

Diploma Thesis

**Optimisations of constructional operations in  
underground engineering based on the case study  
Neckartalübergang**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

**Baubetriebliche Optimierungen im Tiefbau anhand  
des Fallbeispiels Neckartalübergang**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Thomas Sicay, BSc**

Matr.Nr.: 0925526

unter der Anleitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Gerald Goger**

Univ.Ass. Dipl.-Ing.in **Melanie Piskernik**

Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement  
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/234-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2019

---

(Thomas Sicay)



*Der Erfolg kommt nur über  
die Brücke der Planung zu dir.*

— Adolf Loos (1870-1933), österreichischer Architekt



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit und damit zum Abschluss meines Studiums beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald Goger, dem Leiter des Fachbereichs für Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, für die Möglichkeit eine praxisnahe Arbeit mit engem Bezug zur Privatwirtschaft zu verfassen. Besonderer Dank gilt Frau Univ.Ass. Dipl.-Ing.in Melanie Piskernik, welche mich trotz meines Auslandsaufenthaltes ausgezeichnet in der Umsetzung der Arbeit beraten hat und mir die Unterstützung gab diese Arbeit mit hoher wissenschaftlicher Qualität abzuschließen.

Weiters bedanke ich mich bei allen Projektbeteiligten des Bauvorhabens Neckartalübergang, welche mir nicht nur ihre Zeit, sondern auch hochwertigen Input für meine Arbeit gegeben haben. Hervorzuheben ist Herr Dipl.-Ing. Axel Gatz, Projektleiter des Neckartalübergangs, welcher mir ermöglichte Teil dieses spannenden Großprojekts zu sein und in dessen Rahmen meine Diplomarbeit zu realisieren. Großer Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. Peter Fischer, Bauleiter und geotechnischer Experte des Neckartalübergangs, welcher mir fachlich und organisatorisch zur Seite stand und auf dessen Unterstützung ich selbst nach Beendigung meines Einsatzes auf dem Projekt vertrauen konnte. Erst durch seine hilfsbereite Betreuung konnte die Arbeit in diesem Maße umgesetzt werden.

Der größte Dank gilt meiner Familie, welche mich auf meinem gesamten Lebensweg unterstützte und mir auch während des Studiums stets Rückhalt bot. Dabei möchte ich mich besonders bei meiner Mutter Gloria für ihre bedingungslose Zuneigung und ihren unermüdlichen Zuspruch bedanken.

Schließlich danke ich noch all meinen Freunden, für ihre Unterstützung und ihre Kameradschaft, denn nur durch das gemeinsame Herangehen an Hindernisse, konnten diese überwunden werden. Herzliches Dankeschön gilt auch meinem Mitbewohner und Freund Richard, welcher stets ein offenes Ohr für mich hatte und Verständnis für die zu erledigende Arbeit zeigte. Insbesondere möchte ich meine Freundin Marleen hervorheben, die unendliche Geduld aufbrachte und mir in den zeitintensiven Lernphasen Beistand leistete. Vor allem aber haben all jene für die manchmal notwendige Ablenkung gesorgt und damit meine Studienzeit zu einem aufregenden und einzigartigen Abschnitt meines Lebens gemacht.



# Kurzfassung

Schlagwörter: Tiefbauverfahren, Brückenbauprojekt, Kostenanalyse, Problemanalyse, Entscheidungsmatrix, Baugrubensicherungen, Pfahlgründungen

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen eines zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit in Ausführung befindlichen Brückenbauprojekts des Neckartalübergangs in Heilbronn, Deutschland mit Unterstützung des ausführenden Unternehmens Hochtief Infrastructure GmbH sowie unter Anleitung des Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement Fachbereich für Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik der Technischen Universität Wien.

Diese Arbeit behandelt anhand des Fallbeispiels „Neckartalübergang“ eine Kostenanalyse der angewandten Tiefbauverfahren (geböschte Baugrube, Spundwandverbau, Bohrpfähle) zur Errichtung von Brücken Gründungen. Das Ziel ist die kostentreibenden Faktoren der unterschiedlichen Bauverfahren zu eruieren, um damit einen Ausblick auf Optimierungsmaßnahmen für zukünftige Brückenbauwerke mit ähnlichen Gründungskonzept zu geben. Des Weiteren werden aus den Anforderungen des Umwelt- und Wasserschutzes an Tiefbauverfahren sowie aus den baubetrieblichen Erschwernissen des Fallbeispiels Entscheidungsmatrizen erarbeitet, welche dem Benutzer eine rasche Vorauswahl geeigneter Tiefbauverfahren ermöglicht.

Zu Beginn wird ein Überblick über ausgewählte Tiefbauverfahren im Zusammenhang mit dem Bau des Neckartalübergangs gegeben. Dabei werden Verfahren zur Baugrubensicherung, Baugrundverbesserung und Tiefgründung beschrieben. Diese sind im weiteren Verlauf für das Verständnis der Bauabläufe, die Erstellung der Leistungsverzeichnisse sowie für die Kostenermittlung notwendig.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Erstellung und Auswertung der Leistungsverzeichnisse der angewandten Verfahren (geböschte Baugrube, Spundwandverbau, Bohrpfähle). Als Grundlage dafür dienen firmenspezifische Leistungswerte, Bautagesberichte und preisliche Vereinbarung mit Nachunternehmern und Baustofflieferanten. Die ermittelten Kosten werden getrennt nach Verfahren betrachtet und nach den einzelnen Kostenkategorien wie Personal-, Geräte- und Materialkosten untersucht. Anschließend werden die erzielten Resultate mithilfe von grafischen Darstellungen miteinander verglichen und die Anteile der Kostenverursacher ermittelt. Für die maßgebenden Kostenfaktoren werden Maßnahmen zur Kostenoptimierung erarbeitet.

In weiterer Folge werden auf die charakteristischen Erschwernisse im Tiefbau anhand des Fallbeispiels eingegangen. Durch die Untersuchung dieser Schwierigkeiten und der Anforderungen des Umwelt- und Wasserschutzes werden Kriterien erarbeitet, welche die Grundlage für die Erstellung der Entscheidungsmatrizen darstellen.

Zum Schluss wird das Potenzial der Digitalisierung in der Bauausführung sowie dessen Chancen auf effizientere Bauprozesse und Herausforderungen im alltäglichen Baubetrieb beschrieben. Die Massenermittlung mithilfe von Drohnen und die Datennutzung von Transportgeräten im Erdbau zur Erfassung, Analyse und Visualisierung der Leistung werden dabei genauer betrachtet.





# Abstract

Keywords: underground engineering methods, bridge construction project, cost analysis, problem analysis, decision matrix, methods for excavation support, pile foundations

The present diploma thesis was developed as part of a bridge construction project “Neckartalübergang” in Heilbronn, Germany, with the support of the executing company Hochtief Infrastructure GmbH and under guidance of the Institute for Interdisciplinary Construction Process Management Department of Construction Process and Methods of the Vienna University of Technology.

Based on the case study “Neckartalübergang”, this thesis deals with a cost analysis of the used underground engineering methods (sloped excavation, sheet-pile walls, bored piles) for the construction of bridge foundations. The aim is to determine the cost-driving factors of the different construction methods in order to give an outlook on optimisation measures for future bridge construction projects with a similar foundation concept. Furthermore, decision matrices are developed from the requirements of environmental and water protection as well as from the operating difficulties of the case study, which allow its user a quick pre-selection of convenient underground engineering methods.

At the beginning, an overview of selected underground engineering methods in connection with the construction of the “Neckartalübergang” will be given. Here, methods for excavation support, ground treatment, and pile foundations will be described. These are necessary in the further course for the understanding of the construction process, the compilation of the specified bill of quantities as well as for the cost calculation.

The main part of the thesis deals with the preparation and evaluation of the specified bill of quantities of the used methods (sloped excavation, sheet-pile walls, bored piles). The basis for this is company-specific power ratings, daily building reports and price agreements with subcontractors and with building material suppliers. The calculated costs are considered separately according to the methods and are examined according to the individual cost categories, such as personnel, equipment and material costs. Subsequently, the results obtained are compared with each other by means of graphical representations and the proportions of the cost drivers are determined. For the decisive cost factors cost-optimisation measures will be developed.

In further consequence, the characteristic difficulties in the underground engineering will be discussed on the basis of the case study. By examining these difficulties and the requirements of environmental and water protection, criteria are developed which form the basis for the preparation of the decision matrices. Finally, the potential of digitisation in construction and its opportunities for more efficient construction operations and challenges in ordinary construction process are described. The use of drones for volume calculations and the data usage of earthmoving equipment to collect, analyse and visualize performance will be looked at more closely.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Forschungsmethodik . . . . .	2
1.2 Forschungsabgrenzung . . . . .	3
1.3 Forschungsfragen . . . . .	3
<b>2 Bauverfahren im Tiefbau</b>	<b>5</b>
2.1 Baugrubensicherung . . . . .	6
2.1.1 Geböschte Baugruben . . . . .	7
2.1.2 Spundwandverbau . . . . .	10
2.1.3 Zusammenfassung . . . . .	17
2.2 Baugrundverbesserung . . . . .	20
2.2.1 Bodenaustausch . . . . .	20
2.2.2 Rüttelstopfverdichtung . . . . .	22
2.2.3 Bodenvereisung . . . . .	24
2.2.4 Zusammenfassung . . . . .	26
2.3 Pfahlgründungen . . . . .	29
2.3.1 Ortbetonrammpfähle . . . . .	30
2.3.2 Bohrpfähle . . . . .	33
2.3.3 Zusammenfassung . . . . .	40
<b>3 Fallbeispiel Neckartalübergang</b>	<b>45</b>
3.1 Projektbeschreibung . . . . .	45
3.2 Bauphasen . . . . .	50
3.3 Geologie . . . . .	51
3.3.1 Beschreibung der Bodenschichtfolge . . . . .	51
3.3.2 Hydrologie der Böden . . . . .	52
3.3.3 Rammfähigkeit der Böden . . . . .	52
3.4 Angewandte Tiefbauverfahren . . . . .	54
3.4.1 Geböschte Baugrube . . . . .	54
3.4.2 Spundwandverbau . . . . .	56
3.4.3 Bohrpfähle . . . . .	57
<b>4 Kostenanalyse der angewandten Tiefbauverfahren</b>	<b>59</b>
4.1 Ermittlung der Gerätstundensätze . . . . .	60
4.2 Geböschte Baugrube . . . . .	64
4.3 Spundwandverbau . . . . .	65

4.4	Bohrpfähle . . . . .	67
4.5	Auswertung der Leistungsverzeichnisse . . . . .	68
4.5.1	Gesamtkosten . . . . .	69
4.5.2	Kostenbestandteile der einzelnen Verfahren . . . . .	70
4.5.3	Optimierungsmaßnahmen . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Erschwernisse im Tiefbau im Bereich des Neckartalübergangs</b>	<b>77</b>
5.1	Umwelt- und Wasserschutz . . . . .	77
5.1.1	Zuständigkeiten . . . . .	78
5.1.2	Maßnahmen . . . . .	79
5.2	Beschränkte Zugänglichkeit zur Neckarinsel . . . . .	80
5.3	Gründungen im Alt-Bestand . . . . .	82
5.4	Kontaminierter Boden – Altablagerungen . . . . .	83
5.4.1	Bodenuntersuchungen . . . . .	83
5.4.2	Maßnahmen . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Auswahlhilfen für Tiefbauverfahren</b>	<b>85</b>
6.1	Entscheidungsmatrix für Baugrubensicherungen . . . . .	85
6.1.1	Technische Parameter . . . . .	86
6.1.2	Ökologische Parameter . . . . .	89
6.1.3	Ökonomische Parameter . . . . .	90
6.1.4	Ausschluss- und Zielerfüllungskriterien . . . . .	91
6.1.5	Fallbeispiel . . . . .	92
6.2	Entscheidungsmatrix für Pfahlgründungen . . . . .	97
6.2.1	Technische Parameter . . . . .	97
6.2.2	Ökologische Parameter . . . . .	100
6.2.3	Ökonomische Parameter . . . . .	101
6.2.4	Ausschluss- und Zielerfüllungskriterien . . . . .	101
6.2.5	Fallbeispiel . . . . .	102
<b>7</b>	<b>Potenzial der Digitalisierung</b>	<b>105</b>
7.1	Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung . . . . .	105
7.1.1	Chancen . . . . .	105
7.1.2	Herausforderungen . . . . .	108
7.2	Massenermittlung mit Drohnen . . . . .	109
7.2.1	Anwendungsgrenzen . . . . .	110
7.2.2	Funktionsprinzip . . . . .	110
7.2.3	Arbeitsablauf . . . . .	111
7.2.4	Optimierungspotenzial . . . . .	111
7.3	Datennutzung von Baugeräten . . . . .	113
7.3.1	Anwendungsgrenzen . . . . .	113
7.3.2	Funktionsprinzip . . . . .	113
7.3.3	Optimierungspotenzial . . . . .	115
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>117</b>
8.1	Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .	118
8.2	Ausblick . . . . .	120
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>121</b>

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>123</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>125</b>



# Kapitel 1

## Einleitung

Die Beschaffung von Bauleistungen kann seitens der Privatwirtschaft oder durch die öffentliche Hand erfolgen. Bei privaten Ausschreibungen werden Unternehmen, die dem Ausschreibenden bekannt sind, zur Angebotsabgabe aufgefordert. Für die Vergabe von Aufträgen durch die öffentliche Hand, das sind Bund, Bundesländer, Gemeinden und Gemeindeverbände, ist das Bundesvergabegesetz bindend. Dieses regelt die anzuwendenden Vergabeverfahren, wobei diese vom Gesamtvolumen des zu vergebenden Auftrages abhängig sind. Grundsätzlich sind für öffentliche Aufträge ab einer bestimmten Wertgrenze Vergabeverfahren vorgesehen, bei denen mehrere Bieter ihr Angebot gemäß den Zuschlagskriterien abgeben dürfen. Dabei ist in vielen Fällen das preislich günstigste Angebot maßgebend für den Zuschlag.

Um als ausführendes Bauunternehmen wettbewerbsfähig zu bleiben und erfolgreiche Akquisition zu betreiben ist zum einen eine realistische Kostenschätzung in der Angebotsphase und zum anderen die richtige Wahl der Bauverfahren essenziell. Bei einer Kostenüberschätzung besteht die Gefahr, dass die Wahl des Auftraggebers auf die konkurrierenden Bieter mit günstigeren Angeboten trifft. Hingegen führt eine Kostenunterschätzung oder ungeeignete Wahl der Bauverfahren zu einer Kostenabweichungen verglichen mit der Angebotskalkulation. Mögliche Fehleinschätzungen in der Kalkulation liegen in der Risikosphäre des Auftragsnehmers und können daher den erwarteten Gewinn schmälern. Um den Blick auf die Entstehung und Verursacher der Kosten von Tiefbauverfahren im Einsatz von Brückenprojekten zu schärfen und damit bei zukünftigen Projekten an den maßgebenden Stellen die Kosten optimieren zu können, ist die Kostenanalyse und -optimierung der baubetrieblichen Abläufe im allgemeinen Tiefbau und im Spezialtiefbau zur Herstellung von Brückengründungen anhand des Fallbeispiels „Neckartalübergang“ Thema der vorliegenden Diplomarbeit.

Es werden die Baukosten untersucht und quantifiziert, um die maßgebenden Kostenfaktoren zu ergründen mit dem Ziel die Baukosten der angewandten Gründungsverfahren zu senken und damit den wirtschaftlichen Einsatz zu steigern. Dabei werden die Auswirkungen des Umwelt- und Wasserschutzes auf die Bauverfahren mitberücksichtigt. Das Aufzeigen vom Potenzial der Digitalisierung im Baubetrieb runden die Analyse ab. Anhand der Untersuchungen kann für zukünftige Brückenprojekte und für die folgenden Bauphasen des Fallbeispiels Entscheidungsmatrizen erarbeitet werden, welche eine Vorauswahl von Tiefbauverfahren abhängig von vordefinierten Kriterien ermöglicht.

## 1.1 Forschungsmethodik

Durch die gewählte Forschungsmethodik nach Abb. 1.1 können in Kap. 8 die gestellten Forschungsfragen schlüssig beantwortet werden.

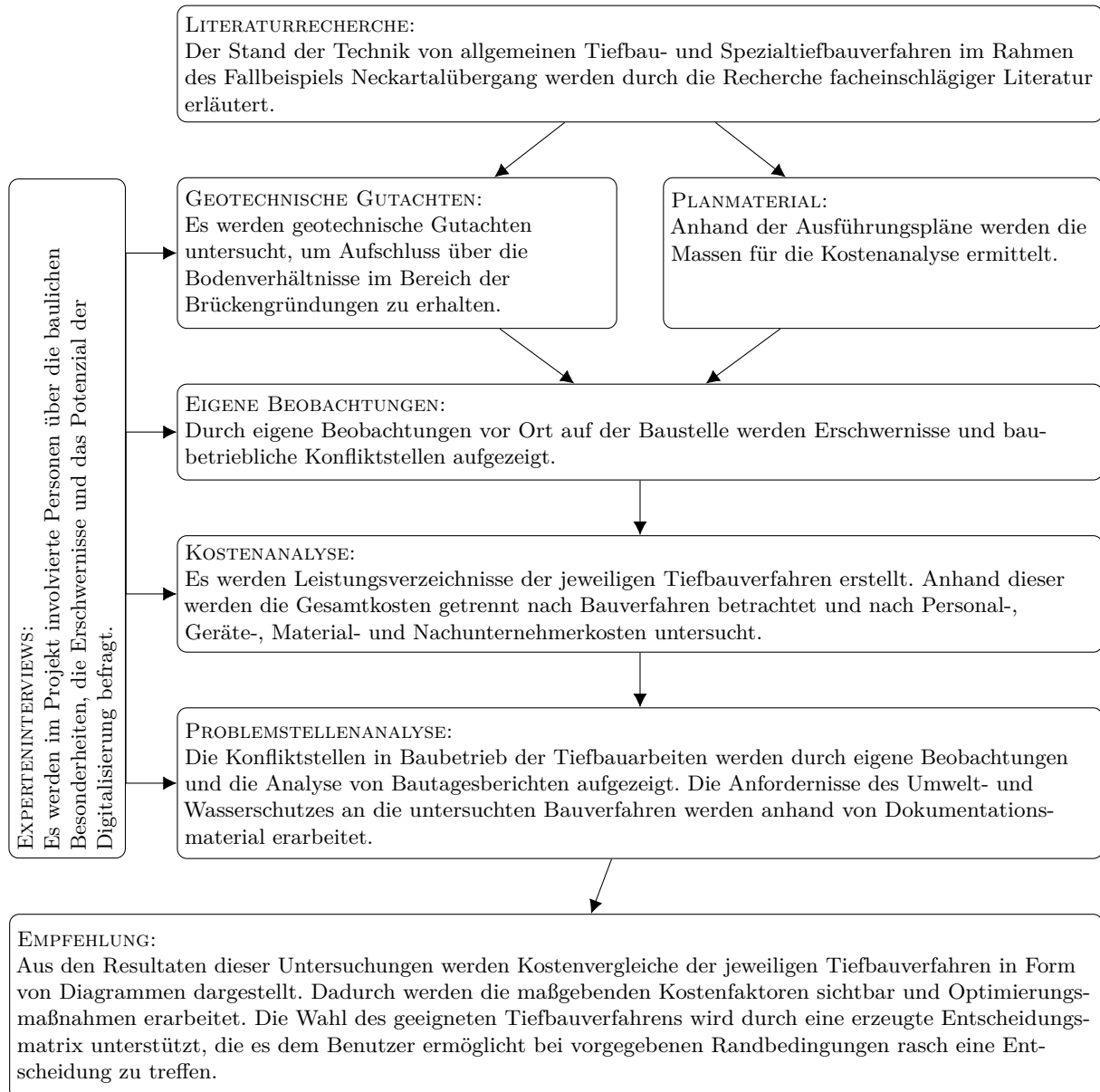


Abb. 1.1: Forschungsmethodik



## 1.2 Forschungsabgrenzung

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit befassen sich ausschließlich mit den baubetrieblichen Abläufen der einzelnen Bauverfahren im allgemeinen Tiefbau und Spezialtiefbau zur Herstellung der Gründungen von TBW 1 des Neckartalübergangs.

Als Sonderfall kommt einmalig das Bauverfahren Brunnengründung mit Bodenvereisung zum Einsatz. Diese Baumaßnahme wurde bereits vor Baubeginn des TBW 1 abgeschlossen und ist nicht im Leistungsangebot der BAUARGEA6WEST enthalten, sie wird daher nicht näher ausgeführt.

Die Verbesserung der Bodeneigenschaften mittels Rüttelstopfverdichtung wird ausschließlich beim Regenklärbecken für die Brückenentwässerung eingesetzt. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu jenen Tiefbauverfahren, die der direkten Brückengründung dienen, nicht Teil der Analyse.

Es werden keine statischen Berechnungen über die Standsicherheit einzelner Gründungsbau- teile durchgeführt. Geotechnische Gutachten dienen ausschließlich dem Aufschluss über die gegenwärtigen Bodenverhältnisse, welche die Wahl des geeigneten Bauverfahrens beeinflussen.

Die Herstellungsverfahren der aufgehenden Teilbauwerke wie Stützen, Hilfsbauwerke für den Querverschub des Überbaus, Überbau und Lärmschutzwände sind nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit.

## 1.3 Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit gibt Aufschluss über folgende Fragestellung:

1. Worin liegen die unterschiedlichen Schwerpunkte bei geotechnischer und baubetrieblicher Betrachtung in der Planungs- und Ausführungsphase des Neckartalübergangs?
2. Welche Besonderheiten im Tiefbau birgt ein Brückenbauprojekt unter dem Aspekt des Umwelt- und Wasserschutzes? Welcher wirtschaftliche Aufwand muss betrieben werden, um den Anforderungen des Umwelt- und Wasserschutzes gerecht zu werden?
3. Welche Erkenntnisse des aktuellen Baufortschritts hinsichtlich Tiefbau, Geotechnik und Gründungsmaßnahmen können aus der Seitenlage der Brücke gewonnen werden und inwiefern kann gewonnenes Know-how die anschließende Bauphase optimieren?
4. Analyse mit Ausblick auf Potenziale durch Digitalisierung (z. B. Echtzeitdatenerfassung, Dokumentation)

Die Erläuterung dieser Fragestellung und das Resultat der Untersuchungen des Neckartalübergangs wird in Kap. 8 angeführt.



# Kapitel 2

## Bauverfahren im Tiefbau

Das Kapitel gibt einen Überblick über den allgemeinen Stand der Technik jener geotechnischen Bauverfahren, welche im Fallbeispiel Neckartalübergang nach erstem Entwurf für den Einsatz vorgesehen waren und tatsächlich zum Einsatz kommen. Im Wesentlichen wird auf die Pfahlgründungsverfahren von Großbohrpfählen und Ortbetonrammpfählen sowie auf die Methoden der Baugrubensicherung durch geböschte Baugruben und durch Spundwände eingegangen. Es werden Verfahrenstechniken der Baugrundverbesserung, wie der Bodenaustausch und die Rüttelstopfverdichtung, erläutert. Zuletzt wird das Verfahren der Bodenvereisung erklärt. Abb. 2.1 zeigt eine Übersicht der Verfahrenstechnik im Grund- und Spezialtiefbau. Jene Verfahren, die Gegenstand dieses Kapitels sind, werden in der folgenden Grafik mit dem Symbol (\*) gekennzeichnet. Der konkrete Einsatz der beschriebenen Verfahren am Neckartalübergang wird in Kap. 3.4 dargestellt. [28, 29, 37]

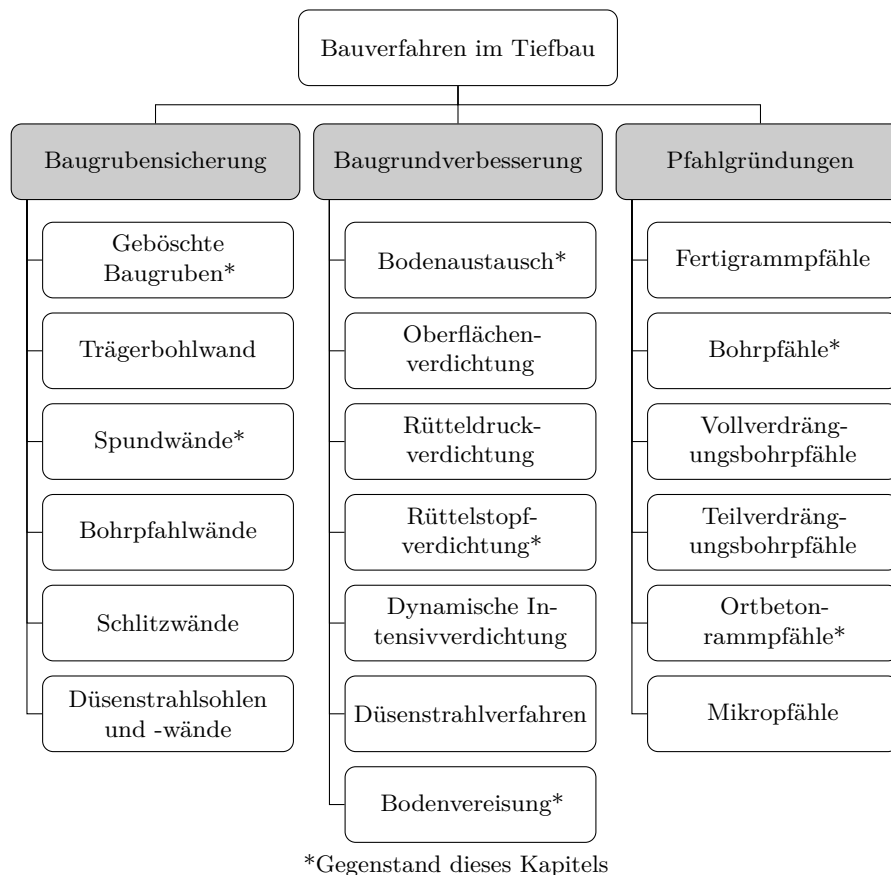


Abb. 2.1: Überblick über Bauverfahren im Tiefbau (modifiziert nach [37])

## 2.1 Baugrubensicherung

Dieses Kapitel widmet sich der Baugrubensicherung, welche notwendig ist um Bauwerke oder Teile davon unter der Geländeoberfläche herzustellen. Dazu zählen unter anderem Fundamente, Tiefgeschosse und Versorgungs- bzw. Entsorgungsinfrastruktur. Man unterscheidet zwischen freistehende Baugrubensicherungen, wie geböschte Baugruben und jene, die mit einem senkrechten Verbau hergestellt werden. Abb. 2.2 verdeutlicht die Unterschiede dieser zwei Arten anhand eines Schnittes durch eine Baugrube. In Abb. 2.3 werden Verbauwände nach ihrer Nachgiebigkeit unterschieden. In diesem Kapitel wird ausschließlich auf das Verfahren zur Herstellung einer geböschten Baugrube (Kapitel 2.1.1) und eines Spundwandverbaus (Kapitel 2.1.2) eingegangen, weitere Baugrubensicherungsverfahren werden nicht ausgeführt, da sie zur Untersuchung des Neckartalübergangs keine Relevanz zeigen. [37]

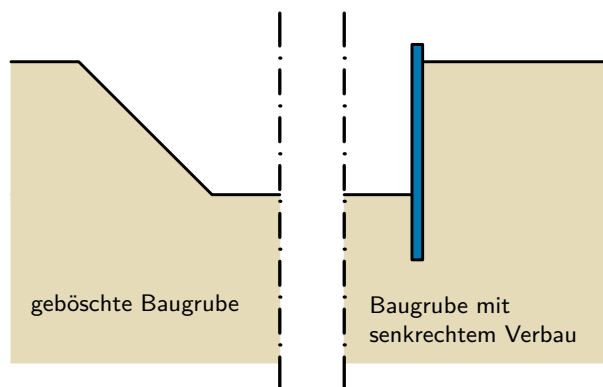
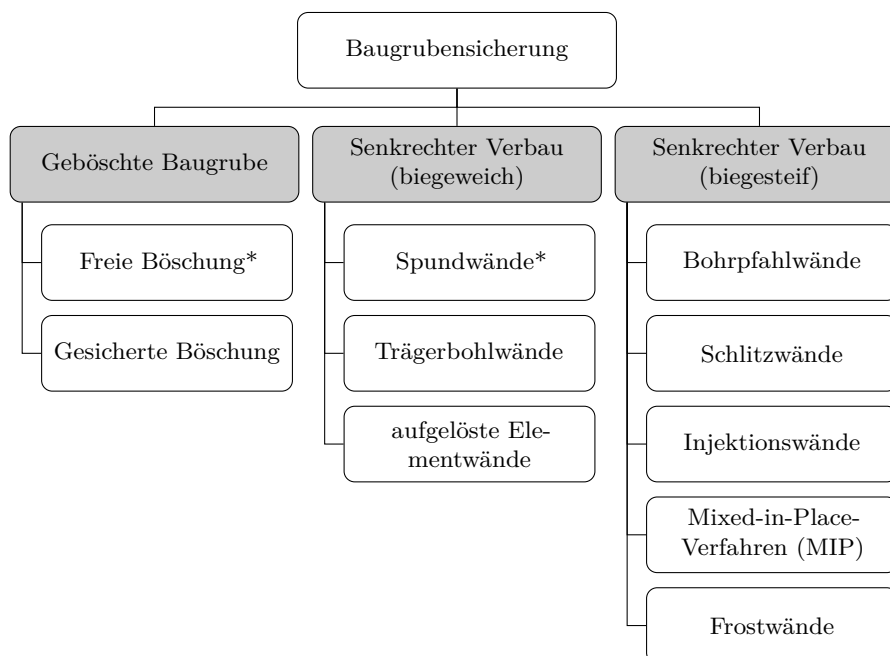


Abb. 2.2: Arten der Baugrubensicherung (modifiziert nach [37])



\*Gegenstand dieses Kapitels

Abb. 2.3: Überblick über Baugrubensicherungen (modifiziert nach [37])

Die Wahl der geeigneten Baugrubensicherung wird durch folgende Randbedingungen bestimmt: [2, 37, 50]

- Bodenverhältnisse
- Grundwasserverhältnisse
- Lage von Leitungen und Kanälen
- Abmessungen des Bauwerks
- erforderliche Gründungstiefe
- erforderlicher Arbeitsraum
- Nachbarbebauung
- Verkehrslasten
- Umweltschutz

Grundsätzlich wird zuerst überprüft, ob die Baugrube abgebösch werden kann, da dies bei flachen Gründungen die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Geböschte Baugruben können ohne Zusatzmaßnahmen nur oberhalb des Grundwasserspiegels ausgeführt werden. Mit zunehmender Baugrubentiefe steigen das Aushubvolumen und damit auch die Kosten für Mehraushub und Wiederverfüllung an, so dass es ab einer bestimmten Tiefe wirtschaftlicher ist nur die geplante Gründungsfläche inklusive der benötigten Arbeitsfläche auszuheben und die Baugrube mit einem senkrechten Verbau zu sichern. Eine Kombination von beiden Varianten ist ebenfalls möglich, wobei der geböschte Teil oberhalb des Grundwasserspiegels liegt.

### 2.1.1 Geböschte Baugruben

Die freie Böschung einer Baugrube wird vor allem bei Baugrubentiefen von 4–6 m angewandt und stellt die einfachste und wirtschaftlichste Möglichkeit der Baugrubensicherung dar. Vor allem beim Wohnhaus- und Gewerbebau in ländlichen Gebieten mit offener Bauungsweise kommt die freie Böschung zum Einsatz.

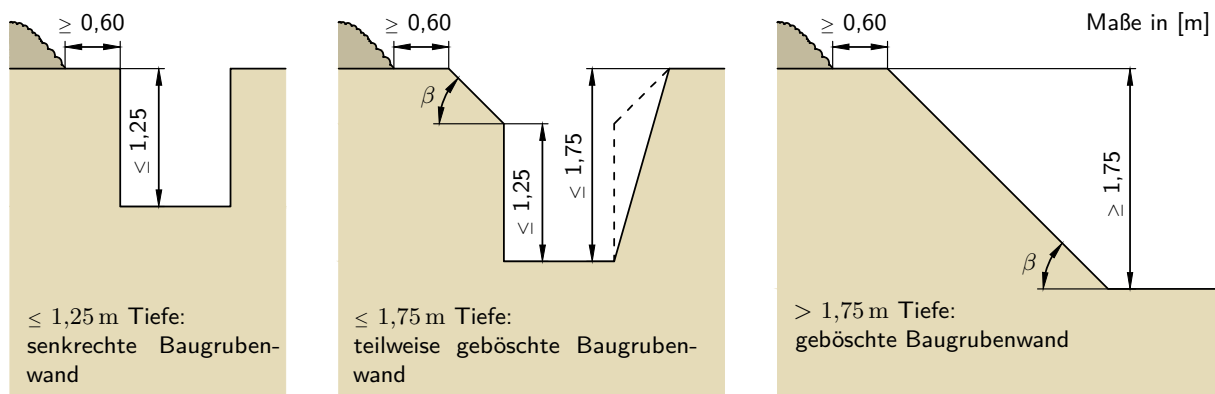
Die Geometrie der Böschungen ergibt sich aus den maximalen Böschungsneigungen, bei denen die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit noch gewährleistet ist. Diese sind abhängig von den Bodeneigenschaften, der Dauer, die sie offen zu halten sind und äußeren Belastungen, die auf die Böschung wirken. Im Allgemeinen werden frei geböschte Baugruben nur oberhalb des Grundwasserspiegels angeordnet. Jedoch kann bei vorhandenem Grundwasser im Bereich der Baugrube eine Grundwasserabsenkung Abhilfe schaffen. Um die erforderliche Standsicherheit zu gewährleisten können zusätzliche Böschungssicherungsmaßnahmen wie Nägel, Anker, Spritzbeton, Geotextilien oder Grasbewuchs zur Anwendung kommen. Diese Maßnahmen werden nicht weiter ausgeführt, da sie nicht in die weitere Ausarbeitung dieser Arbeit eingehen.

Die ÖNORM B 2205 [38] bzw. DIN 4124 [9] regelt die Planung und Herstellung von Baugruben und enthält für einfache Fälle Bemessungsregeln, bei deren Beachtung rechnerische Standsicherheitsnachweise entfallen können. Die Baugrube ist abhängig von der Baugrubentiefe abzubösch und gegebenenfalls mit Bermen auszuführen. Bermen sind waagrechte Ebenen in Böschungen, sie ermöglichen das Begehen und dienen als Schutz vor herabfallendem Bodenmaterial. In Bereichen, wo entweder der Rand der Baugrube oder Grube selbst betreten werden muss, sind mindestens 0,60 m breite Schutzstreifen einzuplanen und von Aushubmaterial und Gegenständen

freizuhalten. Die Herstellung von frei geböschten Baugruben ist ohne rechnerischen Nachweis der Standsicherheit zulässig, wenn folgende allgemeine Voraussetzungen eingehalten werden: [9, 38]

- Böschung unter 5,0 m hoch
- Mindestabstände zur Böschungskante abhängig von Gesamtgewicht des Fahrzeuges sind einzuhalten
- Keine Gefährdung der Standsicherheit durch ungünstige Einflüsse (z. B. Störung des Bodengefüges)
- Keine Gefährdung von vorhandenen Gebäuden, Leitungen oder Verkehrsflächen

Zusätzlich zu den allgemeinen Voraussetzungen gelten abhängig von den bodenmechanischen Eigenschaften, der Baugrubentiefe und der Neigung der angrenzenden Geländeoberfläche folgende Abmessungsgrenzen und Böschungswinkel  $\beta$  (vgl. Abb. 2.4):



**Abb. 2.4:** Ausbildung der Baugrubenwand (modifiziert nach [9, 38])

- Bis 1,25 m Tiefe (Abb. 2.4 links):
  - keine Abböschung notwendig
  - Neigung der angrenzenden Geländeoberfläche nicht steiler als 1:10 bei nichtbindigen und weichen bindigen Böden
  - Neigung der angrenzenden Geländeoberfläche nicht steiler als 1:2 bei mindestens steifen Böden
- Bis 1,75 m Tiefe (Abb. 2.4 mitte):
  - senkrechte Baugrubenwände bis 1,25 m über der Baugrubensohle
  - bis 1,25 m über der Baugrubensohle senkrechte Baugrubenwände
  - ab 1,25 m über der Baugrubensohle geböschte Baugrubenwände
  - Mindestens steifer bindiger Boden oder Fels
  - Neigung der angrenzenden Geländeoberfläche nicht steiler als 1:10 bei mindestens steifen Böden
- Ab 1,75 m Tiefe (Abb. 2.4 rechts):

- Abgeböschte Baugrubenwände
- Anordnung von Bermen mit einer Breite  $\geq 1,5$  m bei einem Höhenabstand  $< 3,0$  m
- $\beta \leq 45^\circ$  für nichtbindige und weiche bindige Böden
- $\beta \leq 60^\circ$  für steife und halbfeste bindige Böden
- $\beta \leq 80^\circ$  für Fels

### Bauablauf

Die Herstellung einer geböschten Baugrube läuft in wenigen Arbeitsschritten ab. Zuerst findet der Baugrubenaushub statt, anschließend wird gegebenenfalls die Böschungssicherung eingebaut. Im Wesentlichen gliedert sich der Bauablauf wie folgt:

1. Aushub der Baugrube
  - a) Oberboden abtragen
  - b) Aushub, Laden, Abtransportieren
  - c) Herstellung der Böschung und nach Bedarf der Bermen
2. Einbau der Böschungssicherung je nach Variante
  - a) Verlegung der Bewehrungsmatten
  - b) Aufbringen des Spritzbetons
  - c) Einbringen der Bodennägel
  - d) Abdeckung mit Geotextilien bzw. Folien
  - e) Pflanzung von Bewuchs

### Gerät

Die gängigste Methode des Baugrubenaushubs und der Herstellung der Böschung ist der Einsatz eines Tieflöffelbaggers von der Geländeoberfläche aus. In Steinbrüchen und im Tagebau ist auch der Aushub mittels Hochlöffelbagger aus der Baugrube üblich. Die Größe des Hydraulikbaggers ist abhängig vom erforderlichen Leistungsziel und dem Umfang der Baumaßnahme. Der Abtransport des gelösten Bodenguts erfolgt bei beiden Varianten mit Lastkraftwagen. Um ein wirtschaftliches Arbeiten zu ermöglichen ist die Anzahl der Transportfahrzeuge nach der Baggerleistung festzulegen, so dass der kontinuierliche Betrieb des Baggers gewährleistet ist. Statt des Einsatzes des Hydraulikbaggers können in besonderen Fällen auch Rad- und Raupenlader zur Anwendung kommen, diese werden in weiterer Folge jedoch nicht näher erläutert.

### Personal

Die Anzahl der Arbeitskräfte für den Erdaushub orientiert sich an der Anzahl der erforderlichen Aushubgeräte und Transportfahrzeuge sowie der damit verbundenen Anzahl an Gerätepersonal. Zur Herstellung der Baugrubensicherung sind mindestens zwei Arbeitskräfte vorzusehen.

### 2.1.2 Spundwandverbau

Spundwände werden als senkrechter Verbau zur Absicherung von Erdkörpern gegen Einsturz verwendet. Sie kommen beispielsweise bei Dauerbauwerken wie Hafenanlagen und temporären Baugrubenverbauten zum Einsatz. Spundbohlen können aus Holz, Stahlbeton und Stahl bestehen. Holzspundbohlen haben im Vergleich zu Stahlspundbohlen rammtechnisch schlechtere Eigenschaften und sind deshalb für den Gebrauch bei Ingenieurbauwerken ungeeignet. Stahlbetonspundwände werden empfohlen, wenn kein großer Anspruch an die Dichtigkeit gestellt wird und die Abnutzung von Stahlspundbohlen durch Sandschliff zu groß ist. Heutzutage werden zumeist Stahlprofile nach ÖNORM EN 12063 [40] bzw. DIN EN 12063 [10] eingesetzt. Die Spundwand zählt zu den nachgiebigen Verbauwänden und kann nur dort angewendet werden, wo unmittelbar neben der Baugrube auftretende Verformungen zulässig sind. Die Nachgiebigkeit kann durch zusätzliche Gurtung, Aussteifungen und vorgespannte Anker reduziert werden. Die konstruktive Verbindung der Spundbohlen zu einer durchlaufenden Fläche nennt man „Schloss“. Die einzelnen Bohlenprofile unterscheiden sich in Querschnittsform sowie der Form und Lage des Schlosses. Die Wahl der Spundbohlenprofile ist abhängig von der Beanspruchung aus Erd- und Wasserdruck, Rammbarkeit des Bodens und Verfügbarkeit der Spundbohlen. Üblicherweise werden zwei Spundbohlen gleichzeitig bei verriegeltem Schloss als sogenannte Doppelbohle in den Boden eingebracht. Da diese steifer als Einzelbohlen sind erleichtert dies den Einbringvorgang. Die Regelform einer Doppelbohle im Grundriss ist s-förmig. Möglich ist auch die Kopplung zu Dreifach- oder Vierfach-Spundbohlen. Je nach Rammtiefe und Anwendungsbereich wird auch zwischen Leichtprofilen (max. 12 m Länge) und Schwerprofilen (max. 30 m Länge) differenziert. In Tab. 2.1 sind gängige Schloss- und Profilformen dargestellt. [2, 29, 37]

#### Abdichtung

Die Aneinanderreihung von einzelnen Spundbohlen zu einer flächigen Spundwand ist grundsätzlich als wasserdicht anzusehen. Ein Spundwandverbau kann daher im Grundwasser oder im offenen Wasser hergestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass im Grundwasser nur umweltverträgliche Dichtmaterialien wie die Produkte Beltan, Roxan oder AKILA eingesetzt werden. Je nach Einsatzdauer wird zwischen Dauerbauwerken wie Hafenanlagen und temporären Baugrubenverbauten unterschieden. Für den bleibenden Verbau hat sich die werkseitig eingebrachte Schlossdichtung aus dauerelastischem Polyurethan gegenüber dem traditionellen Verschweißen der Schlösser (Dichtschweißen) bewährt. Für den temporären Verbau und die mehrfache Anwendung eignen sich Schlossverfüllungen mit bituminösen Materialien, die entweder im Werk oder auf der Baustelle aufgetragen werden. [28, 37, 45]




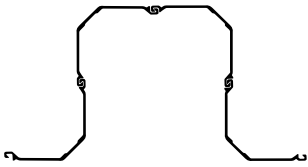









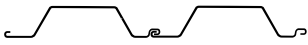

#### Einbringhilfen

Einbringhilfen können dann erforderlich sein, wenn die Bodenverhältnisse für die ursprünglichen oben genannten Einbringverfahren ungeeignet sind. Dazu wird durch unterschiedliche Methoden der Einbringwiderstand so reduziert, dass ein Eintreiben der Spundwandelemente möglich wird. Folgende Einbringhilfen sind gebräuchlich: [2, 29]

- **SCHLOSSSCHMIERUNG:** Dadurch werden die Reibungskräfte im Schloss der Spundbohle reduziert.
- **WASSERSPÜLUNG:** Ein Wasserstrahl tritt über ein angeschweißtes Spülrohr am Fuß der Spundbohle aus und lockert während des Einbringvorgangs den Boden auf. Man unterscheidet zwischen Niederdruckspülen (10–40 bar und 200–500 l/min) und Hochdruckspülen (350–500 bar und 20–40 l/min).



**Tab. 2.1:** Schloss- und Profilformen von Stahlspundbohlen (modifiziert nach [53])

Bezeichnung	Schlossform	Profilform
LARSEN-Profil (U-Profil)		
LARSEN 43, 430 (Sonderform)		
HOESCH-Profil mit LARSEN-Schloss (Z-Profil)		
HOESCH-Profil mit Knopf-/Klauenschloss (Z-Profil)		
PEINER-Profil (Z-Profil)		
UNION-Flachprofil		
Leichtprofil KL		
Kanaldielen	kein Schloss	

- **DRUCKLUFTSPÜLUNG:** Durch Einblasen von Luft unter hohem Druck wird das Grundwasser verdrängt. Die Druckluftspülung wird bei nichtbindigem Boden, insbesondere im Grundwasser, eingesetzt.
- **LOCKERUNGSBOHRUNG:** Mit einer Bohrschnecke werden in bestimmten Abständen entlang der Spundwandachse Lockerungsbohrungen durchgeführt ohne Bodenmaterial zu fördern.
- **AUSTAUSCHBOHRUNG:** Um dem Problem der ungleichmäßigen Auflockerung bei Lockerungsbohrungen zu begegnen werden Austauschbohrungen ausgeführt. Dabei werden überschnittene, verrohrte Bohrungen hergestellt, die mit einem für das gewählte Einbringverfahren geeignete Material verfüllt werden. Die Spundwand wird vollständig innerhalb des Austauschmaterials eingetrieben. Da die Spundbohlen im Vergleich zu Bohrpfählen gezogen werden können ist diese Maßnahme vor allem für temporäre Verbauten anwendbar.
- **LOCKERSPRENGUNG:** Dieses Verfahren wird in stark verdichteten Böden, Tonstein oder Fels angewandt. Durch Sprengungen im Bohrloch wird lokal um das Sprengloch der feste Boden zerkleinert. Durch die Aneinanderreihung mehrerer Sprenglöcher entsteht ein aufgelockerter Boden für die Spundwand.

