Zollinger (1880–1945) konzipierte, oder einfache Notkirchen,

1 Vgl. Huther 2014.
2 Vgl. Steiger 2020, S. 49–55.
3 Vgl. die Brandschutzvorschrift im Herzogtum Bayern, aus der hervorgeht, dass im innerstädtischen Kontext eine harte Bedachung zur Ausführung kommen muss.
4 Löbl/Spitzberger 1974, S. 17, zit. nach: Schwanner 2023, S. 9.
5 Tutsch 2020, S. 32–35.

Abb. 10 Dach einer Halle im Freilichtmuseum in Glentleiten in Zollinger-Bauweise.

wie sie Otto Bartning (1883–1959) in Serie errichten ließ[6], ganz außergewöhnliche Entwicklungen dar, die Ingenieurswissen mit Einfachheit verbanden. (Abb. 10) Doch auch der Brettschichtholzbau, bei dem einzelne Lamellen verleimt wurden, leitete ein Wiederaufleben des Holzbaus in Zusammenhang mit weitgespannten Tragwerken ein.[7]

2. WERKSTOFFE

Eigenschaften

Holz ist ein anisotroper, also der gewachsenen inneren Zellstruktur nach inhomogener Werkstoff, der je nach Holzart und Wuchsort (frei stehend, am Waldrand, im Wald etc.) ganz unterschiedliche Eigenschaften aufweisen kann. Frei stehend wachsende Bäume sind astreicher als solche, die im Wald wachsen. Die Verfügbarkeit von Bäumen mit ausreichend geeigneten Voraussetzungen für den Einsatz im Bauwesen war bedeutsam und hatte Einfluss auf die Ausdifferenzierung der Bauweisen. So finden sich in Bergregionen viele Nadelbäume, die auch recht gerade wachsen und sich somit für die Herstellung von Blockhäusern besonders gut eignen. In Franken wachsen auf sandigen Böden sehr viele Kiefern, weshalb sich in den Gebäuden dort folgerichtig oft diese Baumart findet. In Bayerisch-Schwaben kamen auch einmal Birken im Dachtragwerk einer Kirche zum Einsatz.

Es können grundsätzlich drei Holzarten voneinander unterschieden werden: Kernholzbäume wie Lärche, Kiefer oder auch Eiche haben einen vom äußeren Splintholz klar unterscheidbaren Kern. Bei Reifholzbäumen wie Fichte, Tanne, Buche oder Ahorn ist der Splint feuchter als der Kern. Als reine Splintholzbäume, bei denen sich ein Kern nicht identifizieren lässt, kennen wir Birke, Erle oder Pappel.[8]

Welches Holz ein Zimmerer wählt, richtet sich nach den Eigenschaften der einzelnen Baumarten. Als Bauholz sind eigentlich alle Nadelholzarten geeignet, weil sie eine langfaserige Struktur und damit eine gute Biegesteifigkeit aufweisen, außerdem eine ausreichende Druckfestigkeit. Nadelholz wurde historisch gesehen eine zulässige Druckfestigkeit parallel zur Faser von etwa 8 N/mm² zugewiesen, Eichenholz bis zu 12 N/mm².[9] Die Bruchfestigkeiten liegen bei 50 bis 60 N/mm², ähnlich hoch sind die Werte auf Zug. Dagegen sind zahlreiche Laubholzarten kurzfaserig und damit wenig geeignet für den Einsatz als Bauholz. So besitzt die Buche zwar ebenfalls hohe Festigkeitswerte, kann für biegebeanspruchte Bauteile jedoch kaum verwendet werden und erweist sich gegen äußere Einflüsse wie Feuchte oder Schädlinge wenig widerstandsfähig. Der E-Modul von Eiche beträgt durchschnittlich 12 500 N/mm², der von Fichtenholz liegt etwas darunter bei etwa 10 000 N/mm².[10] Während Nadelholz aufgrund seines Gewichts mit 470 kg/m³ relativ leicht zu transportieren und aufzurichten ist, wiegt Eichenholz mit 770 kg/m³ deutlich mehr. Eichenholz ist deshalb auch nicht flößbar.

Für eine Beanspruchung quer zur Faser ist Holz deutlich schlechter geeignet. Die ansetzbare Druckfestigkeit liegt bei 2,5 N/mm², die Querzugfestigkeit ist vernachlässigbar gering. Dies bereitete im Fachwerkbau immer wieder Probleme, wie noch weiter ausgeführt wird. Heute erfolgt die Einteilung von Holz nach Festigkeitsklassen, wobei die Biegezugfestigkeit angegeben wird. Ein Bauholz der Festigkeitsklasse C30 bezeichnet Nadelholz (Conifere) mit einer Biegezugfestigkeit von 30 N/mm². Mit Q30 ist dementsprechend eine Eiche (Quercus) gemeint.

Neben der Faserstruktur ist die Haltbarkeit bzw. Resistenz gegen Feuchte und Fraßschädlinge ein herausragendes Kriterium. Baumarten, die besonders harzhaltig sind wie Lärche oder Kiefer oder die andere Inhaltsstoffe aufweisen wie die Gerbsäure im Kern von Eichenholz, wurden deshalb historisch auch entsprechend ihren Eigenschaften eingesetzt. So finden sich in Blockhäusern eigentlich immer eichene Schwellhölzer, da diese dem im Sockelbereich erhöhten Feuchteangebot am längsten widerstanden. Genauso wurden eichene Mauerlatten auf Mauerkronen eingesetzt. Eichenholz war im Übrigen auch geeignet, um als Pfahl in der Tiefengründung in sumpfigem Gelände eingesetzt zu werden. Dabei ist wichtig zu wissen, dass Holz, wenn es ständig gänzlich unter Wasser liegt, sehr haltbar ist. Dies zeigen auch archäologische Reste steinzeitlicher Behausungen oder Brunnenanlagen.[11] Problematisch ist eine wechselnde Feuchte zwischen gänzlich nass und trocken. Ganz Venedig steht sozusagen auf Eichenpfählen. Schwierigkeiten bereiten aber nicht die Pfahlschäfte, die im Sumpf stecken, sondern die Übergangsbereiche zu den aufgehenden Bauteilen.

6 Vgl. Rehm 2022.
7 Siehe Müller 2019 zum Thema des Holzleimbaus anhand eines Patents von Otto Hetzer.
8 Steiger 2020, S. 11.
9 Bargmann 2013, S. 128.
10 Ebd., S. 135.
11 Vgl. antike Brunnenanlagen gemäß Rekonstruktion in Huther 2014, S. 287.