### Zusatzmaßnahmen zur Lastabtragung

Der auf die Spundwand wirkende Erd- und Wasserdruck wird in erster Linie über deren Einbindung unterhalb der Baugrubensohle in den Baugrund abgetragen. Bei nicht ausreichender Einbindung können zusätzliche Maßnahmen zu Lastabtragung notwendig sein: [56]

- **VERANKERUNG:** Durch Rückverankerungen werden die erforderlichen Stützkkräfte der Spundwand in den dahinter anstehenden Boden übertragen. Als Verankerung sind Verpressanker, Zugpfähle oder eingesetzte Ankerplatten gebräuchlich.
- **AUSSTEIFUNG:** Stahlsteifen sind horizontale auf Druck beanspruchte Bauteile, die gegen Baugrubenwände gespreizt werden. Meist werden sie unter Vorspannung in Form von Walzprofilen oder Rundrohren eingesetzt. Sie können den Baubetrieb beim Einbau mehrerer Lagen erheblich behindern.
- **GURTUNG:** Horizontal verlegte Gurtungen dienen der gleichmäßigen Verteilung der Anker- oder Steifenkräfte.

### Baublauf

Die Spundwandherstellung wird nach [37] in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

1. Einbringen der Spundbohlen
  - Transport und Ausrichtung der Spundbohle
  - Einbringen der Spundbohle durch Rammen, Rütteln, Einpressen oder Einstellen
  - Einbringhilfen bei Bedarf verwenden
  - Versetzen des Geräts
  - Aushub des Bodens nach Fertigstellung der Spundwand
2. Einbau der Gurtung, Verankerung, Aussteifungen nach Bedarf
  - Herstellung des Bohrloches
  - Einbau des Stahlzugliedes
  - Verpressen
  - Anbringen der Gurtung
  - Vorspannen
  - Anbringen der Aussteifungen
3. Ziehen der Spundbohlen
  - Demontage der Verankerung
  - Anketten der Spundbohlen am Baugerät
  - Herausziehen der Spundbohlen
  - Ablegen und Reinigung der Spundbohlen

## Einbringverfahren

Abhängig von der Baugrundbeschaffenheit, der Rammbarkeit des Bodens, dem erforderlichen Spundbohlenprofil und der Einbringtiefe gibt es vier Methoden zur Einbringung von Spundwandbohlen: [37]

- Schlagrammen
- Vibrieren bzw. Rütteln
- Einpressen
- Einstellen in suspensionsgestützte Schlitz

### 1. Einbringen durch Schlagrammen

Beim Schlagrammen wird die Spundbohle mithilfe eines Rammjärens durch ein herabfallendes Gewicht in den Boden eingetrieben (Abb. 2.5). Folgende Rammjären werden unterschieden: [6, 28, 37]

- FREIFALLRAMMEN (bis zu 40 Schläge/min): Das Schlaggewicht mittels Hydraulikzylinder wird auf die Fallhöhe gebracht, anschließend wird der Hydraulikzylinder schlagartig eingefahren und auf das Rammgut fallengelassen.
- DIESELRAMMEN (39–45 Schläge/min): Durch eine Selbstentzündung eines verdichteten Diesel-Luft-Gemisches beim Aufprall des Schlaggewichtes auf die Spundbohle wird der Kolben erneut angehoben. Es wird eine hohe Einzelschlagenergie bei geringer Schlagzahl erreicht.
- SCHNELLSCHLAGRAMMEN (100–400 Schläge/min): Beim Schnellschlagrammen wird durch Druckluft oder Dampf das Schlaggewicht beim Herabfallen zusätzlich beschleunigt. Anders als beim Dieselbär wird die Spundbohle bei geringer Einzelschlagenergie und hoher Schlagzahl eingetrieben.

Für das Rammen eignen sich vor allem weiche Böden, locker gelagerte Mittel- und Grobsande sowie runde Kornformen. Ungeeignet sind hingegen halbfeste bis feste, trockene bindige Böden, dicht gelagerter Mittel- und Grobkies, kantige Kornformen sowie Fels. [2]

Das Schlagrammen wird dort eingesetzt, wo aufgrund von schwierigen Bodenverhältnissen die erforderlichen Rammtiefen mit anderen Einbringmethoden wie Einrütteln, Einpressen und Einstellen nicht erreicht werden können. Angewendet wird das Schlagrammen vor allem im freien Gelände und im Offshorebereich. Die Nachteile dieses Verfahrens sind hohe Lärmemissionen und starke Erschütterungen während des Betriebes im Vergleich zu den anderen obengenannten Einbringmethoden. Vor allem im dicht besiedelten Raum, wo die Geräuschentwicklung zu begrenzen ist und die Setzung benachbarter Bauwerke durch Erschütterungen eine Gefahr darstellt, ist dieses Verfahren ungeeignet. [2, 6]

### 2. Einbringen durch Vibrieren bzw. Rütteln

Das Einrütteln der Spundbohle funktioniert mittels Vibrationsbären über gegenläufig rotierende Unwuchten (Abb. 2.6). Die erzeugten vertikal gerichteten Schwingungen (1.500 U/min) regen das Spundwandelement an, wodurch die Mantelreibung und der Spitzenwiderstand reduziert werden. Durch das Eigengewicht der Spundbohle, das Gewicht des Vibrationsbären und der dynamischen Belastung wird die Bohle in den Untergrund eingetrieben.



**Abb. 2.5:** Schlagrammen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [31])

Im Vergleich zum ursprünglichen Vibrationsbären ermöglichen Hochfrequenz-Vibratoren (2.200–3.000 U/min) mit variablem statischem Moment während des Betriebes eine optimale Anpassung an den Boden in Hinblick auf Frequenz und Schwingung. Bei locker gelagerten Sanden besteht die Gefahr, dass der Boden in größerer Entfernung durch die Schwingungen verdichtet wird und Setzungen bei anstehenden Bauwerken entstehen. Der kritische Frequenzbereich beim An- und Auslaufen der Vibratoren kann durch die variablen Unwuchten vermieden werden.

Geeignet für dieses Verfahren sind mitteldicht gelagerte, nasse Grob- und Mittelkiesböden, Böden aus Grob- und Mittelsanden, schluffartige Böden und bindige Böden mit höherem Wassergehalt. Ungeeignet sind steife bis feste bindige Böden, sehr dicht gelagerte trockene Sande und Kiese.

Der Vorteil vom Einvibrieren der Bohlen ist, dass die Lärmbelastung im Gegensatz zum Schlagrammen geringer ist. Die mit der Einbringung verbundene Erschütterungen können durch den Einsatz von Hochfrequenz-Vibratoren mit variablem statischem Moment reduziert werden. Im Vergleich zum Schlagrammen ist dieses Verfahren nicht in allen Böden anwendbar. Bei umlagerungsfähigen Böden und falschen Herstellparametern kann es zur Verdichtung des Bodens am Spundbohlenfuß oder zum gegenteiligen Effekt, der Bodenverflüssigung, kommen. [2, 37, 56]

### 3. Einbringen durch Pressen

Zur Herstellung einer Spundwand mit Pressen werden die einzelnen Spundbohlen durch statischen Druck in den Boden gedrückt. Dabei stützt sich die Spundwandpresse während



Abb. 2.6: Einrütteln von Spundwandprofilen (modifiziert nach [32])

des Pressvorganges auf den zuvor eingebrachten Spundbohlen ab. Es werden folgende Einpressverfahren unterschieden: [2, 29, 37]

- **FREIREITENDE SPUNDWANDPRESSE** (Abb. 2.7): Es werden jeweils mehrere Spundwandelemente, die zuvor zu einer Spundwandtafel zusammengesetzt wurden, eingebracht. Dazu werden die Hydraulikzylinder beginnend in der Mitte der Spundwandtafel nacheinander ausgefahren. Sobald alle Spundwandelemente um dasselbe Maß eingepresst wurden, werden die Hydraulikzylinder eingefahren und der Ablauf beginnt erneut.
- **FREISCHREITENDE SPUNDWANDPRESSE** (Abb. 2.8): Im Gegensatz zur freireitender Spundwandpresse werden keine Spundwandtafeln, sondern einzelne Bohlen nach der Reihe eingepresst. Dazu stützt sich die Presse auf die bereits eingetriebenen Spundbohlen ab.

Die Spundwandpresse ist vor allem für den Einsatz in weichen und kohäsiven Böden sowie in locker bis mitteldicht gelagerten Sand und Kies geeignet. Ungeeignet sind hingegen feste Tone und Schluffe, dicht gelagerte Sande und Kiese sowie alle Böden mit Steineinschlüssen.

Ihr Vorteil ist der geräuschlose und erschütterungsfreie Betrieb. Dieses Verfahren kann vor allem im innerstädtischen Bereich und in Böden, welche unter dynamischer Belastung setzungsgefährdet wären, angewandt werden. Obwohl die Geräte sehr umweltfreundlich arbeiten, werden sie aus Kostengründen selten verwendet. Die erzielbaren Leistungen liegen weit unter denen des Schlagrammens. [6]

#### 4. Einstellen in suspensionsgestützte Schlitz

Es werden suspensionsgestützte Bodenschlitze mittels Schlitzwandgreifer oder Fräse bzw. suspensionsgestützte überschrittene Bohrungen hergestellt und anschließend die Spundbohlen eingestellt. Dieses Verfahren wird vor allem bei nicht rammbaren Böden und bei hohem Anspruch auf Dichtigkeit eingesetzt. Hindernisse können mittels Greifer, Fräse oder Meißel vor Einstellen der Bohlen beseitigt werden. [2, 8]

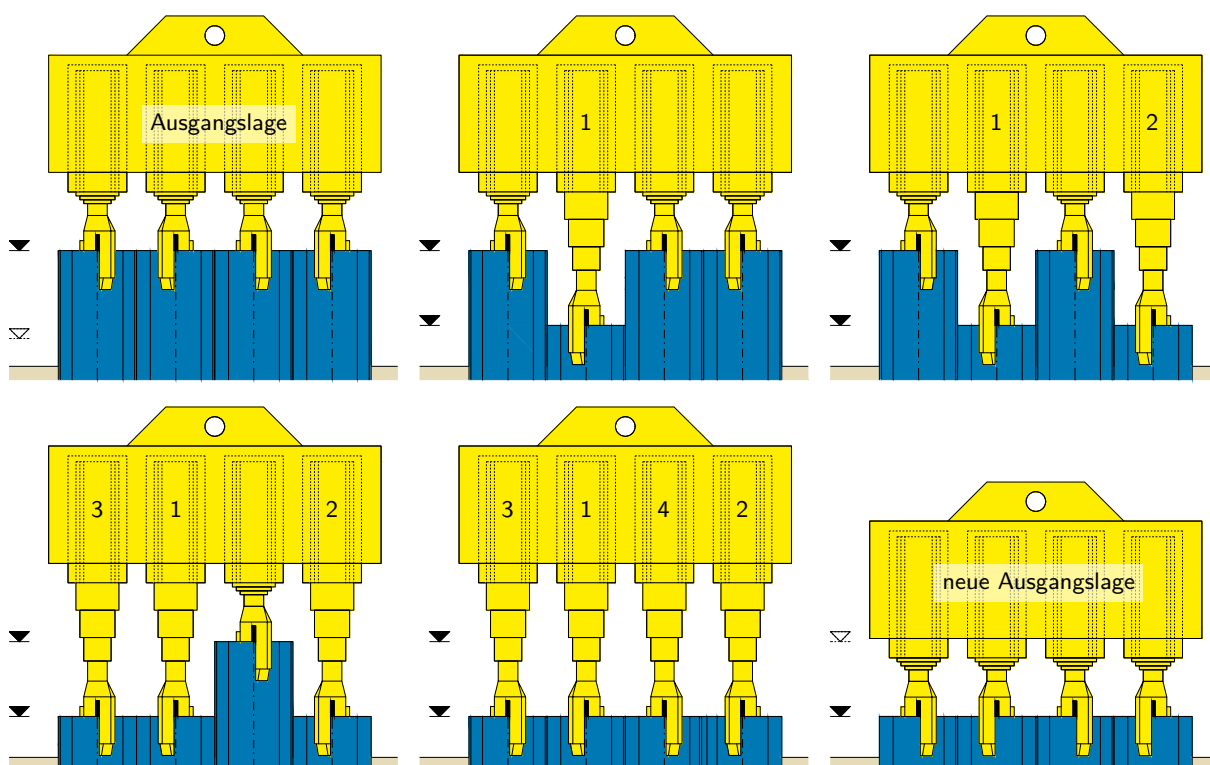


Abb. 2.7: Freireitendes Einpressen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [3])

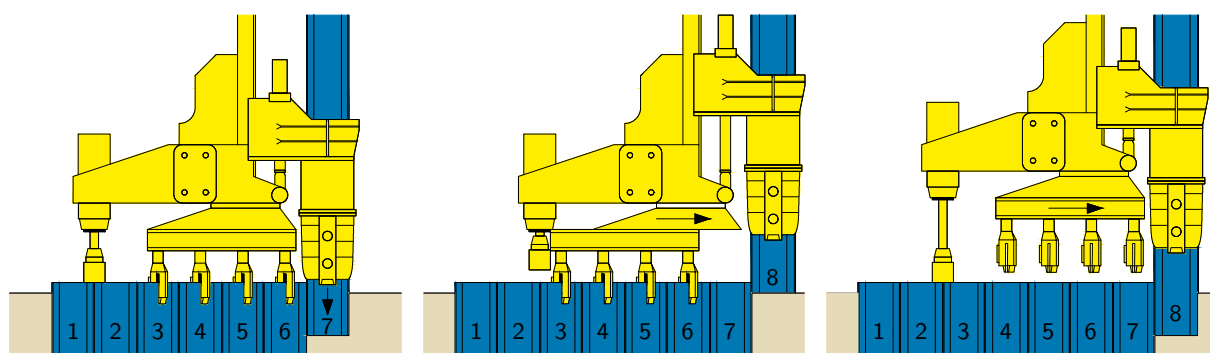


Abb. 2.8: Freischreitendes Einpressen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [3])

### Gerät

Als Trägergerät werden Hydraulikbagger (20–40 t) mit oder ohne Anbaumäkler verwendet. Ein Mäkler ist ein vertikaler Mast, welcher am Trägergerät angebaut werden kann. Er dient als Führung der Spundbohle. Durch ihn können geplante Neigungen ausgeführt und Bodenunebenheiten ausgeglichen werden. Das erforderliche Gewicht des Trägergerätes richtet sich nach den verfahrenstechnisch abhängigen Anbaugeräten. Bei besonders schweren Spundbohlen kann auch ein Seilbagger mit Gitterausleger (45–60 t) eingesetzt werden. Je nach gewählten Einbringverfahren sind folgende Anbaugeräte erforderlich: [29, 37]

- Anbaumäkler
- Rammbar
- Vibrationsbar

- Spundwandpresse

### **Personal**

Zur Herstellung einer Spundwand wird folgende Arbeitsmannschaft benötigt:

- 1 GeräteführerIn für das Trägergerät
- 1 RammmeisterIn zur Kontrolle der Rammarbeiten
- 1 Hilfskraft für Nebenarbeiten

Zusätzliche Baumaßnahmen wie das Einbringen der Verankerung sowie das Anbringen einer umlaufenden Gurtung erfordert in vielen Fällen eine zweite Arbeitsmannschaft. Diese besteht aus:

- 1 GeräteführerIn für das Kleinbohrgerät, Mischer und Verpresspumpe
- 1–2 Hilfskräfte für Nebenarbeiten

### **2.1.3 Zusammenfassung**

In Tab. 2.2 (S. 18) sind die Vor- und Nachteile einer geböschten Baugrube und eines Spundwandverbaus dargestellt.

Tab. 2.3 (S. 19) und Tab. 2.4 (S. 19) fassen die Arbeitsschritte zur Herstellung einer geböschten Baugrube und eines Spundwandverbaus zusammen. Zusätzlich werden die erforderlichen Geräte, Personal und kalkulatorischen Werte angegeben. Die kalkulatorischen Werte [37] für die einzelnen Arbeitsschritte sind als Richtwerte anzusehen.

**Tab. 2.2:** Vor- und Nachteile der Baugrubensicherungen [2, 37, 56]

Baugrubensicherung	Vorteile	Nachteile
Geböschte Baugrube	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Herstellung</li> <li>• Lärmarme und erschütterungsfreie Herstellung</li> <li>• Kein Einsatz von Spezialgeräten erforderlich</li> <li>• Kein Verbaumaterial erforderlich</li> <li>• Keine Aussteifungen erforderlich, welche den Arbeitsraum einschränken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großer Platzbedarf</li> <li>• Bei Grundwasser nur mit Zusatzmaßnahmen möglich</li> <li>• Bei zunehmender Tiefe steigt das Aushub- und Verfüllvolumen</li> <li>• Nicht neben Nachbarbebauung anwendbar</li> <li>• Materialzufuhr zur Baugrube aufwendiger, da Baugeräte aufgrund der Böschung weiter entfernt stehen</li> </ul>
Spundwandverbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aushub sofort nach Einbringen der Spundbohlen möglich</li> <li>• Witterungsunabhängiger Einbau</li> <li>• Wiedergewinnbare Spundbohlen</li> <li>• Bodenverdrängung beim Einbringen der Spundbohlen aktiviert eine hohe Mantelreibung, so dass vertikale Lasten abgetragen werden können</li> <li>• Anwendbarkeit in nicht standfestem Boden</li> <li>• Anwendbarkeit im Grundwasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lärmemissionen und Erschütterungen beim Einbringen der Spundbohlen, vor allem beim Schlagrammen</li> <li>• Nachgiebige (weiche) Verbauart hat Setzungsgefahr für Nachbarbebauung zur Folge</li> <li>• Spundbohlenlänge von Transportlängen abhängig</li> <li>• Setzungsgefahr beim Ziehen der Spundbohlen</li> <li>• Anwendbarkeit durch Rammbarkeit des Bodens beschränkt</li> <li>• Wenig flexibel bei Leitungskreuzungen und veränderten Bodenverhältnissen</li> <li>• Hohe Investitionskosten</li> </ul>



**Tab. 2.3:** Herstellung einer geböschten Baugrube [23, 37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert
<b>1 Aushub der Baugrube</b>			
Oberboden abtragen Aushub, Laden, Abtransportieren	Hydraulikbagger oder Raupenlader Lastkraftwagen	1 GeräteführerIn 1 Fahrer	25–100 m <sup>3</sup> /h
Herstellung der Böschung und Bermen	Hydraulikbagger	1 GeräteführerIn	25–200 m <sup>3</sup> /h
<b>2 Einbau der Böschungssicherung</b>			
Aufbringen des Spritzbetons	Spritzbetonanlage	1 Hilfskraft	2,0 h/m <sup>2</sup>
Einbringen der Bodennägel	Kleinbohrgerät oder Bohrhammer	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	2,0 h/m <sup>2</sup>

**Tab. 2.4:** Herstellung eines Spundwandverbaus [23, 37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert
<b>1 Einbringen der Spundbohlen</b>			
Transport und Ausrichtung der Spundbohle	Hydraulikbagger	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	1,3 h/t
Einbringen der Spundbohle durch Rammen, Rütteln, Einpressen oder Einstellen	Hydraulikbagger (Trägergerät) Rammbar Vibrationsbar Spundwandpresse	1 GeräteführerIn 1 RammmeisterIn 1 Hilfskraft	0,075– 0,20 h/m <sup>2</sup>
<b>2 Einbau der Verankerung</b>			
Herstellung des Bohrloches	Kleinbohrgerät	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	0,06–0,20 h/m
Verpressen	Mischanlage	1 Hilfskraft	0,5 h/Stk
Vorspannen	Spannpresse	1 Hilfskraft	0,7 h/Stk
<b>3 Ziehen der Spundbohlen</b>			
Anketten der Spundbohlen am Baugerät, Herausziehen der Spundbohlen, Ablegen und Reinigung der Spundbohlen	Hydraulikbagger	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	0,10–0,25 h/m <sup>2</sup>

## 2.2 Baugrundverbesserung

Um Bauwerkslasten über das Fundament in den Untergrund ableiten zu können wird eine ausreichende Standsicherheit des Untergrundes vorausgesetzt. Ist diese Voraussetzung vom anstehenden Boden nicht erfüllt, müssen entweder die Eigenschaften des vorliegenden Bodens verbessert oder die Möglichkeit einer Tiefgründung in Betracht gezogen werden. Die Beibehaltung der Flachgründung ist jedenfalls die wirtschaftlichere Lösung gegenüber einer Tiefgründung. Jedoch kann der Einsatz von Pfahlgründungen bei großem Aushubvolumen und dem Entfall der Wasserhaltung kostengünstiger sein. [37]

Eine Baugrundverbesserung wird durch die Verringerung der zu erwartenden Setzung sowie durch die Erhöhung der Tragfähigkeit des Bodens erreicht. Die Verbesserung des Untergrunds wird durch folgende Maßnahmen hervorgerufen: [37]

- Verhinderung des Abgleitens der Körner gegeneinander
- Erhöhung der Lagerungsdichte
- Entwässerung

Abb. 2.9 gibt einen Überblick über die Verfahren zur Baugrundverbesserung. In diesem Kapitel werden der Bodenaustausch (Kap. 2.2.1), die Rüttelstopfverdichtung (Kap. 2.2.2) und die Bodenvereisung (Kap. 2.2.3) behandelt, da diese Relevanz für den Neckartalübergang zeigen.

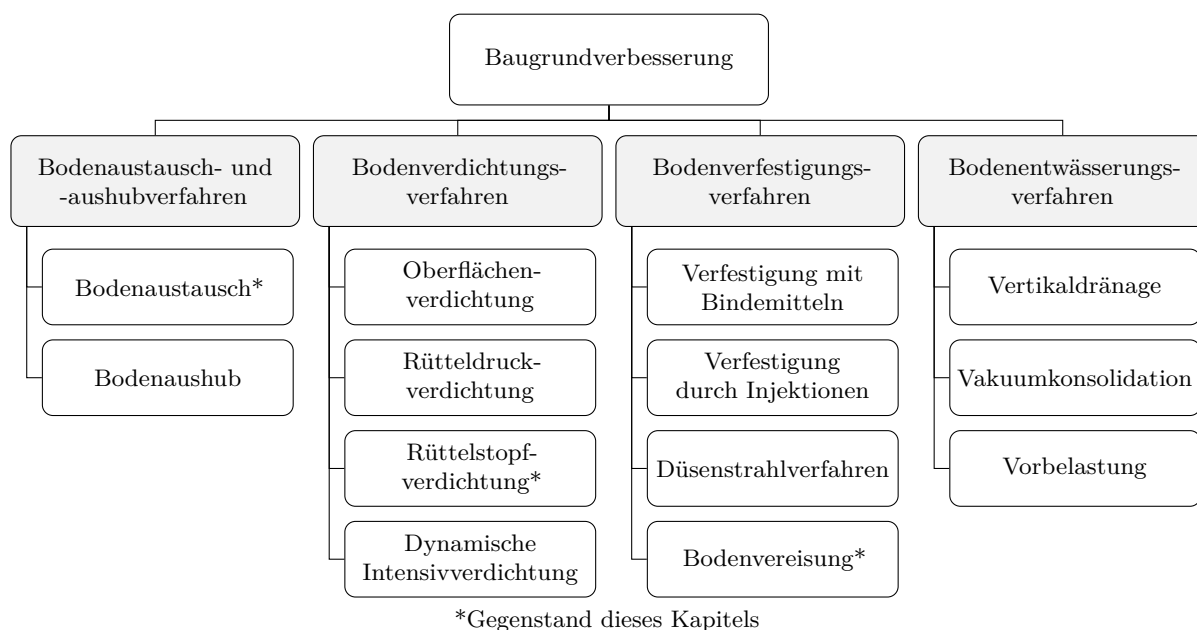


Abb. 2.9: Überblick über Baugrundverbesserungsverfahren (modifiziert nach [37])

### 2.2.1 Bodenaustausch

Beim Bodenaustauschverfahren werden für eine direkte Gründung ungeeignete Bodenschichten ausgehoben und durch verdichtetes, tragfähiges, nichtbindiges Schüttmaterial ersetzt. Bei der Ermittlung der auszutauschenden Erdmassen ist die Lastausbreitung unter der Fundamentsohle zu berücksichtigen (Abb. 2.10).

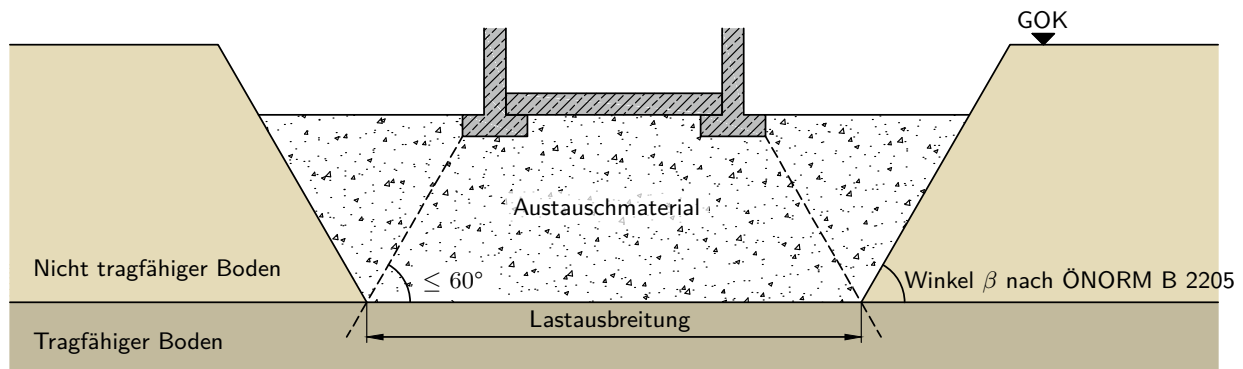


Abb. 2.10: Bodenaustauschverfahren (modifiziert nach [37])

Ungeeignete Böden mit geringen Scherfestigkeiten können organische Böden oder Anschüttungen von weicher bis flüssiger Konsistenz sein. Der Umfang des Bodenaustausches richtet sich nach der räumlichen Ausdehnung des zu verbessernden Bodens, der Gründungsfläche und den auftretenden Belastungen. Bei Schichtmächtigkeiten kleiner als 3 m ist das Bodenaustauschverfahren die technisch einfachste und wirtschaftlich günstigste Baugrundverbesserungsmethode. Als Austauschmaterial werden Sande, Kiese, Siebschutt, industrielle Recycleprodukte oder Abraumprodukte aus dem Bergbau verwendet. Die Voraussetzung dieser Materialien ist die ausreichende Verdichtbarkeit. Bei erhöhtem Grundwasserspiegel kann eine Grundwasserhaltung notwendig sein, um Erschwernissen beim Aushub und der Verdichtung des Ersatzmaterials vorzubeugen. [37]

### Baublauf

Die Herstellung eines Bodenaustausches erfolgt in zwei Arbeitsschritten: [37]

1. Lösen des anstehenden Bodens
2. Einbau des Austauschmaterials

Dabei wird das Ersatzmaterial lagenweise eingebaut, wobei die einzelnen Lagen ausreichend verdichtet werden müssen.

### Gerät

Wie auch bei der Herstellung der geböschten Baugrube in Kapitel 2.1.1 (S. 9) werden für das Bodenaustauschverfahren folgende Baugeräte eingesetzt:

- Hydraulikbagger oder Radlader für den Bodenaushub bzw. Einbau des Austauschmaterials
- Lastkraftwagen für den Abtransport des gelösten Bodenguts bzw. Antransport des Ersatzmaterials

### Personal

Die Anzahl der Arbeitskräfte für den Erdaushub und Abtransport orientiert sich, wie auch in Kapitel 2.1.1 (S. 9) beschrieben, an der Anzahl der erforderlichen Aushubgeräte und Transportfahrzeuge.

### 2.2.2 Rüttelstopfverdichtung

Die Rüttelstopfverdichtung nach ÖNORM EN 14731 [43] bzw. DIN EN 14731 [13] wird eingesetzt, wenn bindige feinkörnige Böden wie Tone und Schluffe verbessert werden sollen, bei denen eine Eigenverdichtung nur gering möglich ist. Bei diesem Verfahren wird mit einem Tieferüttler ein Hohlraum mit einem Durchmesser von 50–80 cm durch Verdrängung des Bodens hergestellt. Dieser wird anschließend mit Zugabematerial wie beispielsweise Kies, Schotter oder auch Recyclingprodukten mit einem Korndurchmesser von 10–40 mm verfüllt. Die entstandenen Rüttelstopfsäulen erhöhen die Scherfestigkeit und verringern die Zusammendrückbarkeit des Bodens. Durch ihre gleichzeitige Wirkung als Drainage beschleunigen sie den Setzungsprozess. Die Tragfähigkeit der Säulen ist aufgrund ihrer eigenen geringen Scherfestigkeit von der seitlichen Stützung des umschließenden Bodens abhängig. Flüssige und breiige Böden sind aufgrund ihres geringen seitlichen Widerstandes ungeeignet. Mindestens halb feste feinkörnige Böden erschweren das Eintreiben des Rüttlers und sind ebenfalls nicht geeignet. [2, 37]

Die Säulen zur Bodenverbesserung werden ausschließlich unter dem Fundament bzw. der belasteten Fläche angeordnet (vgl. Abb. 2.11). Eine zusätzliche Säulenreihe um die lasteinleitende Fläche ist nahezu wirkungslos. Es können bis zu 20 m lange Rüttelstopfsäulen hergestellt werden. Bei Schichtmächtigkeiten von 3–10 m ist die Rüttelstopfverdichtung wirtschaftlich. [37]

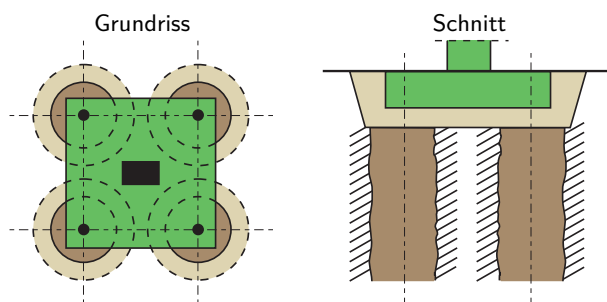


Abb. 2.11: Anordnung der Rüttelstopfsäulen unter einem Fundament (modifiziert nach [27])

#### Baublauf

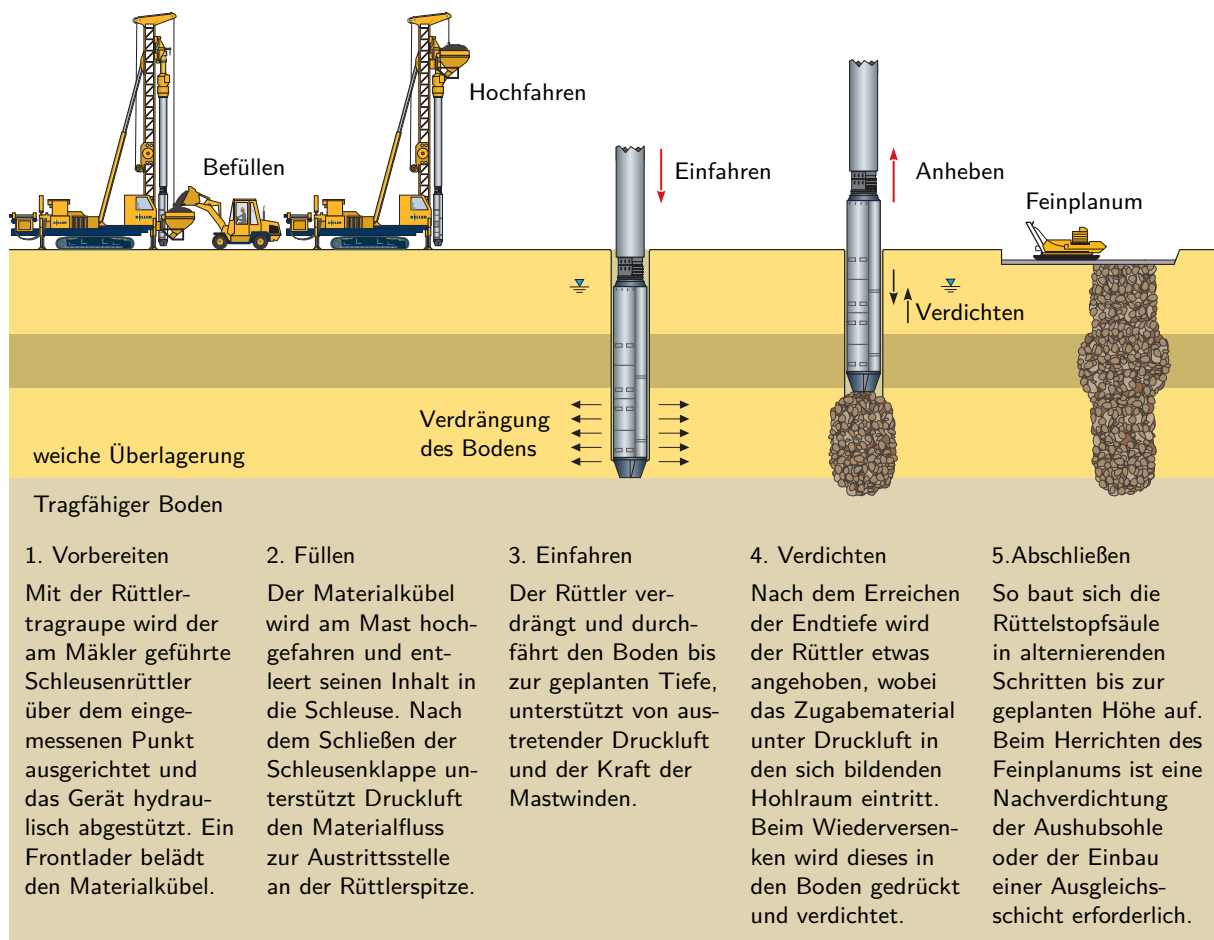
Bei der Rüttelstopfverdichtung wird meistens ein so genannter Schleusenrüttler eingesetzt. Der Schleusenrüttler besitzt eine Rohrführung, über die Zugabematerial mit Druckluftunterstützung bis zur Rüttlerspitze gelangt und dort austreten kann. Das Zugabematerial wird mit einem Radlader in einen Materialkübel gefüllt und am Mast hochgefahren. Um einen höheren Andruck beim Absenk- und Verdichtungsprozess zu erzielen, werden die Rüttler an einem Mäkler geführt. Beim Rüttelstopfverfahren wird in alternierenden Schritten gearbeitet. Das beim Anheben des Rüttlers austretende Zugabematerial wird beim Wiederversenken (Stopfen) verdichtet und seitlich in den Boden verdrängt. Auf diese Weise entstehen sogenannte Rüttelstopfsäulen. [2]

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung einer Rüttelstopfverdichtung mit Schleusenrüttlern sind in Abb. 2.12 beschrieben.

#### Gerät

Zur Herstellung von Rüttelstopfsäulen mit Schleusenrüttlern sind folgende Geräte notwendig:

- Radlader zur Befüllung des Materialkübels



**Abb. 2.12:** Herstellung einer Rüttelstopfverdichtung mit Schleusenrüttler [27]

- Trägergerät (Hydraulikbagger oder Seilbagger) für die Rüttlereinheit
- Schleusenrüttler
- Planiertraupe zum Planieren des Arbeitsfeldes
- Flächenrüttler zur Oberflächenverdichtung

### Personal

Die Arbeitsgruppe für die Rüttelstopfverdichtung besteht aus:

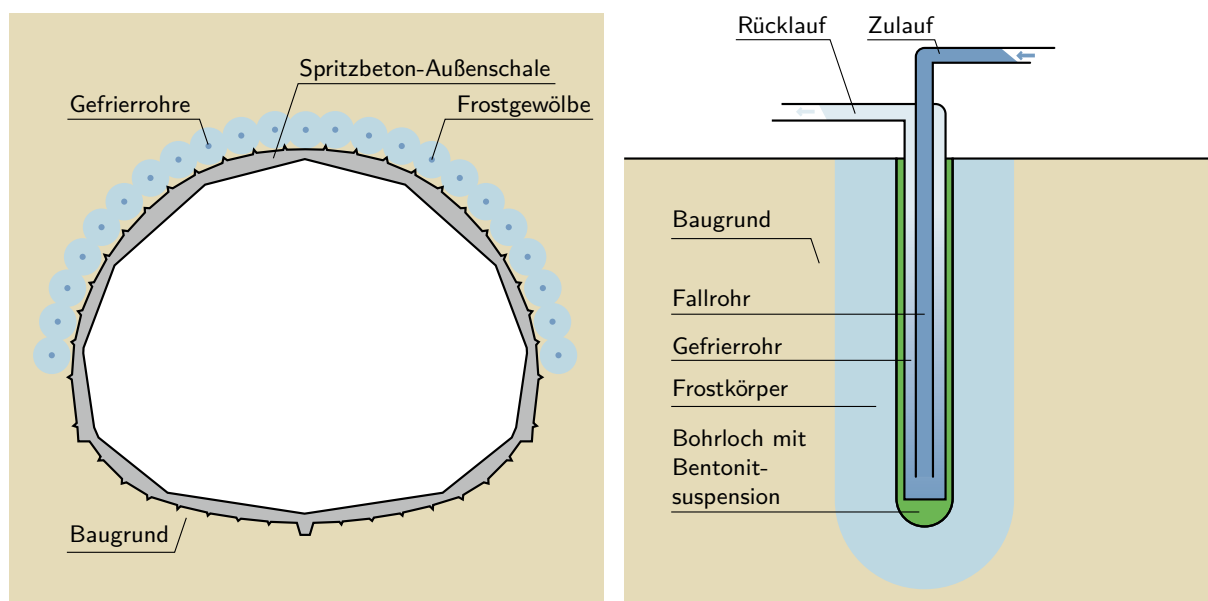
- 1 GeräteführerIn für das Trägergerät (Hydraulikbagger oder Seilbagger)
- 1 GeräteführerIn für den Radlader
- 1 Hilfskraft für das Trägergerät

Zur Erstellung des Feinplanums sind folgende Personen im Einsatz:

- 1 GeräteführerIn für das Planiergerät
- 1 Hilfskraft für den Flächenrüttler

### 2.2.3 Bodenvereisung

Bei der Bodenvereisung wird der Boden so weit abgekühlt bis das darin enthaltene Bodenwasser gefriert. Der vereiste Bodenkörper weist eine hohe Festigkeit und geringe Wasserdurchlässigkeit auf. Im Vergleich zu den bisher beschriebenen permanenten Bodenverbesserungsverfahren (Kap. 2.2.1 und Kap. 2.2.2) zählt die Bodenvereisung zu den temporären Bauhilfsmaßnahmen. Für dessen Einsatz werden ausreichender Wassergehalt des Bodens und eine geringe Fließgeschwindigkeit des Grundwassers vorausgesetzt. Die Bodenvereisung wird häufig als temporäre Sicherungsmaßnahme im Tunnel- und Schachtbau oder als Abdichtung durchlässiger Verbauwände eingesetzt. In Abb. 2.13 ist links die Ausbildung eines Frostgewölbes im Tunnelbaues und rechts das Grundprinzip eines Gefrierrohrs dargestellt. [56]



**Abb. 2.13:** Frostgewölbe im Tunnelbau (li.) und Grundprinzip eines Gefrierrohrs (re.) [36]

#### Baublauf

Um eine Bodenvereisung herzustellen, werden zuerst Gefrierrohre in geplanten Abständen in den Boden gerammt oder in vorgefertigte Bohrlöcher eingesetzt. Zur Ausbildung eines ausreichend großen und dichten Frostkörpers ist eine Bohrgenauigkeit von 0,5–1 % der Bohrlänge einzuhalten. Bei größeren Abständen besteht die Gefahr, dass sich entweder kein geschlossener Frostkörper ausbilden kann oder ein größerer und kostenintensiverer Frostkörper entsteht. Bei der Bohrlochherstellung werden die eingelegten Gefrierrohre zusätzlich mit einem Injektionsmittel (z. B. Bentonit) verpresst, um so den Einschluss von Luftporen zu vermeiden. Denn Luft wirkt als Isolator und hemmt den raschen Kälte-transport. Nach dem Einbau der Gefrierleitungen werden diese an eine zentrale Mess- und Regeltechnikeinheit angeschlossen, welche die Informationen über die Temperaturstände in den einzelnen Vereisungsrohren aufzeichnet. Ist der Kreislauf in sich dicht und geschlossen fertiggestellt, wird Kältemittel durch die Gefrierrohre geleitet, welches dem umgebenden Boden Wärme entzieht. Es entstehen zylinderförmige Frostkörper, die sich mit den benachbarten Frostkörpern zu gefrorenen, dichten Wänden bilden. Zur Herstellung einer Bodenvereisung gibt es zwei Verfahren mit unterschiedlichen Kältemitteln, die Bodenvereisung mit Sole oder mit Stickstoff. [7]

### Bodenvereisung mit Sole

Bei dieser Bodenvereisungsmethode wird eine wässrige Salzlösung (Sole) als Kältemittel eingesetzt. Durch Kälteaggregate wird die Temperatur im geschlossenen Kühlkreislauf auf  $-5$  bis  $-35$  °C abgekühlt. Eine Kreislumpumpe fördert die Sole durch die isolierten Leitungen im Kreislauf. Zusätzlich ist ein Rückkühlwerk notwendig, um die Kompressionswärme des Kälteaggregates abzuführen. Im Vergleich zur Stickstoffvereisung sind der Energieverbrauch und somit auch die Betriebskosten geringer. Andererseits ist die Installation von Kälteaggregat und Rückkühlung kostenintensiver. Nachteilig wirkt sich auch der langsame Aufbau des Vereisungskörpers aus. Aus diesen Gründen wird die Bodenvereisung mit Sole hauptsächlich für länger andauernde Bauvorhaben eingesetzt. In Abb. 2.14 ist ein Schema einer Solevereisung dargestellt. [7]

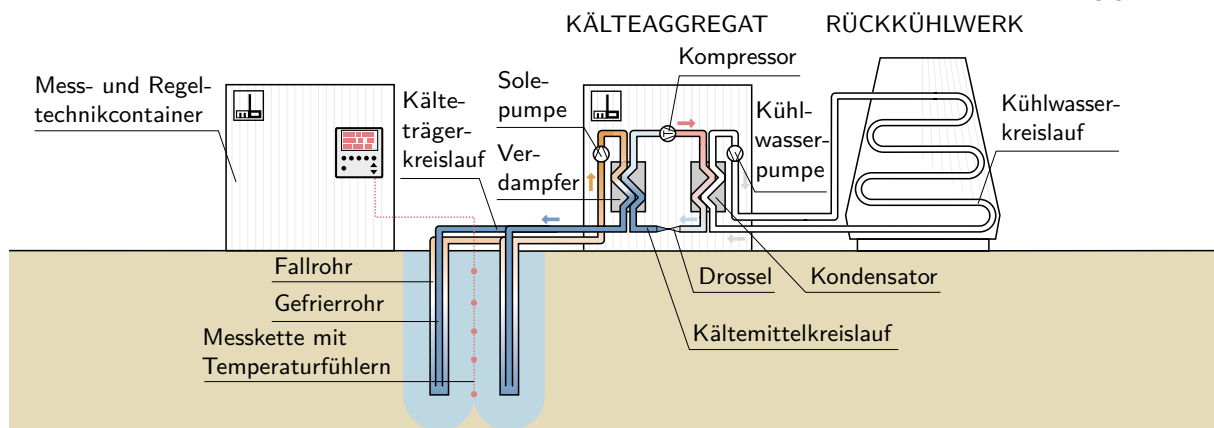


Abb. 2.14: Bodenvereisung mit Sole (modifiziert nach [36])

### Bodenvereisung mit Stickstoff

Bei dieser Methode wird im Boden durch Einbringen von flüssigem Stickstoff, dessen Verdampfungstemperatur bei  $-196$  °C liegt, das im Boden enthaltene Wasser „schockgefroren“. Im Gegensatz zur Solevereisung können mit dieser Methode wesentlich kürzere Gefrierzeiten erzielt werden. Die Energiekosten sind jedoch deutlich höher als bei der Solevereisung, weshalb diese Methode entweder bei kleineren Bauvorhaben oder bei starken Grundwasserströmungen eingesetzt wird. In Abb. 2.15 ist ein Schema einer Stickstoffvereisung dargestellt. [7]

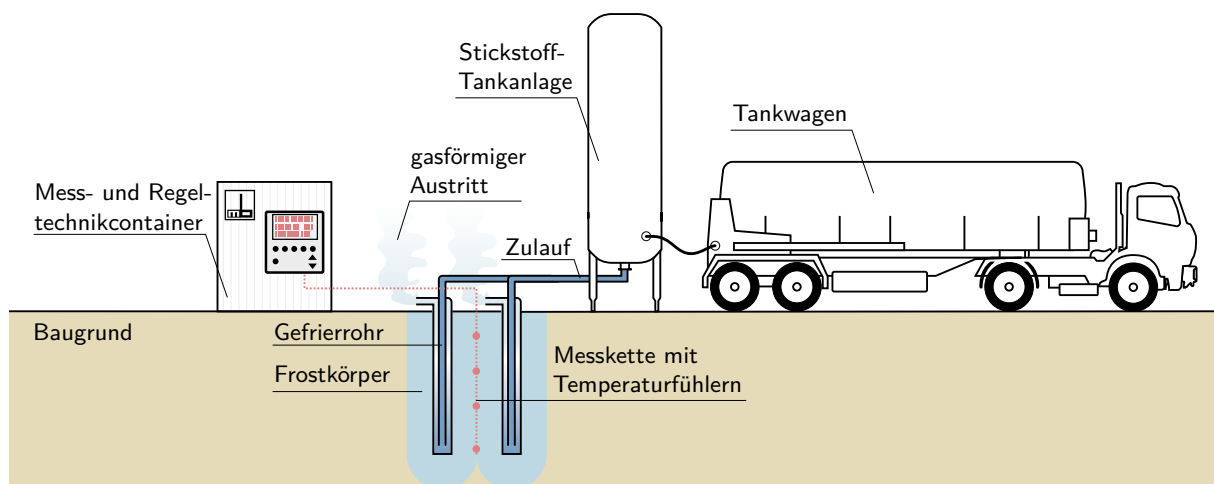


Abb. 2.15: Bodenvereisung mit Stickstoff (modifiziert nach [36])

### Gerät

Zur Herstellung einer Solevereisung werden folgenden Anlagenteile benötigt: [56]

- Sole als Kälteträger
- Kälteaggregat (Kältemittelkreislauf)
- Rückkühlwerk (Kühlwasserkreislauf oder Luftkühlung)
- Isolierte Rohrleitungen (Kälteträgerkreislauf)
- Mess- und Regeltechnikeinheit

Die Stickstoffvereisung besteht aus folgenden Anlagenkomponenten:

- Stickstofftankanlage
- Tankwagen zur Stickstoffversorgung
- Isolierte Rohrleitungen
- Mess- und Steuerungstechnikeinheit

### Personal

Die Herstellung einer Bodenvereisung erfordert folgende Personen:

- 1 Ramm- bzw. BohrmeisterIn zum Einbringen der Rohrleitungen in den Boden
- 2 Hilfskräfte zum Aufbau und Verlegung der Anlagenteile
- 1 GeräteführerIn für den Tankwagen (Stickstoffvereisung)

### 2.2.4 Zusammenfassung

In Tab. 2.5 (S. 27) sind die Vor- und Nachteile des Bodenaustauschverfahrens, der Rüttelstopfverdichtung und der Bodenvereisung dargestellt.

Tab. 2.6 (S. 28) und Tab. 2.7 (S. 28) fassen die Arbeitsschritte zur Herstellung eines Bodenaustausches und einer Rüttelstopfverdichtung zusammen. Zusätzlich werden die erforderlichen Geräte, Personal und kalkulatorischen Werte angegeben. Die kalkulatorischen Werte [37] für die einzelnen Arbeitsschritte sind als Richtwerte anzusehen.



Tab. 2.5: Gegenüberstellung der Baugrundverbesserungsverfahren [2, 7, 37]

Baugrund-verbesserungsverfahren	Vorteile	Nachteile
Boden-austausch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache Herstellung</li> <li>• In allen Bodenarten einsetzbar</li> <li>• Wirtschaftlich für kleine Flächen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. wirksame verbesserbare Tiefe bis 5 m</li> <li>• Wasserhaltung ist gegebenenfalls erforderlich</li> <li>• Transport von Aushubmaterial</li> </ul>
Rüttelstopf-verdichtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umweltfreundlich durch den Einbau natürlicher Füllmaterialien</li> <li>• Keine Bodenförderung (wichtig bei schadstoffbelasteten Böden)</li> <li>• Bodenverdrängung beim Einbringen führt zu Verdichtung</li> <li>• Keine Wasserhaltung notwendig</li> <li>• Rüttelstopfsäulen wirken als Vertikaldränage (Setzungsbeschleunigung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abhängigkeit der Tragfähigkeit von seitlicher Stützung des umschließenden Bodens</li> <li>• Beschränkt auf weiche bis steife bindige Böden</li> <li>• Wirtschaftlich ab Flächen &gt;1.200 m<sup>2</sup></li> </ul>
Boden-vereisung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frostkörper hat tragende und dichtende Funktion</li> <li>• Reversibilität, Wiederherstellung der ursprünglichen Boden- und Grundwasserverhältnisse ohne bleibende Rückstände</li> <li>• Ökologisch, schadstoff- und reststofffrei</li> <li>• Keine Bodenförderung (wichtig bei schadstoffbelasteten Böden)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschränkt auf weiche bis steife bindige Böden</li> <li>• Hohe Energiekosten (Verfahren mit Stickstoff)</li> <li>• Hohe Betriebskosten (Verfahren mit Sole)</li> <li>• Nicht geeignet bei hoher Grundwasserströmung</li> <li>• Hebungen des Bodens können durch die Volumenzunahme des Wassers auftreten</li> </ul>

**Tab. 2.6:** Herstellung eines Bodenaustausches [37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert
<b>1 Aushub der Baugrube</b>			
Oberboden abtragen Aushub, Laden, Abtransportieren	Hydraulikbagger oder Raupenlader Lastkraftwagen	1 GeräteführerIn 1 Fahrer	25–100 m <sup>3</sup> /h
Herstellung der Böschung und Bermen	Hydraulikbagger	1 GeräteführerIn	25–200 m <sup>3</sup> /h
<b>2 Einbau des Austauschmaterials</b>			
Lagenweiser Einbau und Verdichtung	Hydraulikbagger Flächenrüttler	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	0 h/m <sup>2</sup>

**Tab. 2.7:** Herstellung einer Rüttelstopfverdichtung [37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert
<b>1 Rüttelstopfverdichtung</b>			
Füllen des Materialkübels	Radlader	1 GeräteführerIn	-
Einfahren des Rüttlers	Trägergerät	1 GeräteführerIn	150–200 m <sup>2</sup> pro Tag
Anheben des Rüttlers	(Hydraulikbagger oder Seilbagger)	1 Hilfskraft	
Austritt des Zugabematerials	Schleusenrüttler		
Absenken des Rüttlers			
Verdichten des Zugabematerials			
Wiederholung bis zur Erreichung der Arbeitsebene			
<b>2 Erstellung des Feinplanums</b>			
Planieren des Arbeitsfeldes	Planiererraupe	1 GeräteführerIn	100–400 m <sup>2</sup> /h
Oberflächenverdichtung	Oberflächenrüttler	1 Hilfskraft	60 m <sup>2</sup> /h

## 2.3 Pfahlgründungen

Pfahlgründungen werden vor allem in den Bereichen des Brückenbaus, des Hochbaus und des Wasserbaus eingesetzt (vgl. Abb. 2.16). Sie sind immer dann notwendig, wenn der Baugrund unter dem geplanten Bauwerk nicht ausreichend tragfähig ist. Dabei werden die Bauwerkslasten über die Pfahlmantelfläche und/ oder der Pfahlspitze in tiefer liegende, tragfähige Bodenschichten eingeleitet.

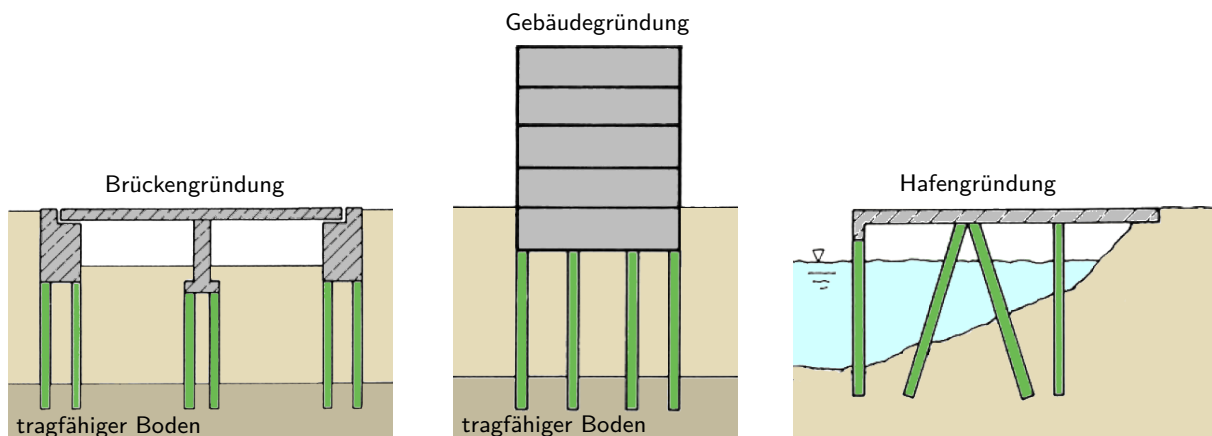


Abb. 2.16: Einsatzbereiche von Pfahlgründungen (modifiziert nach [37])

Für die individuellen Einsatzbereiche hat sich eine breite Auswahl an Pfahltypen auf dem Markt etabliert, die nach unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden. Grundsätzlich wird zwischen Verdrängungspfählen [11, 41], Bohrpfählen [14, 44] und Mikropfählen [12, 42] unterschieden (vgl. Abb. 2.17). Zu den Verdrängungspfählen zählen Fertigpfähle, welche aus Holz, Stahl, Stahlbeton oder Spannbeton bestehen können, sowie Ortbetonrammpfähle, Vollverdrängungspfähle und verpresste Verdrängungspfähle. Bohrpfähle haben üblicherweise einen Durchmesser von 30–300 cm. Ortbetonpfähle und Verbundpfähle mit einem Durchmesser kleiner als 30 cm werden als Mikropfähle bezeichnet.

Die Wahl des geeigneten Pfahltyps und des entsprechenden Herstellungsverfahrens richtet sich neben den Forderungen nach Wirtschaftlichkeit auch nach den Boden- und Wasserverhältnissen, der Art und Größe der Beanspruchungen, den Platzverhältnissen und den Umweltbeeinträchtigungen (z. B. Erschütterung, Lärm, ...).

Zur Bestimmung der Boden und Wasserverhältnisse für Pfahlgründungen werden Baugrunderkundungen durchgeführt. Es werden geologische Karten ausgewertet und nach einer Begehung des Geländes Zahl, Art und Tiefe der Aufschlüsse festgelegt. Hierfür kommen zwei Erkundungsmethoden in Frage:

- Bohrungen liefern Informationen über die Abfolge, die Mächtigkeit und die räumliche Lage der einzelnen Bodenschichten sowie die Lage des Grundwasserspiegels.
- Sondierungen sind im Vergleich zu Bohrungen kostengünstiger und geben Rückschluss über die Tragfähigkeit des Bodens.

Generell sind Voruntersuchungen für Pfahlgründungen aufwendiger als bei Flachgründungen, da zusätzliche Bodenparameter, wie die Abschätzung der Tragfähigkeit der Pfähle oder die Beurteilung der Rammpfahigkeit des Untergrundes, erforderlich sind. Hinzu kommen Untersuchungen über die Chemie des Grundwassers, das aggressiv auf die Pfahlbaustoffe wirken kann.

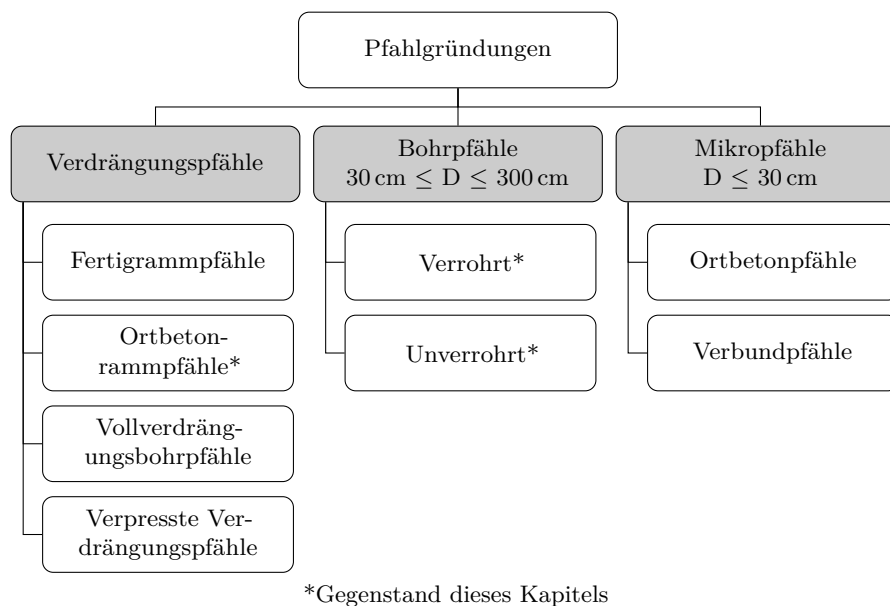


Abb. 2.17: Überblick über Pfahlgründungsverfahren (modifiziert nach [2])

### 2.3.1 Ortbetonrammpfähle

Ortbetonrammpfähle, früher als Ortbetonverdrängungspfähle bezeichnet, zählen nach [11, 41] zu den Spezialpfählen innerhalb der Gruppe der Verdrängungspfähle. Sie werden durch das Einrammen eines am unteren Ende verschlossenen Vortriebsrohres hergestellt. Dabei wird der Boden verdrängt und gleichzeitig nimmt die Horizontalspannung im Mantelbereich zu, somit sind dem Verfahren bezüglich Bohrdurchmesser, Bohrtiefe und der Verdrängungswilligkeit des Bodens Grenzen gesetzt. Je nach Verfahren wird das Vortriebsrohr durch Innenrammung (Franki-Pfahl) oder durch Kopframung (Simplex-Pfahl) in den Boden gerammt. Meist wird nach Erreichen der geplanten Eindringtiefe der Boden im Fußbereich noch zusätzlich verdichtet. Es entsteht eine sogenannte Fußverbreiterung, welche die Tragfähigkeit der Pfähle um bis zu 50 % verbessern kann. Ebenso ist der Pfahl durch die Fußverbreiterung in der Lage Zugkräfte aufzunehmen. Während der Herstellung eines Ortbetonrammpfahls kommt es zu keinem Bodenaushub. Zu den häufig eingesetzten Pfahltypen zählen der Franki-Pfahl (Abb. 2.18) und der Simplex-Pfahl (Abb. 2.19), welche im Folgenden erläutert werden. [37, 45, 50]

#### Gerät

Ein Rammgerät besteht aus: [37]

- Trägergerät
- Freifall-, Hydraulik- oder Dieselmotor für den Eintrieb des Pfahles

Zur Freilegung des Pfahlkopfes werden folgende Geräte benötigt:

- Kompressor für Presslufthammer
- Presslufthammer zum Lösen des ausgehärteten Betons

### Personal

Eine Arbeitsgruppe zur Herstellung von Ortbetonrammpfählen besteht aus: [37]

- 1 RammmeisterIn zur Kontrolle und Überwachung der Arbeitsvorgänge
- 1 GeräteführerIn für das Rammgerät
- 2 Hilfskraft für Nebenarbeiten und das Freilegen der Pfahlköpfe

### Franki-Pfahl NG

Zur Herstellung eines Franki-Pfahles NG der „neuen Generation“ wird das stählerne Vortriebsrohr durch einen Betonpfropfen wasserdicht verschlossen und anschließend durch eine Innenrammung abgeteuft. Beim Abteufen des Vortriebsrohres fällt der Rammbar stets frei auf den Betonpfropfen, der sich im Vortriebsrohr verspannt und dieses mit hinunterdrückt. Nach Erreichen der Endtiefe wird das Vortriebsrohr fixiert, um bei erneutem Rammvorgang ein Nachrutschen des Rohres zu verhindern, den Betonpfropfen zu lösen und den Pfahlfuß auszustampfen. Nach Einstellen des Bewehrungskorbes wird fließfähiger Beton eingefüllt. Während des Betonierens wird das Vortriebsrohr gezogen, so dass ein rauer Pfahlschaft und somit ein ausreichender Verbund zwischen Boden und Pfahl entsteht. Sollte der anstehende Boden in der vorgesehenen Absetztiefe keine ausreichende Tragfähigkeit besitzen, kann anstelle des Betonpfropfens eine Herstellung mit einer Kiesvorverdichtung erfolgen. Dabei wird vor Einbringung des Betons der Boden unter- und oberhalb der Absetztiefe durch Ausstampfen von Kies verdichtet. Übliche Pfahldurchmesser reichen von 42–71 cm. Es können Pfähle bis zu 30 m Länge und einer Neigung gegen die Vertikale bis zu 4:1 (14°) hergestellt werden. Die Vorteile dieses Pfahlsystems sind unter anderem die geringe Lärmemission durch die Innenrammung im Vergleich zum Simplex-Pfahl mit Kopframmung sowie die zusätzliche Bodenverbesserung mittels Kiesvorverdichtung. Durch die volle Bodenverdrängung werden Auflockerungen im Boden unterbunden und die Entsorgung des Bohrguts entfällt. Daher ist diese Gründungsmethode vor allem in kontaminierten Erdreichen beliebt. In Abb. 2.18 sind die einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung eines Franki-Pfahls grafisch dargestellt. [17, 37]

### Simplex-Pfahl

Beim Simplex-Pfahl wird das stählerne Vortriebsrohr mit einem Hydraulik- oder Dieselpfahl über Kopframmung in den Boden geschlagen. Das Rohr ist am unteren Rohrende durch eine lösbare Fußplatte wasserdicht verschlossen. Nach dem Erreichen der Solltiefe wird der vorgefertigte Bewehrungskorb eingehoben, der Beton eingebracht und das Vortriebsrohr gezogen. Das Rohr wird entweder durch Außenrüttler auf der hydraulischen Ziehvorrichtung oder mit Hilfe von Vibrationsrüttlern gezogen, während gleichzeitig der Beton verdichtet wird. Die als Pfahlfuß dienende Fußplatte verbleibt im Boden. Es können Pfahldurchmesser von 34–72 cm, eine Pfahllänge von bis zu 40 m und eine Neigung bis 4:1 ausgeführt werden. Das Pfahlsystem eignet sich ebenfalls besonders für kontaminierte Böden, da durch die Bodenverdrängung eine Förderung von Bodenmaterial entfällt. In Abb. 2.19 wird der Arbeitsablauf zur Herstellung eines Simplex-Pfahls schrittweise erläutert. [18, 37]

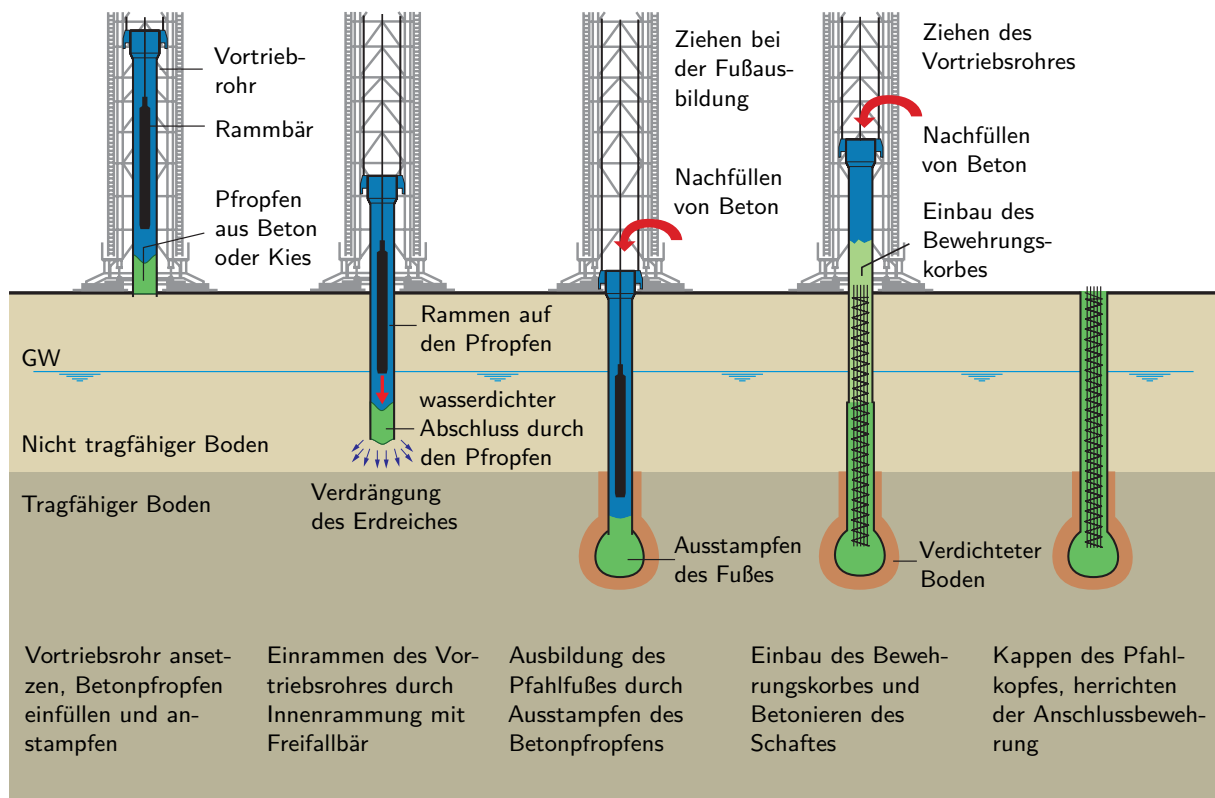


Abb. 2.18: Herstellung eines Franki-Pfahles (modifiziert nach [17])

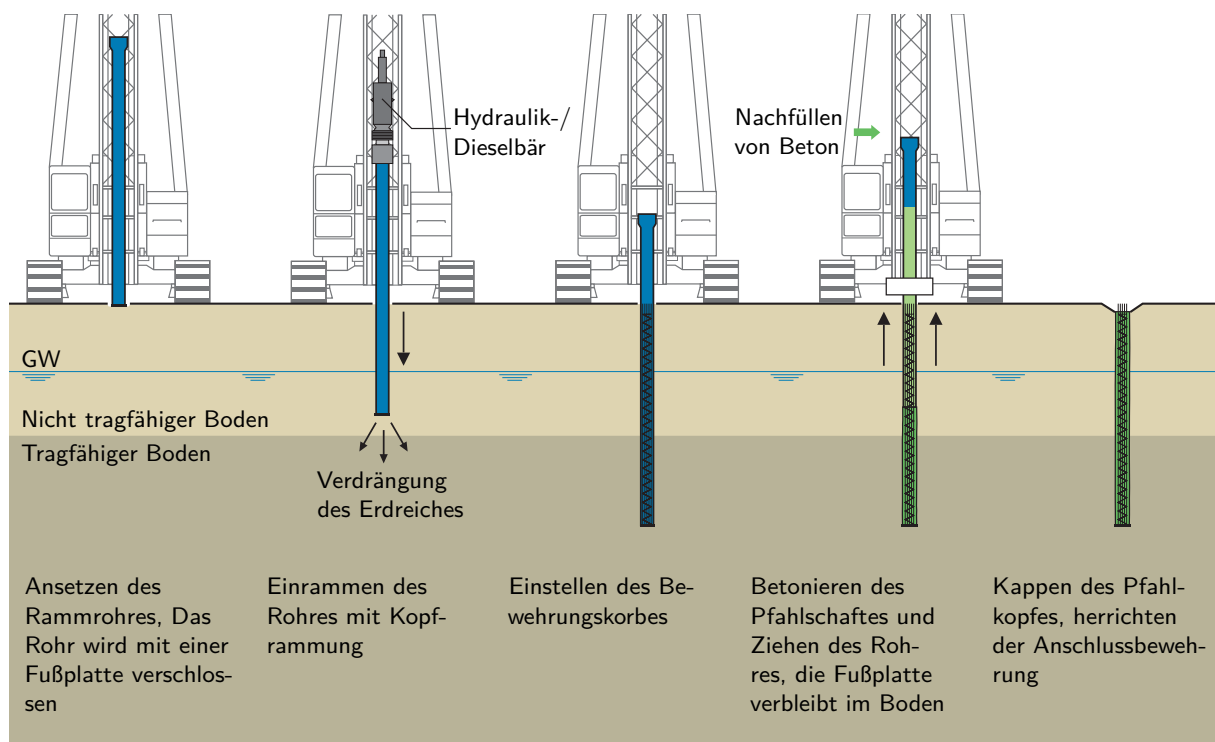


Abb. 2.19: Herstellung eines Simplex-Pfahles (modifiziert nach [18])

### 2.3.2 Bohrpfähle

Bohrpfähle unterscheiden sich von den Verdrängungspfählen dadurch, dass ein vertikaler Hohlraum in den Baugrund gebohrt und anschließend Bewehrung und Beton eingebracht wird. Durch den Druck des flüssigen Betons gegen die Bohrlochwandung entsteht bei den meisten Bodenarten eine gute Verzahnung mit dem Baugrund zur Lastabtragung. Die Tragfähigkeit von Bohrpfählen hängt nicht nur von den bodenmechanischen Eigenschaften, sondern auch wesentlich vom Herstellungsverfahren, der Belastung und der Pfahlgeometrie ab. Im Detail unterscheiden sich die etablierten Herstellungsverfahren nach: [37, 45]

- der Art der Bohrlochsicherung
- der Art der Bohrung
- der Materialförderung
- der Ausbildung des Pfahlfußes
- der Art des Betonierens

Gewöhnlich haben Ortbetonpfähle einen Durchmesser von 30–300 cm. Ihre Neigung gegen die Vertikale ist nicht größer als 15°. Die große Bandbreite der Abmessungen und Herstellungsverfahren, die sich an die Baugrundverhältnisse anpassen, zeichnen Ortbetonpfähle aus. Die Förderung des Bodenmaterials während des Bohrens gibt Aufschluss über die tatsächlichen Baugrundverhältnisse. Demnach kann noch während der Bohrarbeiten die Pfahllänge gegebenenfalls erweitert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der Ausführung kaum Lärmemissionen und Erschütterungen entstehen. [37, 45]

#### Bauablauf

Die Arbeitsschritte zur Herstellung eines Bohrpfahles sind für die meisten Verfahrenstechniken ähnlich, wobei Schritt 1-3 abhängig vom gewählten Verfahren zeitgleich ausgeführt werden können. Bei einigen Verfahren mit Langschnecke wird der Bewehrungskorb erst nach der Betonage in das Bohrloch eingerüttelt. Zur Herstellung eines Bohrpfahles sind folgende Arbeitsschritte notwendig: [37]

1. Bohren
2. Bohrlochsicherung
3. Materialförderung aus dem Bohrloch
4. Einheben des Bewehrungskorbes
5. Betonieren des Pfahles
6. Freilegen des Pfahlkopfes

#### Bohren

Beim Herstellen der Bohrlöcher werden folgende Verfahren unterschieden: [2, 37]

- **TROCKENBOHRVERFAHREN** (Schlagbohren, Drehbohren): Beim Trockenbohrverfahren erfolgt der Bohrvorgang ohne Zusatz von Wasser oder Spülflüssigkeit. Beim Schlagbohren wird der Boden mit einem sogenannten Schlaggreifer gelöst und gefördert. Dabei sind Bohrdurchmesser von 60–300 cm und eine Bohrtiefe bis ca. 100 m möglich. Geeignet ist das Trockenbohrverfahren für Lockergesteine, sofern sie nicht mit grobem Gestein oder Fels durchsetzt sind. Sind Felsschichten oder einzelne Steine vorhanden die geringe Mächtigkeit aufweisen, können diese gegebenenfalls mit Fallmeißeln zerkleinert werden. Das Drehbohrverfahren erzielt im Vergleich zum Schlagbohrverfahren eine höhere Bohrleistung. Dabei wird als Bohr- und Förderungswerkzeug eine kurze oder lange Schnecke eingesetzt. Bei zu hohem Bodenwiderstand wird zum Eintreiben der Verrohrung ein zusätzlicher Drehantrieb für Bohrschnecke und Verrohrung herangezogen.
- **SPÜLBOHRVERFAHREN** (Saugbohrverfahren, Lufthebebohrverfahren): Beim Saugbohrverfahren wird der Boden mit einem Rollmeißel gelöst und das Bohrgut durch ein Speichermedium gefördert und mit einer Pumpe abgesaugt. Als Speichermedium wird Wasser, Bentonitsuspension oder ein Luft-Wasser-Gemisch verwendet, das gleichzeitig als Stützflüssigkeit für das Bohrloch dient. Das Gemisch aus Spülflüssigkeit und Bohrgut wird in einen Spülteich eingeleitet, wo sich das Bohrgut absetzt. Nach der Regeneration der Spülflüssigkeit kann diese wieder eingesetzt werden. Beim Lufthebebohrverfahren wird das Bohrgut durch Einblasen von Luft gefördert. Spülbohrverfahren werden erst ab Tiefen von 30 m wirtschaftlich und kommen daher nur in Frage, wenn bei großen Tiefen die Grenzen der verrohrten Bohrverfahren erreicht sind. Zu den Hauptanwendungsgebieten des Spülbohrverfahrens zählen Lockergesteinböden. Gewöhnlich sind Pfähle mit einem Bohrdurchmesser bis 200 cm ausführbar.

Nach Erreichen der Endtiefe kann, falls erforderlich, ein Pfahlfuß nach ÖNORM EN 1536 [44] bzw. DIN EN 1536 [14] ausgebildet werden. Dabei handelt es sich um eine Verbreiterung des Bohrdurchmesser im Sohlenbereich, welche nach Aushub des Bohrloches durch rotierende, schwenkbare Arme entsteht. [37, 56]

### **Bohrlochsicherung**

Die Sicherung der Bohrung soll Auflockerungen in der Umgebung des Bohrpfahles beim Bohren einschränken und das Herabfallen von Ausbrüchen aus der Bohrlochwand in das Bohrloch verhindern. Zur Sicherung der Bohrlochwandung werden drei Verfahren unterschieden: [29, 37]

- **VERROHRTES BOHREN:** Durch eine Drehbewegung und den Vorschubkräften von zwei vertikal stehenden Hydraulikzylindern wird die Mantelreibung zwischen Bohrrohr und Boden und der Spitzenwiderstand am Bohrrohrschuh überwunden. Die verwendeten Vortriebsrohre haben Wanddicken von ca. 40 mm und Einzellängen von 3,0 bis 6,0 m. Am unteren Rand des zuerst niedergebrachten Rohres befindet sich eine Bohrkronen aus gehärtetem Sonderstahl. Bei großer Mantelreibung zwischen Bohrlochwandung und Vortriebsrohr wird mit einem Schneidkranzüberstand am unteren Ende der Verrohrung gebohrt.
- **UNVERROHRTES BOHREN:** Wenn es die Baugrundverhältnisse zulassen und der Baugrund ausreichend standfest ist, darf nach ÖNORM EN 1536 [44] bzw. DIN EN 1536 [14] auch ungestützt gebohrt werden. Allerdings ist der obere Teil der Bohrung zur Führung des Bohrwerkzeuges und zur Verhinderung von Bodeneinbrüchen im oberflächennahen Bereich durch ein Standrohr zu sichern.
- **STÜTZFLÜSSIGKEIT:** Bei dieser Methode wird eine stützende Flüssigkeit wie Bentonitsuspension zur Sicherung der Bohrlochwandung eingesetzt. Der oberflächennahe Bereich wird



wie beim unverrohrten Bohren durch ein Standrohr gestützt. Während des gesamten Bohr- und Betoniervorganges darf der Spiegel der Stützflüssigkeit die Unterkante des Standrohres nicht unterschreiten. Daher ist ein ausreichender Vorrat an Stützflüssigkeit vorzusehen.

### Materialförderung

Die Förderung des gelösten Bodenmaterials wird unterschieden in: [29, 37]

- **KONTINUIERLICHE MATERIALFÖRDERUNG:** Bei kontinuierlich ablaufenden Bohrungen, wird das Bohrgut stetig, ohne Pausieren des Bohrvorganges, gefördert. Dies kann durch das Spülbohrverfahren, Lufthebebohrverfahren oder einer Bohrung mit Langschnecke erfolgen.
- **DISKONTINUIERLICHE MATERIALFÖRDERUNG:** Bei diskontinuierlich ablaufenden Bohrungen, laufen die Arbeitsschritte Bohren und Fördern nacheinander ab, wobei das Material in Behältern (Bohrgreifern, Bohreimern) aus dem Bohrloch ausgetragen wird.

### Bewehren

Der Bewehrungskorb ist im Ganzen so herzustellen, dass er beim Transport, beim Einheben und beim Betonieren nicht bleibend verformt wird. Bei Längen, die über das zulässige Transportmaß hinausgehen, werden die Bewehrungskörbe vor Ort zusammengesetzt. Die Querbewehrung kann entweder als Ring oder als Spirale ausgeführt werden. Um die erforderliche Betondeckung von 50–60 mm einzuhalten sind Abstandhalter vorzusehen, außer der Abstand wird bereits durch die Wanddicke der Bohrrohre eingehalten. Am unteren Ende des Bewehrungskorbes ist der Einbau eines Kreuzes aus Flachstahl erforderlich. Dieses verhindert vor allem den Auftrieb und die Abweichung der planmäßigen Lage des Bewehrungskorbes beim Betonieren und beim Ziehen des Bohrrohres. Bei einigen Verfahren der Bohrpfahlherstellung (z. B. SOB-Pfahl, Abb. 2.23, S.39) wird der Bewehrungskorb erst nach dem Betonieren in das Bohrloch eingebracht. [37]

### Betonieren

Die Pfähle sind unmittelbar nach Abschluss des Bohrvorganges, Säuberung der Bohrlochsohle und dem Einsetzen des Bewehrungskorbes zu betonieren. Beim Betoniervorgang muss beachtet werden, dass der Beton in der vorgesehenen Zusammensetzung und Konsistenz bis zur Bohrlochsohle gelangt, nicht entmischt oder verunreinigt wird sowie die Betonsäule unterbrochen wird. Es werden folgende Arten des Betonierens unterschieden: [37]

- **SCHÜTTVERFAHREN:** Bei diesem Verfahren wird mit Schüttrohren betoniert, die zu Beginn des Betoniervorganges bis zur Bohrlochsohle reichen und während des Betonierens stetig angehoben werden. Das Schüttrohr muss stets in den Frischbeton eintauchen.
- **KONTRAKTORVERFAHREN:** Im Grundwasser bzw. bei einer Stützung des Bohrloches mit Suspension/ Wasser muss der Beton im Kontraktorverfahren eingebracht werden. Dieses Verfahren verhindert die Entmischung zu Beginn des Betonierens mithilfe eines Schaumgummiballs, welcher vor dem Beton in den Betoniertrichter gelegt wird. Ist die Betonleitung vollgefüllt, tritt der Gummiball am unteren Rohrende aus und schwimmt nach oben. Es ist darauf zu achten, dass das Betonierrohr mindestens 1,5–2,5 m im Beton eingetaucht ist. Bei verrohrter Bohrpfahlherstellung darf mit dem Ziehen der Verrohrung erst begonnen werden, wenn die Betonsäule in der Verrohrung ausreichend hoch ist. Dies stellt sicher, dass die Betonsäule nicht abreißt.

### Gerät

Die Auswahl des geeigneten Gerätes zur Herstellung von Bohrpfählen ist vom Bohrdurchmesser, der Bohrtiefe, dem Ausmaß der herzustellenden Bohrungen, den Platzverhältnissen und den Bodeneigenschaften abhängig. Die Ausstattung eines Bohrgerätes sieht wie folgt aus: [29, 37]

- Trägergerät
- Drehbohrantrieb
- Bohrgestänge (teleskopiert oder fixe Länge, Langschnecke, Kurzschncke)
- Bohrröhre (ein- oder doppelwandig, Bohrröhlängen von 1,0–6,0 m)
- Bohrwerkzeug (Bohrgreifer, Bohrmeißel, Bohreimer, Schnecke)
- ggf. Verrohrungsmaschine

Zur Freilegung des Pfahlkopfes werden folgende Geräte benötigt:

- Kompressor für Presslufthammer
- Presslufthammer zum Lösen des ausgehärteten Betons

### Personal

Eine Arbeitsgruppe zur Herstellung von Bohrpfählen besteht aus: [37]

- 1 BohrmeisterIn zur Kontrolle und Überwachung der Arbeitsvorgänge
- 1 GeräteführerIn für das Bohrgerät
- 2 Hilfskräfte für Nebenarbeiten und das Freilegen der Pfahlköpfe

### Kelly-Bohrverfahren mit verrohrter Bohrung

Die Kellystange ist eine teleskopierbare Bohrstange, deren einzelne Teleskopteile untereinander und mit dem Drehantrieb mechanisch verbunden sind. Je nach Ausführung lässt sich die Kellystange auf das 2- bis 5-fache der Transportlänge ausfahren. Im Taktbetrieb (diskontinuierlich) wird der Boden im Bohrloch gelöst und über eine kurze Bohrschnecke oder einen Kastenbohrer nach oben befördert. Ein Kastenbohrer wird zum Bohren in wasserführenden bindigen eingesetzt. Das Entleeren der Schnecke geschieht durch schnelles Drehen und Ausschleudern des Bohrguts neben dem Bohrloch. Beim Kastenbohrer kann zum Entleeren des Werkzeugs die Bodenklappe automatisch geöffnet werden. Anschließend wird der Bewehrungskorb in die Verrohrung eingehoben und Beton eingefüllt. Das geschieht üblicherweise im Kontraktorverfahren. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt im Einsatz für alle Bodenarten sowie für beengte Platzverhältnissen. Der Bohrvorgang ist erschütterungsarm und eignet sich daher für Untergründe nahe empfindlicher Bauwerke. Das Bohrröhr wird über einen Drehantrieb vorgetrieben. Reicht das Drehmoment für das Absenken der Verrohrung nicht aus wie es bei größeren Bohrdurchmessern und Bohrtiefen vorkommen kann, besteht die Möglichkeit zur Verwendung einer Verrohrungsmaschine am Unterwagen des Trägergerätes, die das Eindrehen des Rohres übernimmt. Gewöhnlich werden Pfähle mit einem Durchmesser von 60–180 cm und einer Tiefe bis 40 m hergestellt, wobei auch größere Tiefen technisch möglich sind. Die einzelnen Arbeitsschritte des Kelly-Bohrverfahrens mit verrohrter Bohrung sind in Abb. 2.20 dargestellt. [1]

### **Kelly-Bohrverfahren mit hydraulisch gestützter Bohrung**

Das Kelly-Bohrverfahren mit hydraulischer Stützung zählt zu den unverrohrten Bohrungen. Die Sicherung der Bohrlochwandung übernimmt eine Stützflüssigkeit wie beispielsweise Bentonit- oder Polymersuspension, welche stetig aufbereitet und zurückgewonnen wird. Ein Standrohr dient als Führung für das Bohrwerkzeug und als Schutz vor Bodeneinbrüchen im oberflächennahen Bereich. Das Verfahren ist bei allen Bodenarten einsetzbar und vor allem bei großen Pfahldurchmessern und Pfahl-tiefen anwendbar. Der Bohrvorgang ist ohne Erschütterungen möglich. Es sind ausschließlich Vertikalpfähle herstellbar. Üblich sind Pfahldurchmesser von 40–240 cm und Pfahllängen bis 40 m, wobei größere Längen möglich sind. Die einzelnen Arbeitsschritte des Kelly-Bohrverfahren mit hydraulisch gestützter Bohrung sind in Abb. 2.21 dargestellt. [1]

### **Greiferbohrverfahren mit verrohrter Bohrung**

Als Basis für das Greiferbohrverfahren mit verrohrter Bohrung dient ein eingerammtes Bohrrohr. Der Bohrgreifer ist frei hängend am Trägergerät montiert. Das Lösen und Fördern des Bodens erfolgt mit einem Bohrgreifer. Nach erreichter Bohrtiefe und Einbau der Bewehrung wird der Pfahl im Kontraktorverfahren betoniert. Der Haupteinsatzbereich dieses Verfahrens sind Böden wie Sande und Kiese, die an Drehbohrverfahren erhöhte Anforderungen stellen. Bei hartem bis sehr hartem Bodenschichten werden Fallmeißel eingesetzt. Dabei kommt es zu systembedingten Erschütterungen, sodass ein Mindestabstand zu bestehenden Bauwerken eingehalten werden muss. Gängige Bohrdurchmesser reichen von 62–200 cm bei einer Bohrtiefe von bis zu 50 m. Die einzelnen Arbeitsschritte des Greiferbohrverfahren mit verrohrter Bohrung sind in Abb. 2.22 dargestellt. [1]

### **Kelly-Bohrverfahren mit unverrohrter Bohrung (SOB-Pfahl)**

Das Bohren mit langer Schnecke zählt zu den kontinuierlichen und unverrohrten Bohr- und Fördermethoden, deren Bohrtiefe mit der nutzbaren Mastlänge beschränkt ist. Es zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit zur Herstellung von Bohrpfählen aus. Durch das Eindrehen der Schnecke in den Boden wird dieser während des Bohrvorganges gelöst. Dabei bleibt das Bodenmaterial bis zum Erreichen der Endtiefe zwischen den Schneckenwendeln und stützt somit das Bohrloch. Bei der Betonage wird durch das Seelenrohr der Bohrschnecke Beton nach unten gepumpt und die Schnecke, ohne zu drehen, entsprechend dem Betoniervorgang langsam gezogen, dabei wird gleichzeitig das gelöste Material gefördert. Anschließend wird der Bewehrungskorb, soweit erforderlich, eingedrückt oder eingerüttelt. Mit diesem Verfahren sind Bohrdurchmesser von 40–100 cm und Bohrtiefen bis 18 m herstellbar. In Abb. 2.23 ist der Ablauf der Pfahlherstellung im Drehverfahren mit langer Schnecke dargestellt. [1]

### **Bohrverfahren mit Doppelkopf-Drehantrieb**

Zwei voneinander unabhängige Drehantriebe am Mast treiben die Langschnecke und das Bohrrohr gegenläufig an. Zum gleichzeitigen Eintreiben des Bohrrohres und der Schnecke werden beide Drehantriebe jedoch gekoppelt. Bei Erreichen der Endtiefe wird durch Entkopplung der beiden Bauteile die Schnecke herausgezogen und während des Drehens durch eine Putzvorrichtung gesäubert. So wird das Bohrgut aus dem im Boden verbleibenden Bohrrohr nach oben gefördert. Das Einbringen des Betons erfolgt im Kontraktorverfahren bei gleichzeitigem Ziehen der Schnecke und der Verrohrung. Nach vollständiger Auffüllung des Bohrloches mit Beton wird der Bewehrungskorb eingesetzt. Dieses erschütterungsfreie Bohrverfahren ist für beengte Platzverhältnisse ideal. Da aufgrund der Bauweise des Gerätes ein geringer Abstand zu Gebäuden möglich ist, bietet sich diese Methode vor allem zur Herstellung einer Bohrpfahlwand nahe bebauter Grundstücksgrenzen

an, wie es oft in urbanem Gebieten vorkommt. Bohrtiefen bis 15 m und Bohrdurchmesser von 60–120 cm sind üblich. Die Abfolge der Pfahlherstellung mit dem Doppelkopfdrehverfahren ist in Abb. 2.24 zu sehen. [1]

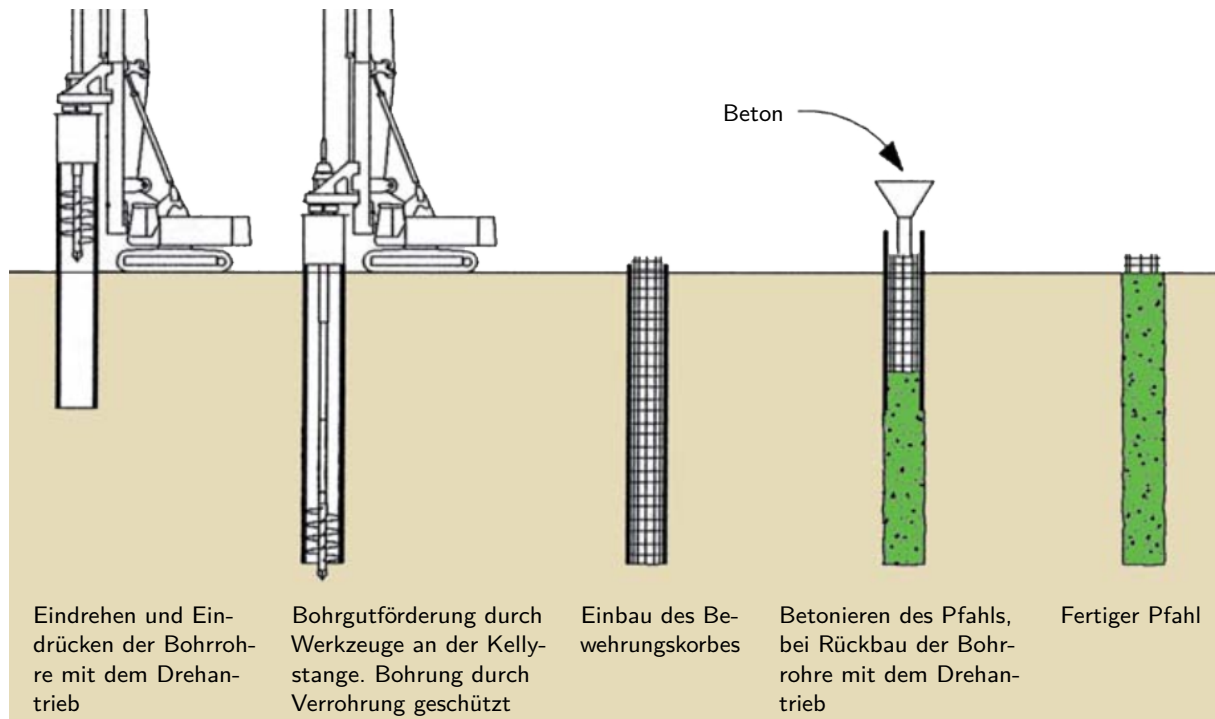


Abb. 2.20: Herstellung eines verrohrten Bohrpfahls (modifiziert nach [1])

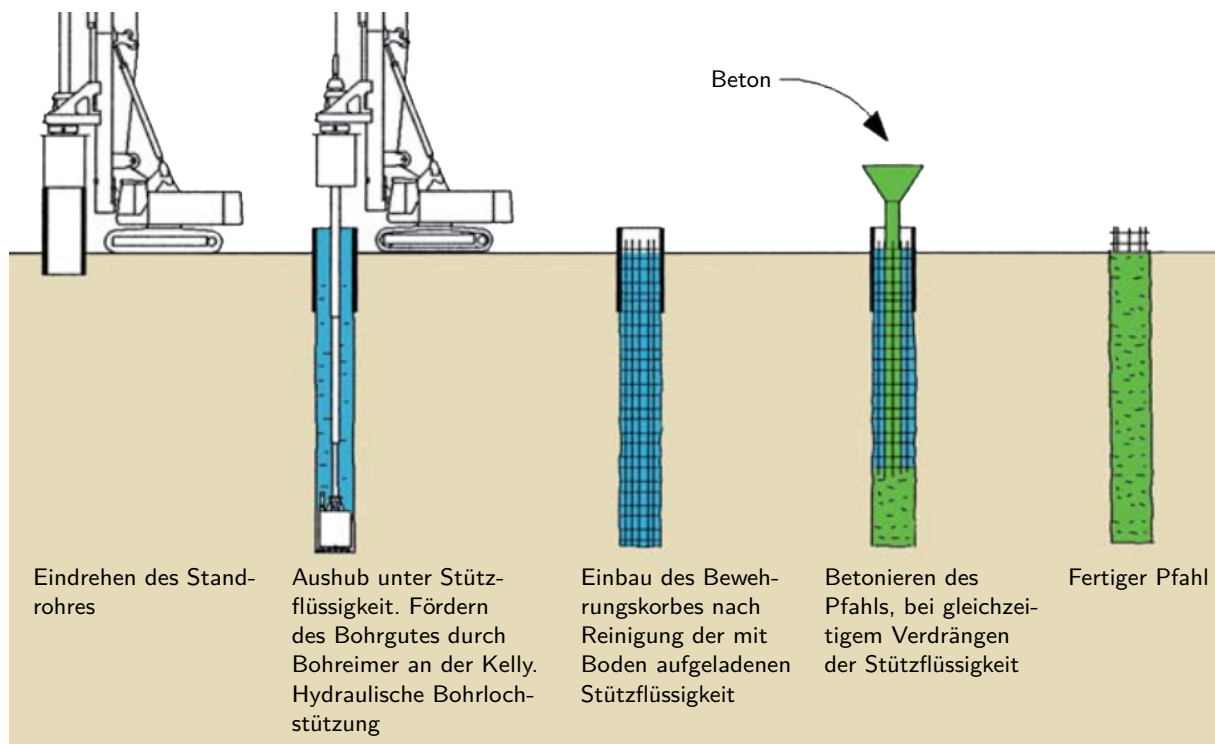


Abb. 2.21: Herstellung eines hydraulisch gestützten Bohrpfahles (modifiziert nach [1])

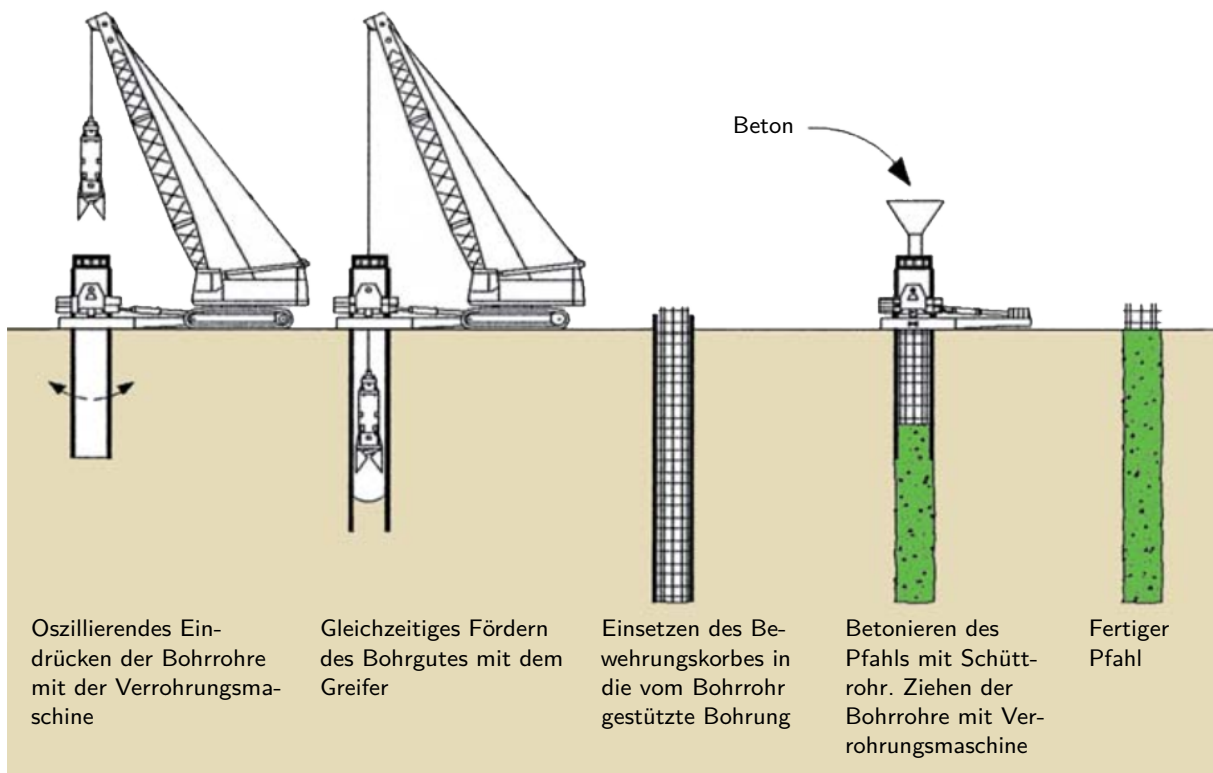


Abb. 2.22: Greiferbohrverfahren (modifiziert nach [1])

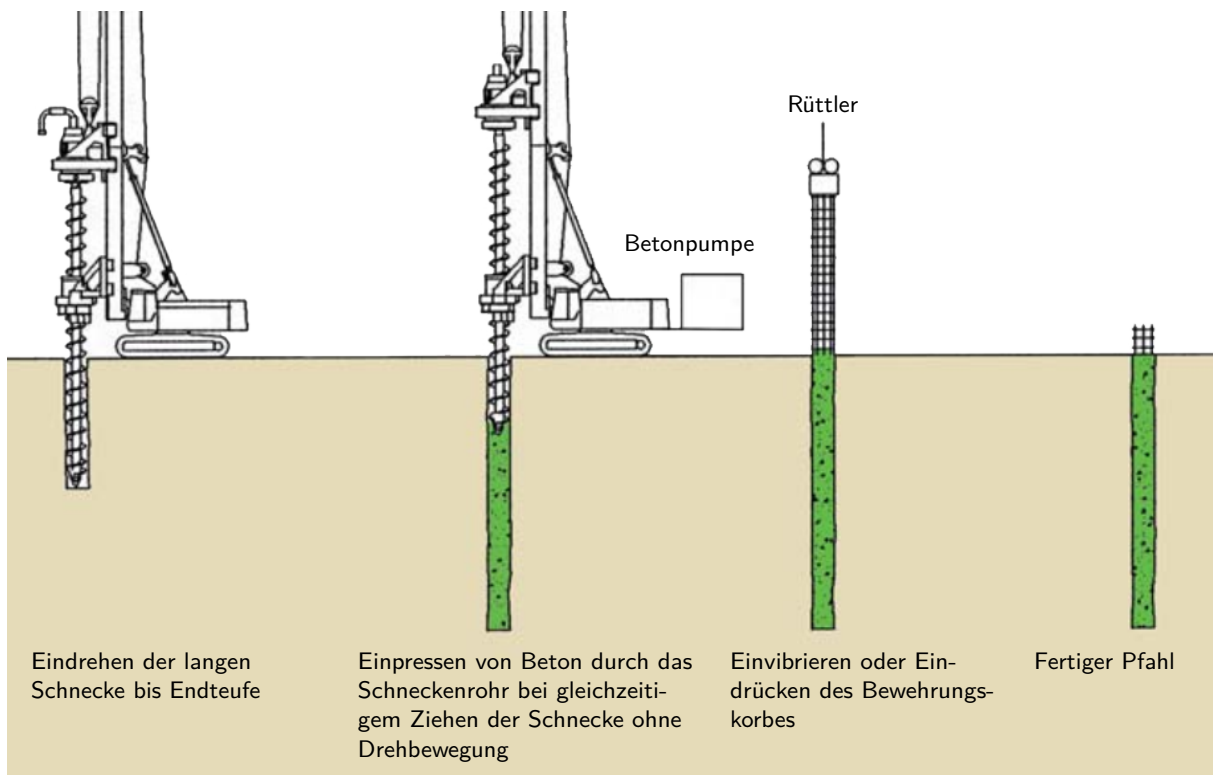


Abb. 2.23: Drehbohrverfahren mit langer Schnecke (modifiziert nach [1])

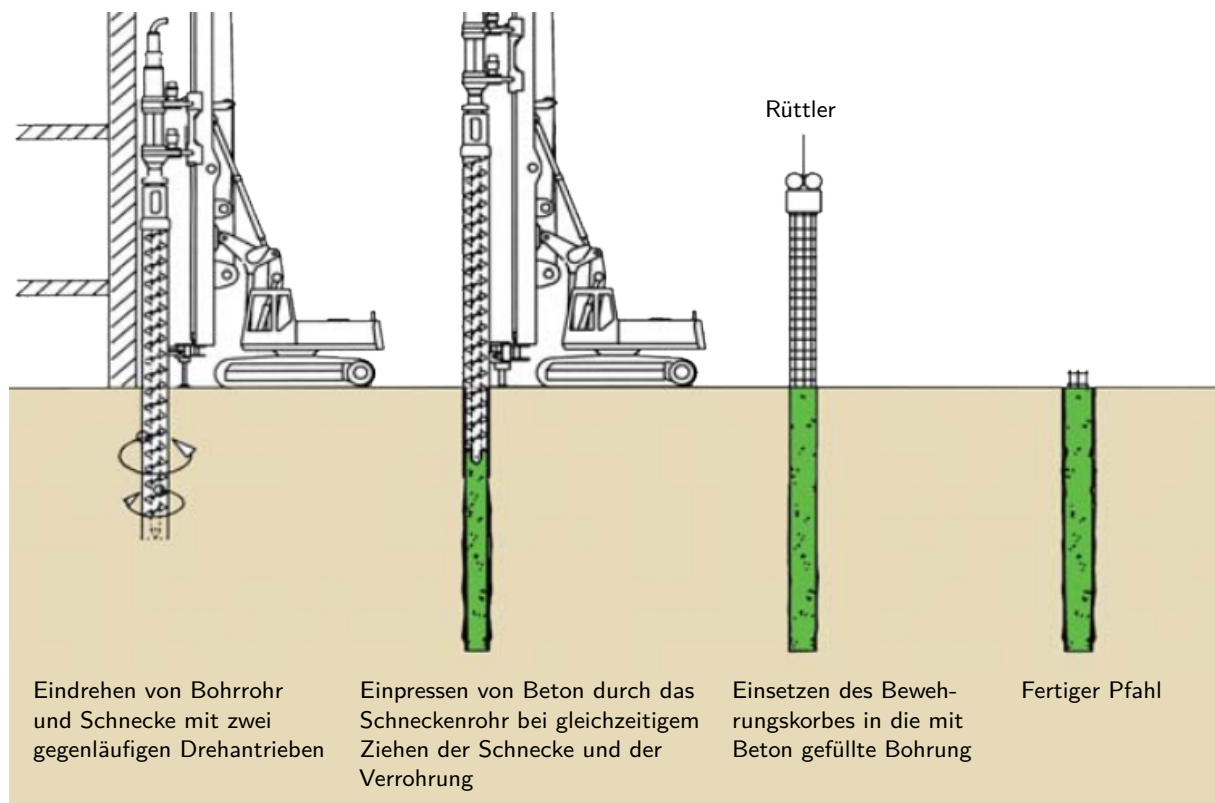


Abb. 2.24: Doppelkopfdrehverfahren (modifiziert nach [1])

### 2.3.3 Zusammenfassung

In Tab. 2.8 sind die Vor- und Nachteile von Ortbetonrammpfählen und Bohrpfählen dargestellt.

Tab. 2.9 (S. 42) und Tab. 2.10 (S. 43) fassen die Arbeitsschritte zur Herstellung von Ortbetonrammpfählen und Bohrpfählen zusammen. Zusätzlich werden die erforderlichen Geräte, Personal und kalkulatorischen Werte angegeben. Die kalkulatorischen Werte [37] für die einzelnen Arbeitsschritte sind als Richtwerte anzusehen.

Tab. 2.8: Vor- und Nachteile der Pfahlgründungsarten [2, 29, 37]

Pfahlart	Vorteile	Nachteile
Ortbeton-rammpfähle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Tragfähigkeit durch Verdichtung des Bodens</li> <li>• Geringe Setzungen</li> <li>• Keine Bodenförderung notwendig, da Boden verdrängt wird</li> <li>• Vergleichsweise geringer Betonverbrauch</li> <li>• Erhöhung der Tragfähigkeit durch Pfahlfußverbreiterung</li> <li>• Zusätzliche Bodenverbesserung mittels Kiesvorverdichtung möglich (Franki-Pfahl)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lärm und Erschütterung beim Rammen</li> <li>• Gefahr der Beschädigung frischer Nachbarpfähle, wenn Mindestabstände nicht eingehalten werden</li> <li>• Probleme bei Rammhindernissen</li> </ul>
Bohrpfähle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erschütterungs- und lärmarme Herstellung</li> <li>• Aufschluss der Bodenschichten während des Bohrvorganges</li> <li>• Anpassung der Pfahllänge an die tatsächlichen Geologie</li> <li>• Einsatz bei geringer Arbeitshöhe (z. B. unter Brücken) möglich</li> <li>• Große Tiefen und Durchmesser möglich</li> <li>• Bohrhindernisse können durch Meißeln überwunden werden</li> <li>• Erhöhung der Tragfähigkeit durch Pfahlfußverbreiterung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflockerung der durchfahrenen Bodenschichten</li> <li>• Qualität von Herstellungsverfahren und Arbeitsgruppe abhängig</li> <li>• Anfall und Entsorgung von Bohrgut</li> <li>• Unterwasserbetonieren (Kontraktorverfahren) insbesondere kleiner Querschnitte ist schwierig, da das Vortriebsrohr beim Hochziehen die frische Betonsäule mitreißen kann</li> </ul>

**Tab. 2.9:** Herstellung eines Ortbetonrammpfahles [37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert [37]
<b>1 Abteufen des Pfahles</b>			
Ausrichtung des Rammgerätes	Trägergerät Freifall, Hydraulik- oder Dieselbär	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	5 min
Betonpfropfen einfüllen und anstampfen (Franki-Pfahl)	wie oben	wie oben	30–45 min
Abteufen des Rammrohres mit Innenrammung und Freifallbär (Franki-Pfahl) bzw. Abteufen des Rammrohres mit Kopframmung und Hydraulik- oder Dieselbär (Simplex-Pfahl)	Trägergerät Freifallbär  Trägergerät Hydraulik- oder Dieselbär	wie oben	0,15 h/m
Herstellen des Pfahlfußes durch Ausrammen des Betonpfropfens (Franki-Pfahl)	Trägergerät Freifallbär	wie oben	10 min
<b>2 Einbau der Bewehrung</b>			
Einheben des Bewehrungskorbes	Trägergerät Freifall, Hydraulik- oder Dieselbär	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	10–15 min
<b>3 Betonieren des Pfahles</b>			
Auffüllen des Vortriebsrohres mit Beton Ziehen des Vortriebsrohres	Trägergerät Freifall, Hydraulik- oder Dieselbär	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	0,04 h/m
<b>4 Nacharbeiten</b>			
Freilegen des Pfahlkopfes	Kompressor Presslufthammer	2 Hilfskräfte	30–60 min
Umsetzen der Rammeinheit	Trägergerät Freifall, Hydraulik- oder Dieselbär	1 GeräteführerIn 1 Hilfskraft	5–10 min



**Tab. 2.10:** Herstellung eines Bohrpfahles [37]

Teilprozess	Gerät	Personal	Kalkulatorischer Wert [37]
<b>1 Abteufen des Pfahles</b>			
Ausrichtung der Verrohrungsmaschine	Trägergerät Drehbohranlage Verrohrungsmaschine Bohrrohre Bohrwerkzeug	1 GeräteführerIn 2 Hilfskräfte	10–15 min
Bodenförderung und gleichzeitiges Vortreiben der Bohrrohre	wie oben	wie oben	5–10 m/h
Beseitigen von Hindernissen beim Aushub	wie oben +Bohrmeißel	wie oben	1,0 h/m
<b>2 Einbau der Bewehrung</b>			
Einheben des Bewehrungskorbes	Trägergerät Drehbohranlage	1 GeräteführerIn 2 Hilfskräfte	15–30 min
<b>3 Betonieren des Pfahles</b>			
Einlassen des Betonschüttrohres	Trägergerät Drehbohranlage Betonschüttrohr	1 GeräteführerIn 2 Hilfskräfte	20–30 min
Betonieren unter oszillierendem Ziehen der Bohrrohre	wie oben	wie oben	12 m/h
<b>4 Nacharbeiten</b>			
Freilegen des Pfahlkopfes	Kompressor Presslufthammer	2 Hilfskräfte	30–60 min



# Kapitel 3

## Fallbeispiel Neckartalübergang

Kap. 3.1 gibt einen Überblick über das Bauvorhaben Neckartalübergang. In Kap. 3.2 werden die Dauer und die zu errichtenden Bauwerke der einzelnen Bauphasen beschrieben. Anschließend werden in Kap. 3.3 die Geologie im Bereich des Brückenneubaus erläutert. Die eingesetzten Bauverfahren im allgemeinen Tiefbau und Spezialtiefbau zur Herstellung der Brückengründungen werden in Kap. 3.4 angeführt.

### 3.1 Projektbeschreibung

Das Gesamtprojekt beinhaltet den Ausbau des 47,2 km langen Abschnittes der Bundesautobahn A6 zwischen der Anschlussstelle Wiesloch/Rauenberg und dem Autobahnkreuz Weinsberg in Baden-Württemberg, Deutschland. Das Bauvorhaben wird von der Arbeitsgemeinschaft BAUARGE A6 WEST ausgeführt, welche sich aus den Unternehmen HOCHTIEF INFRASTRUCTURE und JOHANN BUNTE BAUNTERNEHMUNG zusammensetzt. Vom Ausbau des Streckenabschnittes von bisher zwei auf drei Fahrstreifen je Fahrtrichtung ist auch die Brücke, der sogenannte „Neckartalübergang“ betroffen. Der 1,3 km lange Neckartalübergang verläuft zwischen Heilbronn Untereisesheim und Neckarsulm. Neben dem Neckar quert die Brücke die Neckartalstraße (L1100), die Kanalstraße (L1101), Wirtschaftswege entlang des Neckarufers und Gleise der Deutschen Bahn. Die Lage und der Anschluss an das Verkehrsnetz sind in Abb. 3.1 dargestellt.

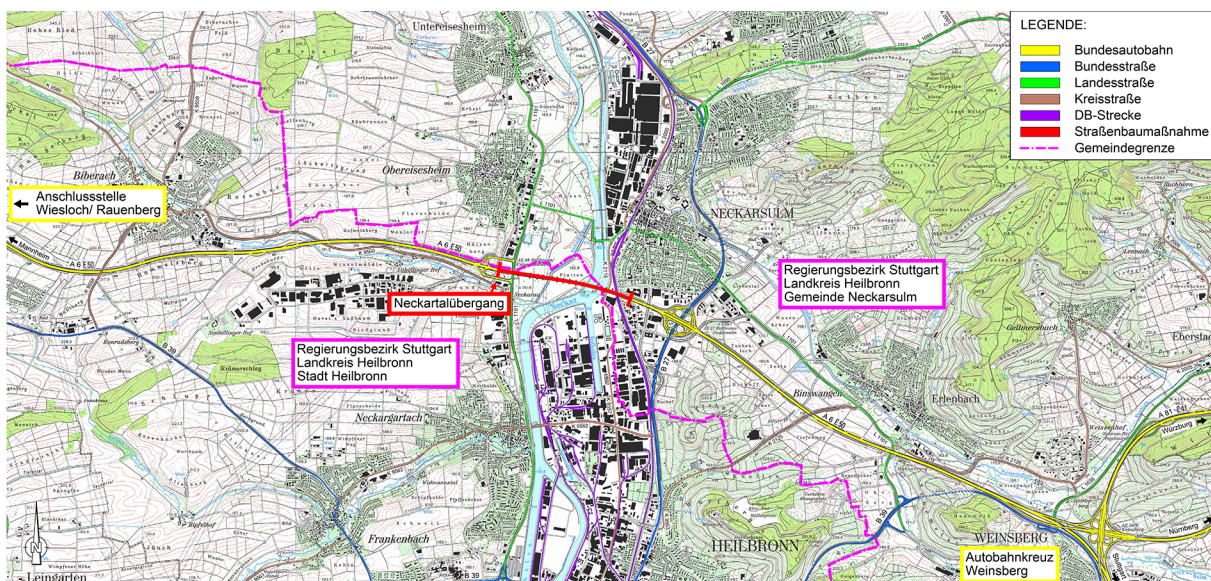


Abb. 3.1: Übersichtskarte (modifiziert nach [25])

Der Neckartalübergang wurde 1967 aus vier einzelnen Brückenbauwerken mit zwei Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn erbaut. In den vergangenen Jahren mussten an der Bestandsbrücke immer wieder umfangreiche und kostenintensive Erhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Eine Ertüchtigung bzw. Erneuerungen einzelner Bauwerke ist nach entsprechender Prüfung weder technisch möglich noch wirtschaftlich sinnvoll. Eine Erneuerung einzelner Teilbauwerke war unter der Vorgabe den Autobahnverkehr stets aufrecht zu erhalten verkehrstechnisch nicht möglich. Aus diesen Gründen wurde entschieden den Neckartalübergang neu zu errichten. Dabei wurde festgelegt, dass die bestehende Autobahnachse erhalten bleiben muss. Der Neubau wird sich daher an der gleichen Stelle wie die bestehende Bestandsbrücke befinden.

Der Neubau des Neckartalübergangs besteht aus zwei Brückenbauwerken je Fahrtrichtung:

- Vorlandbrücke (vgl. Planausschnitt in Abb. 3.4)
- Neckarbrücke (vgl. Planausschnitt in Abb. 3.5)

Weiters ist der Brückenquerschnitt vertikal betrachtet in drei konstruktive Abschnitte unterteilt, geordnet nach bauzeitlicher Abfolge (vgl. Abb. 3.2):

- Gründungselemente (Flachgründung oder Bohrpfahlgründung)
- Unterkonstruktion (Pfeiler, Schubwand, Schub balken)
- Überbau (Spannbeton- oder Stahlverbundkonstruktion)

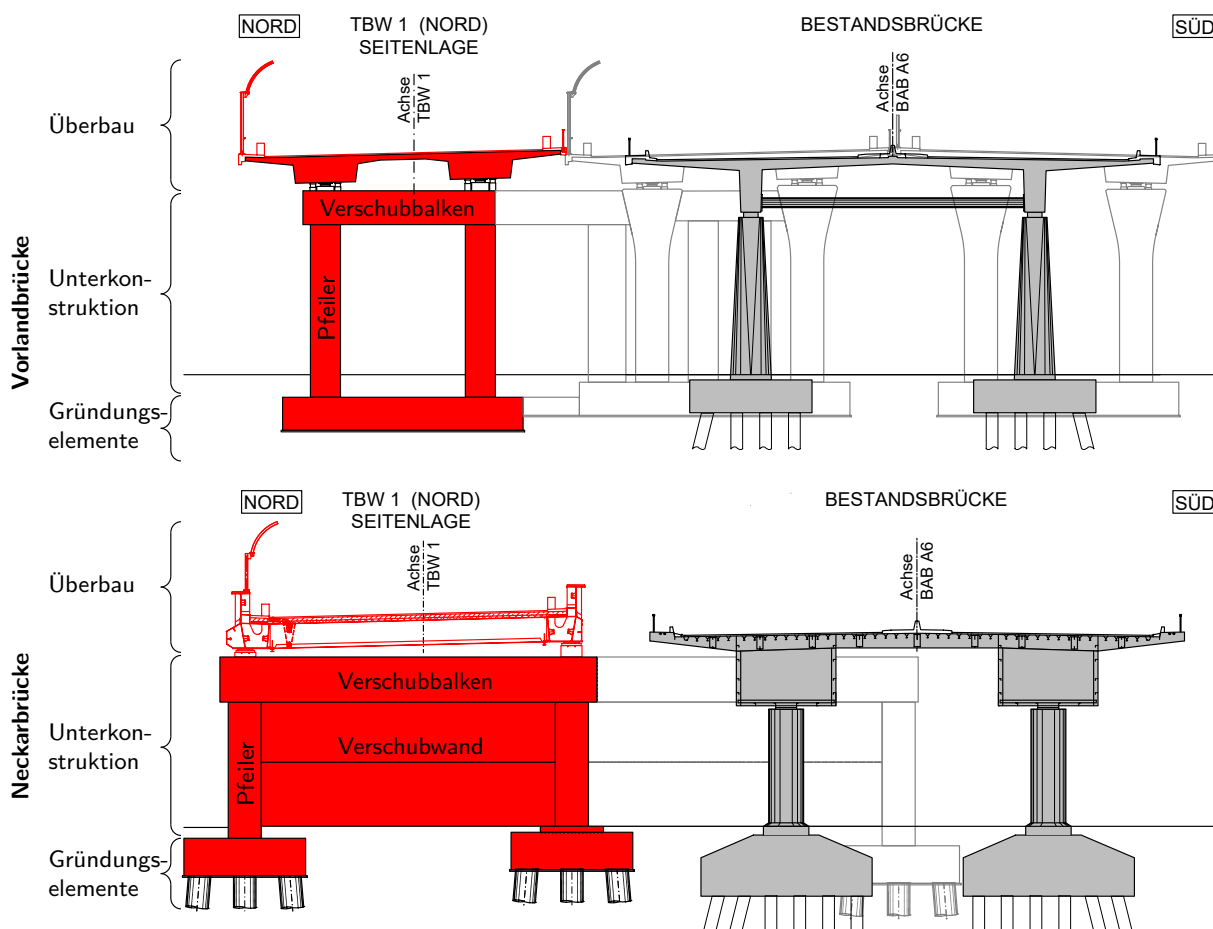


Abb. 3.2: Brückenquerschnitt in Seitenlage (modifiziert nach [26])

Die Lage der Brückenpfeiler wird in insgesamt 29 Hauptachsen beschrieben. Im weiteren Verlauf wird die Bezeichnung „Achse“ mit dem Buchstaben „A“ abgekürzt, z. B. A10 für Achse 10. Die Vorlandbrücke erstreckt sich vom Widerlager A10 bis zum Trennpfeiler A230/A240. Der Überbau der Vorlandbrücke wird mittels Vorschubrüstung, beginnend bei Widerlager A10, feldweise hergestellt (Abb. 3.3, re.). Somit ergeben sich für den Überbau 22 Bauabschnitte. Die Neckarbrücke, welche unmittelbar östlich an die Vorlandbrücke anschließt, verläuft von A230/A240 bis zum Widerlager A290. Die Herstellung der Neckarbrücke erfolgt im Taktschiebeverfahren (Abb. 3.3, li.). Der Vormontageplatz, der sogenannte „Taktkeller“ befindet sich östlich im Anschluss an das Widerlager A290. In diesem werden die einzelnen Brückenabschnitte für die Neckarbrücke vorgefertigt. In Tab. 3.1 sind die wichtigsten Daten der zwei Brückenbauwerke zusammengefasst.

**Tab. 3.1:** Daten der Vorland- und Neckarbrücke

	Vorlandbrücke	Neckarbrücke
Herstellung	Vorschubgerüst	Taktschiebeverfahren
Konstruktion	Spannbeton/ 2-stegiger Plattenbalken	Stahlverbundbrücke/ Trogquerschnitt
Länge	824 m	513 m
Feldanzahl	22	5
Stützweiten	ca. 38 m	83 m - 131 m - 126 m - 92 m - 79 m



**Abb. 3.3:** Taktschiebeverfahren (li.), Vorschubrüstung (re.) [52]

Beim Neubau des Neckartalübergangs werden zwei getrennte Überbauten abhängig vom Zeitpunkt der Herstellung (vgl. Bauphasen in Kap. 3.2) unterschieden:

- Teilbauwerk (TBW) 1: Überbau im Norden
- Teilbauwerk (TBW) 2: Überbau im Süden

Das TBW 1 für die Richtungsfahrbahn Weinsberg-Wiesloch/Rauenberg wird nördlich der Bestandsbrücke in sogenannter Seitenlage erstellt (vgl. Abb. 3.2). Nach Rückbau der Bestandsbrücke und Neubau des TBW 2 für die Richtungsfahrbahn Wiesloch/Rauenberg-Weinsberg wird das zuvor in Seitenlage erstellte TBW 1 auf die endgültige Position in die sogenannte Endlage querverschoben. Der zeitliche Ablauf der Herstellung erfolgt in drei Bauphasen, welche in nachfolgendem Kap. 3.2 erläutert werden.



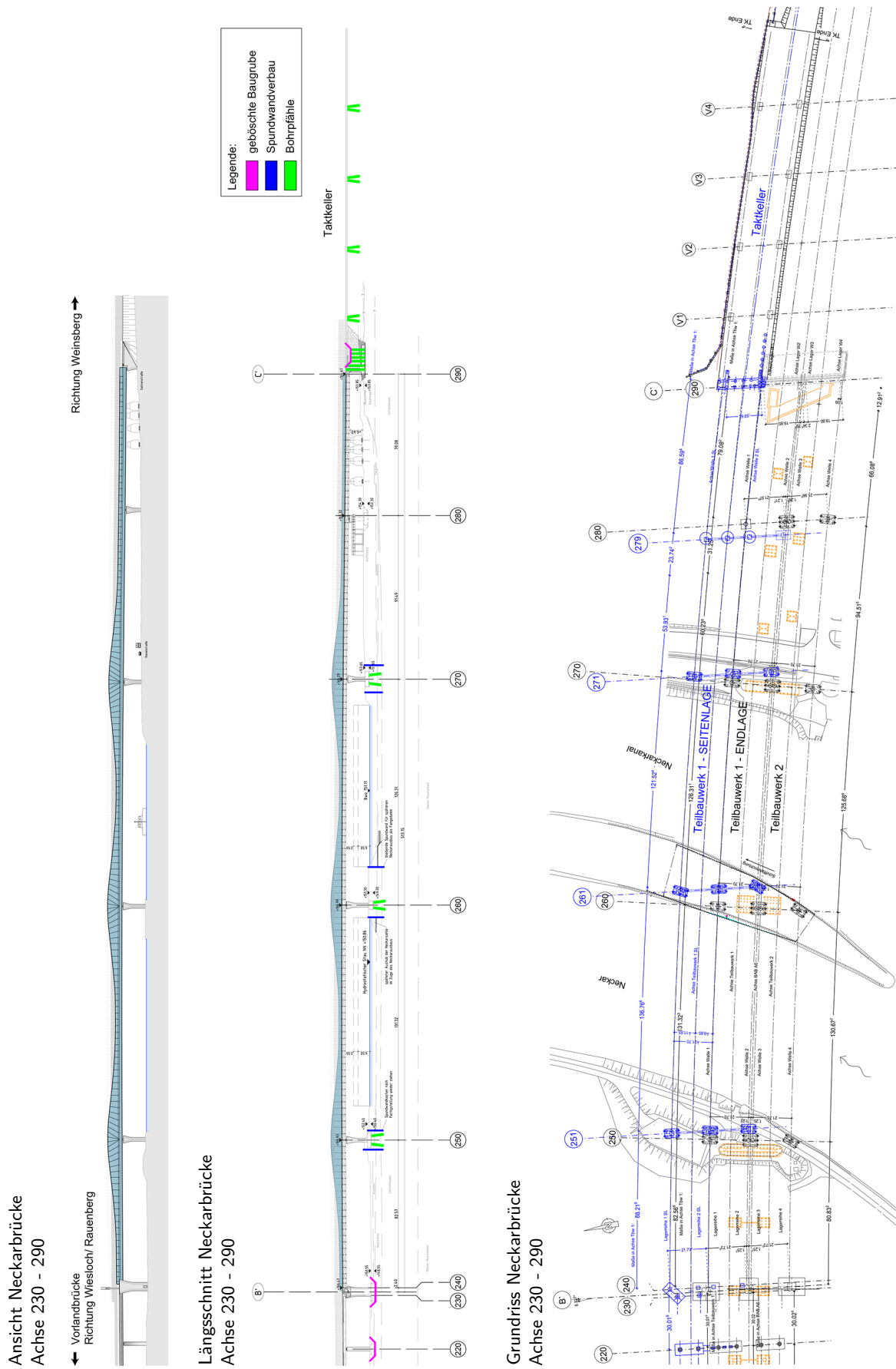


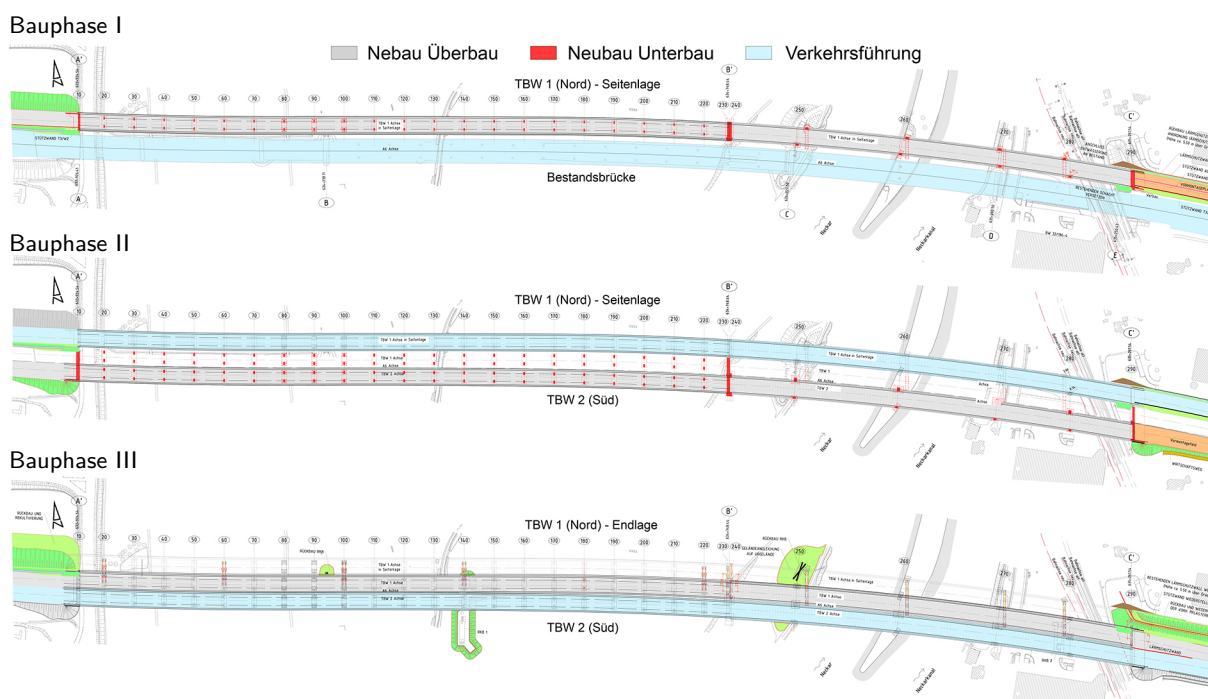
Abb. 3.5: Übersicht Neckarbrücke (modifiziert nach [26])

### 3.2 Bauphasen

In Tab. 3.2 werden die drei Bauphasen, deren Zeiträume und deren Arbeitsprozesse beschrieben. Zusätzlich sind die Bauphasen grafisch in Abb. 3.6 dargestellt.

**Tab. 3.2:** Bauphasen des Neckartalübergangs

Bauphase	Zeitraum	Arbeitsprozess
I	01.2017 – 03.2019	Herstellung des Teilbauwerks 1 in Seitenlage Verkehrsführung über Bestandsbrücke
II	01.04.2019 04.2019 – 10.2019 09.2019 – 04.2021	Verkehrsumlegung auf Teilbauwerk 1 in Seitenlage Abbruch der Bestandsbrücke Herstellung des Teilbauwerks 2
III	28.10.2021 10.2021 – 03.2022 30.06.2022	Verkehrsumlegung auf Teilbauwerk 2 Querverschub des Teilbauwerks 1 in Endlage Verkehrsfreigabe von Teilbauwerk 1 und Teilbauwerk 2 Abbruch aller temporären Bauwerke



**Abb. 3.6:** Bauphasen des Neckartalübergangs, Grundriss (modifiziert nach [25])

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit befindet sich das Bauvorhaben in der fortgeschrittenen Bauphase I, in welcher die Herstellung des Überbaus TBW 1 erfolgt und der Verkehr regulär über die Bestandsbrücke geführt wird. Der Fokus liegt daher auf der Herstellung des TBW 1 in Seitenlage, besonders auf den Tiefbauverfahren zur Erstellung der Brücken Gründungen.



### 3.3 Geologie

Die anstehenden Bodenverhältnisse im Bereich des Neckartalübergangs sind maßgebend für die Wahl der Gründungsart. Dabei werden die einwirkenden Kräfte aus Verkehrslast, Eigengewicht und Querverschub an den Brückenachsen unterschiedlich durch Flachgründungen oder Tiefgründungen in den Untergrund abgetragen. Die Untersuchungen aus geotechnischen Gutachten geben Auskunft über die Bodenverhältnisse im Bereich des Neckartalübergangs.

#### 3.3.1 Beschreibung der Bodenschichtfolge

Auf der Grundlage von Felderkundungen wie Rammkernbohrungen und Rammsondierungen wurden die Reihenfolge der Bodenschichten am Neckartalübergang bestimmt. Diese sind nachfolgend mit der stratigraphisch jüngsten Schicht beginnend angeführt: [24]

1. **AUFFÜLLUNGEN:** Anthropogen aufgefüllte Böden wurden bis in Tiefen von 2,0 m bzw. 3,6 m aufgeschlossen. Es handelt sich teils um Auenlehm und Lößlehm, die künstlich umgelagert wurden. Die Konsistenzen sind von steif bis halbfest einzustufen. Diese Böden besitzen eine geringe bis mittlere Scherfestigkeit und sind stark zusammendrückbar. Die Verdichtungsfähigkeit dieser Böden ist schlecht, die Wasserdurchlässigkeit gering.
2. **AUENLEHM:** Es wurde Auenlehm direkt unter dem Mutterboden und teils unter den Auffüllungen mit unterschiedlichen Schichtdicken zwischen 2,0–3,0 m aufgeschlossen. Die Konsistenzen sind steif bis halbfest, jedoch veränderlich und vom jahreszeitlich schwankenden Wassergehalt abhängig. Der Auenlehm besitzt eine geringe bis mittlere Scherfestigkeit und ist von mittlerer bis großer Zusammendrückbarkeit. Die Verdichtungsfähigkeit dieser Böden ist schlecht, die Wasserdurchlässigkeit gering.
3. **NECKARKIES:** Unter dem Auenlehm wurde Neckarkies in Schichtdicken zwischen 1,5–4,0 m aufgeschlossen. Diese Böden besitzen eine große bis sehr große Scherfestigkeit und sind gering zusammendrückbar. Die Verdichtungsfähigkeit dieser Böden ist gut, die Wasserdurchlässigkeit mittel bis groß.
4. **GIPSKEUPER:** In einer Tiefe von 3,4–10,5 m unter Geländeoberkante wurden die verwitterten Schichten des Gipskeupers aufgeschlossen. Es handelt sich um Mergel- bzw. Tonstein, welcher stark verwittert ist. Die Konsistenzen sind halbfest bis fest. Diese Böden besitzen eine mittlere Scherfestigkeit und sind von mittlerer bis großer Zusammendrückbarkeit. Der Gipskeuper wird nach unten durch Dolomitstein mit einer Mächtigkeit von rund 1 m begrenzt.
5. **LETTENKEUPER:** Der Lettenkeuper wurden unterhalb der Neckarkiese mit einer Mächtigkeit von 10–15 m aufgeschlossen. Zwischen A80 bis A100 wurden diese unter dem Grenzdolomit des Gipskeupers angetroffen. Es handelt sich um Schluffstein und Tonstein sowie untergeordnet Sandstein und einzelne Kalksteinbänke. Der Lettenkeuper weist oberflächlich eine schlechte Kornbindung und eine Verwitterung auf. Im Tiefenbereich zwischen 0,5–1,0 m unter der Oberkante des Lettenkeupers erfolgt jedoch ein Übergang von mäßig harten bis harten Gesteinsfestigkeiten.
6. **OBERER MUSCHELKALK:** Unterhalb des Lettenkeupers befindet sich Oberer Muschelkalk. Es handelt sich um Kalkstein und Sandstein mit einer mäßigen bis guten Kornbindung.

Der Keuper ist die oberste der drei lithostratigraphischen Gruppen der Germanischen Trias. In der Talebene zwischen A80 und A100 liegt eine tektonische Störung innerhalb der Sedimentgesteine Lettenkeuper und Gipskeuper vor. Im Bereich dieser Störung ist der Lettenkeuper abgesunken und die Gipskeuperschichten sind unter dem Neckarkies anstehend. Der geologische Geländeschnitt des Neckartalübergangs in Abb. 3.7 (S. 53) zeigt die Bodenschichtfolge.

#### 3.3.2 Hydrologie der Böden

Bei den durchgeführten Erkundungen wurde Grundwasser im Bereich des Baugeländes vorgefunden. Dieses ist für den Baubetrieb, die Wasserhaltung in Baugruben und die Konsistenz der Böden von Bedeutung. Maßgebend für den Grundwasserspiegel entlang des Neckartalübergangs ist der Fluss Neckar.

Der Grundwasserspiegel ist jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Die Schwankungsbreite wird von der Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet und damit von der jahreszeitlichen Niederschlagsverteilung sowie der Verdunstung beeinflusst. Die Schwankungen des Grundwasserspiegels werden auch maßgeblich durch Hochwasserereignisse bestimmt:

- regelmäßig wiederkehrende saisonale Schwankungen von 0,2 m
- regelmäßig wiederkehrende monatliche Schwankungen von 0,3 m
- alle zwei Jahre plötzlicher Anstieg von mindestens 0,75 m
- alle drei Jahre plötzlicher Anstieg von mindestens 1,2 m

Die Chemie des Wassers in den jeweiligen Bodenschichten ist vor allem für den Beton der Tiefgründungen relevant. Da der Neckartalübergang teilweise auf Bohrpfählen gegründet und eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Pfähle sicherzustellen ist, muss der Beton widerstandsfähig gegenüber chemischen und physikalischen Einwirkungen aus seiner Umgebung sein. Die verschiedenen Arten von Einwirkungen sind in Expositionsklassen nach DIN EN 1992-1-1 [15] bzw. ÖNORM B 4710-1 [39] unterteilt. Im Bereich des Neckartalübergangs ist der Widerstand gegen den chemischen Angriff des Bodenwassers (Expositionsklasse XA) relevant. Die Bodenwasserentnahmen aus dem Neckarkies sind nicht betonangreifend. Demgegenüber liegt im Lettenkeuper eine chemisch schwach angreifende Umgebung vor, es ist Beton der Expositionsklasse XA1 einzubauen. Das Grundwasser aus den Schichten des Gipskeupers und des Oberen Muschelkalkes ist wegen seines hohen Sulfatgehaltes stark betonangreifend, es muss Beton der Expositionsklasse XA2 eingesetzt werden.

#### 3.3.3 Rammfähigkeit der Böden

Zur Erkundung des Ramm- und Bohrverhaltens wurden Rammsondierungen durchgeführt. Die Eignung der Böden für das Einbringen von Spundwandelementen durch Rammen mit Rammhären oder Einrütteln mit Vibrationshären werden in Tab. 3.3 zusammengefasst.

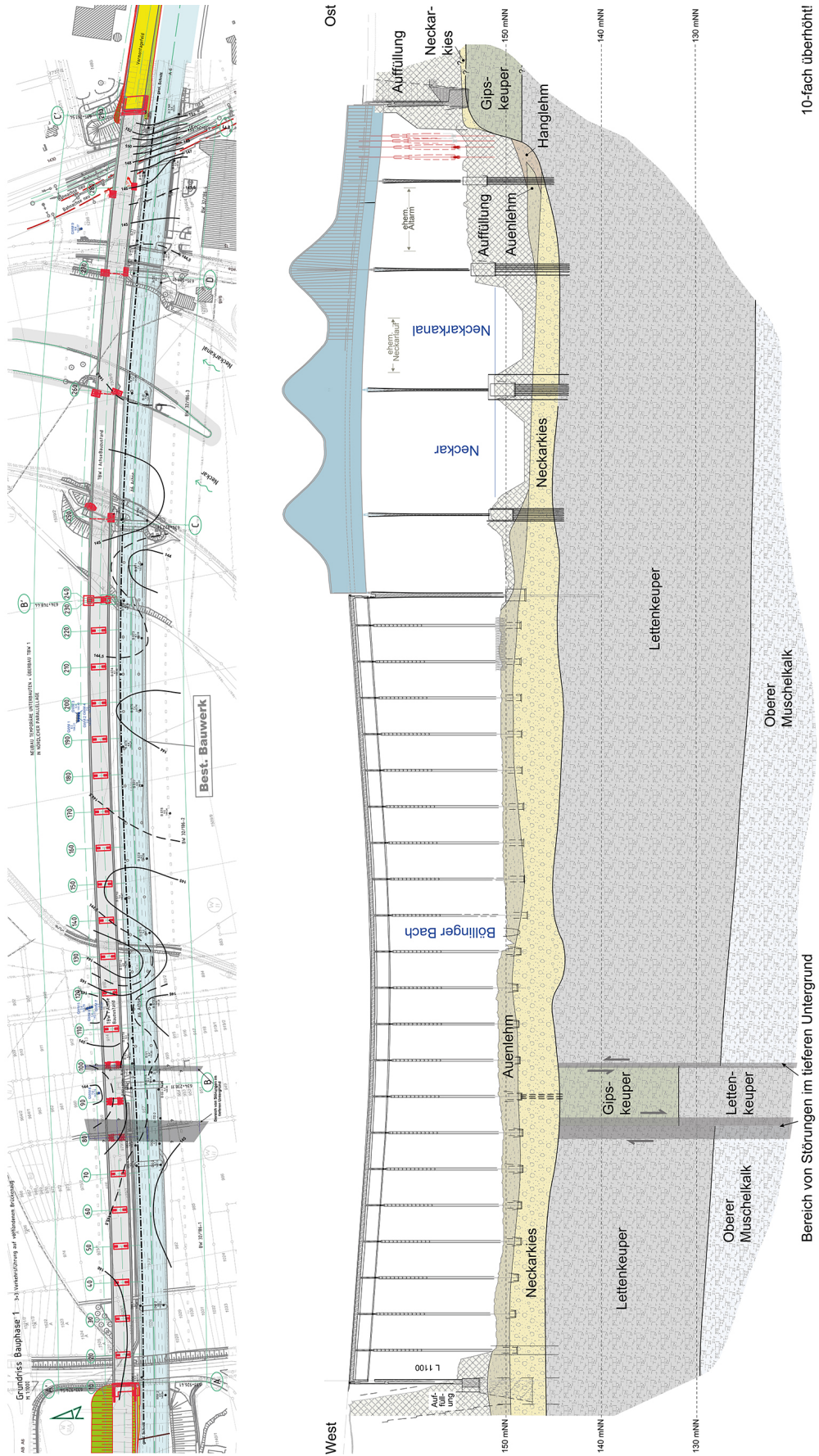


Abb. 3.7: Geologischer Geländeschnitt (modifiziert nach [51])

**Tab. 3.3:** Rammfähigkeit der Böden im Bereich des Neckartalübergangs [24]

Bodenschicht	Schlagrammen	Vibrationsrammen
1. Auffüllungen	leicht	leicht-mittel
2. Auenlehm	leicht	mittel-schwer
3. Neckarkies	mittel - schwer	mittel
4. Gipskeuper	mittel - schwer	sehr schwer
5. Lettenkeuper	sehr schwer - nicht rammbaar	nicht rammbaar

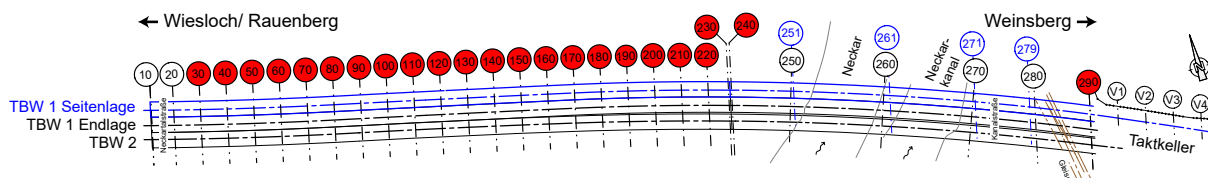
### 3.4 Angewandte Tiefbauverfahren

In diesem Kapitel wird auf die Bauverfahren aus dem Spezialtiefbau und allgemeinen Tiefbau zur Herstellung der Brückengründungen des TBW 1 in Seitenlage eingegangen. Es werden die Bauverfahren geböschte Baugrube (Kap. 3.4.1), Spundwandverbau (Kap. 3.4.2) und Bohrpfähle (Kap. 3.4.3) näher untersucht und getrennt betrachtet. Dabei werden die Einsatzorte an den jeweiligen Brückenachsen mit grafischen Darstellungen beschrieben sowie eine quantitative Erfassung der Einsatzmenge anhand der Ausführungspläne für die Kostenanalyse in Kap. 4 ermittelt.

In allen Baugruben erfolgt die Wasserhaltung zur Ableitung von Oberflächenwasser und gegebenenfalls Grundwasser durch eine offene Wasserhaltung. Dabei wird das in der Baugrube anfallende Wasser in Gräben gesammelt und Pumpsümpfen zugeführt. Von dort wird das Wasser zeitweise abgepumpt.

Die Baugruben für Brückengründungen werden entweder geböschst ausgeführt oder durch Spundwandverbauten gesichert. Als Brückengründungen kommen Flach- und Bohrpfahlgründungen zum Einsatz. Die zu untersuchenden Tiefbauverfahren sind auf den Längsschnitten des Neckartalübergangs in Abb.3.4 (S. 48) und Abb. 3.5 (S. 49) farblich gekennzeichnet. Die geplanten Flachgründungen liegen in Neckarkiesen, welche vom Lettenkeuper unterlagert werden. Die Bohrpfähle binden im Lettenkeuper bzw. in der Störzone bei A90 im Gipskeuper ein.

#### 3.4.1 Geböschte Baugrube



**Abb. 3.8:** Übersichtsskizze geböschte Baugrube (modifiziert nach [26])

Von A30 bis A240 und A290 werden die Baugrubensicherungen als geböschte Baugruben nach ÖNORM B 2205 [38] bzw. DIN 4124 [9] mit einem Neigungswinkel von  $\beta = 45^\circ$  gegen die Horizontale hergestellt (vgl. rot markierte Achsen in Abb. 3.8). Die Baugruben werden als offene Gräben ohne zusätzliche Böschungssicherung ausgebildet, da die anstehenden Böden ausreichend standfest sind. Die Böschungshöhen sind stets unter 5 m sowie die Geländeneigung neben der

Böschungsoberkante kleiner als 1:10. Ein rechnerischer Nachweis der Standsicherheit ist nach [9, 38] nicht erforderlich.

Das TBW 1 der Vorlandbrücke steht von A20–A220 jeweils auf zwei Brückenpfeiler je Achse, diese haben ein gemeinsames Fundament. In diesem Bereich sowie beim Widerlager A290 wird je Achse eine Baugrube ausgehoben. Bei der Neckarbrücke stehen die Brückenpfeiler des TBW 1 von A230–A280 auf Einzelfundamenten, je Achse werden mehrere Baugruben für die Brückenfundamente ausgehoben.

In Abb. 3.9 ist links der Aushub der Baugrube mittels Hydraulikbagger und rechts die Herstellung der Baugrubensohle von A150 zu sehen.



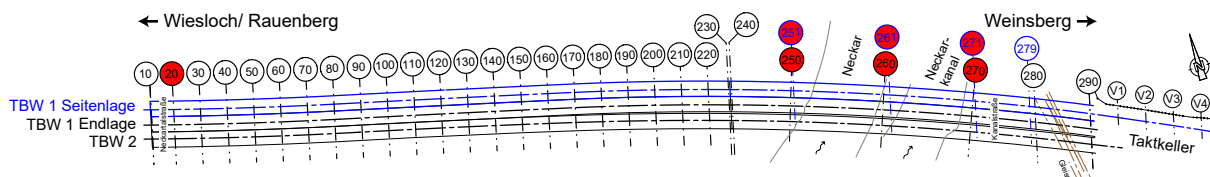
**Abb. 3.9:** Herstellen einer geböschten Baugrube bei A150 [22]

In Tab. 3.4 sind die Gründungsarten, Grundflächen der Baugrubensohle und das Aushubvolumen der geböschten Baugruben je Achse angegeben. Die Massen sind den entsprechenden Ausführungsplänen entnommen.

**Tab. 3.4:** Massenermittlung geböschte Baugrube

Achse	Bauteil	Gründung	Grundfläche Sohle [m <sup>2</sup> ]	Aushubvolumen [m <sup>3</sup> ]
30 – 80	Vorlandpfeiler	Flach	140	1.015
90	Vorlandpfeiler	Tief	140	1.015
100	Vorlandpfeiler	Flach	140	1.015
110 – 130	Vorlandpfeiler	Flach	230	1.245
140 – 220	Vorlandpfeiler	Flach	140	1.015
230/240	Trennpfeiler	Flach	260	1.405
290	Widerlager Ost	Tief	588	2.500
Summe			3.918	24.895

### 3.4.2 Spundwandverbau



**Abb. 3.10:** Übersichtsskizze Spundwandverbau (modifiziert nach [26])

Bei A20, A250/251, A260/261 und A270/271 wurde ein Spundwandverbau zur Sicherung der Baugrube eingesetzt (vgl. rot markierte Achsen in Abb. 3.10). Der Verbau wurde der geböschten Baugrube vorgezogen. Zum einen, weil die Platzverhältnisse durch angrenzende Verkehrswege und Fundamente der Bestandsbrücke beschränkt sind, zum anderen, weil eine Wasserhaltung bei einem dicht umschließenden Spundwandverbau im Vergleich zur Wasserhaltung bei einer geböschten Baugrube einfacher zu handhaben ist. Die Grundwasserspiegel bei A250/251 bis A270/271 werden vor allem durch den unmittelbar nahegelegenen Fluss Neckar beeinflusst. Teilweise werden die Spundwandverbauten ausgesteift. Auf der Neckarinsel bei A260/261 werden die Spundwände mit Stabanker gegeneinander verankert. Die Einbringung der Spundwandbohlen erfolgt durch einen mäklergeführten Vibrationsbären. Die Spundwände binden mindestens 0,5 m in den oberflächennah verwitterten Lettenkeuper ein.

In Abb. 3.11, ist links das Einrütteln der Spundwandbohlen mittels Rammgerät und rechts der Aushub der ausgesteiften Baugrube von A270/271 zu sehen.



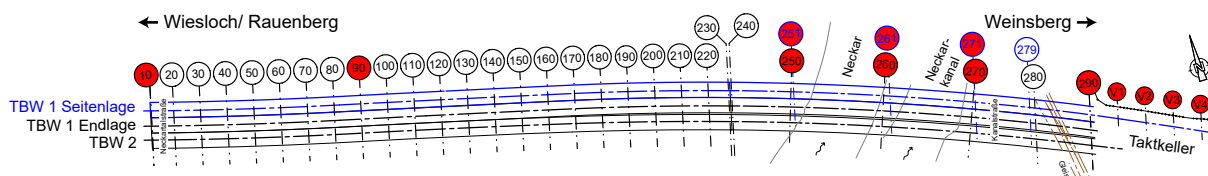
**Abb. 3.11:** Herstellen eines Spundwandverbaus bei A270/271 [22]

In Tab. 3.5 werden die Gründungsarten und kalkulatorisch relevanten Massen wie Umfang, Ansichtsfäche und Aushubvolumen des Spundwandverbaus je Achse angegeben. Die Massen sind den entsprechenden Ausführungsplänen entnommen.

**Tab. 3.5:** Massenermittlung Spundwandverbau

Achse	Bauteil	Gründung	Umfang [m]	Ansichtsfläche [m <sup>2</sup> ]	Aushubvolumen [m <sup>3</sup> ]
20	Vorlandpfeiler	Flach	52,5	386,0	500
250/251	Pfeiler westl. Neckarufer	Tief	84,5	763,0	570
260/261	Pfeiler Neckarinsel	Tief	130,2	1.080,0	1.204
270/271	Pfeiler östl. Neckarufer	Tief	86,1	956,0	967
Summe			353,3	3.185,0	3.241

### 3.4.3 Bohrpfähle

**Abb. 3.12:** Übersichtsskizze Bohrpfähle (modifiziert nach [26])

Der Einsatz von Bohrpfählen für das TBW 1 in Seitenlage ist in Abb. 3.12 mit rot markierten Achsen gekennzeichnet.

Bei A250/251, A260/261 und A270/271 werden jeweils drei Brückenpfeiler errichtet. Diese Pfeiler sind jeweils auf einer Pfahlkopfplatte mit je sechs Bohrpfählen gegründet. Dabei handelt es sich um zwei provisorische Pfeiler, die nach dem Querverschub von TBW 1 zurückgebaut werden und einem endgültigen Pfeiler auf diesem der Neckartalübergang in Endlage aufliegt.

Bei A279/280 wird eine Brunnengründung unter dem Einsatz einer Bodenvereisung als Vorabmaßnahme vom Auftraggeber ausgeführt. Es handelt sich bei dieser Gründungsmethode um einen Sonderfall, der sonst an keiner Achse des Neckartalübergangs vorkommt. Aufgrund dessen werden diese Verfahren in dieser Diplomarbeit nicht weiter behandelt.

Das östliche Widerlager bei A290 wird auf Bohrpfählen gegründet, welche als Einzelpfähle in Abständen von 3,5 m und 4,5 m ausgeführt werden. Bereichsweise werden einige Pfähle tangierend angeordnet. Im anschließenden Taktkeller liegt das Brückentragwerk während der Montage auf acht sogenannten „Schwingfundamenten“ auf. Diese sind ebenfalls jeweils auf zwei Bohrpfählen gegründet.

Die Bohrpfähle werden mit einem Durchmesser von 1,5 m nach [14, 44] ausgeführt. Als Gründungshorizont (Pfahlunterkante) dient das Festgestein des Lettenkeupers. Wobei die Bohrpfähle mindestens 1,5 m in den Lettenkeuper einbinden, davon 1,0 m in den verwitterten Lettenkeuper und 0,5 m in die tragfähige Schicht des Lettenkeupers. Da die Pfähle in das Grundwasser reichen ist eine wasserrechtliche Genehmigung von der zuständigen Wasserbehörde in Heilbronn bzw. Neckarsulm erforderlich.

In Abb. 3.13 ist das Herstellen der Arbeitsebene mittels Hydraulikbagger und Flächenrüttler (links oben), die Herstellung eines Bohrpfahles (rechts oben) und das Betonieren eines Bohrpfahles

### 3 Fallbeispiel Neckartalübergang

im Kontraktorverfahren (links unten) bei A260/261 sowie das Abstemmen der Pfahlköpfe (rechts unten) bei A290 zu sehen.



**Abb. 3.13:** Herstellen von Bohrpfählen bei A260/261 und A290 [22]

In Tab. 3.6 werden die kalkulatorisch relevanten Massen zur Herstellung von Bohrpfählen wie die Anzahl, die Gesamtlänge, das Betonvolumen und die Bewehrungstonnage je Achse angegeben. Die Massen sind den entsprechenden Ausführungsplänen entnommen.

**Tab. 3.6:** Massenermittlung Bohrpfähle

Achse	Bauteil	Anzahl [Stk.]	Gesamtlänge [m]	Beton [m <sup>3</sup> ]	Bewehrung [to]
10	Widerlager West	39	547,5	1.112,6	177,70
90	Vorlandpfeiler	8	96,8	196,7	7,54
250/251	Pfeiler westl. Neckarufer	18	183,0	371,9	18,79
260/261	Pfeiler Neckarinsel	18	186,0	378,0	20,48
270/271	Pfeiler östl. Neckarufer	18	177,0	359,7	16,00
290	Widerlager Ost	26	315,0	640,2	41,95
Taktkeller	Schwingfundamente	16	246,0	499,9	66,28
Summe		143	1.751,3	3.559,0	348,74



# Kapitel 4

## Kostenanalyse der angewandten Tiefbauverfahren

In diesem Kapitel werden die Baukosten der angewandten Tiefbauverfahren aus Kap. 3.4 zur Herstellung des Teilbauwerk 1 in Seitenlage untersucht. Das Resultat soll Aufschluss über den Anteil der jeweiligen Verfahren an den Gesamtkosten geben und die kostentreibenden Faktoren hervorheben.

Zur Ermittlung der Kosten in Kap. 4.2, Kap. 4.3 und Kap. 4.4 werden je nach Verfahren die Achsen einzeln betrachtet und in Form von Leistungsverzeichnissen dargestellt. Die vollständige Sammlung der Leistungsverzeichnisse als Grundlage der Kostenanalyse ist im Anhang dieser Arbeit angeführt.

In den Leistungsverzeichnissen werden in der Spaltenüberschrift die Abkürzungen EP für EINHEITSPREIS und GP für GESAMTPREIS verwendet. Die Positionsbezeichnungen beinhalten außerdem folgende Information:

- Die Buchstaben G (geböschte Baugrube), S (Spundwandverbau) oder B (Bohrpfähle) geben Aufschluss über das betrachtete Bauverfahren.
- Die dreistellige Zahl orientiert sich an der jeweiligen Achsennummerierung.
- Eine fortlaufende Zahl ermöglicht das Unterteilen in mehrere Unterpositionen.

Zum Beispiel handelt es sich bei der Position G.030.1 um eine Unterposition zur Herstellung einer geböschten Baugrube bei A30.

In der Spalte KURZTEXT der einzelnen Positionen sind rechts vom Kurztext Buchstaben angeordnet, die einen Hinweis auf die Kostenzuordnung geben. Dabei haben diese Abkürzungen folgende Bedeutungen:

- G für Gerätekosten
- M für Materialkosten
- N für Nachunternehmerkosten
- P für Personalkosten
- W für Kosten von speziellen Wasserfahrzeugen (vgl. Kap. 5.2)

Zur Erstellung der Leistungsverzeichnisse und zur Ermittlung der Baukosten werden folgenden Annahmen und Randbedingungen festgelegt:

- Die Grundlage der Baukosten bilden die Baumassen der betrachteten Bauverfahren. Diese wurden anhand der Ausführungspläne ermittelt und sind in Tab. 3.4, Tab. 3.5 und Tab. 3.6 im Kap. 3.4 angeführt.
- Für das Personal gilt eine Arbeitszeit von 10 Stunden pro Arbeitstag. Eine Arbeitswoche besteht aus 5 Arbeitstage. Ein Vorhaltemonat umfasst nach der BGL 2015 [21] bzw. ÖBGL 2015 [16] 170 Arbeitsstunden.
- Die Leistungswerte werden anhand der Leistungsaufzeichnungen aus den Bautagesberichten ermittelt. Bei fehlender Dokumentation werden unternehmensinterne Erfahrungswerte von Hochtief aus vergangenen realisierten Projekten zur Berechnung verwendet.
- Die Kosten von Nachunternehmerleistungen werden aus den abgeschlossenen Vertragsvereinbarungen zwischen der BAUARGEA6WEST und der jeweiligen Nachunternehmer sowie aus deren Rechnungen ermittelt.
- Die Materialkosten werden anhand der vereinbarten Preise aus den Verträgen zwischen der BAUARGEA6WEST und den Lieferanten für Bewehrungsstahl, Beton, Betonpumpe und Schotter ermittelt.
- Die Personalkosten basieren auf einem Mittellohnpreis von 42,00 €/h und sind von der Einsatzdauer der Arbeitskräfte abhängig. Beim Stundensatz von GeräteführerInnen wird zusätzlich zum Mittellohnpreis die Schmierstunde durch einen Aufschlag von 10 % berücksichtigt. Die Personalanzahl beruht auf tatsächlichen Gegebenheiten.
- Die Gerätekosten der eingesetzten Baugeräte liegen den kalkulatorischen Werten der Baugeräteliste (BGL) 2015 [21] bzw. Österreichischen Baugeräteliste (ÖBGL) 2015 [16] zugrunde. Die Anzahl der eingesetzten Geräte beruht auf tatsächlichen Gegebenheiten. Die Ermittlung der Gerätestundensätze ist im nachfolgenden Kap. 4.1 beschrieben.

### 4.1 Ermittlung der Gerätestundensätze

In diesem Kapitel werden die Stundensätze der Geräte zur Herstellung der geböschten Baugruben, Spundwandverbauten und Bohrpfählen als Grundlage für die weitere Kostenanalyse ermittelt. Die Berechnungen der Gerätekosten basieren auf den Daten der BGL 2015 [21] bzw. ÖBGL 2015 [16], welche nahezu gleichgestellt sind. Es werden die Geräteausstattung und -kosten sowie die spezifischen Annahmen zur Errechnung der Stundensätze folgender Baugeräte untersucht:

- Planierdraupe (Tab. 4.1)
- Lastkraftwagen (Tab. 4.2)
- Hydraulikbagger (Tab. 4.3)
- Flächenrüttler (Tab. 4.4)
- Rammgerät mit Bohreinrichtung (Tab. 4.5)
- Rammgerät mit Rammeinrichtung (Tab. 4.6)
- Drehbohrgerät (Tab. 4.7)

In Tab. 4.1 bis Tab. 4.7 sind die monatlichen Abschreibungs- und Verzinsungsbeträge (AV) sowie die monatlichen Reparaturkosten (Rep) der einzelnen Geräte, welche durch Interpolation der BGL-Werte ermittelt wurden in der Spalte „BGL-Nr.“ mit dem Symbol (\*) gekennzeichnet. Weiters liegen den Gerätekalkulationen folgende allgemeine Annahmen zugrunde:

- Abminderungsfaktoren der BGL-Werte:
  - Abschreibung und Verzinsung,  $f_{AV} = 50 \%$
  - Reparatur,  $f_{Rep} = 50 \%$
- Durchschnittlicher Dieserverbrauch,  $V_{Diesel} = 0,12 \text{ l/kWh}$
- Dieselposten,  $K_{Diesel} = 1,35 \text{ €/l}$

**Tab. 4.1:** Gerätekalkulation Planiererraupe

Planiererraupe Komatsu 61PX/ 169 kW/ 19,4 to/ Schneidenbreite 3,86 m						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV [€/Mo]	$\sum$ AV [€/Mo]	Rep [€/Mo]	$\sum$ Rep [€/Mo]
1	D.4.00.0170	Planiererraupe	13.700	13.700	13.300	13.300
		Summe		13.700		13.300
		Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$	130	h		
		Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$	169	kW		
		$AV = \sum AV \cdot f_{AV} / h_{Mo}$	52,69	€/h		
		$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep} / h_{Mo}$	51,15	€/h		
		Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$	27,38	€/h		
		Schmierstoffe = 10 % von Treibstoff	2,74	€/h		
		<b>Gerätekosten je h</b>	<b>133,96</b>	<b>€/h</b>		

**Tab. 4.2:** Gerätekalkulation Lastkraftwagen

Lastkraftwagen 8x4/ 32 to						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV [€/Mo]	$\sum$ AV [€/Mo]	Rep [€/Mo]	$\sum$ Rep [€/Mo]
1	P.2.02.0320	Lastkraftwagen 8x4/ 32,0 to/ 330 kW	3.750	3.750	2.850	2.850
		Summe		3.750		2.850
		Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$	130	h		
		Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$	330	kW		
		$AV = \sum AV \cdot f_{AV} / h_{Mo}$	14,42	€/h		
		$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep} / h_{Mo}$	10,96	€/h		
		Treibstoff = $35 \text{ km/h} \cdot 42 \text{ l/100 km}$	14,70	€/h		
		Schmierstoffe = 10 % von Treibstoff	1,47	€/h		
		<b>Gerätekosten je h</b>	<b>41,55</b>	<b>€/h</b>		

Tab. 4.3: Gerätekalkulation Hydraulikbagger

Hydraulikbagger CAT 323E/ 24,4 to/ 121 kW						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV	$\sum AV$	Rep	$\sum Rep$
			[€/Mo]	[€/Mo]	[€/Mo]	[€/Mo]
1	D.1.00.0121*	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk	5.528	5.528	4.433	4.433
1	D.1.40.0121*	Monoblockausleger mit Hydraulikzylindern	797	797	634	634
1	D.1.43.0121*	Stiel mit Hydraulikzylinder	282	282	226	226
1	D.1.60.1100*	Tieflöffel 1100 l	165	165	165	165
1	D.1.61.0930	Grabenräumlöffel 930l inkl. Schwenkeinrichtung	208	208	208	208
Summe				6.980		5.666
Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$			150	h		
Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$			121	kW		
$AV = \sum AV \cdot f_{AV}/h_{Mo}$			23,27	€/h		
$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep}/h_{Mo}$			18,89	€/h		
Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$			19,60	€/h		
Schmierstoffe = 10 % von Treibstoff			1,96	€/h		
<b>Gerätekosten je h</b>			<b>63,71</b>	<b>€/h</b>		

Tab. 4.4: Gerätekalkulation Flächenrüttler

Flächenrüttler						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV	$\sum AV$	Rep	$\sum Rep$
			[€/Mo]	[€/Mo]	[€/Mo]	[€/Mo]
1	D.8.61.0800	Flächenrüttler mit Dieselmotor (Vibrationsplatte)	695	695	476	476
Summe				695		476
Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$			120	h		
Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$			16	kW		
$AV = \sum AV \cdot f_{AV}/h_{Mo}$			2,90	€/h		
$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep}/h_{Mo}$			1,98	€/h		
Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$			2,59	€/h		
Schmierstoffe = 10 % von Treibstoff			0,26	€/h		
<b>Gerätekosten je h</b>			<b>7,73</b>	<b>€/h</b>		

Tab. 4.5: Gerätekalkulation Rammgerät mit Bohreinrichtung

Rammgerät RTG RG 21T/ 71 to/ 563 kW/ 55,8 kNm mit Kraftdrehkopf RTG MB 50-M						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV [€/Mo]	$\sum AV$ [€/Mo]	Rep [€/Mo]	$\sum Rep$ [€/Mo]
1	J.0.00.0022	Kombiniertes Ramm- und Bohrgerät	31.000	31.000	35.000	35.000
1	K.2.01.0060	Kraftdrehkopf für Bohrgeräte (60 kNm)	1.660	1.660	1.540	1.540
5	K.7.00.0500	Bohrschnecke für Vertikalbohrungen (L = 2 m)	242	1.210	225	1.125
Summe				33.870		37.665
Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$			150,00	h		
Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$			563	kW		
$AV = \sum AV \cdot f_{AV}/h_{Mo}$			112,90	€/h		
$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep}/h_{Mo}$			125,55	€/h		
Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$			91,21	€/h		
Schmierstoffe = 10% von Treibstoff			9,12	€/h		
<b>Gerätekosten je h</b>			<b>338,78</b>	<b>€/h</b>		

Tab. 4.6: Gerätekalkulation Rammgerät mit Rammeinrichtung

Rammgerät RTG RG 21T/ 71 to/ 563 kW mit Vibrationsbär RTG MR 125 V						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV [€/Mo]	$\sum AV$ [€/Mo]	Rep [€/Mo]	$\sum Rep$ [€/Mo]
1	J.0.00.0022	Kombiniertes Ramm- und Bohrgerät	31.000	31.000	35.000	35.000
1	J.3.10.1250*	Vibrationsbär, hydraulisch	3.555	3.555	3.555	3.555
2	J.3.12.0650*	Doppel-Klemmzange (2 Einfach-Klemmzange)	359	717	359	717
1	J.3.20.0280	Hydraulikaggregat f. Vibrationsbär	4.360	4.360	3.550	3.550
Summe				39.632		42.822
Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$			150,00	h		
Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$			563	kW		
$AV = \sum AV \cdot f_{AV}/h_{Mo}$			132,11	€/h		
$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep}/h_{Mo}$			142,74	€/h		
Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$			91,21	€/h		
Schmierstoffe = 10% von Treibstoff			9,12	€/h		
<b>Gerätekosten je h</b>			<b>375,17</b>	<b>€/h</b>		

Tab. 4.7: Gerätekalkulation Drehbohrgerät

Drehbohrgerät BAUER BG28 H/ 277 kNm/ 354 kW/ 84 to						
Anz.	BGL-Nr.	Gerätebezeichnung	AV [€/Mo]	$\sum$ AV [€/Mo]	Rep [€/Mo]	$\sum$ Rep [€/Mo]
1	K.2.00.0277*	Drehbohrgerät	28.026	28.026	25.972	25.972
1	K.2.01.0277*	Kraftdrehkopf für Bohrgeräte	5.159	5.159	4.782	4.782
1	K.2.05.3024	Teleskop-Kellystange 3-fach	3.320	3.320	2.790	2.790
1	K.4.01.1500	Verrohrungsmaschine für Drehbohranlage	3.560	3.560	3.310	3.310
1	K.4.10.0354*	Hydraulikaggregat für Verrohrungsmaschine	6.538	6.538	6.067	6.067
1	K.6.00.1503	Bohrrohr, einwandig L = 3,0 m	690	690	690	690
4	K.6.00.1506	Bohrrohr, einwandig L = 6,0 m	920	3.680	920	3.680
1	K.6.02.1502	Schneidschuh für Bohrrohre	535	535	535	535
1	K.6.03.1500	Rohraufsatztrichter	299	299	299	299
1	K.7.00.1350	Bohrschnecke für Vertikalbohrungen	455	455	424	424
1	K.7.10.1360	Bohreimer	970	970	905	905
Summe				53.233		49.454
Betriebsstunden im Monat, $h_{Mo}$			150,00	h		
Leistung des Geräts, $L_{Gerät}$			354	kW		
$AV = \sum AV \cdot f_{AV} / h_{Mo}$			177,44	€/h		
$Rep = \sum Rep \cdot f_{Rep} / h_{Mo}$			164,85	€/h		
Treibstoff = $L_{Gerät} \cdot V_{Diesel} \cdot K_{Diesel}$			57,35	€/h		
Schmierstoffe = 10 % von Treibstoff			5,73	€/h		
<b>Gerätekosten je h</b>			<b>405,37</b>	<b>€/h</b>		

## 4.2 Geböschte Baugrube

Ein Überblick über das Bauverfahren zur Herstellung der geböschten Baugrube wurde in Kap. 3.4.1 gegeben. Die für die Erstellung der Leistungsverzeichnisse relevanten Massen wurden in Tab. 3.4 angeführt. Um eine geböschte Baugrube herzustellen werden die Leistungsverzeichnisse in folgende Arbeitsschritte bzw. Unterpositionen gegliedert:

- Gerätetransport
- Oberboden abtragen
- Baugrubenaushub
- Verfuhr zur Einbaustelle
- Baugrubensohle herstellen
- Offene Wasserhaltung herstellen

Einige Arbeitsschritte können bei bestimmten Achsen entfallen. Die Abweichungen von diesen Arbeitsschritten werden im Folgenden je Achsen bzw. Baustellenbereich erläutert.

**Achse 30 bis 100 und 140 bis 220 – Vorlandpfeiler**

Die geböschten Baugruben von A30 bis A100 und A140 bis A220 sind geometrisch ident. Der Arbeitsablauf gleicht der Abfolge, welche oben beschrieben wurde. Das Leistungsverzeichnis von A30 gilt aufgrund der ähnlichen Geometrie auch für A30 bis A100 und A140 bis A220. Die Kosten des Gerätetransports werden anteilig auf 24 Achsen (A20 – A250) im Bereich der Vorlandbrücke aufgeteilt. Die Zufahrt zu diesem Baustellenabschnitt erfolgt über die Neckartalstraße (L1100).

**Achse 110 bis 130 – Vorlandpfeiler**

Die Baugruben von A110 bis A130 sind ebenfalls ident, jedoch haben jene einen größeren Umfang und ein höheres Aushubvolumen als zuvor erwähnte. Der Arbeitsablauf gleicht dem Ablauf, der am Anfang des Kap. 4.2 beschrieben wurde. Das Leistungsverzeichnis von A110 ist auch für A120 und A130 gültig. Der Gerätetransport und die Baustellenzufahrt sind wie im vorherigen Abschnitt (A30) beschrieben.

**Achse 230/240 – Trennpfeiler**

Bei A230/240 werden zwei getrennte Baugruben errichtet. Die Baugrubentiefe ist geringer als jene von A30 bis A220, folglich unterscheidet sich auch das Aushubvolumen. Der Arbeitsablauf gleicht der Abfolge, welche am Anfang des Kap. 4.2 beschrieben wurde. Die Aufteilung der Gerätetransportkosten und die Lage der Baustellenzufahrt gleichen der Beschreibung aus vorherigem Abschnitt (A30).

**Achse 290 – östl. Widerlager**

Die Baugruben für das östliche Widerlager bei A290 werden erst nach Fertigstellung der Bohrpfahlarbeiten ausgehoben. Der Abtrag des Oberbodens erfolgt bereits im Zuge des Taktkellerausbaus und wird deshalb im Leistungsverzeichnis nicht berücksichtigt. Ebenso wird auf die Herstellung einer Baugrubensohle verzichtet, da das wandartige Widerlager die Lasten nicht über seine Aufstandsfläche, sondern über Bohrpfähle abträgt. Die Kosten des Gerätetransports werden anteilig auf die A290 und den Taktkeller aufgeteilt. Die Zufahrt auf diesen Baustellenabschnitt erfolgt direkt über die Autobahn A6.

## 4.3 Spundwandverbau

In Kap. 3.4.2 wurde ein Überblick über die Herstellung eines Spundwandverbaus gegeben. Die für die Erstellung der Leistungsverzeichnisse relevanten Massen wurden in Tab. 3.5 angeführt. Die Leistungsverzeichnisse zur Herstellung der Spundwandverbauten werden in folgende Arbeitsschritte bzw. Unterpositionen gegliedert:

- Gerätetransport
- Oberboden abtragen
- Arbeitsebene herstellen
- Spundwand einbringen
- Spundwandbohlen abschneiden
- Baugrubenaushub

- Verfuhr zur Einbaustelle
- Gurtung für Spundwandverbau einbauen
- Baugrubensohle herstellen

Auf einige Arbeitsschritte wird bei bestimmten Achsen verzichtet. Bei einer Abweichung dieser Arbeitsabfolge wird im Folgenden explizit darauf hingewiesen. Bei den Spundwandverbauten ist im Vergleich zu den geböschten Baugruben keine Wasserhaltung vorgesehen.

#### **Achse 20 – Vorlandpfeiler**

Bei A20 ist die Baugrubensicherung als Spundwandverbau ausgeführt, da aufgrund der nahegelegenen Neckartalstraße (L1100) und der daher engen Platzverhältnisse eine geböschte Baugrube nicht möglich ist. Der Arbeitsablauf gleicht der Abfolge, welche am Anfang des Kap. 4.3 beschrieben wurde. Die Gerätetransportkosten werden anteilig auf die A20 und A250 aufgeteilt. Der Baustellenbereich ist über die Neckartalstraße (L1100) erreichbar. Der Spundwandverbau wird an drei Seiten abgeschnitten, während die Seite zur angrenzenden Landesstraße unberührt bleibt. Nach schrittweisem Baugrubenaushub werden Gurtung und horizontale Steifen angebracht.

#### **Achse 250/251 – Pfeiler am westl. Neckarufer**

Bei A250/251 werden zwei Spundwandverbauten hergestellt. Diese sind erforderlich, da durch den stark schwankenden Grundwasserspiegel, welcher durch den nahegelegenen Fluss Neckar beeinflusst wird, eine geböschte Baugrube mit Wasserhaltung einen größeren Arbeitsaufwand darstellt. Die Kosten des Gerätetransports sowie die Zufahrt zu diesem Baustellenabschnitt sind wie zuvor bei A20 beschrieben. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.3 beschrieben wurde, werden beide Spundwandverbauten ohne Gurtungen und Aussteifungen ausgeführt. Auf die Herstellung der Baugrubensohle wird verzichtet. Um die Zugänglichkeit des Bohrgeräts für die nachträgliche Herstellung der Bohrpfähle zu ermöglichen, werden die Spundwandverbauten jeweils an drei Seiten abgeschnitten.

#### **Achse 260/261 – Pfeiler auf der Neckarinsel**

Auf der Neckarinsel bei A260/261 wird im Vergleich zu den restlichen Achsen der flächenmäßig größte Spundwandverbau hergestellt. Unter Absprache mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtssamt Stuttgart (WSV) wird der, an der Uferböschung angrenzende, Teil der Spundwände für den späteren Neckarausbau verbleiben. Die Spundwände quer zur Uferböschung werden nach Abschluss aller Bauphasen gezogen. Der An- und Abtransport der Baustoffe und Baugeräte erfolgt über den Wasserweg mittels Krafruder und Ponton sowie Krafruder und Schute für den Erdaushub (siehe Kap. 5.2). Der Ponton wird zusätzlich als Arbeitsebene zum Einbringen der Spundwand am westlichen Neckarinselufer verwendet. Für diese Transportmethode sind an den Ufern der Neckarinsel und des Festlandes Anlandungsstellen herzustellen. Diese Errichtungskosten sind Teil der Baustelleneinrichtung und werden daher nicht im Leistungsverzeichnis zur Herstellung des Spundwandverbauts angeführt. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.3 beschrieben wurde, wird auf das Abtragen des Oberbodens, das Aufschottern der Arbeitsebene und das Herstellen der Baugrubensohle verzichtet. Zusätzlich wird dieser Spundwandverbau mit Gurtungen und GEWI-Ankerstäben, vom westlichen zum östlichen Ufer gespannt, ausgeführt. Eine Wasserhaltung durch Leerbohrungen wurde nach den Spundwandarbeiten im Zuge der Bohrpfahlherstellung hergestellt.



### **Achse 270/271 – Pfeiler am östl. Neckarufer**

Bei A270/271 werden zwei Spundwandverbauten hergestellt. Die Zufahrt zu dieser Achse erfolgt über die Kanalstraße (L1101). Besonders sind die engen Platzverhältnisse durch die angrenzende Landesstraße, die das Rangieren mit Großbaumaschinen erschweren. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.3 beschrieben wurde, wird auf das Abtragen des Oberbodens und das Aufschottern der Arbeitsebene verzichtet, da der vorhandene Untergrund durch seine Vornutzung bereits ausreichend verdichtet ist. Von der Herstellung der Baugrubensohle wird ebenfalls abgesehen. Beide Spundwandverbauten werden auf der Höhe der Geländeoberkante abgeschnitten und mit Gurtungen und horizontalen Steifen ausgestattet.

## **4.4 Bohrpfähle**

In Kap. 3.4.3 wurde die Herstellung der Bohrpfahlgründungen beschrieben. Die für die Kostenanalyse relevanten Massen wurden in Tab. 3.6 angeführt. Die Leistungsverzeichnisse zur Herstellung von Bohrpfählen sind in folgende Arbeitsschritte bzw. Unterpositionen gegliedert:

- Gerätetransport
- Arbeitsebene herstellen
- Bohrschablone herstellen (nur bei tangierender Bohrpfahlwand)
- Bohrpfähle herstellen
- Bohrgut entsorgen
- Pfahlköpfe abstemmen

Der Abtrag des Oberbodens wird bereits in den Leistungsverzeichnissen zur Herstellung der geböschten Baugruben bzw. der Spundwandverbauten berücksichtigt. Die Abweichungen von der oben erwähnten Arbeitsabfolge und die Besonderheiten der jeweiligen Achsen werden im Folgenden erläutert.

### **Achse 10 – westl. Widerlager**

Bei A10 wird eine tangierende Bohrpfahlwand aus 39 Pfählen hergestellt. Im Vergleich zu den anderen Achsen werden an dieser Achse am meisten Bohrmeter ausgeführt. Der Arbeitsablauf gleicht der Abfolge, welche oben beschrieben wurde. Der Gerätetransport erfolgt ausschließlich für diese Achse über eine angrenzende Gemeindestraße, da diese durch den Verlauf der Neckartalstraße (L1100) von den übrigen Achsen abgegrenzt ist.

### **Achse 90 – Vorlandpfeiler**

Bei A90 wird eine Tiefgründung aus sechs Einzelbohrpfählen hergestellt. Abweichend vom am Anfang des Kap. 4.4 beschriebenen Arbeitsablaufes wird auf die Herstellung einer Bohrschablone verzichtet. Der Gerätetransport für diesen Baustellenabschnitt im Vorlandbereich erfolgt über die Neckartalstraße (L1100). Die Transportkosten werden auf A90 und A250/251 aufgeteilt.

##### **Achse 250/251 – Pfeiler am westl. Neckarufer**

Bei A250/251 werden drei Tiefgründungen aus je sechs Einzelbohrpfählen hergestellt. Von der Herstellung einer Bohrschablone wird abgesehen. Ansonsten gleicht die Arbeitsabfolge jener, welche am Anfang des Kap. 4.4 beschrieben wurde. Die Kosten für den Gerätetransport werden anteilig auf A90 und A250/251 aufgeteilt. Die Baustellenzufahrt erfolgt, wie bei A90 beschrieben, über die Neckartalstraße (L1100).

##### **Achse 260/261 – Pfeiler auf der Neckarinsel**

Auch bei A260/261 werden drei Tiefgründungen aus je sechs Einzelbohrpfählen ausgeführt. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.4 beschrieben wurde, wird zusätzlich eine Wasserhaltung durch Leerbohrungen hergestellt. Der An- und Abtransport der Baugeräte und Baustoffe erfolgt über den Wasserweg mittels spezieller Wasserfahrzeuge (siehe Kap. 5.2).

##### **Achse 270/271 – Pfeiler am östl. Neckarufer**

Bei A270/271 werden ebenfalls drei Tiefgründungen aus je sechs Einzelbohrpfählen hergestellt. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.4 beschrieben wurde, wird auf das Aufschottern der Arbeitsebene verzichtet, da der vorhandene Untergrund durch seine Vornutzung bereits ausreichend verdichtet ist. Besonders sind bei dieser Achse die angrenzende Kanalstraße (L1101) und die dadurch engen Platzverhältnisse, die das Rangieren mit Großbaumaschinen einschränken. Die Gerätetransportkosten werden ausschließlich für diese Achse verrechnet.

##### **Achse 290 – östl. Widerlager**

Das östliche Widerlager bei A290 besteht aus insgesamt 26 Bohrpfählen, wobei diese als Einzelbohrpfähle und abschnittsweise als tangierende Bohrpfahlwand hergestellt werden. Abweichend vom Arbeitsablauf, welcher am Anfang des Kap. 4.4 beschrieben wurde, wird die Herstellung der Arbeitsebene in diesem Leistungsverzeichnis nicht berücksichtigt, da diese Leistung im Zuge des Taktkellerausbaus erfolgt. Die Gerätetransportkosten werden anteilig auf A290 und den Taktkeller aufgeteilt. Die Zufahrt zu beiden Baustellenabschnitten erfolgt direkt über die Autobahn A6.

##### **Taktkeller – Schwingfundamente**

Im Taktkeller werden acht Schwingfundamente hergestellt, welche jeweils auf zwei Einzelbohrpfählen gegründet sind (siehe Kap. 3.4.3). In diesem Leistungsverzeichnis wird, wie bei A290, auf die Herstellung der Arbeitsebene verzichtet. Die Transportkosten und Baustellenzufahrt sind mit A290 ident.

## **4.5 Auswertung der Leistungsverzeichnisse**

In diesem Kapitel werden die ermittelten Kosten aus den Leistungsverzeichnissen der betrachteten Bauverfahren aus Kap. 4.2, Kap. 4.3 und Kap. 4.4 zusammengefasst und grafisch dargestellt. Zuerst werden die Anteile der einzelnen Bauverfahren an den Gesamtkosten miteinander verglichen, anschließend wird jedes Bauverfahren einzeln betrachtet und die Kostenanteile für Personal, Gerät, Material, Nachunternehmen und Wasserfahrzeuge untersucht. Anhand der Resultate lassen sich die maßgebenden Kostenfaktoren ableiten und auf entsprechende Optimierungsmaßnahmen schlussfolgern.

### 4.5.1 Gesamtkosten

In Abb. 4.1 sind die Kostenanteile je Bauverfahren (geböschte Baugrube, Spundwandverbau und Bohrpfahlgründungen) von A10 bis zum Taktkeller auf der Abszisse aufgetragen. Die Ordinate gibt den Kostenanteil in Prozent bezogen auf die Gesamtkosten aller drei Tiefbauverfahren an. Vor allem an den Widerlagern (A10 und A290, Taktkeller) und um den Neckarinselbereich (A250/251, A260/261 und A270/271) entstehen mit 59 % der Großteil der Gesamtkosten, verursacht von den Spundwand- und Bohrpfahlarbeiten. Daher sollte vor allem an diesen Achsen bzw. Bereichen des Neckartalübergangs der Fokus auf die Kostenoptimierung bei der Herstellung des TBW 2 gelegt werden. Weiters zeigt der Vergleich der Kostenanteile je Achse für die geböschte Baugrube (1 %) und dem Spundwandverbau (4–13 %), dass die Herstellung einer geböschten Baugrube deutlich günstiger ist.

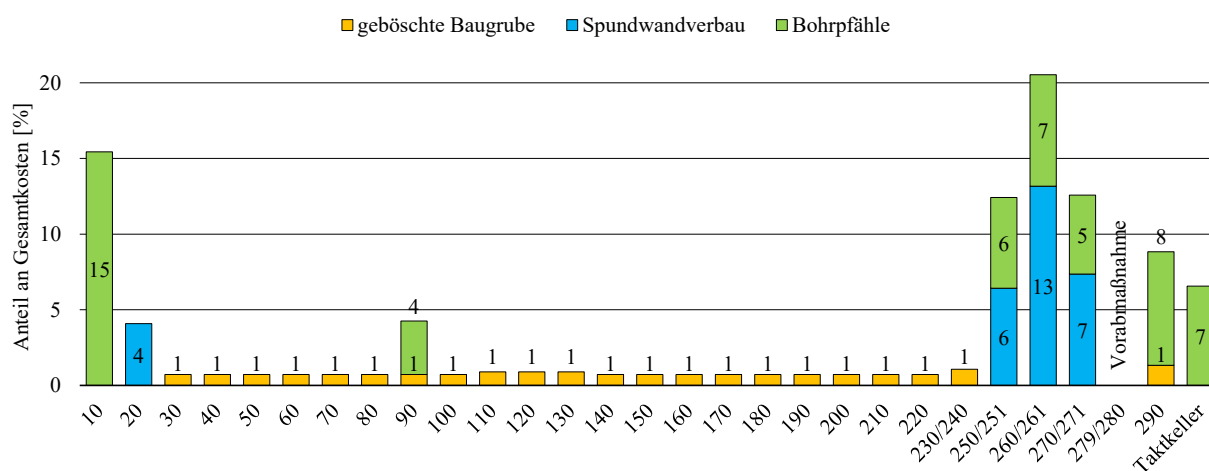


Abb. 4.1: Kostenanteile je Bauverfahren und Achse

In Abb. 4.2 sind die Kostenanteile der drei Bauverfahren gegenüber den Gesamtkosten aller betrachteten Tiefbauverfahren zusammengefasst dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass mit einem Anteil von 52 % an den Gesamtkosten die Herstellung von Bohrpfählen ein kostentreibender Faktor ist. Die Herstellung der Spundwandverbauten machen 31 % aus und der Anteil der geböschten Baugruben 17 %. Dieses Resultat zeigt, dass an erster Stelle das Verfahren der Bohrpfahlgründungen und an zweiter Stelle das Spundwandverfahren näher zu untersuchen sind.

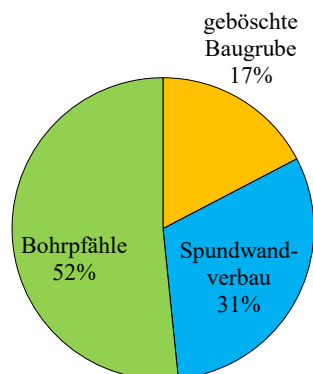


Abb. 4.2: Kostenanteile je Bauverfahren

In den Gesamtkosten sind die Gerätetransportkosten inkludiert. Dabei haben die einzelnen Achsen unterschiedliche Gerätetransportkosten, da sich bestimmte Achsen in einem gemeinsam zugänglichen Baustellenabschnitt befinden und die Transportkosten somit anteilig auf mehrere Achsen aufgeteilt werden. Hohe Transportkosten entstehen vor allem auf der Neckarinsel A260/261, wo der Transport über Wasser mit speziellen Wasserfahrzeugen erfolgt.

### 4.5.2 Kostenbestandteile der einzelnen Verfahren

In den folgenden Diagrammen in Abb. 4.3, Abb. 4.4 und Abb. 4.5 werden die Kosten der Verfahren einzeln betrachtet und in Personal-, Material, Geräte-, Nachunternehmen- und Wasserfahrzeugkosten unterteilt. Dabei werden die Transportkosten in den Gerätekosten berücksichtigt. Der Sondertransport mittels Wasserfahrzeuge wird als eigener Kostenbestandteil ausgliedert. Die Abszisse zeigt die Kostenanteile je Achse von A10 bis zum Taktkeller. Auf der Ordinate sind die beschriebenen Kostenbestandteile in Prozent bezogen auf die gesamten Kosten des jeweiligen Bauverfahrens (geböschte Baugrube, Spundwandverbau oder Bohrpfähle) angegeben.

#### Kosten der geböschten Baugruben

Abb. 4.3 zeigt die Kostenanteile für Personal, Geräte und Material jener Achsen, wo geböschte Baugruben hergestellt werden. Im Vorlandbereich von A30 bis A220 sind die summierten Kostenanteile je Achse von 4,3 % bis 5,4 % annähernd gleich hoch. Bei A230/240 (6,5 %) und A290 (7,3 %) sind die Kosten aufgrund des größeren Aushubvolumens höher. In Abb. 4.6 sind die Kosten für Personal, Geräte und Material aller geböschten Baugruben abgebildet. Den Großteil davon verursachen mit 51 % die Baugeräte, gefolgt vom Personal mit 43 %. Die Materialkosten spielen mit einem Anteil von 6 % eher eine untergeordnete Rolle.

#### Kosten der Spundwandverbauten

Abb. 4.4 zeigt die Kostenanteile für Personal, Geräte, Material, Nachunternehmen und Wasserfahrzeuge jener Achsen, wo Spundwandverbauten hergestellt werden. Im Vergleich zu den anderen Achsen sind die hohen Gesamtkosten bei A260/261 (42 %) auffallend. Diese sind auf die Größe des Spundwandverbautens und den Einsatz von Wasserfahrzeugen (9 %) für den An- und Abtransport von Baugeräten und Baustoffen zurückzuführen. Erhöhte Kosten entstehen auch für die Aussteifung mit Gurtung und GEWI-Ankern, welche von einem Nachunternehmen (6 %) eingebaut werden. In Abb. 4.7 sind die gesamten Kosten der Spundwandverbauten in Personal, Geräte, Material, Nachunternehmen und Wasserfahrzeuge aufgeteilt. Den Großteil der Kosten für die Herstellung der Spundwandverbauten verursachen mit 48 % das Material (Spundwandbohlen und Schotter) gefolgt von den Geräten mit 24 %. Die Kosten für Personal (9 %), Nachunternehmen (10 %) und Wasserfahrzeugen (9 %) sind annähernd gleich verteilt.

#### Kosten der Bohrpfahlgründungen

Abb. 4.5 zeigt die Kostenanteile Personal, Geräte, Material und Wasserfahrzeuge jener Achsen, wo Bohrpfähle hergestellt werden. Auffallend ist der hohe Gesamtkostenanteil beim westlichen Widerlager A10 (30 %), welcher verglichen mit den anderen Achsen auf die höhere Bohrmeteranzahl (vgl. Tab. 3.6) zurückzuführen ist. Bemerkbar ist auch, dass bei steigender Bohrmeteranzahl das Verhältnis zwischen dem Kostenanteil Material zu den Kostenanteilen Personal und Gerät ansteigt. So sind bei A90, A250/250 und A270, wo die durchschnittliche Bohrleistung bei unter 180 m liegt, die Materialkosten gleich oder geringer als die Personal- und Gerätekosten zusammen.

Mit zunehmender Bohrleistung, wie es bei A10, A290 und im Taktkeller der Fall ist, wird der Materialkostenanteil größer als die restlichen Anteile zusammen. Daher wird ab einer bestimmten Bohrmeteranzahl der Kostenanteil Material zum maßgebenden Kostenfaktor, während bei kleineren Bohrarbeiten Personal- und Gerätekosten zusammen verhältnismäßig ähnlich zu den Materialkosten sind. Eine Ausnahme ist A260/261, wo die Kosten für Wasserfahrzeuge hinzukommen. Werden diese Transportkosten den Gerätekosten angerechnet, so widersprechen sie dem erwähnten Verhaltensmuster über das Kostenverhältnis zwischen Material zu Personal und Geräte. In Abb. 4.8 sind die gesamten Kosten der Bohrpfahlgründungen in Personal, Geräte, Material und Wasserfahrzeuge aufgeteilt. Den Großteil der Kosten für die Herstellung der Bohrpfähle verursachen mit 49 % das Material (Beton, Bewehrungsstahl, Schotter) gefolgt von den Geräten mit 30 % und dem Personal mit 18 %. Der Anteil der Wasserfahrzeuge ist mit 3 % gering. Dieser Verteilung zufolge liegt bei der Herstellung von Bohrpfählen das größte Einsparungspotenzial bei den Materialkosten.

### Einheitskosten der Tiefbauverfahren

Anhand der Auswertung der Leistungsverzeichnisse wurden Einheitskosten für die untersuchten Tiefbauverfahren ermittelt. In Tab. 4.8 sind diese getrennt nach Verfahren dargestellt. Dabei sind die Kosten in Kostenanteile für Gerät, Personal, Material, Nachunternehmen und Wasserfahrzeuge gegliedert. Anhand dieser Einheitskosten können für die Errichtung des TBW 2 in nächster Bauphase des Neckartalübergangs und für zukünftige Tiefbaumaßnahmen auf Brückenbauprojekten mit ähnlichen Rahmenbedingungen (Inselbaustelle, Untergrundbeschaffenheit, ...) Kostenprognosen erstellt werden.

**Tab. 4.8:** Kostenanteile der angewandten Bauverfahren

	geböschte Baugrube		Spundwandverbau		Bohrpfähle	
	[€/m <sup>3</sup> ]	[%]	[€/m <sup>2</sup> ]	[%]	[€/lfm]	[%]
Gesamtmasse	24.895		3.185		1.751	
Personalkosten	7,17	43	20,10	9	123,84	18
Gerätekosten	8,45	51	55,62	24	210,12	30
Materialkosten	1,08	6	112,37	48	349,26	49
Nachunternehmerkosten	-	-	24,11	10	-	-
Wasserfahrzeugkosten	-	-	21,24	9	23,13	3
Gesamtkosten	16,70	100	233,44	100	706,35	100

#### 4 Kostenanalyse der angewandten Tiefbauverfahren

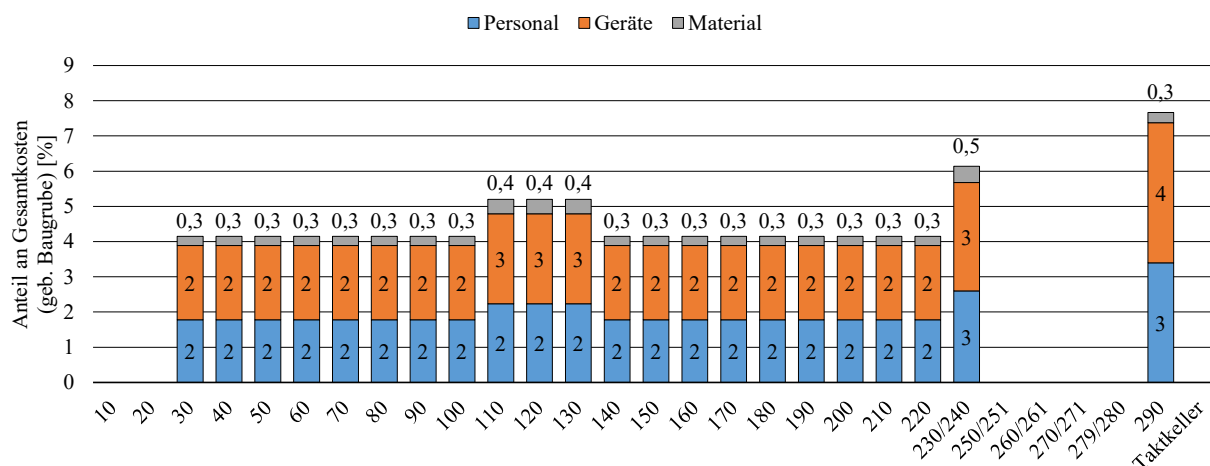


Abb. 4.3: Kostenanteile der geböschten Baugruben je Achse

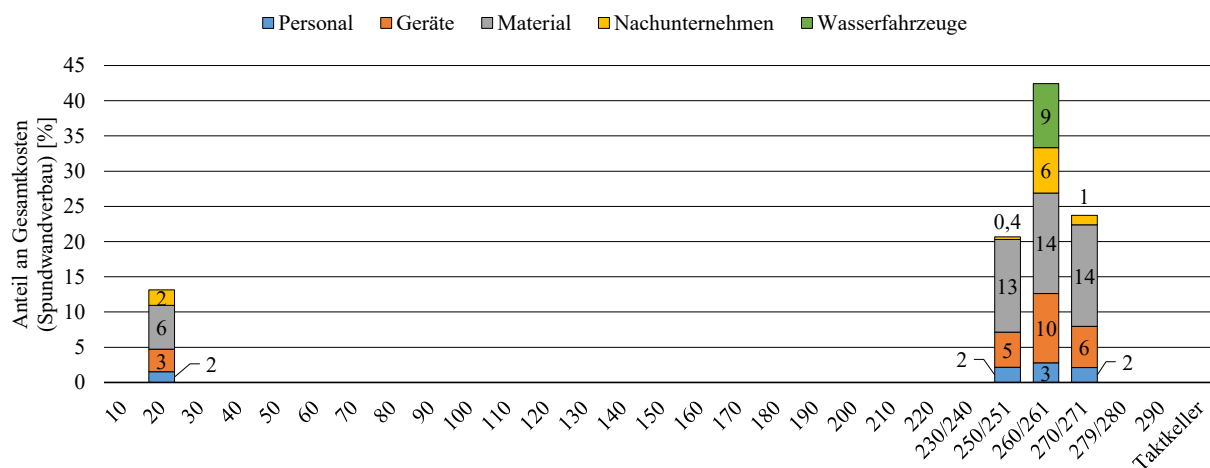


Abb. 4.4: Kostenanteile der Spundwandverbauten je Achse

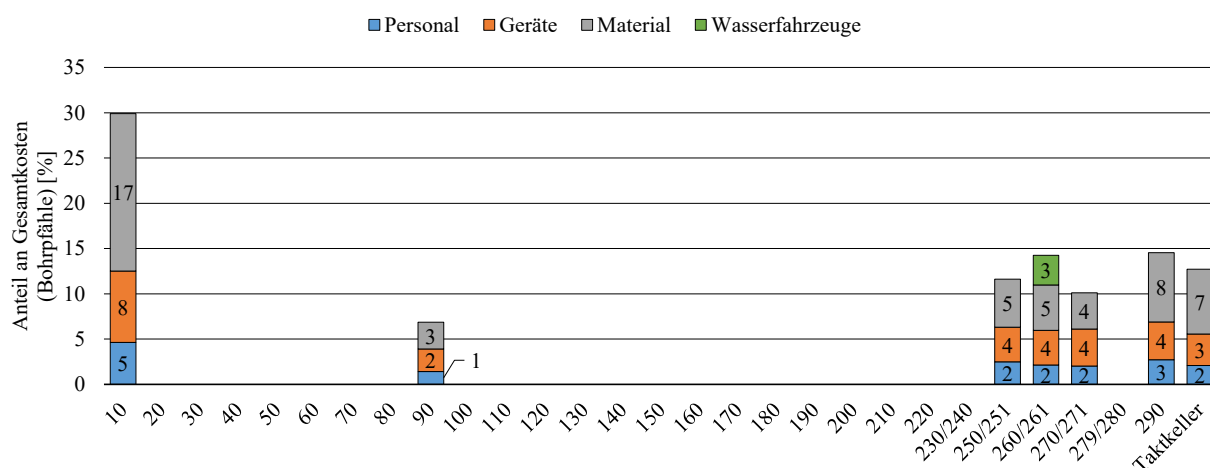


Abb. 4.5: Kostenanteile der Bohrpfahlgründungen je Achse

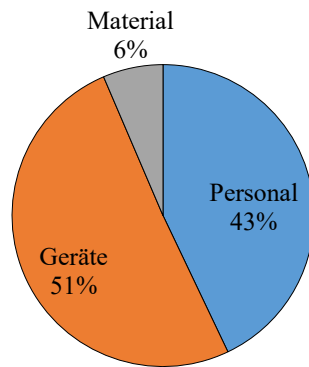


Abb. 4.6: Kostenanteile aller geböschten Baugruben

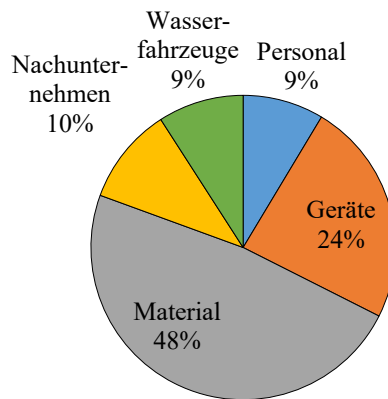


Abb. 4.7: Kostenanteile aller Spundwandverbauten

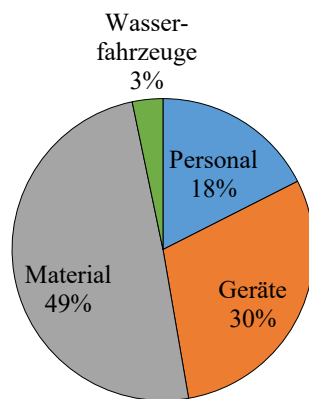


Abb. 4.8: Kostenanteile aller Bohrfahlgründungen

### 4.5.3 Optimierungsmaßnahmen

Bezugnehmend auf die Auswertung der Kosten aus Kap. 4.5.1 und Kap. 4.5.2 werden im Folgenden Kostenoptimierungsvorschläge gegeben. Dabei wird auf die maßgebenden Kosten eingegangen, das sind die Materialkosten bei den Spundwandverbauten und Bohrpfählen sowie Gerätekosten bei den geböschten Baugruben.

- **OPTIMIERUNG DER GESAMTKOSTEN DURCH ALTERNATIVE BAUVERFAHREN:**

Die Analyse der Kosten hat gezeigt, dass eine Baugrubensicherung als geböschte Baugrube ausgeführt deutlich günstiger ist als ein Spundwandverbau. Die Anschaffung von teurem Material wie Spundbohlen bleibt erspart. Eine Umstellung der Verfahren ist daher empfehlenswert. Die Voraussetzungen für die Herstellung einer geböschten Baugrube sind ausreichende Platzverhältnisse für die Ausbildung der Böschung, daher genügend Abstand zu benachbarten Verkehrsachsen oder Bauwerken. Allerdings kann bei Baugruben mit hoher Grundwasserbeanspruchung die Standsicherheit der Böschung beeinträchtigt werden. Hinzu kommt ein erhöhter Aufwand für die Wasserhaltung. Zusatzmaßnahmen zur Sicherung der Böschung schaffen Abhilfe wie z. B. das Aufbringen von Spritzbeton.

Weiters können bei der Herstellung von Tiefgründungen die Geräte- und Personalkosten reduziert werden, indem Bauverfahren eingesetzt werden, welche keine Förderung des Bodenmaterials erfordern, z. B. Verdrängungspfähle. In diesem Verfahren werden die Pfähle in den Untergrund eingerüttelt bzw. eingerammt und verdrängen dabei das Erdreich. Der Einsatz von Erdbaugeräten wie Lastkraftwagen und Hydraulikbagger sowie das dazugehörige Personal für die Verfuhr von Bodenmaterial entfällt.

- **OPTIMIERUNG DER MATERIALKOSTEN DURCH FELDVERSUCHE:**

Bei der Herstellung von Brückengründungen sind vor allem die Materialkosten in den Bereichen der Widerlager und Inselbaustelle maßgebend, daher kann durch die Reduzierung der Bohrpfahlmassen Kosten eingespart werden. So können nach [24] durch Pfahlprobelastungen im Vergleich zur rechnerischen Ermittlung ohne Versuche, höhere Pfahltragfähigkeiten nachgewiesen werden. Durch eine Mantelverpressung kann die Tragfähigkeit von Bohrpfählen um 30–40 % erhöht werden [24]. Eine Erhöhung der Tragfähigkeit hat eine Verringerung des Bohrpfahldurchmessers zur Folge, damit werden Beton- und Bewehrungsmassen reduziert und die Bohrleistung durch den geringeren Reibungswiderstand erhöht. Dem gegenüber stehen mögliche Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit bei Linienbauwerken wie Brücken. Bei variierenden Untergrundverhältnissen ist die Durchführung von Pfahlbelastungsversuchen an mehreren Stellen der Brücke erforderlich. Die dabei entstehenden Mehrkosten für die Planung und die Versuche führen erst ab einer bestimmten Bohrmeteranzahl zu Einsparungen in den Herstellungskosten.

- **OPTIMIERUNG DER MATERIALKOSTEN DURCH BAUSTOFFRECYCLING:**

Ein weiterer Bestandteil der kostentreibenden Materialkosten der Bohrpfahl- und Spundwandherstellung ist Schotter, welcher für die Arbeitsebenen verwendet wird. Im untersuchten Fallbeispiel Neckartalübergang wird für die Errichtung des TBW 1 in Seitenlage Schotter aus einem Steinbruch angekauft. Als Alternative für die Arbeiten in Endlage in Bauphase II (vgl. Kap. 3.2) ist zu untersuchen, ob es wirtschaftlicher ist, Abbruchmaterial der Bestandsbrücke vor Ort zu Betonbruchschotter zu verarbeiten und für die Herstellung der Arbeitsebenen zu verwenden. Dabei blieben die Lieferkosten und Materialkosten erspart, jedoch würden Kosten für die Herstellung mit der Brecheranlage entstehen. Der Einsatz dieser Methode zur Materialgewinnung ist durchaus denkbar, wenn nahegelegene



Betonbauwerke recycelt werden können und deren Materialeigenschaften den gewünschten Anforderungen entsprechen.

Weiters können die Materialkosten der Bohrpfähle reduziert werden, indem obenerwähntes Betonbruchmaterial als Zuschlagstoff für die Betonverarbeitung verwendet wird. Der Transport vom Bruchmaterial zum Betonmischwerk verursacht allerdings ebenfalls Kosten, welche das Einsparungspotenzial vermindern.

- **OPTIMIERUNG DER MATERIALKOSTEN DURCH MEHRFACHEINSATZ:**  
Die Materialkosten der Spundwandverbauten sind großteils vom Stahlpreis der Spundwandbohlen abhängig. Als bauausführendes Unternehmen kann auf diesen Marktpreis kaum Einfluss genommen werden. Jedoch kann darauf geachtet werden den Bauablauf zur Herstellung der Spundwände so abzustimmen, dass die Spundbohlen mehrmals verwendet werden. Um die Materialkosten zu reduzieren sind Baugruben möglichst rasch wiederzufüllen, um anschließend die Bohlen wiedergewinnen zu können. Diese können an anderen Baustellenabschnitten erneut eingesetzt werden, eine kostenintensive Neuanschaffung bliebe erspart.
- **OPTIMIERUNG DER MATERIALKOSTEN DURCH VERKAUF:**  
Eine weitere Möglichkeit die Materialkosten zu senken ist der Verkauf der Spundbohlen nach Gebrauch. Das Material kann als Wiederverwendbares verkauft werden, dabei ist der Verkaufswert abhängig vom Zustand der Bohlen. Ist eine Wiederverwendung nicht mehr möglich, da die Bohlen irreparabel beschädigt sind, können diese als Stahlschrott verkauft werden. Zu beachten ist, dass der Stahlschrottpreis über einen Zeitraum von zwölf Monaten betrachtet Preisschwankungen von bis zu 130 € pro Tonne unterliegen kann [47].
- **OPTIMIERUNG DER GERÄTEKOSTEN DURCH DATENNUTZUNG:**  
Vor allem bei der geböschten Baugrube spielen die Gerätekosten eine bedeutende Rolle. Das Einsparungspotenzial der Baugeräte ist von der Häufigkeit der notwendigen Reparaturen und dem Kraftstoffverbrauch abhängig. Die Anschaffung bzw. der Einsatz moderner Baugeräte mit einer Start-Stopp-Automatik reduziert den Dieserverbrauch. Ebenso können durch die Vernetzung und Nutzung von Gerätedaten Frühwarnsysteme eingerichtet werden, welche mit dem Gerät und der zuständigen Maschinenabteilung verbunden sind. Durch die Echtzeiterfassung und Datenauswertung in einer Datenzentrale kann auf eine rechtzeitige Wartung hingewiesen werden, um Folgeschäden durch verspätete Wartungsmaßnahmen zu verhindern. Dafür werden Daten über die Betriebsstunden, die zurückgelegten Kilometer und den Beladungszustand des Geräts genutzt. Auf das Potenzial der Datennutzung wird im Kap. 7.3 näher eingegangen.
- **OPTIMIERUNG DER GERÄTEKOSTEN DURCH LEISTUNGSFÄHIGERE GERÄTE:**  
Da die Gerätekosten auch von der Einsatzdauer abhängig sind, kann der Einsatz von Leistungsstärkeren Geräten bei Bohr- und Rammgerät oder die Erhöhung der Geräteanzahl bei Hydraulikbaggern zu einer Kostenersparnis führen. Mit steigender Leistungsfähigkeit geht eine Verkürzung der Arbeitszeit einher. In diesem Fallbeispiel wurde kein Variantenvergleich durchgeführt, für zukünftige Untersuchungen an Kostenoptimierungen von Tiefbauverfahren soll dieser Ansatz weitergeführt werden.



# Kapitel 5

## Erschwernisse im Tiefbau im Bereich des Neckartalübergangs

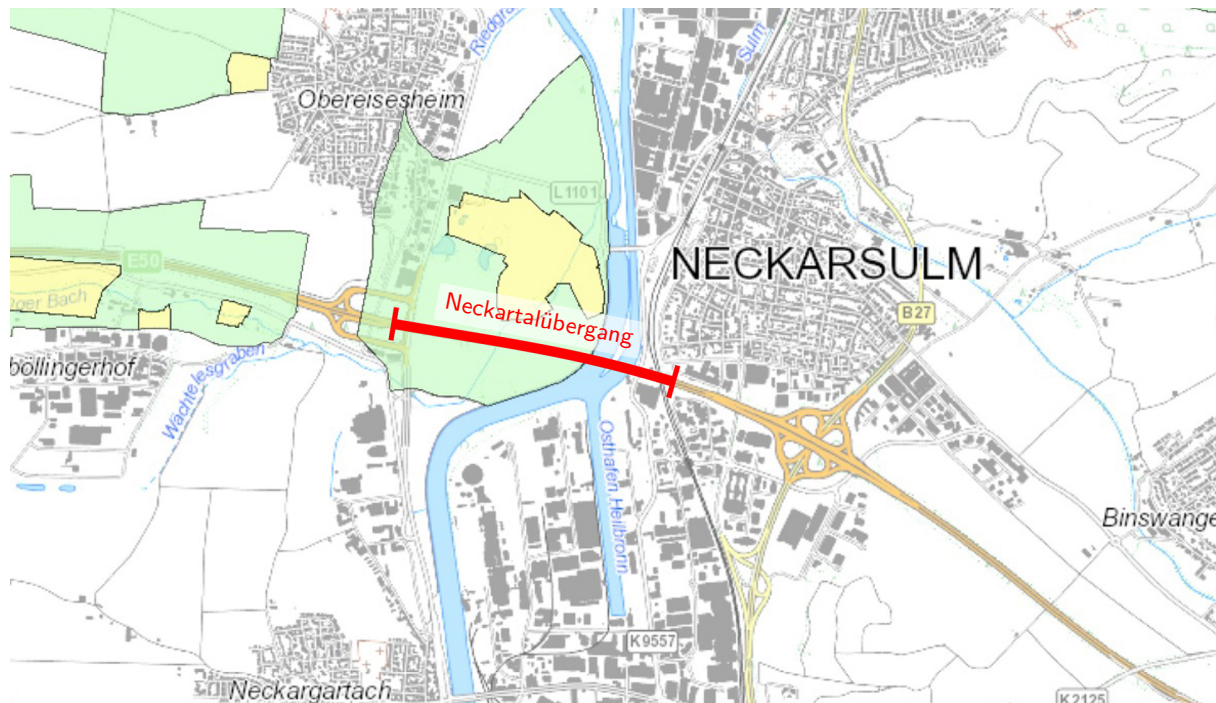
In diesem Kapitel werden auf einige Erschwernisse und Besonderheiten eingegangen, welche für die Tiefbauarbeiten des Neckartalübergangs charakteristisch sind. Es werden die Bereiche Umwelt- und Wasserschutz und ihre Bedeutung für die Bauausführung erläutert. Die speziellen Bedingungen für die Bauarbeiten auf der Neckarinsel werden beschrieben. Weiters wird auf die Problematik durch das Tiefgründen in Bereichen mit Altgründungen und Altablagerungen eingegangen. In weiterer Folge werden die gewonnen Erkenntnisse zur Erarbeitung von Entscheidungsmatrizen für Tiefbauverfahren herangezogen.

### 5.1 Umwelt- und Wasserschutz

Teilbereiche des Neckartalübergangs befinden sich in Wasserschutzgebieten, in denen spezielle Bestimmungen für die Bauausführung gelten. Die Rechtsgrundlage des Wasserschutzes wird im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt. Weiters ist in Deutschland beim Neu-, Um- und Ausbau von Straßen in Wasserschutzgebieten die Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten [48] anzuwenden. Wasserschutzgebiete sind von den Naturschutzgebieten und den anderen Schutzgebieten nach dem Bundesnaturschutzgesetz zu unterscheiden. Gebiete können zugleich Wasser- und Naturschutzgebiet sein, so wie es im Bereich um den Neckartalübergang der Fall ist. Folgende Wasserschutzgebiete werden nach dem WHG unterschieden:

- **Wasserschutzzone I – Fassungsbereich:**  
Diese Zone schützt die eigentliche Fassungsanlage (Brunnen) im Nahbereich und hat in der Regel einen Radius von mindestens 10 m.
- **Wasserschutzzone II – Engeres Schutzgebiet:**  
Vom Rand der engeren Schutzzone soll die Fließzeit zu den Brunnen mindestens 50 Tage betragen, um Trinkwasser vor bakteriellen Verunreinigungen zu schützen. Bei sehr günstigen Untergrundverhältnissen (z. B. gespannter Grundwasserspiegel) soll die Grenze mindestens 100 m Abstand von der Wasserfassung haben. Die Verletzung der Deckschicht ist verboten, deshalb gelten Nutzungsbeschränkungen unter anderem für Bebauung, Bodennutzung mit Verletzung der oberen Bodenschichten, Landwirtschaft und Umgang mit wassergefährdenden Stoffen.
- **Wasserschutzzone III – Weiteres Schutzgebiet:**  
Diese Zone umfasst das gesamte Einzugsgebiet der geschützten Wasserfassung. Hier gelten Verbote bzw. Nutzungseinschränkungen für das Ablagern von Schutt, Abfallstoffen und wassergefährdenden Stoffen.

Abb. 5.1 zeigt einen Kartenausschnitt der Wasserschutz-zonen im Bereich des Neckartalübergangs. Dabei befinden sich der Baustellenbereich der Vorlandbrücke in der Schutzzone II (gelb) und Schutzzone III (grün). Der Bereich der Neckarbrücke ist in keinem Wasserschutzgebiet.



**Abb. 5.1:** Karte der Wasserschutz-zonen im Bereich des Neckartalübergangs [30]

### 5.1.1 Zuständigkeiten

Ausführende Unternehmen brauchen eine wasserrechtliche Genehmigung, wenn sie Grundwasser fördern, Abwasser in ein Gewässer ableiten, Stoffe in das Grundwasser einleiten oder ein Gewässer zu einem anderen bestimmten Zweck nutzen wollen. Die Genehmigung legt Art und Maß der Nutzung fest und kann mit Auflagen oder einer Befristung verknüpft sein. Eine wasserrechtliche Genehmigung ist abhängig vom Projektstandort bei der zuständigen Wasserbehörde einzuholen. Einer Wasserbehörde obliegt in Deutschland der Vollzug des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) des Bundes und der Wassergesetze (WG) der Länder. Der Aufbau des Behördenapparats ist je nach Bundesland zwei- oder dreistufig gegliedert.

In Baden-Württemberg (Projektstandort) sind nach dem Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG BW) folgende Organe für wasserrechtliche Angelegenheiten zuständig:

- Oberste Wasserbehörde:  
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft
- Obere Wasserbehörden:  
Vier Regierungspräsidien (Stuttgart, Karlsruhe, Freiburg und Tübingen)
- Untere Wasserbehörden:  
Land- und Stadtkreise

Die Regierungspräsidien sind daneben nach WG BW als besondere Wasserbehörden, sogenannte Flussgebietsbehörden, für die großflächige Bewirtschaftung der Flussgebiete Alpenrhein/Bodensee, Hochrhein, Oberrhein, Neckar, Main und Donau zuständig.

Für die wasserrechtlichen Angelegenheiten des Neckartalübergangs sind das Regierungspräsidium Stuttgart und der Landkreis Heilbronn zuständig.

In Österreich sind vergleichbare Behörden nach dem Wasserrechtsgesetz die Wasserrechtsbehörden vertreten durch die Bezirksverwaltungsbehörden der jeweiligen Länder und das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.

### 5.1.2 Maßnahmen

Für die Herstellung von geböschten Baugruben, Spundwandverbauten und Pfahlgründungen sind wasserrechtliche Genehmigungen notwendig, die bei der Unteren Wasserbehörde (Landkreis Heilbronn) von den ausführenden Unternehmen zu beantragen ist. Die zuständige Behörde legt in deren schriftlichen Zustimmung Maßnahmen zur Erhaltung der Wasserschutzgebiete fest. Erst nach Erhalt der wasserrechtlichen Erlaubnis kann mit dem jeweiligen Bauvorhaben (geböschte Baugrube, Spundwandverbau, Bohrpfähle) im Wasserschutzgebiet begonnen werden. Im Folgenden werden die Gründe einer solchen Genehmigung je nach Bauverfahren aufgelistet:

- Geböschte Baugrube:
  - Einleitung von Oberflächenwasser aus den Pumpsümpfen in das angrenzende Gewässer (Neckar, Böllinger Bach)
- Spundwandverbau:
  - Eindringen der Spundwandbohlen in den Grundwasserleiter
  - Belastung des Grundwassers durch Eisenoxidation
  - Behinderung des Grundwasserflusses durch den geschlossenen Spundwandverbau
- Bohrpfähle:
  - Eindringen der Bohrpfähle in den Grundwasserleiter
  - Einleiten des Bohrwassers in das angrenzende Gewässer (Neckar, Böllinger Bach)

Zufolge der Unteren Wasserbehörde (Landkreis Heilbronn) gelten folgende Bedingungen für die Bauarbeiten im Bereich des Neckartalübergangs in der Wasserschutzzone III:

- Allgemein zur Bauausführung:
  - Es dürfen nur Baustoffe verwendet werden, deren Eignung zur Verwendung in Wasserschutzgebieten nachgewiesen ist.
  - Im Überschwemmungsgebiet dürfen keine dauerhaften Logistikflächen angelegt werden, sofern sie nicht kurzfristig freigeräumt werden können.
- Geböschte Baugrube:
  - Beim Bauvorhaben darf nur unbelastetes Bodenmaterial verwendet werden. Fremdmaterial ist vor dem Einbau von einem Bodengutachter auf seine Eignung und eventuelle Belastung mit Schadstoffen zu kontrollieren.

- Wird beim Ausheben der Baugrube verunreinigtes Erdreich festgestellt, ist das Landratsamt Heilbronn zu benachrichtigen. Der verunreinigte Boden ist entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen [54, 55] zu entsorgen (vgl. Kap. 5.4).
- Spundwandverbau:
  - Die Bitumenabdichtung an den Spundwandbohlen muss eine Eignung zur Verwendung in Wasserschutzgebieten haben.
  - Wird beim Ausheben der Baugrube verunreinigtes Erdreich festgestellt, ist das Landratsamt Heilbronn zu benachrichtigen. Der verunreinigte Boden ist entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen [54, 55] zu entsorgen (vgl. Kap. 5.4).
- Bohrpfähle:
  - Die Bohrarbeiten sind durch ein externes Ingenieurbüro zu überwachen.
  - Zur Herstellung der Pfähle ist chromatarmere Pfahlbeton zu verwenden.
  - Eine Verbindung der durchteuften Grundwasserstockwerke darf zu keiner Zeit erfolgen.
  - Anfallendes Bohrwasser ist vor Einleitung in das Gewässer über ein Absetzbecken und eine Neutralisationsanlage zu reinigen.

### 5.2 Beschränkte Zugänglichkeit zur Neckarinsel

Auf der Neckarinsel (A260) sind ein Spundwandverbau und Bohrpfahlgründungen herzustellen. Der geplante Spundwandverbau wird mittels einer Spundwandramme hergestellt. Anschließend werden für die Herstellung der Bohrpfähle ein Drehbohrgerät benötigt. Die Zugänglichkeit zur Neckarinsel ist allerdings begrenzt. Die einzige Zufahrt geht über einen schmalen Weg, den sich Passanten, Radfahrer und Mitarbeiter des angrenzenden Wehrs teilen. Mit Zustimmung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) darf dieser Weg für das Bauvorhaben zur Errichtung des Neckartalübergangs mit Baufahrzeugen bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5 to befahren werden. Aufgrund der Größe und Gewichts der Großbaumaschinen und der Einhaltung des Lichtraumes über den Neckar kommt daher nur ein Gerätetransport mit einem Ponton und einem Krafruder in Frage. Ein Ponton ist ein Wasserfahrzeug, das sich durch variable Stützen auf dem Gewässeruntergrund abstützen kann und daher vom Wasserstand unabhängig ist. Besonders ist seine Transportfähigkeit von Schwerlasten wie Baugeräte. Pontons verfügen über keinen eigenen Antrieb und benötigen daher zusätzlich ein Antriebsschiff, ein sogenanntes „Krafruder“. Eine Wasserüberfahrt ist zeit- und kostenintensiv und erfordert die Abstimmung sowie Einwilligung der WSV. Zusätzlich sind auf der westlichen Uferseite des Neckararmes sowie auf der Neckarinsel eine Pontonanlandungsstelle zu errichten. Die Planung dieser Anlandungsstellen erfolgt ebenfalls in Abstimmung mit der WSV. Nach Abschluss der Arbeiten sind diese zurückzubauen. Abb. 5.2 zeigt die Anlieferungssituation der Geräte und Baustoffe auf der Neckarinsel.

Des Weiteren werden der Ponton und das Krafruder für den Transport der Pfahlbewehrung auf die Neckarinsel genutzt (Abb. 5.3, li.). Die Anlieferung des Schotters zur Herstellung der Arbeitsebenen für die Baugeräte und der Abtransport von Bohrschlamm und Aushubmaterial erfolgt ebenfalls über den Wasserweg. Hierzu werden eine Schute und ein Krafruder eingesetzt (Abb. 5.3, re.). Eine Schute ist ein antriebsloses Transportschiff mit eigenem Ladungsraum für Schüttgut. Die Einsatzzeiten sind mit der WSV abzustimmen. Im Vergleich zu den herkömmlichen

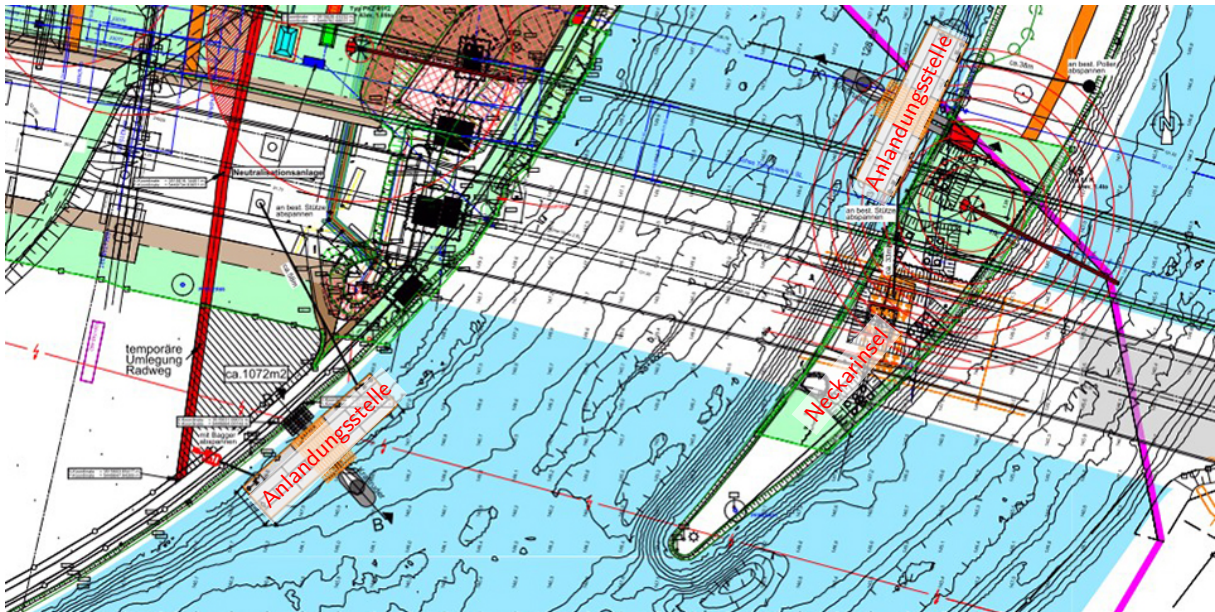


Abb. 5.2: Baustellensituation Neckarinsel [22]

Transportmethoden mit Lastkraftfahrzeugen bedeutet der Einsatz von Krafruder, Ponton und Schute einen erhöhten Kostenaufwand.



Abb. 5.3: Anlieferung mit Wasserfahrzeugen [22]

Der zur Herstellung der Bohrpfähle notwendige Beton wird von der Bestandsbrücke über eine Druckleitung auf die Neckarinsel geleitet. Die Betondruckleitung wird auf einem dafür errichteten Traggerüst befestigt. Die Betoneinlaufstelle befindet sich dabei auf dem überbreiten Standstreifen auf den schwächeren Außenteilen der bestehenden Brücke. Aus diesem Grund können während der Betonentladung nicht mehrere Betonmischfahrzeuge gleichzeitig an dieser Stelle stehen. Während ein Fahrzeug entlädt müssen weitere Mischfahrzeuge vor der Brücke auf der Höhe des östlichen Widerlagers (A290) warten. Weiters müssen für die Platzierung des Einfülltrichters einige Lärmschutzwandelemente der Bestandsbrücke entfernt werden. In Abb. 5.4 ist die Anlieferung des Betons über die Druckleitung zu sehen.



Abb. 5.4: Betonanlieferung über Druckleitung [22]

### 5.3 Gründungen im Alt-Bestand

Nach der Fertigstellung des TBW 1 und der Verkehrsumlegung wird die Bestandsbrücke zurückgebaut. Dabei verbleibt die ursprüngliche Tiefgründung aus Ortbetonrammpfählen im Untergrund. Für die bevorstehenden Tiefgründungen zur Errichtung des TBW 2 in Endlage entstehen dadurch besonders schwierige Untergrundverhältnisse.

Der Ausschnitt aus dem Übersichtsplan der Neckarbrücke in Abb. 5.5 zeigt im Grundriss die Lage der Gründungen von TBW 2 in schwarzer und blauer Farbe sowie die Gründungen der Bestandsbrücke in oranger Farbe. Jene Bestandsgründungen, welche mit den Neugründungen kollidieren sind in roter Farbe dargestellt.

Bei folgenden Achsen kommt es zu Überschneidungen der Brückenachsen:

- A230/240 – Trennpfeiler
- A250 – Pfeiler am westl. Neckarufer
- A260 – Pfeiler auf der Neckarinsel
- A270 – Pfeiler am östl. Neckarufer

In den Überschneidungsbereichen ist es notwendig das Bohrgerät mit entsprechendem Bohrwerkzeug auszustatten, welche den bewehrten Pfahlbeton lösen können. Geeignete Werkzeuge sind Kernrohr, Rollenmeißel, Multihammer oder das Verfahren vom verrohrten Imlochhammerbohren. Das Kernrohr mit Hartmetallstiftzähnen eignet sich besonders zum Durchkernen von bewehrtem Beton. Beim Imlochhammerbohren wird an einem Bohrgestänge am unteren Ende ein Hammer geführt, dieser dringt schlagend und gleichzeitig rotierend in den Baugrund ein. Ein Druckluftspülstrom fördert das gelöste Bohrgut nach oben. Das Verfahren findet bei hartem bis sehr hartem Gestein Anwendung.



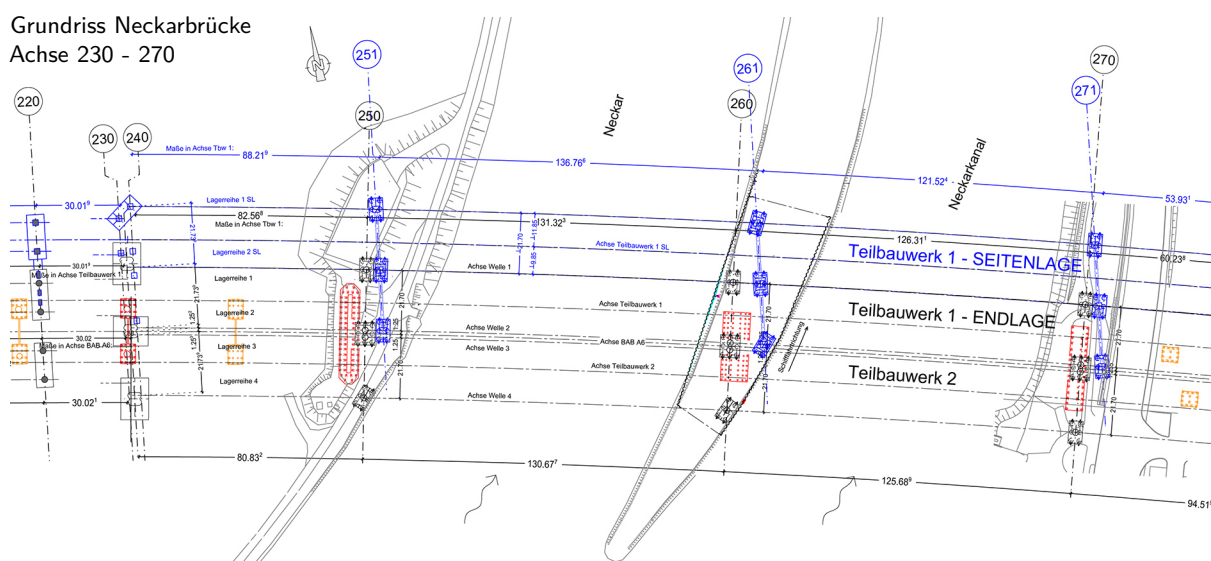


Abb. 5.5: Übersicht Alt-Bestand (modifiziert nach [26])

## 5.4 Kontaminierter Boden – Altablagerungen

Der Bereich um A280 im Osten des Neckartalübergangs ist Teil einer als „Altablagerung“ bezeichneten Verfüllung eines ehemaligen Neckar-Altarms sowie eines Altstandortes einer ehemaligen Autoverwertung. Zusätzlich besteht für diesen Bereich Kampfmittelverdacht. Bei A280 werden in Seitenlage keine der untersuchten Bauverfahren (geböschte Baugrube, Spundwandverbau, Bohrpfähle) ausgeführt. Allerdings hat diese Altlastenproblematik eine Relevanz für die Tiefbaumaßnahmen in Endlage in der weiteren Bauphase des Neckartalübergangs. Generell soll dieses Kapitel zeigen, welche Untersuchungen und Maßnahmen in solch einem Fall notwendig sind.

Für die Untersuchungen über den Grad der Wiederverwendbarkeit des Bodens werden zwei Regelwerke herangezogen:

- Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums Baden-Württemberg für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial [54]
- Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) [55]

### 5.4.1 Bodenuntersuchungen

Es wurden insgesamt 39 Bodenproben für abfalltechnische chemische Untersuchung entnommen:

- 11 Bodenproben aus Schürfen mit Hydraulikbagger
- 28 Bodenproben aus Kampfmittelsondierungen mit einem Schneckenbohrgerät

Dabei wurden die Schürfe und Kampfmittelsondierungen vor Ort abfalltechnisch begleitet, beprobt und die Schichtenfolgen aufgenommen. Anschließend wurden die Bodenproben jeweils in einem chemischen Labor untersucht.

Die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen und die daraus resultierenden abfalltechnischen Einstufungen hinsichtlich Verwertbarkeit (Z-Klassen) nach [54] bzw. Deponierbarkeit (Deponieklassen) nach [55] werden in Tab. 5.1 zusammenfassend beschrieben.

**Tab. 5.1:** Verteilung der Einstufungen für Verwertbarkeit und Deponierbarkeit

Z-Qualität	Anzahl Proben	Anteil	Deponieklasse	Anzahl Proben	Anteil
Z 0/ Z 0*	3	8 %	DK 0	0	0 %
Z 1.1	2	5 %	DK I	1	3 %
Z 1.2	12	31 %	DK II	19	49 %
Z 2	15	38 %	DK III	15	38 %
> Z 2	7	18 %	> DK III	4	10 %
Summe	39	100 %	Summe	39	100 %

Für den weitaus überwiegenden Teil (87 %) der untersuchten 39 Bodenproben resultieren erhöhte Einstufungen nach den Z-Klassen [54]: Z 1.2 (31 %), Z 2 (38 %) sowie größer Z 2 (18 %). Zwar sind Böden mit Belastungen bis Z 2 in technischen Bauwerken noch verwertbar, in der Praxis ist dies aber meist nicht realisierbar, da keine Verwertungsmaßnahmen zur Verfügung stehen, die das Material aus einer Altablagerung annehmen würden. Somit bleibt nur die Entsorgung auf einer Deponie. Für diesen Fall sind die Einstufungen nach Deponieverordnung [55] maßgebend. Diese ergeben in fast allen Bodenproben aufgrund des erhöhten Anteils an organischen Stoffen Einstufungen in die höheren Deponieklassen DK II (49 %), DK III (38 %) sowie größer DK III (10 %).

#### 5.4.2 Maßnahmen

Zusammenfassend wird festgehalten, ist die Verwertbarkeit von gelösten Bodenmaterial nicht möglich, so bleibt nur die Entsorgung auf Deponien. Die Entsorgung von kontaminiertem Boden ist kostenintensiv und steigt mit zunehmender Deponieklasse. Daher ist im Zuge von Tiefbauarbeiten gefördertes Bodenmaterial in Bereichen mit Altlastbestand, wenn möglich, durch eine geeignete Wahl von Bauverfahren zu vermeiden.

Im Falle von Aushubarbeiten ist es trotz umfangreicher Voruntersuchungen notwendig, den Aushub chargenweise in „Haufwerken“ zu je 500 m<sup>3</sup> zwischenzulagern und die endgültige abfalltechnische Einstufung und den konkreten Entsorgungsweg festzulegen. In Deponien wird belastetes Bodenmaterial ausschließlich in solchen Haufwerkdeklarationen angenommen. Daher sind die Haufwerksbildungen, Zwischenlagerungen sowie der Zeitaufwand für die baubegleitenden Beprobungen und Deklarationsuntersuchungen bei der Planung des Bauablaufs und der Bauzeiten zu berücksichtigen.

# Kapitel 6

## Auswahlhilfen für Tiefbauverfahren

Anhand der Resultate aus der Kostenanalyse und der Optimierungsmaßnahmen in Kap. 4 sowie den Untersuchungen über die Konfliktstellen beim Neckartalübergang in Kap. 5 können Kriterien für die Entwicklung von Entscheidungsmatrizen definiert werden. Die Verfahren zur Herstellung von Baugrubensicherungen und Pfahlgründungen weisen sowohl baubetriebliche als auch ökonomische Vor- und Nachteile auf. In diesem Kapitel werden technische, ökologische und ökonomische Parameter der einzelnen Verfahren verglichen und bewertet. Zum Schluss wird jeweils eine Entscheidungsmatrix erarbeitet, welche dem Benutzer bei der Entscheidungsfindung unterstützen soll.

Die betrachteten Verfahren werden, sofern nicht anders angegeben, auf Grundlage von [37] bewertet. Zur Erstellung einer Entscheidungsmatrix dient auch die Arbeit von [19] als Vorlage.

### 6.1 Entscheidungsmatrix für Baugrubensicherungen

Zur Erstellung der Entscheidungsmatrix für Baugrubensicherungsverfahren werden folgende Verfahren verglichen:

- geböschte Baugrube
- Trägerbohlwand
- Spundwand
- aufgelöste Bohrpfahlwand
- tangierende Bohrpfahlwand
- überschnittene Bohrpfahlwand
- Schlitzwand
- Injektionswand
- Frostwand

### 6.1.1 Technische Parameter

Damit ein Verfahren anwendbar ist müssen gewisse technische Voraussetzungen für vordefinierte Einsatzbedingungen erfüllt sein. In Tab. 6.1 werden technische Parameter angeführt, welche vor der Auswahl des Verfahrens erhoben werden müssen, um die Verfahrensauswahl einzugrenzen. Die Erläuterungen der einzelnen Parameter folgen im Anschluss der Tab. 6.1.

**Tab. 6.1:** Technische Parameter

Baugrubensicherungsverfahren	Technische Parameter											
	Bodeneignung Ton	Bodeneignung Schluff	Bodeneignung Sand	Bodeneignung Kies	Bodeneignung Fels	Einsatzdauer	Durchlässigkeit	Nachgiebigkeit	Einsatztiefe	Bodenförderung	Anpassung	Flexibilität
geböschte Baugrube	+	+	+	+	+	T	-	-	-	-	+	+
Trägerbohlwand (Rammen)	~	~	+	+	-	T	-	~	~	-	-	+ ~
Trägerbohlwand (Einrütteln)	~	~	+	+	-	T	-	~	~	-	-	+ ~
Trägerbohlwand (Einstellen)	+	+	+	+	-	P	-	~	~	-	-	+ ~
Spundwand (Rammen)	~	~	+	+	-	T/P	+	+ ~	+ ~	-	-	-
Spundwand (Einrütteln)	~	~	+	+	-	T/P	+	+ ~	+ ~	-	-	-
Spundwand (Einpressen)	- ~	- ~	~	~	-	T/P	+	+ ~	+ ~	-	-	-
Spundwand (Einstellen)	+	+	+	+	~	P	+	+ ~	+ ~	-	-	-
aufgelöste Bohrpfahlwand	+	+	+	+	~	P	-	+	+	+	~	-
tangierende Bohrpfahlwand	+	+	+	+	~	P	-	+	+	+	~	-
überschnittene Bohrpfahlwand	+	+	+	+	~	P	+	+	+	+	~	+ ~
Schlitzwand (Greifer)	+	+	+	+	-	P	+	+	+	+	~	~
Schlitzwand (Fräsen)	+	+	+	+	~	P	+	+	+	+	~	~
Injektionswand (DSV)	~	+	+	+	-	P	+	+	+ ~	-	-	+ ~
Frostwand*	+	+	~	~	-	T	+	+	+	-	~	-

\*abhängig von Bodenwassergehalt und Strömungsgeschwindigkeit

#### Bodeneignung

Die Eignung der Verfahren für bestimmte Bodenarten ist im Detail nicht zu ermitteln, da die Bodenbeschaffenheit von mehreren Faktoren wie Kornform, Korngröße, Lagerungsdichte, Wassergehalt, Strömungsgeschwindigkeit usw. abhängig ist. Die Bodeneignung in Tab. 6.1 stellt nur grobe Richtwerte dar. Die tatsächliche Eignung für Ramm-, Bohr- oder Fräsarbeiten muss durch entsprechende Bodenerkundungen im Vorhinein untersucht werden. Es werden folgende Bewertungsgrade unterschieden:

- (+) geeignet
- (~) bedingt geeignet
- (- ~) bedingt – nicht geeignet
- (-) nicht geeignet

### **Einsatzdauer**

Anhand der Einsatzdauer können Baugrubensicherungsverfahren für temporäre oder für dauerhafte Baumaßnahmen eingesetzt werden. Dabei können permanente Maßnahmen im Bauwerk integriert sein. In Tab. 6.1 werden diese Verfahren in Bezug auf die Einsatzdauer unterschieden in permanente (P) oder temporäre (T) Baugrubensicherungen.

### **Durchlässigkeit**

In Bereichen, wo ein hoher Grundwasserandrang zu erwarten ist, kann es notwendig sein Baugruben wasserundurchlässig auszuführen oder zumindest so dicht, dass eine offene Wasserhaltung mit geringem Aufwand möglich ist. In Fallbeispiel Neckartalübergang trifft das auf die Brücken Gründungen nahe des Fluss Neckars zu. In Tab. 6.1 wird der Grad der Durchlässigkeit unterschieden in: [2]

- (+) wasserundurchlässig
- (–) wasserdurchlässig

### **Nachgiebigkeit**

Die Baugrubenverbauten werden in Tab. 6.1 nach ihrer Nachgiebigkeit unterschieden. Ein nachgiebiger Verbau kann dort angewendet werden, wo unmittelbar neben der Baugrube geringfügig auftretende Verformungen keine Schäden an benachbarten Bauwerken hervorrufen können. Dabei kann durch Anker und Steifen der Verformung der Wände entgegengewirkt werden. Hingegen ist die Standhaftigkeit der geböschten Baugrube stark vom Boden und den Witterungseinflüssen abhängig. Die Nachgiebigkeit wird im Folgenden beurteilt mit:

- (+) verformungsarm
- (+ ~) gering nachgiebig, verbesserbar durch Zusatzmaßnahmen (z. B. Anker, Steifen)
- (~) nachgiebig, verbesserbar durch Zusatzmaßnahmen (z. B. Anker, Steifen)
- (–) sehr nachgiebig

### **Einsatztiefe**

Die optimale Einsatztiefe ist bei Baugrubensicherungen von den Untergrundverhältnissen abhängig. Durch verschiedene Einbringmethoden wie Bohren, Einrammen, Einrütteln oder Einpressen können unterschiedliche Tiefen erreicht werden (vgl. 6.2). Bei Spundwänden gibt es eine Einschränkung der maximalen Verbautiefe wegen beschränkter Transportlänge und Gerätehöhe. Die Einsatztiefe von Frostwänden ist abhängig von den Verfahren zur Herstellung der Bohrlöcher. In Tab. 6.1 werden die optimalen Einbindetiefen bewertet mit:

- (+) sehr tiefer Einsatzbereich
- (+ ~) tiefer Einsatzbereich
- (~) ausreichend tiefer Einsatzbereich
- (–) gering tiefer Einsatzbereich

**Tab. 6.2:** Technischer Parameter – Einsatztiefe

Baugrubensicherungsverfahren	Einsatztiefe
geböschte Baugrube	<6 m
Trägerbohlwand	<15 m
Spundwand	<30 m
aufgelöste Bohrpfahlwand [1]	<40 m
tangierende Bohrpfahlwand [1]	<40 m
überschnittene Bohrpfahlwand [1]	<40 m
Schlitzwand	<100 m
Injektionswand (DSV)	<30 m
Frostwand	<40 m

### Bodenförderung

In Bereichen mit kontaminiertem Untergrund kann die Entsorgung von zusätzlichem Aushub bzw. Bohrgut zur Herstellung von Baugrubensicherungen zu erheblichen Kosten führen. Daher ist in solchen Fällen eine Bodenförderung, wenn möglich, zu vermeiden. In Tab. 6.1 wird zwischen Verfahren mit Bodenförderung (–) und ohne Bodenförderung (+) differenziert.

### Anpassung an veränderte Bodenverhältnisse

Durch Bodenerkundungsmaßnahmen können Findlinge, hartes Gestein oder alte Bauwerksrückstände im Untergrund ausfindig gemacht werden. In manchen Fällen kommt es vor, dass trotz Voruntersuchungen unerwartet auf Hindernisse gestoßen wird. In solchen Situationen muss durch die Anpassung der Geräteausstattung rasch reagiert werden, um einen eventuellen Stillstand des Baufortschrittes zu vermeiden. In Tab. 6.1 werden die Anpassungsfähigkeiten der Verfahren in Bezug auf veränderte Bodenverhältnisse wie folgt bewertet:

- (+) Anpassung ohne nennenswerten Aufwand
- (~) Anpassung mit Aufwand
- (–) Anpassung nicht möglich

### Flexibilität bei Leitungskreuzungen

Es kommt vor, dass in Baugruben Hindernisse wie kreuzende Leitungen oder Fundamentvorsprünge umgangen werden müssen. In Tab. 6.1 sind die Anpassungsfähigkeiten der Baugrubensicherungen bei vorhandenen Hindernissen angegeben mit:

- (+) flexibel ohne nennenswerten Aufwand
- (+ ~) flexibel mit geringem Aufwand
- (~) flexibel mit Aufwand (z. B. Umbau des Werkzeugs)
- (–) keine Anpassung möglich

### 6.1.2 Ökologische Parameter

Ebenso bedeutend wie die technischen Einsatzgrenzen sind die Einflüsse der Bauverfahren auf die Umwelt. Dabei werden folgende ökologischen Parameter in Tab. 6.3 unterschieden:

- Platzbedarf
- Erschütterung und Lärm
- Grundwasser

**Tab. 6.3:** Ökologische & ökonomische Parameter

Baugrubensicherungsverfahren	Ökolog. Parameter				Ökonom. Parameter			
	Platzbedarf Sicherungsdicke	Platzbedarf BE-Fläche	Erschütterung	Lärm	Grundwasser Materialeintrag	Grundwasser- strömung	Baukosten	Bauzeit
geböschte Baugrube	-	+	+	+ ~	+	+	+	+
Trägerbohlwand (Rammen)	+ ~	+ ~	-	-	~	+	+ ~	+ ~
Trägerbohlwand (Einrütteln)	+ ~	+ ~	~	~	~	-	+ ~	+ ~
Trägerbohlwand (Einstellen)	+ ~	+ ~	+	+	~	-	~	~
Spundwand (Rammen)	+	+ ~	-	-	~	-	+ ~	+ ~
Spundwand (Einrütteln)	+	+ ~	~	~	~	-	+ ~	+ ~
Spundwand (Einpressen)	+	+ ~	+	+	~	-	+ ~	~
Spundwand (Einstellen)	+	+ ~	+	+	~	-	~	~
aufgelöste Bohrpfahlwand	+ ~	~	+	+ ~	-	-	~	~
tangierende Bohrpfahlwand	~	~	+	+ ~	-	-	- ~	-
überschnittene Bohrpfahlwand	~	~	+	+ ~	-	-	- ~	-
Schlitzwand (Greifer)	~	~	-	- ~	-	-	- ~	-
Schlitzwand (Fräsen)	~	~	+	+	-	-	- ~	- ~
Injektionswand (DSV)	-	-	+	+ ~	-	-	- ~	~
Frostwand	-	-	+	+ ~	~	-	-	-

#### Platzbedarf

Unter dem Platzbedarf wird zum einen die Sicherungsdicke (Böschungsbreite, Spundwandstärke, Bohrpfahldurchmesser usw.) verstanden und zum anderen die erforderliche Baustelleneinrichtungsflächen (BE-Flächen) für Materialvorhaltung und -anlieferung. In Tab. 6.3 wird der erforderliche Platzbedarf, der zur Herstellung benötigt wird, wie folgt beurteilt:

- (+) geringer Bedarf
- (+ ~) geringer – mittlerer Bedarf
- (~) mittlerer Bedarf
- (-) großer Bedarf

### **Erschütterung und Lärm**

Ein weiteres Kriterium ist die Empfindlichkeit der Umgebung auf die Belastung durch Erschütterungen und Lärm bei der Herstellung der Baugrubensicherung. Vor allem in Wohn- und Naturschutzgebieten ist auf geringe Lärmemissionen zu achten. Durch Erschütterungen bei nahegelegenen Bauwerken besteht die Gefahr von ungewollten Setzungen oder Beschädigungen am benachbarten Bauwerk. In Tab. 6.3 werden die betrachteten Verfahren nach ihrer Beeinträchtigung auf die Umwelt durch Erschütterungen und Lärm wie folgt bewertet:

- (+) geringe Beeinträchtigung
- (+ ~) geringe – mittlere Beeinträchtigung
- (~) mittlere Beeinträchtigung
- (– ~) mittlere – große Beeinträchtigung
- (–) große Beeinträchtigung

### **Grundwasser**

Dieser Parameter beurteilt den Einfluss der Verfahren auf das Grundwasser, vor allem beim Eintrag von Baustoffen wie Stahl, Beton und Abdichtungsmaterial in den Untergrund. Für dieses Kriterium wird vorausgesetzt, dass die Sicherungsmaßnahmen in das Grundwasser einbinden. Dieser Parameter ist besonders relevant in Wasserschutzgebieten, wo für die Anwendung der unterschiedlichen Sicherungsmaßnahmen eine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich sein kann. In Tab. 6.3 werden zwei Unterkategorien unterschieden: der Einfluss durch Materialeintrag und der Einfluss der Durchlässigkeit auf die Grundwasserströmung. Der erforderliche Aufwand für die Wasserhaltung wird nicht berücksichtigt, da dieser bereits mit der Beurteilung des technischen Parameters Durchlässigkeit einhergeht. Die Bewertung in Tab. 6.3 hat in Bezug auf die Beeinträchtigung auf das Grundwasser folgende Bedeutung:

- (+) geringe Beeinträchtigung
- (~) mittlere Beeinträchtigung
- (–) große Beeinträchtigung

### **6.1.3 Ökonomische Parameter**

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Verfahren unterliegt einer großen Schwankungsbreite, da sie von vielen Faktoren wie z. B. Materialkosten, Zugänglichkeit der Baustelle, tatsächliche Untergrundverhältnisse abhängig ist. Die relevanten Parameter in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit sind (vgl. Tab. 6.3):

- Baukosten
- Bauzeit

#### **Baukosten**

Im Vorhinein gestaltet sich die Ermittlung der Herstellungskosten für ein Projekt oftmals schwierig, daher müssen meist Richt- und Erfahrungswerte angesetzt werden. In den Herstellungskosten



werden die Kosten für Personal, Gerät und Material berücksichtigt. Die Kosten für die Aufrechterhaltung der Sicherung fließen ebenfalls in die Bewertung ein. Eine genaue Kostenermittlung zur Beurteilung der Verfahren wurde nicht durchgeführt. Die Kosten in der Tab. 6.3 werden im Verhältnis zueinander angegeben, dabei wird wie folgt unterschieden:

- (+) sehr niedrige Kosten
- (+ ~) niedrige Kosten
- (~) mittelhohe Kosten
- (- ~) hohe Kosten
- (-) sehr hohe Kosten

### **Bauzeit**

Ein weiterer wirtschaftlicher Einflussfaktor stellt die voraussichtliche Bauzeit dar. Für die Bewertung werden ebenfalls die verfahrensbedingten Erhärungszeiten der eingesetzten Baustoffe berücksichtigt. Denn erst nach ausreichender Erhärtung erhält die jeweilige Sicherungsmaßnahme ihre vollwertige statische Wirkung. In Tab 6.3 werden die Verfahren zur Baugrubensicherung auf die voraussichtlich zu erwartenden Bauzeiten im Verhältnis zueinander wie folgt urteilt:

- (+) sehr kurze Bauzeit
- (+ ~) kurze Bauzeit
- (~) mittellange Bauzeit
- (-) lange Bauzeit

### **6.1.4 Ausschluss- und Zielerfüllungskriterien**

Ein weiterer Schritt zur Erstellung der Entscheidungsmatrix ist die Unterteilung der technischen, ökologischen und ökonomischen Parameter aus Kap. 6.1.1, Kap. 6.1.2 und Kap. 6.1.3 in Ausschluss- und Zielerfüllungskriterien.

#### **Ausschlusskriterien**

Unter einem Ausschlusskriterium werden jene Parameter verstanden, welche bei Nichterfüllung der Anforderungen automatisch zum Ausscheiden des Verfahrens führen. So können z. B. Verfahren, die für bestimmte Bodenschichten nicht geeignet sind, bereits ausgeschieden werden.

Einige der Parameter sind nicht eindeutig als Ausschlusskriterium identifizierbar. Diese sind von der entscheidenden Person abhängig. So kann z. B. durch die Vorgabe, dass eine verformungsarme Baugrubensicherung herzustellen ist, alle Verfahren die biegeweich sind aus der engeren Auswahl ausscheiden. Ist die Nachgiebigkeit der Verfahren der zu entscheidenden Person allerdings gleichgültig, so wird dieses Kriterium automatisch zu einem Zielerfüllungskriterium. Der Zielerfüllungsgrad fließt in die Entscheidungsmatrix ein. So hat z. B. ein biegesteifes System eine höhere Zielerfüllung, als ein biegeweiches System.

Daher werden zwischen fixen und variablen Ausschlusskriterien unterschieden. Fixe Ausschlusskriterien geben eine eindeutige Aussage über die Eignung des Verfahrens für das vorliegende Problem und können von der entscheidenden Person nicht beeinflusst werden. Während bei

variablen Ausschlusskriterien die entscheidende Person die Wahl hat, ob ein Kriterium ein Ausschlusskriterium oder ein Kriterium mit einem Zielerfüllungsgrad darstellt.

In Tab. 6.4 sind die technischen, ökologischen und ökonomischen Parameter nach ihrer Art des Ausschlusskriteriums angegeben.

**Tab. 6.4:** Art der Ausschlusskriterien

Parameter	Ausschlusskriterium
<b>Technische Parameter</b>	
Bodeneignung	fix
Einsatzdauer	fix
Durchlässigkeit	variabel
Nachgiebigkeit	variabel
Einsatztiefe	variabel
Bodenförderung	variabel
Anpassung Bodenverhältnisse	variabel
Flexibilität Leitungskreuzungen	variabel
<b>Ökologische Parameter</b>	
Platzbedarf	variabel
Erschütterung / Lärm	variabel
Grundwasser	variabel
<b>Ökonomische Parameter</b>	
Baukosten	variabel
Bauzeit	variabel

### Zielerfüllungskriterien

Alle variablen Ausschlusskriterien aus dem letzten Abschnitt können Zielerfüllungskriterien sein, sofern keine Einschränkung definiert wurden. Ein Zielkriterium ist nicht nur mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten, sondern enthält Zwischenwerte, welche angeben inwieweit ein Verfahren für das vorliegende Bauvorhaben geeignet ist. Um die unterschiedlichen Zielerfüllungskriterien in der Entscheidungsmatrix vergleichen zu können wird ein Bewertungssystem nach dem Schulnotensystem eingeführt. Der Wert „1“ steht für eine hohe Zielerfüllung während der Wert „5“ eine geringe Zielerfüllung bedeutet. Die Umstellung vom ursprünglichen Wertungssystem mit den Symbolen von (-) bis (+) auf das Schulnotensystem wird anhand des Bewertungsschemas in Tab. 6.5 gezeigt. Im Falle von mehreren Wertungen bei einem Parameter bzw. Zielerfüllungskriterium wird der arithmetische Mittelwert gebildet. So sind z. B. beim ökologischen Parameter Grundwasser für die Trägerbohlwand in Tab. 6.3 zwei Wertungen angegeben, (~) und (+). Diese sind gleichbedeutend mit den Schulnoten „3“ und „1“. Sie ergeben im gesamten für das Zielerfüllungskriterium Grundwasser den arithmetischen Mittelwert „2“.

### 6.1.5 Fallbeispiel

Um die praktische Anwendung der Entscheidungsmatrix für Baugrubensicherungen zu verdeutlichen, wird diese anhand des Fallbeispiels Neckartalübergang erklärt. Der allgemeine Ablauf zur Entscheidungsfindung läuft wie folgt ab:

**Tab. 6.5:** Bewertungsschema für die Zielerfüllungskriterien

Gering	Zielerfüllungsgrad			
		Mittel		Hoch
5	4	3	2	1
–	– ~	~	+ ~	+

1. Bestandserhebung (Bodenschichten, Grundwasser, Flächenverfügbarkeit usw.)
2. Festlegung von Ausschlusskriterien führt zum Ausschluss ungeeigneter Verfahren
3. Bewertung der Zielerfüllungskriterien führen zu einer Rangfolge der übriggebliebenen Verfahren
4. Benutzerdefinierte Gewichtung der Parameter führt zu einer geänderten Rangfolge
5. Finale Entscheidung

### 1. Schritt – Bestandserhebung

Im konkreten Fall des Neckartalübergangs bei A270/271 ist eine temporäre Baugrubensicherung für die Brückenfundamente herzustellen. Die Brückenfundamentunterkante ist, gemessen von der Geländeoberkante, 5 m tief. Aufgrund der unmittelbaren Nähe zum Fluss Neckar ist mit Grundwasserandrang und -schwankungen zu rechnen. Der Bemessungsgrundwasserspiegel übersteigt die Fundamentunterkante um 1 m. Die Baustellenfläche an dieser Brückenachse ist im Westen durch den Verlauf des Neckars und im Osten durch die Kanalstraße (L1101) eingegrenzt. Die zu errichtende Baugrube ist 2 m vom Fundament der Bestandsbrücke entfernt. Das angrenzende Bauwerk ist allerdings als nicht setzungsempfindlich einzustufen, da es auf Pfählen in tieferliegenden Bodenschichten einbindet. Es verlaufen keine querenden Leitungen innerhalb der Baugrube. Unterhalb der zu errichtenden Brücken Gründung sind Auffüllungen, eine geringe Mächtigkeit von Auenlehm und Neckarkies anzutreffen (vgl. Abb. 3.7). Die Rammfähigkeit der Böden ist in Tab. 3.3 ersichtlich.

### 2. Schritt – Festlegung von Ausschlusskriterien

Zufolge der Bestandserhebung werden in diesem Beispiel die Parameter Bodeneignung und Einsatzdauer als fixe Ausschlusskriterien gewählt. Die übrigen Parameter stellen Zielerfüllungskriterien dar.

Der Untergrund bei A270/271 besteht hauptsächlich aus Auffüllungen und in tieferen Bereichen aus dem Neckarkies. Der darunterliegende Lettenkeuper wirkt als Grundwasserstauer. Nach Tab. 3.3 ist die Eindringfähigkeit der maßgebenden Bodenschichten von mittel bis schwer einzustufen. Es sind daher vorwiegend Verfahren, welche in Kies eingesetzt werden können in der engeren Auswahl.

Alle Bauwerke in Seitenlage des Neckartalübergangs sind nach Bauende rückzubauen, daher temporär auszuführen, nur in Ausnahmefällen (Bohrpfähle) wird davon abgesehen. In diesen Bereich fällt auch die zu erstellende Baugrubensicherung bei A270/271.

Zufolge der beiden Ausschlusskriterien bleiben folgende Baugrubensicherungsverfahren übrig:

- geböschte Baugrube

- Trägerbohlwand (Rammen)
- Trägerbohlwand (Einrütteln)
- Spundwand (Rammen)
- Spundwand (Einrütteln)
- Frostwand

### 3. Schritt – Bewertung der Zielerfüllungskriterien in Entscheidungsmatrix

Mit den noch übrig gebliebenen Verfahren wird nun die Entscheidungsmatrix in Tab. 6.6 befüllt. Alle zuvor erwähnten Parameter, ausgenommen der Ausschlusskriterien, werden nach dem Schulnotensystem bewertet (siehe Kap. 6.1.4). Aus den einzelnen Parametern werden jeweils die arithmetischen Mittelwerte für die drei Parameter Technik, Ökologie und Ökonomie gebildet. In weiterer Folge wird aus diesen drei Werten ebenfalls das arithmetische Mittel als Gesamtnote berechnet. Dabei steht die beste Note, also „1“, für das geeignetste Verfahren zur Erfüllung der vorliegenden Zielerforderungen.

Die Gewichtung wird in diesem Schritt noch vernachlässigt. Erkennbar ist dies an den verhältnismäßig gleichverteilten Faktoren in der Spalte „benutzerdefinierte Gewichtung“ in Tab. 6.6.

**Tab. 6.6:** Entscheidungsmatrix Baugrubensicherung ohne Gewichtung

Parameter	Baugrubensicherungsverfahren						
	benutzerdefinierte Gewichtung	geböschte Baugrube	Trägerbohlwand (Rammen)	Trägerbohlwand (Einrütteln)	Spundwand (Rammen)	Spundwand (Einrütteln)	Frostwand (Bohren)
<b>Technische Parameter</b>							
Durchlässigkeit	0,17	5	5	5	1	1	1
Nachgiebigkeit	0,17	5	3	3	2	2	1
Einsatztiefe	0,17	5	3	3	2	2	1
Bodenförderung	0,17	1	1	1	1	1	5
Anpassung Bodenverhältnisse	0,17	1	5	5	5	5	3
Flexibilität Leitungskreuzung	0,17	1	2	2	5	5	5
<b>Ökologische Parameter</b>							
Platzbedarf	0,33	3	2	2	1,5	1,5	5
Erschütterung / Lärm	0,33	1,5	5	3	5	3	1,5
Grundwasser	0,33	1	2	2	4	4	4
<b>Ökonomische Parameter</b>							
Baukosten	0,50	1	2	2	2	2	5
Bauzeit	0,50	1	2	2	2	2	5
Technische Parameter	$\bar{x}$	3,00	3,17	3,17	2,67	2,67	2,67
Ökologische Parameter	$\bar{x}$	1,83	3,00	2,33	3,50	2,83	3,50
Ökonomische Parameter	$\bar{x}$	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00
Gesamt	$\bar{x}$	1,94	2,7	2,50	2,72	2,50	3,72

Aus der Entscheidungsmatrix (Tab. 6.6) ergibt sich eine Rangfolge aus der hervorgeht, dass die geböschte Baugrube das geeignetste Verfahren darstellt.

#### **4. Schritt – Gewichtete Bewertung der Zielerfüllungskriterien in Entscheidungsmatrix**

In der Praxis kann es vorkommen, dass der Entscheider die Kriterien so beeinflussen möchte, wie es seiner Erfahrung nach, am besten ist. So werden die einzelnen Zielerfüllungskriterien mit einem eigenen Prozentsatz multipliziert und erhalten dadurch eine Gewichtung. Allerdings ist mit dem Einsatz einer Gewichtung Vorsicht geboten, da die Entscheidungsmatrix durch die eigenen Interessen manipuliert und für Dritte ein nicht optimales Verfahren vorgeschlagen werden kann.

In folgendem Beispiel wird angenommen, dass der Auftraggeber aufgrund der angrenzenden Kanalstraße (L1101) einen größeren Wert auf eine verformungsarme Baugrubensicherung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Verkehrs legt. Daher ist bei Platznot das Ausweichen auf den fließenden Verkehr möglichst zu vermeiden und ein platzsparendes Verfahren zu bevorzugen. In der Entscheidungsmatrix in Tab. 6.7 wird die Gewichtung der Parameter Durchlässigkeit, Nachgiebigkeit und Platzbedarf bewusst erhöht, während die übrigen Parameter anteilig reduziert werden. Die Gewichtung der drei Grundparameter Technik, Ökologie und Ökonomie bleiben untereinander jeweils unverändert.

#### **5. Schritt – Finale Entscheidung**

Unter Berücksichtigung der benutzerdefinierten Gewichtung resultiert eine neue Rangfolge. In Tab. 6.8 ist die neue Reihung und die Veränderung zur ursprünglichen Reihung dargestellt.

Trotz der Vorschläge beider Entscheidungsmatrizen (Tab. 6.6 und Tab. 6.7) liegt es letztendlich im Ermessen des Entscheiders, ob dieser das vorgeschlagene Baugrubensicherungsverfahren einsetzen möchte.

**Tab. 6.7:** Entscheidungsmatrix Baugrubensicherung mit Gewichtung

Parameter	Baugrubensicherungsverfahren						
	benutzerdefinierte Gewichtung	geböschte Baugrube	Trägerbohlwand (Rammen)	Trägerbohlwand (Einrütteln)	Spundwand (Rammen)	Spundwand (Einrütteln)	Frostwand (Bohren)
<b>Technische Parameter</b>							
Durchlässigkeit	0,30	5	5	5	1	1	1
Nachgiebigkeit	0,30	5	3	3	2	2	1
Einsattiefe	0,10	5	3	3	2	2	1
Bodenförderung	0,10	1	1	1	1	1	5
Anpassung Bodenverhältnisse	0,10	1	5	5	5	5	3
Flexibilität Leitungskreuzung	0,10	1	2	2	5	5	5
<b>Ökologische Parameter</b>							
Platzbedarf	0,50	3	2	2	1,5	1,5	5
Erschütterung / Lärm	0,25	1,5	5	3	5	3	1,5
Grundwasser	0,25	1	2	2	4	4	4
<b>Ökonomische Parameter</b>							
Baukosten	0,50	1	2	2	2	2	5
Bauzeit	0,50	1	2	2	2	2	5
Technische Parameter	$\bar{x}$	3,80	3,50	3,50	2,20	2,20	2,00
	0,33	1,27	1,17	1,17	0,73	0,73	0,67
Ökologische Parameter	$\bar{x}$	2,13	2,75	2,25	3,00	2,50	3,88
	0,33	0,71	0,92	0,75	1,00	0,83	1,29
Ökonomische Parameter	$\bar{x}$	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	5,00
	0,33	0,33	0,67	0,67	0,67	0,67	1,67
Gesamt	$\Sigma$	2,31	2,75	2,58	2,40	2,23	3,63

**Tab. 6.8:** Vergleich der Rangfolgen

	Rang		$\Delta$	Baugrubensicherungsverfahren
	mit Gew.	ohne Gew.		
1.	2.	+1		Spundwand (Einrütteln)
2.	1.	-1		geböschte Baugrube
3.	4.	+1		Spundwand (Rammen)
4.	2.	-2		Trägerbohlwand (Einrütteln)
5.	4.	-1		Trägerbohlwand (Rammen)
6.	6.	$\pm 0$		Frostwand

## 6.2 Entscheidungsmatrix für Pfahlgründungen

Das Prinzip zur Erarbeitung einer Entscheidungsmatrix für Pfahlgründungen gleicht dem Vorgang wie in Kap. 6.1 beschrieben. Klein- und Mikropfähle werden nicht berücksichtigt. Sämtliche Werte und Vergleiche in diesem Abschnitt basieren auf der Grundlage von [1, 37]. Die Ausarbeitung dieser Auswahlhilfe umfasst den Vergleich folgender Verfahren:

- Ortbetonrammpfahl (Franki)
- Vollverdrängungspfahl (Atlas)
- Bohrfahl (Greiferverfahren)
- Bohrfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)
- Bohrfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)
- Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)
- Doppelkopf-Drehbohrpfahl

### 6.2.1 Technische Parameter

Damit ein Verfahren angewendet werden kann müssen die technischen Einsatzgrenzen eingehalten werden. Ein wesentlicher Parameter ist die Tragfähigkeit der Pfähle, welche jedoch nicht global beurteilt werden kann. Sie muss im Vorhinein abhängig von den Bodenverhältnissen bestimmt werden. Dasselbe gilt für die Bestimmung von Pfahldurchmesser und -anzahl. Aus diesem Grund wird die Tragfähigkeit als Kriterium zur Erarbeitung der Entscheidungsmatrix nicht verwendet. Die relevanten technischen Parameter, um die Verfahrensauswahl einzugrenzen sind in Tab. 6.9 angegeben.

**Tab. 6.9:** Technische Parameter

Pfahlgründungsverfahren	Technische Parameter						
	Pfahldurchmesser	Einsatztiefe	Pfahlneigung	Anpassung an Bodenverhältnisse	Bodenförderung	Bodenverdichtung	Pfahlfußverbreiterung
Ortbetonrammpfahl (Franki)	~	~	+	-	-	+	+
Vollverdrängungspfahl (Atlas)	-	- ~	+	-	-	+ ~	-
Bohrpfahl (Greiferverfahren)	+	+ ~	-	+	+	-	-
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	+	+ ~	+	+	+	-	+
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	+	+	-	+	+	-	+
Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	~	-	+	-	~	~	-
Doppelkopf-Drehbohrpfahl	-	-	+	-	~	-	-

### Pfahldurchmesser

Die unterschiedlichen Pfahldurchmesser je Verfahren werden in Tab. 6.10 angegeben. Dieser werden anhand der realisierbaren Größenauswahl in Tab. 6.9 wie folgt beurteilt:

- (+) große Auswahlmöglichkeit
- (~) mittelmäßige Auswahlmöglichkeit
- (-) kleine Auswahlmöglichkeit

**Tab. 6.10:** Technischer Parameter – Pfahldurchmesser

Pfahlgründungsverfahren	Durchmesser
Ortbetonrammpfahl (Franki)	300–700 mm
Vollverdrängungspfahl (Atlas)	420–610 mm
Bohrpfahl (Greiferverfahren)	620–2.000 mm
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	600–1.800 mm
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	400–2.400 mm
Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	400–1.000 mm
Doppelkopf-Drehbohrpfahl	620–880 mm

### Einsatztiefe

In Tab. 6.11 werden ausschließlich die Einsatztiefen angegeben, in welchen die jeweiligen Verfahren nach Herstellerangaben noch wirtschaftlich sind. Daher sind auch größere Tiefen mit höherem Aufwand technisch realisierbar. Die Bewertung in Tab. 6.9 sieht wie folgt aus:

- (+) sehr tiefer Einsatzbereich
- (+ ~) tiefer Einsatzbereich
- (~) mitteltiefer Einsatzbereich
- (- ~) beschränkter Einsatzbereich
- (-) sehr beschränkter Einsatzbereich

**Tab. 6.11:** Technischer Parameter – Einsatztiefe

Pfahlgründungsverfahren	Einsatztiefe
Ortbetonrammpfahl (Franki)	40 m
Vollverdrängungspfahl (Atlas)	34 m
Bohrpfahl (Greiferverfahren)	50 m
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	40 m
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	60 m
Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	18 m
Doppelkopf-Drehbohrpfahl	15 m



### **Pfahlneigung**

Je nach Art der Belastung und gewünschten Lastabtragung kann eine bestimmte Neigung der Pfähle erforderlich sein. In Tab. 6.9 wird zwischen Verfahren unterschieden, welche eine Neigung zulassen (+) und welche bei denen eine Neigung nicht möglich ist (-).

### **Anpassung an veränderte Bodenverhältnisse**

Ist nach geologischer Vorerkundung vereinzelt mit Hindernissen in Form von Findlingen oder festeren Bodenschichten zu rechnen ist ein Verfahren, welches sich in diesem Fall durch den Wechsel des Bohrwerkzeugs an die Gegebenheiten anpassen kann geeignet. In Tab. 6.9 werden Verfahren differenziert, bei welchen eine Anpassung durch eine alternative Geräteausstattung möglich ist (+) und jene bei welchen keine Anpassung (-) möglich ist.

### **Bodenförderung**

In Bereichen mit kontaminiertem Untergrund kann die Entsorgung von Bodenmaterial zu erheblichen Kosten führen. Daher ist in solchen Fällen eine Bodenförderung zu vermeiden. In Tab. 6.9 werden die Verfahren nach folgenden Kriterien unterschieden:

- (+) ohne Bodenförderung
- (~) mit teilweiser Bodenförderung
- (-) mit Bodenförderung

### **Bodenverdichtung**

Abhängig davon, wie der Pfahl in den Untergrund eingebracht wird, kann bei bestimmten Verfahren eine zusätzliche Verdichtung des Bodens einhergehen. In Tab. 6.9 werden die Verfahren nach folgender Bewertung dargestellt:

- (+) sehr gute Verdichtung
- (+ ~) gute Verdichtung
- (~) geringe Verdichtung
- (-) keine Verdichtung

### **Pfahlfußverbreiterung**

Durch eine Verbreiterung des Pfahlfußes kann die Tragfähigkeit der Pfähle erhöht werden. Es wird in Tab. 6.9 zwischen Verfahren mit (+) und ohne (-) der Möglichkeit eine Pfahlfußverbreiterung auszuführen unterschieden.

### 6.2.2 Ökologische Parameter

Ebenso bedeutend wie die technischen Einsatzgrenzen sind die Einflüsse der Bauverfahren auf die Umwelt. Dabei werden folgende ökologischen Parameter unterschieden (vgl. Tab. 6.12):

- Platzbedarf
- Erschütterung und Lärm

**Tab. 6.12:** Ökologische & ökonomische Parameter

Pfahlgründungsverfahren	Ökolog. Parameter		Ökonom. Parameter
	Platzbedarf	Erschütterung und Lärm	Bauzeit
Ortbetonrammpfahl (Franki)	~	–	+ ~
Vollverdrängungspfahl (Atlas)	~	+	+ ~
Bohrpfahl (Greiferverfahren)	–	–	– ~
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	~	~	~
Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	~	~	~
Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	+	+ ~	+
Doppelkopf-Drehbohrpfahl	+	+ ~	+

#### Platzbedarf

Die Bewertung in Tab. 6.12 erfolgt in Anbetracht auf den erforderlichen Platz zur Vorhaltung von Geräten, welche für die Herstellung der Pfähle erforderlich sind, z. B. Bohrwerkzeug oder Aufbereitungsanlagen. Ebenso wird der mögliche Abstand zu einem unmittelbar angrenzenden Bauwerk berücksichtigt. Die Beurteilung erfolgt in Hinblick auf den Platzbedarf in:

- (+) geringer Bedarf
- (~) mittlerer Bedarf
- (–) großer Bedarf

#### Erschütterung und Lärm

Vor allem bei setzungsempfindlichen Bauwerken in unmittelbarer Nähe des Herstellungsortes sind erschütterungsarme Verfahren zu bevorzugen. In dicht besiedelten Gebieten ist auch die Lärmemission ein entscheidendes Kriterium für die Wahl des Verfahrens. Daher werden die Verfahren in Tab. 6.12 wie folgt eingestuft:

- (+) geringe Beeinträchtigung
- (+ ~) geringe – mittlere Beeinträchtigung
- (~) mittlere Beeinträchtigung
- (–) große Beeinträchtigung

### 6.2.3 Ökonomische Parameter

Wie bereits in Kap. 6.1.3 beschrieben gestaltet sich der Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen den jeweiligen Verfahren sehr schwierig, da sie unter anderem von der Bodenbeschaffenheit, Materialkosten, und Zugänglichkeit der Baustelle abhängig ist. Eine genaue Kostenermittlung zur Beurteilung der Verfahren wird nicht durchgeführt. Es werden daher in Tab 6.12 ausschließlich die Herstellungszeit der jeweiligen Verfahren im Verhältnis zueinander verglichen. Als Herstellungszeit wird jener Zeitraum vom Einbringen des Pfahls bis zur Erhärtung des Materials und vollständigen Belastbarkeit gezählt. Die Bewertung der Verfahren erfolgt in:

- (+) sehr kurze Bauzeit
- (+ ~) kurze Bauzeit
- (~) mittellange Bauzeit
- (- ~) lange Bauzeit

### 6.2.4 Ausschluss- und Zielerfüllungskriterien

Wie zuvor in Kap. 6.1.4 beschrieben werden die technischen, ökologischen und ökonomischen Parameter aus Kap. 6.2.1, Kap. 6.2.2 und Kap. 6.2.3 in fixe und variable Ausschlusskriterien bzw. Zielerfüllungskriterien eingeteilt. Es wird davon ausgegangen, dass nach ausreichenden Bodenerkundungsmaßnahmen die erforderliche Tiefe der Pfähle abgeschätzt werden kann. Aus diesem Grund wird der technische Parameter Einsatztiefe als fixes Ausschlusskriterium betrachtet. Die übrigen Parameter sind variable Ausschlusskriterien und werden in weiterer Folge in der Entscheidungsmatrix nach dem Zielerfüllungsgrad bewertet.

Die Umrechnung von der Bewertung mit den Symbolen (+) und (-) auf das Schulnotensystem mit Zahlenwerten erfolgt nach Tab. 6.5.

In Tab. 6.13 werden alle Parameter nach der Art des Ausschlusskriteriums dargestellt.

**Tab. 6.13:** Art der Ausschlusskriterien

Parameter	Ausschlusskriterium
<b>Technische Parameter</b>	
Pfahldurchmesser	variabel
Einsatztiefe	fix
Pfahlneigung	variabel
Anpassung Bodenverhältnisse	variabel
Bodenförderung	variabel
Bodenverdichtung	variabel
Pfahlfußverbreiterung	variabel
<b>Ökologische Parameter</b>	
Platzbedarf	variabel
Erschütterung / Lärm	variabel
<b>Ökonomische Parameter</b>	
Bauzeit	variabel

## 6.2.5 Fallbeispiel

Anhand des Fallbeispiels Neckartalübergang wird die Entscheidungsmatrix als Auswahlhilfe für Pfahlgründungen demonstriert. Der allgemeine Ablauf ist bereits bekannt und erfolgt wie in Kap. 6.1.5 beschrieben.

### 1. Schritt – Bestandserhebung

Im Vergleich zur Auswahl von Baugrubensicherungen werden die Pfahlgründungsverfahren nicht für jede Achse einzeln, sondern für den gesamten Bereich des Neckartalübergangs ausgewählt. Es wird außerdem festgelegt, dass die Pfahlgründungen in den Gründungshorizont Lettenkeuper bzw. Gipskeuper einbinden müssen. Damit ist eine Einsatztiefe von maximal 15 m vorgegeben. Die antreffenden Bodenschichten sind in Tab. 3.3.1 dargestellt. Abgesehen vom festen Gründungshorizont weisen die darüberliegenden Bodenschichten keine relevanten Hindernisse auf, welche die Herstellung erschweren könnten.

### 2. Schritt – Festlegung von Ausschlusskriterien

Ausgehend von der im Vorhinein durchgeführten Bodenerkundung wird der technische Parameter Einsatztiefe als Ausschlusskriterium gewählt. Nachdem jedoch die voraussichtlich erforderliche Pfahllänge gering ist, finden alle zuvor untersuchten Verfahren Eingang in die Entscheidungsmatrix. Dabei werden folgende Pfahlgründungsverfahren anhand ihrer Zielerfüllungskriterien bemessen:

- Ortbetonrammpfahl (Franki)
- Vollverdrängungspfahl (Atlas)
- Bohrfahl (Greiferverfahren)
- Bohrfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)
- Bohrfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)
- Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)
- Doppelkopf-Drehbohrpfahl

### 3. Schritt – Bewertung der Zielerfüllungskriterien in Entscheidungsmatrix

Als erster Schritt zur Entscheidungsfindung wird eine Entscheidungsmatrix ohne Gewichtung aufgestellt. Dies ist in Tab. 6.14 an den anteilig gleichen Verhältnissen der einzelnen Parameter in der Spalte „benutzerdefinierte Gewichtung“ zu erkennen. Das Prinzip der Berechnung ist bereits aus Kap. 6.1.5 bekannt und wird daher nicht weiter erläutert.

Aus der Entscheidungsmatrix (Tab. 6.14) resultiert eine Rangfolge, welche den Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren) als das geeignetste Verfahren darstellt.

### 4. Schritt – Gewichtete Bewertung der Zielerfüllungskriterien in Entscheidungsmatrix

In weiterer Folge wird der Fokus bewusst auf die technischen Einsatzgrenzen gelegt, während die ökologischen und ökonomischen Ansprüche verringert werden. In der Entscheidungsmatrix mit berücksichtigter Gewichtung (Tab. 6.15) wird daher der technische Parameter auf 70 % erhöht während der ökologische und ökonomische Parameter jeweils auf 15 % abgemindert wird.

Tab. 6.14: Entscheidungsmatrix Pfahlgründungsverfahren ohne Gewichtung

Parameter	Pfahlgründungsverfahren							
	benutzerdefinierte Gewichtung	Ortbetonrammpfahl (Franki)	Vollverdrängungspfahl (Atlas)	Bohrpfahl (Greiferverfahren)	Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	Doppelkopf-Drehbohrpfahl
<b>Technische Parameter</b>								
Pfahldurchmesser	0,17	3	5	1	1	1	3	5
Pfahlneigung	0,17	1	1	5	1	5	1	1
Anpassung Bodenverhältnisse	0,17	5	5	1	1	1	5	5
Bodenförderung	0,17	1	1	5	5	5	3	3
Bodenverdichtung	0,17	1	2	5	5	5	3	5
Pfahlfußverbreiterung	0,17	1	5	5	1	1	5	5
<b>Ökologische Parameter</b>								
Platzbedarf	0,50	3	3	4	3	3	1	1
Erschütterung / Lärm	0,50	5	1	5	3	3	2	2
<b>Ökonomische Parameter</b>								
Bauzeit	1,00	2	2	4	3	3	1	1
Technische Parameter	$\bar{x}$	2,00	3,17	3,67	2,33	3,00	3,33	4,00
Ökologische Parameter	$\bar{x}$	4,00	2,00	4,50	3,00	3,00	1,50	1,50
Ökonomische Parameter	$\bar{x}$	2,00	2,00	4,00	3,00	3,00	1,00	1,00
Gesamt	$\bar{x}$	2,67	2,39	4,06	2,78	3,00	1,94	2,17

## 5. Schritt – Finale Entscheidung

Aus den Entscheidungsmatrizen resultieren abhängig von Gewichtung unterschiedliche Rangfolgen der Verfahren. In Tab. 6.16 wird Veränderung der Rangfolgen dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Wahl des Verfahrens letztendlich dem Entscheider obliegt. Die angegebenen Rangfolgen stellen bloß eine Auswahlhilfe dar. Die Entscheidungsmatrizen sollen durch ihre Einfachheit in der Bedienung auch von jenen Personen als Unterstützung eingesetzt werden können, welche keine spezielle Vorbildung in diesen Themenbereichen haben.

**Tab. 6.15:** Entscheidungsmatrix Pfahlgründungsverfahren mit Gewichtung

Parameter	Pfahlgründungsverfahren							
	benutzerdefinierte Gewichtung	Ortbetonrammpfahl (Franki)	Vollverdrängungspfahl (Atlas)	Bohrpfahl (Greiferverfahren)	Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)	Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)	Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)	Doppelkopf-Drehbohrpfahl
<b>Technische Parameter</b>								
Pfahldurchmesser	0,17	3	5	1	1	1	3	5
Pfahlneigung	0,17	1	1	5	1	5	1	1
Anpassung Bodenverhältnisse	0,17	5	5	1	1	1	5	5
Bodenförderung	0,17	1	1	5	5	5	3	3
Bodenverdichtung	0,17	1	2	5	5	5	3	5
Pfahlfußverbreiterung	0,17	1	5	5	1	1	5	5
<b>Ökologische Parameter</b>								
Platzbedarf	0,50	3	3	4	3	3	1	1
Erschütterung / Lärm	0,50	5	1	5	3	3	2	2
<b>Ökonomische Parameter</b>								
Bauzeit	1,00	2	2	4	3	3	1	1
<b>Technische Parameter</b>								
	$\bar{x}$	2,00	3,17	3,67	2,33	3,00	3,33	4,00
	0,70	1,40	2,22	2,57	1,63	2,10	2,33	2,80
<b>Ökologische Parameter</b>								
	$\bar{x}$	4,00	2,00	4,50	3,00	3,00	1,50	1,50
	0,15	0,60	0,30	0,68	0,45	0,45	0,23	0,23
<b>Ökonomische Parameter</b>								
	$\bar{x}$	2,00	2,00	4,00	3,00	3,00	1,00	1,00
	0,15	0,30	0,30	0,60	0,45	0,45	0,15	0,15
Gesamt	$\sum$	2,30	2,82	3,84	2,53	3,00	2,71	3,18

**Tab. 6.16:** Vergleich der Rangfolgen

	Rang		$\Delta$	Pfahlgründungsverfahren
	mit Gew.	ohne Gew.		
1.	4.	+3		Ortbetonrammpfahl (Franki)
2.	5.	+3		Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, verrohrt)
3.	1.	-2		Teilverdrängungsbohrpfahl (Schneckenbohrverfahren)
4.	3.	-1		Vollverdrängungspfahl (Atlas)
5.	6.	+1		Bohrpfahl (Kellybohrverfahren, hydraulisch gestützt)
6.	2.	-4		Doppelkopf-Drehbohrpfahl
7.	7.	$\pm 0$		Bohrpfahl (Greiferverfahren)

# Kapitel 7

## Potenzial der Digitalisierung

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Potenzial der Digitalisierung in der Bauausführungsphase. Anhand des untersuchten Fallbeispiels Neckartalübergang wurden die Chancen der Digitalisierung erkannt. Im Folgenden soll aufgezeigt werden welchen Einfluss moderne Technologien auf die Arbeitseffizienz und -abläufe haben, dabei wird auf drei Themenbereiche eingegangen:

- Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung
- Massenermittlung mit Drohnen
- Datennutzung von Baugeräten im Erdbau

Die gesammelte Information zu diesen Themengebieten basieren auf Studien [4, 5, 20, 49], eigenen Beobachtungen und Befragungen von Projektbeteiligten aus unterschiedlichen Abteilungen des Unternehmens HOCHTIEF. Dabei haben Bauleiter, Projektleiter, Planer, Personal aus der Arbeitsvorbereitung und Mitarbeiter der konzerninternen Abteilung für Innovationen eine Stellungnahme abgegeben.

### 7.1 Chancen und Herausforderungen der Digitalisierung

Das aktuelle Thema der Digitalisierung im Bauwesen spaltet die Meinungen der Beteiligten. Während eine Interessengruppe das Potenzial erkennt, steht die andere dieser neuen Entwicklung mit Skepsis gegenüber. Im Folgenden seien einige Chancen aber auch neue Herausforderungen beschrieben. [5, 20]

#### 7.1.1 Chancen

- DURCHGÄNGIGE INFORMATIONSKETTE DURCH BUILDING MODELING INFORMATION (BIM): BIM beschreibt einen Arbeitsprozess über alle Bauwerksphasen wie Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase. Als Grundlage dient ein digitales Gebäudemodell, welches während der jeweiligen Phasen mit Daten gefüllt und so auf dem aktuellen Stand gehalten wird. Alle Projektbeteiligten haben Zugriff auf das gemeinsame Datenmodell. Die Anwendungsvoraussetzung von BIM ist eine abgeschlossene Planung vor Bauausführung. Um das Potenzial weiter auszuschöpfen und den gewerksübergreifenden Informationsaustausch zu sichern ist das Ziel in naher Zukunft einen genormten BIM-Standard zu entwickeln [4]. Zu den Chancen von BIM in der Bauausführung zählen die Zeitersparnis bei Massen- und Kostenermittlung sowie die Visualisierung des Baufortschrittes. Die effizienten Prozesse und die Optimierung der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Gewerken eines Bauobjektes werden ebenso als Vorteile gesehen. Der Informationsverlust bei der Übergabe von Bauwerksdaten

zwischen den Gewerken wird durch die durchgängige Datenkette vermieden. Die mehrfache Eingabe von Daten von verschiedenen Projektbeteiligten wird unterbunden und die erfassten Daten für weitere Prozessschritte verwendet.

- **INFORMATIONSWEITERGABE BEI PERSONALFLUKTUATION:**  
Es kommt häufig vor, dass bei Großprojekten ausführende Mitarbeiter nach Beendigung einer Projektphase abgezogen werden und projektspezifische Informationen dadurch verloren gehen. Die Eingabe von Daten in eine zentrale Datenbank sorgt dafür, dass bei Personalwechsel oder -abgang wichtige Informationen erhalten bleiben. Die Anwendung einer zentralen Datenbank auf welche beliebige Beteiligte Zugriff haben, erhöht den Informationsfluss. Zudem ermöglicht es einen einfacheren Zugriff auf vergangene Daten, da ein Suchen in einer Datenbank wesentlich effizienter ist, als das Durchstöbern von Ordnern und Dokumenten in Papierform.
- **KOMFORT:**  
Die Daten unterschiedlicher Projektbeteiligten werden in einer Datenbank bzw. in einem digitalen Gebäudemodell gesammelt, automatisch analysiert und verarbeitet. Der Zugriff auf Auswertungen, Analysen und Daten ist für verschiedenen Beteiligten von jedem browserfähigen Smartphone, Tablet oder Laptop aus möglich.
- **EINFACHE ANALYSE VON DATEN:**  
Digitale Prozesse erhöhen nicht nur die Effizienz von Datenanalysen, sondern auch den Informationsgewinn. Die Daten werden in wertvolle Informationen transferiert und ermöglichen es Prozesse zu optimieren. Die Folgen sind eine Erhöhung der Genauigkeit und Verminderung des Analyse- und Auswerteaufwands für das Personal.
- **SCHNELLE DATENVERFÜGBARKEIT DURCH CLOUD-COMPUTING:**  
Cloud-Computing zeichnet sich aus durch die jederzeit Verfügbarkeit von Daten, automatische Datensicherungen und die schnellere Kommunikation, welche zur einer Effizienzsteigerung von Arbeitsprozessen führt. Diese Datenplattform stellt auch die Grundlage für Building Information Modeling (BIM) dar. Diesen Vorteilen stehen allerdings neue Herausforderungen wie der Kostenaufwand für die Bereitstellung, der Schutz vor unerwünschten Zugriffen und der gesetzliche Nutzungsrahmen gegenüber. Diese Herausforderungen werden in Kap. 7.1.2 erläutert.
- **AUTOMATION:**  
Zufolge der Studie von Roland Berger GmbH [49] werden vier Hebeln (Digitale Daten, Digitaler Zugang, Automation und Netzwerke) definiert. Dabei ist das Potenzial durch Digitalisierung in der Bauausführung in der Automation am größten. Zu diesen zählen unter anderem auch Technologien wie automatische Massenermittlung mit Drohnen (vgl. Kap. 7.2) oder digitale Abrechnungen. Durch die Automation von Arbeitsabläufen wird das Personal entlastet und damit die Personalkosten sowohl auf der Auftraggeber- als auch auf der Auftragnehmerseite reduziert.
- **DIGITALE LIEFERSCHEINE:**  
Derzeit werden Lieferscheine nach erfolgter Lieferung als Hardcopy in zweifacher Ausfertigung für Zulieferer und Besteller ausgestellt. Die Bauleitung oder die Vorarbeiterin/der Vorarbeiter unterzeichnen die Lieferscheine nach Erhalt der Ware, anschließend wird dieser in Ordnern abgelegt. Informationen wie Lieferdatum, Liefermenge, unterzeichnende Person, Einbaustelle der Lieferung und zugehörige Kostenstelle bleiben auf Papier und sind mit zunehmender Aktendichte schwieriger aufzufinden. Abhilfe schafft die Erstellung eines Projektstrukturplanes. Dazu wird der relevante Baustellenbereich durch Kilometrierung und



Breite des Gebietes bzw. durch Koordinaten definiert. Durch Scannen eines QR-Codes auf dem Lieferschein mit dem Firmensmartphone bzw. -tablet werden die Daten aufgenommen und an die Datenzentrale übermittelt, es erscheint sofort der Hinweis wo die Lieferung abzuladen und einzubauen ist, gleichzeitig erhält der Lieferschein eine digitale Signatur. Auf die Datenbank haben alle notwendigen Projektbeteiligten Zugriff und können die für sie relevanten Daten einsehen. Die Voraussetzung für diesen Informationsaustausch ist die örtliche Definition des Baustellenbereiches und eine Schnittstelle zwischen Zulieferer und Besteller in Form eines genormten QR-Codes.

- **DIGITALE BAUSTELLENDOKUMENTATION:**  
Üblicherweise werden zur Dokumentation der Baustelle Fotos und Videos als ergänzende Beschreibung der Sachlage aufgenommen. Meist wird dafür eine kompakte Digitalkamera verwendet. Nach der Besichtigung werden die Aufnahmen vom Speichermedium ausgelesen und manuell in eine Ordnerstruktur am internen Server abgelegt. Ein Prozess, der vom Personal oft als mühsam erachtet wird. Der Einsatz einer digitalen Baustellendokumentation und -überwachung durch die Aufnahme mit einem mobilen Endgerät wie ein Smartphone oder Tablet in Verbindung mit einem vordefiniertem Baustellenstrukturplan, wie zuvor im Punkt „Digitale Lieferscheine“ beschrieben, vereinfachen diesen Prozess. Die Aufnahmen werden direkt in eine Cloud hochgeladen und abhängig vom Aufnahmeort und -zeit automatisch in eine beliebige Ordnerablagestruktur gesichert. Die Verwendung eigener Applikationen für die Endgeräte ermöglicht es zusätzlich zur Aufnahmefunktion weitere Funktionen, wie das Hinzufügen von Bemerkungen, zu integrieren.
- **DIGITALE MÄNGELDOKUMENTATION:**  
Festgestellte Mängel werden unmittelbar mit dem Smartphone oder Tablet aufgenommen, der Standort direkt im digitalen Gebäudemodell verzeichnet und das zuständige Personal verständigt. Die Freigabe nach Behebung der Mängel wird ebenso über das Gebäudemodell kommuniziert. Zeitgleich werden die Arbeitsschritte von Mängelanzeige bis zur Mängelbehebung automatisch dokumentiert. Durch die Kommunikation am Modell entfallen die aufwendige Lagebeschreibung und Dokumentation, das Personal wird entlastet.
- **DYNAMISCHE ANPASSUNG:**  
Die durchgängige Datenkette beim Einsatz eines BIM-Modells über alle Bauphasen ermöglicht eine einfache Anpassung von Kosten und Terminen, welche mit den Bauteilen des Gesamtmodelles verknüpft sind. Für das Baucontrolling bedeutet dies eine erhebliche Reduzierung des Arbeitsaufwands bei gleichzeitiger Erhöhung der Informationsgenauigkeit. Ein weiter Vorteil ist, dass die Folgen einer Bauablaufabweichung und Leistungsänderung rasch ermittelt werden können. Ebenso können durch Simulationen der Bauabläufe Varianten verglichen werden. Der Baufortschritt samt seinen Kosten und Terminen ist so für alle Beteiligten in Echtzeit einsehbar und transparenter.
- **EFFIZIENTERE GERÄTE- UND MATERIALLOGISTIK:**  
Durch die Verknüpfung der einzelnen Bauteile des Gebäudemodells mit den dafür erforderlichen Geräten und Materialien ist es einfacher Stehzeiten und Terminkollisionen der Geräte zu vermeiden. Ebenso können die Betriebszeiten und die Position durch GPS-Tracking der Geräte eingesehen werden (vgl. Kap. 7.3). Zeitnahe Lieferungen der Baustoffe können einfacher koordiniert werden und ersparen das platzintensive Vorhalten auf den Baustellenflächen.

### 7.1.2 Herausforderungen

- **AKZEPTANZ:**  
Die digitale Dokumentation wird bereits bei Hochbau- und Infrastrukturprojekten umgesetzt, jedoch wird der Umgang nicht konsequent gepflegt. Vor allem Personal aus Generationen, welches ohne Computer aufgewachsen ist, fehlt es an notwendigem Know-how und Akzeptanz gegenüber digitalen Prozessen. Um diesem Problem zu begegnen sind gezielte Schulungen mit dem Ziel über die modernen Entwicklungen aufzuklären notwendig. So können alte Gewohnheiten abgelegt und ein allgemeines Verständnis für Digitalisierungstechnologien geschaffen werden. Zudem werden durch strengere Kontrollen des eigenen Personals und Anweisungen von Führungskräften der Einsatz digitaler Hilfsmittel gefestigt.
- **NACHUNTERNEHMERGESCHÄFT:**  
Die Digitalisierung im eigenen Unternehmen voranzutreiben stellt bereits eine Herausforderung dar. Die Zusammenarbeit mit Nachunternehmen mit geringer bis gar keiner Erfahrung hinsichtlich moderner Entwicklungen machen den Fortschritt in diese Richtung noch schwieriger. Das Nachunternehmergeschäft auf Baustellen ist jedoch nicht wegzudenken. Meist ist das Hauptkriterium bei der Wahl des Nachunternehmers der Preis, dadurch erhält der günstigste Anbieter den Zuschlag, welcher jedoch in den seltensten Fällen eine Digitalisierungstechnologie nach neustem Stand der Technik anwendet. Dieses Auswahlkriterium hemmt die Weiterentwicklung der Digitalisierung im Bauwesen.
- **DATENSCHUTZ VON PERSONEN UND GEBÄUDEOBJEKTEN:**  
Die digitale Baustellendokumentation wird durch Foto- und Videoaufnahmen unterstützt. Auf diesen Aufnahmen sind gelegentlich auch Baustellenarbeitskräfte zu sehen, auch wenn diese nicht das Hauptmotiv darstellen. Generell gilt die Privatsphäre der jeweiligen Personen zu schützen und diese unkenntlich darzustellen solange keine Einwilligung der betreffenden Personen eingeholt wurde. Für zukünftige Entwicklungen, welche auf Fotoaufnahmen von weiten Baustellenabschnitten zurückgreifen, wie die Massenermittlung mit Drohnen, stellt dies ein Hindernis dar, da sensible Bereiche nicht überflogen werden dürfen und der Einsatz daher eingeschränkt wird (vgl. Kap. 7.2).
- **NEUE BERUFSBILDER:**  
Die regelmäßig notwendige Datenpflege bei BIM und die dabei entstehenden gewerksübergreifenden Konflikte bedürfen eine klare Rollenverteilung und Verteilung von Verantwortungsbereichen. Im Vorhinein ist zu bestimmen wer die Verantwortung trägt, wer die Ansprechpersonen sind und wer das Modell bearbeiten darf. Dies erfordert neue Berufsbilder wie den BIM-Manager als Ansprechperson für den Auftraggeber und den BIM-Koordinator. Zu den Aufgaben des BIM-Managers zählen die Erstellung eines BIM-Konzepts gemeinsam mit dem Auftraggeber, die Definition der Modelltiefe und die Kontrolle der Modellqualität in den jeweiligen Bauphasen. Die BIM-Koordinatoren unterliegen den Anweisungen des BIM-Managers. Sie agieren auf der Seite des Auftragnehmers, koordinieren die verschiedenen Abteilungen im Unternehmen und sind die direkten Ansprechpartner für den BIM-Manager. Derzeit gibt es in Österreich noch wenig qualifiziertes Personal in diesem neuen Umfeld, daher bilden viele Unternehmen ihr Personal selbst aus. Dabei wird die Ausbildung gezielt auf die firmeneigenen Anforderungen in den Digitalisierungsbereichen abgestimmt.
- **HAFTUNG:**  
Werden die Massen und Kosten in Zukunft über das zuvor erstellte BIM-Gebäudemodell ermittelt, so ist zu klären wer für die Richtigkeit des Modells bzw. eine falsche Modellierung haftet. Denn Falschinformationen können in späteren Projektphasen erhebliche Schäden

anrichten. Ob dem planenden Unternehmen, welches das BIM-Modell erstellt oder dem ausführenden Unternehmen durch die Prüf- und Warnpflicht ein Haftungsrisiko entsteht bleibt zu klären.

- **DATENSICHERHEIT:**  
Mit zunehmender Digitalisierung und Vernetzung der Datenbanken steigt die Gefahr vor Cyber-Kriminalität wie Hackerangriffe und Datenklau. Zuzolge der Studie [5] stellen allerdings die eigenen Mitarbeiter noch das größte Risiko dar, welche durch Unwissenheit oder Nachlässigkeit Sicherheitslücken verursachen. Die Daten müssen aus diesem Grund vor unbefugten Zugriffen geschützt werden.
- **DATENEIGENTUM:**  
Die Verwendungs- und Nutzungsrechte der Datenbanken (BIM-Modell, Cloud-Computing) zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer sind vertraglich im Vorhinein zu vereinbaren, vor allem für den Fall einer vorzeitigen Vertragsbeendigung.
- **DATENMENGE:**  
Mit wachsendem Einsatz von digitalen Arbeitsabläufen steigt auch die Gefahr vor einem Informationsüberfluss. Um den Überblick über die nutzerspezifischen Daten zu behalten sind neue Datenmanagementsysteme notwendig. Ebenso produzieren digitale Prozesse eine enorme Datenmenge, deren Bewältigung eine ausreichend dimensionierte Infrastruktur notwendig macht. Server und Übertragungsgeschwindigkeiten sowohl über Kabel als auch über Mobilfunk müssen mit der erhöhten Nutzung von digitalen Daten abgestimmt werden.
- **FEHLENDE STANDARDISIERUNG:**  
Vor allem für die Zusammenführung der Daten zwischen unterschiedlichen Gewerken und Firmen fehlt ein konkreter Standard, welcher eine Datenablagestruktur vorschreibt und klärt welche Information von welchen Projektbeteiligten einzugeben sind. In Hinblick auf Softwareanwendungen gibt es derzeit keine standardisierten Softwareschnittstellen, die den lückenlosen Datenaustausch und somit eine Interoperabilität ermöglichen.

## 7.2 Massenermittlung mit Drohnen

Im Zuge des Taktkellerausbaus am Neckartalübergang wurden erste Versuche mit Drohnen unternommen. Während eines Drohnenfluges werden durch Photogrammetrie oder Scannen Oberflächenpunkte aufgenommen. Bei der Photogrammetrie werden mehrere Fotos eines Bereiches zu einem Fotobündel zusammengelegt und die Oberflächen berechnet, man spricht dabei von einer stereophotogrammen Auswertung. [33–35, 46]

Der Taktkeller befindet sich in der Seitenlage auf einem niedrigeren Höhenniveau als die Verkehrsachse der Bestandsbrücke. Nach Fertigstellung des TBW 1 wird die Verkehrsführung von der Bestandsbrücke auf das TBW 1 umgelegt. Der Höhenunterschied wird durch die Aufschüttung von Erdmassen bis zur erforderlichen Höhe angeglichen. Um diese komplexen Massenänderungen zu quantifizieren werden Drohnen zu Hilfe genommen. Dabei überfliegen Drohnen das Zielgelände und sammeln die erforderlichen Daten zur nachträglichen Berechnung der Massenveränderung. Das Resultat ist die Massendifferenz, welche gleichzeitig auch grundlegende Datenwerte für die Leistungs- und Kostenermittlung darstellen. Die Massenermittlung mittels Drohne ermöglicht in Zukunft komplexe Mengenänderungen schneller aufzunehmen bzw. überhaupt quantifizieren zu können.

### 7.2.1 Anwendungsgrenzen

Die Massenermittlung mittels Drohnen ist durch folgende Punkte eingeschränkt:

- **DATENMENGE:**  
Die Massenermittlung mit Drohnen liefert derzeit noch eine Fülle an Daten, welche hohe Speicherkapazitäten erfordert. Daher sind die Aufschlusstiefe und die zu untersuchenden Geländefläche durch die Kapazität der Datenablagensysteme beschränkt.
- **REFERENZWERTE:**  
Um festzustellen ob die ausgewerteten Geländemodelle den natürlichen Gegebenheiten entsprechen sind Vergleichswerte notwendig. Vom derzeitigen Ausgangspunkt ist es schwierig Vergleichswerte zu erhalten, da es von den Massenänderungen im Takt Keller keine Aufzeichnungen gibt.
- **MANUELLE NACHBEARBEITUNG:**  
In der Regel befinden sich auf dem zu untersuchenden Gelände Störobjekte wie Baugeräte, Baumaterial und Vegetation, die eine händische Nachbearbeitung erforderlich machen. Solche Objekte werden entfernt, indem die Datenpunkte auf die Höhe der benachbarten Punkte angeglichen werden. Das Resultat ist eine ebene Geländeoberfläche, die der tatsächlichen Geologie entspricht. Dies bedeutet einen enormen Zeitaufwand und Einsatz von Personalressourcen.
- **WETTERABHÄNGIGKEIT:**  
Laserscanning und Photogrammetrie sind witterungsabhängig. Dichter Nebel und Niederschlag jeglicher Form können die aufgenommenen Datenpunkte verfälschen, da bei Laserscanning die Laserstrahlen bereits vor Erreichen der Geländeoberfläche reflektieren. Bei der Photogrammetrie können diese Witterungsbedingungen unscharfe Aufnahmen hervorrufen. Schlechte Lichtverhältnisse oder Dunkelheit führen ebenso zu Unschärfe oder gar zu nicht verwertbaren Bildaufnahmen. Bei starken Windverhältnissen kann ein Überflug erst gar nicht stattfinden.
- **RECHTLICHER RAHMEN:**  
In Deutschland zählen Drohnen als unbemannte Luftfahrzeuge und unterliegen den Regeln des Luftverkehrsgesetzes (LuftVG) und der Luftverkehrsordnung (LuftVO). Diesen Gesetzen zufolge ist das Überfliegen von Menschenansammlungen, Gefängnissen, Industrieanlagen, Kraftwerken oder Flughäfen nicht gestattet. Die Persönlichkeitsrechte der gefilmten Personen und die Urheberrechte im Fall von Gebäuden müssen ebenfalls gewahrt werden. Daher können auf Baustellen Drohnen erst nach Einholen der erforderlichen Bewilligungen eingesetzt werden.

### 7.2.2 Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip der Massenermittlung mit Drohnen läuft wie folgt ab:

1. Das Gelände wird durch den Drohnenüberflug aufgenommen.
2. Die aufgenommenen Punktwolken werden zu Dreieckstriangulationen vermascht und Prismen erzeugt.
3. Die Prismen der Ausgangssituation und der veränderten Geländesituation werden miteinander verglichen und die Massendifferenz berechnet.

### 7.2.3 Arbeitsablauf

Die Massenermittlung mit Drohnen ist in folgende Arbeitsschritte gegliedert:

1. Die Drohne wird von einer Arbeitskraft über das Zielgelände gesteuert, wo sie die Geländeoberfläche aufnimmt. Die Arbeitskraft benötigt abgesehen eines Kenntnissnachweises für gewerbliche Flüge bei Geräten über 2 kg keine speziellen Qualifikationen. Während der Aufnahmen ist auf eine gleichmäßig ruhige Führung der Drohne und ein vollständiges Überfliegen des Zielgebietes zu achten.
2. Nach der Aufnahme erfolgen die Nachbereitung und Auswertung dieser Daten. Aufgrund der großen Datenmenge werden dafür zwei bis drei Arbeitskräfte benötigt. Diese sind meist Vermessungsingenieure oder CAD-Kräfte.

In der Regel ist ein Überflug bei Zustandsänderung einmal am Tag ausreichend. Dieser kann am Ende des Arbeitstages bei geräumtem Baufeld erfolgen. Das hat den Vorteil, dass Aufnahmen ohne den Störobjekten wie Personal oder Baugeräte gemacht werden können.

In Abb. 7.1 ist die Informationskette und der Prozessablauf der Massenermittlung mit Drohnen dargestellt.

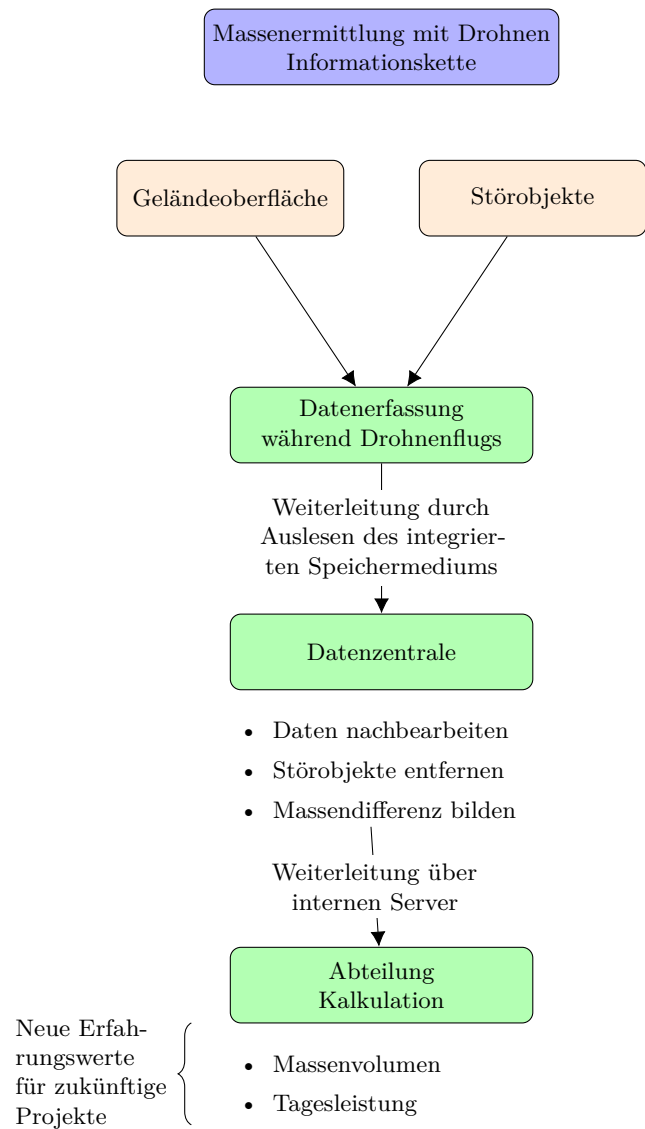
### 7.2.4 Optimierungspotenzial

Das Personal, welches benötigt wird, um die Drohne zu steuern kann durch selbstständig fliegende Drohnen überflüssig werden. Dabei fliegt die Drohne entlang einer vorprogrammierten Strecke im Zielgebiet, welche durch mehrere Checkpoints definiert ist. Jedoch müssen dafür erst die rechtlichen Bedingungen geschaffen werden, da sich derzeit in Deutschland das Flugobjekt nicht aus dem Blickfeld der Drohnenführerin/ des Drohnenführers entfernen darf.

Um die Anzahl der beteiligten Arbeitskräfte für die Nachbearbeitung zu reduzieren muss dieser Arbeitsprozess automatisiert werden. Das selbständige Herausrechnen der obengenannten Störobjekte aus dem Zielgelände bedarf noch weiterer Forschung. Damit solche Berechnungsalgorithmen diese Störobjekte als solche erkennen müssen zuerst Referenzstörobjekte gebildet werden. Derzeit läuft die Nachbearbeitung noch manuell ab und ist sehr zeitaufwendig.

Eine weitere Überlegung ist das Funktionsprinzip der Drohne zu Lande durchzuführen. Statt einer fliegenden Drohne kommt ein fahrbarer Laserscanner zum Einsatz. Dies hat den Vorteil das hierfür die rechtlichen Anforderungen einfacher erfüllt werden können, weil das LuftVG und der LuftVO nicht zu beachten sind.

Mithilfe von Drohnen können komplexe Massenänderungen aufgezeichnet werden. Die gesammelten Informationen über die Tagesleistung von Erdarbeiten, wie Aushub von Baugruben oder Aufschüttung von Dämmen sind relevant für die Leistungserfassung in der Arbeitskalkulation. Der Fortschritt der Baustelle kann so einfach ermittelt werden. In Bauphase II (vgl. Kap. 3.2) kann dieses Verfahren zur Herstellung des TBW 2 für die einzelnen Baugruben von A20 bis A290, sowie die Aufschüttungen des westlichen Widerlagers bei A10 und des Taktkellers eingesetzt werden.



**Abb. 7.1:** Informationskette bei Massenermittlung mit Drohnen

## 7.3 Datennutzung von Baugeräten

Die GPS-Daten werden heutzutage bereits von Baumaschinen erfasst. Die Nutzung dieser Daten und der Wert dieses Informationsgewinns birgt noch Potenzial. Im Folgenden wird der Nutzen bei Tiefbauarbeiten betrachtet. So kann die Verfuhr der Aushubmassen von Transportgeräten durch GPS-Daten aufgezeichnet und in Echtzeit verfolgt werden. Daten wie Betriebsstunden und Nutzlast werden nicht erhoben. Eine Entwicklung, welche diese Informationen sammelt, fehlt noch. Die Datennutzung von Baugeräten kommt derzeit bei diesem Bauprojekt nicht zum Einsatz. Jedoch kann die Verwendung dieser Daten die Leistungserfassung erheblich erleichtern.

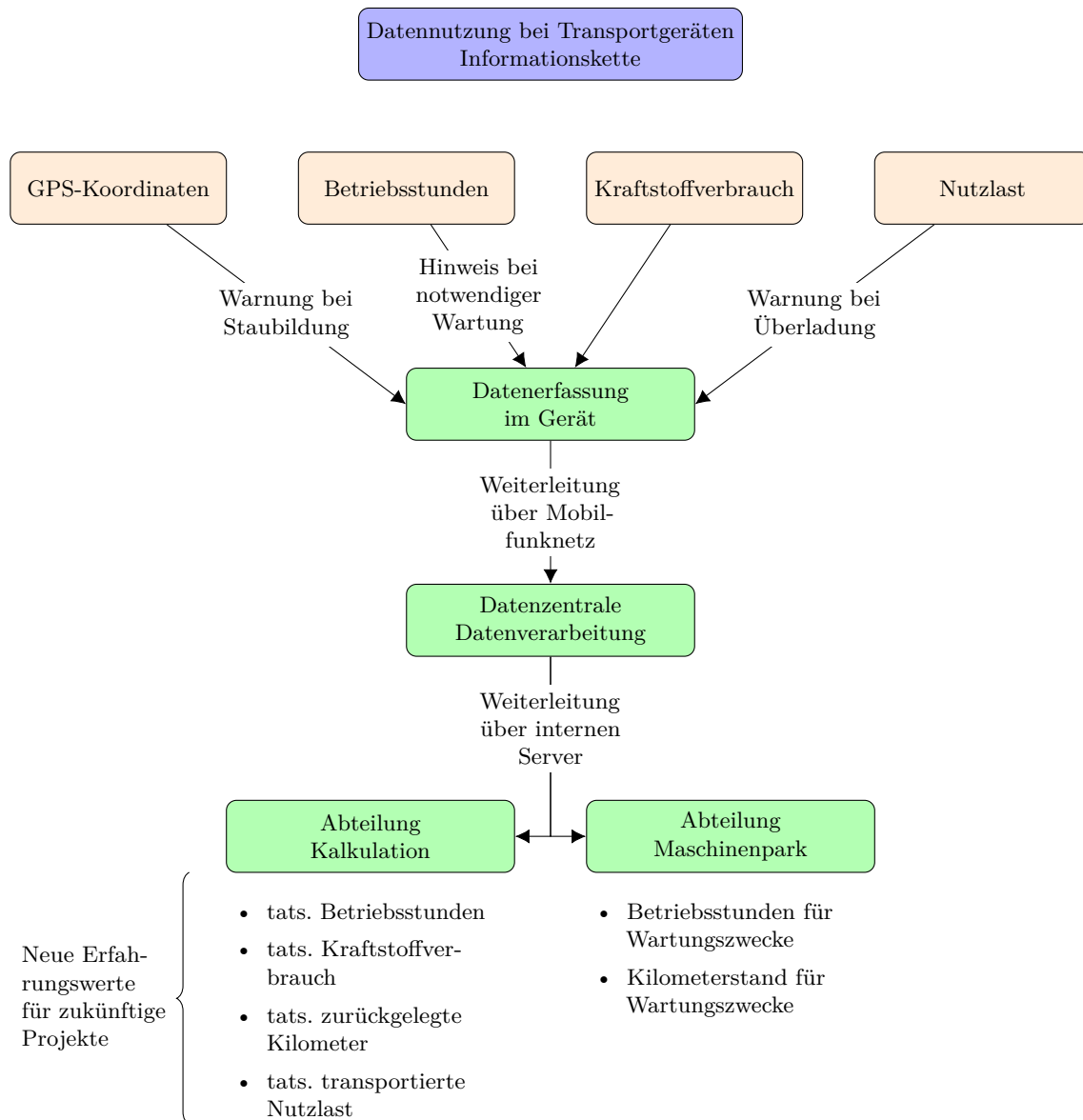
### 7.3.1 Anwendungsgrenzen

Die Datennutzung von Baugeräten im Erdbau unterliegt folgenden Einsatzgrenzen:

- **VARIIERENDE BODENKONSISTENZ:**  
Die Gewichtsmessungen der Verfuhrmassen, also der Nutzlast, sind abhängig von der Bodenkonsistenz. Der Wassergehalt und der Auflockerungsfaktor müssen berücksichtigt werden. Die Ermittlung des Volumens über das Gewicht ist daher ungenau.
- **DATENSCHNITTSTELLE:**  
Um die Daten des Transportfahrzeugs zu erhalten ist die Freigabe einer Schnittstelle seitens der Fahrzeughersteller notwendig. Eine Alternative ist, dass die Baugeräte mit einer sogenannten „Blackbox“ nachgerüstet werden. Unabhängig vom Fahrzeughersteller kann so eine eigene Schnittstelle nach den Bedürfnissen des Unternehmens geschaffen werden.
- **FREMDGERÄTE:**  
Generell ist die Datenerfassung durch das Nachunternehmergeschäft eingeschränkt. Bei von Nachunternehmern zur Verfügung gestellten Baugeräten oder angemieteten Maschinen können Änderungen am Gerät nur nach Einwilligung des Eigentümers vorgenommen werden. Vor allem wenn Baugeräte von Nachunternehmern auf verschiedenen Baustellen eingesetzt werden ist darauf zu achten, dass die Daten außerhalb der eigenen Baustelle bzw. von anderen Baustellen nur mit einer Genehmigung aufgezeichnet werden dürfen. Es stellt sich auch die Frage, ob Nachunternehmern die „Blackbox“ konsequent einsetzen, denn nur vollständige Datensätze sind für die Leistungserfassung nützlich.

### 7.3.2 Funktionsprinzip

Abb. 7.2 zeigt den Informationsfluss bei der Nutzung von GPS-Daten sowie den Aufzeichnungen über Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch und Nutzlast von Transportgeräten. Das Prinzip wird anhand des Szenarios eines Baugrubenaushubs mit Hydraulikbagger und Verfuhr mittels Lastkraftfahrzeugen erklärt. Dabei fahren mehrere Lastkraftfahrzeuge dieselbe Strecke mehrmals im beladenen Zustand zur Deponiestelle und im unbeladenen Zustand zurück zur Beladungsstelle. Die Daten werden dabei von den Lastkraftfahrzeugen erhoben.



**Abb. 7.2:** Informationskette bei Datennutzung von Transportgeräten



### 7.3.3 Optimierungspotenzial

Die gezielte Analyse und Auswertung von Daten, die von Transportgeräten während des Betriebes gesammelt werden, ermöglichen eine bessere Nutzung des Equipments. Plötzliche Ausfallzeiten der Geräte können durch angepasste Wartungsintervalle verringert werden, da die zurückgelegte Strecke und die Betriebsstunden unter Vollast ermittelt werden können.

Zusätzlich vereinfacht der Informationsaustausch zwischen dem Transportgerät und dem Aushubgerät deren Kommunikation untereinander. So ist es möglich, dass die Gerätechkraft des Aushubgeräts (Hydraulikbagger) und des Transportgerätes den aktuellen Ladestatus erhalten. Dies führt zu einer optimalen Ausnutzung der Ladekapazität und vermeidet gleichzeitig eine Überladung des Lastfahrzeugs.

Dieses Verfahren kann für alle Erdarbeiten wo Erdmassen mit Transportgeräten bewegt werden zum Einsatz kommen. Die gesammelten Daten über Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch, zurückgelegte Kilometer und Nutzlasten von Transportgeräten bei der Verfuhr von Bodenmaterial sind relevant für die Leistungserfassung in der Arbeitskalkulation und zukünftige Angebotskalkulationen. Innerhalb des Projekts Neckartalübergang kann dies für die Erdarbeiten zur Errichtung von Baugruben und Dämmen an den Widerlagern und Brückenpfeilern in Bauphase II (vgl. Kap. 3.2) angewendet werden.



# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurden in Kap. 4 die Kosten für die Herstellung geböschter Baugruben, Spundwandverbauten und Tiefgründungen mit Bohrpfählen anhand des Fallbeispiels Neckartalübergang analysiert und beurteilt, um für nachfolgende Tiefbauverfahren in fortgeschrittenen Bauphasen des Neckartalübergangs aber auch für Brückenprojekten mit ähnlichen Rahmenbedingungen, einen Ausblick über die kostentreibenden Faktoren und mögliche Optimierungen zu geben. Es wurden dafür Leistungsverzeichnisse erstellt und die Kosten der jeweiligen Verfahren im Verhältnis zu den Gesamtkosten aller Verfahren untersucht. In weiterer Folge wurden die Kosten der einzelnen Tiefbauverfahren getrennt betrachtet und in Kostenanteile für Gerät, Personal, Material, Nachunternehmerleistungen und Transporte mit Wasserfahrzeugen unterteilt.

Die Auswertung der Leistungsverzeichnisse in Kap. 4.5 hat gezeigt, dass bei Betrachtung aller angewandten Tiefbauverfahren am Neckartalübergang die Kosten für die Herstellung der Bohrpfähle und der Spundwandverbauten den Großteil der Gesamtkosten ausmachen. Daher liegt vor allem bei diesen Verfahren der Fokus auf eine Kostenoptimierung. Bei weiteren Untersuchungen ist festzustellen, dass im Durchschnitt 50 % der einzelnen Verfahrenskosten vom eingesetzten Material verursacht werden. Es wird außerdem deutlich, dass mit zunehmender Bohrmeterzahl die Materialkosten bei den Bohrpfählen im Verhältnis zu den anderen Kostenanteilen zunehmen. Diesen Ergebnissen zufolge wurden in Kap. 4.5.3 mögliche Optimierungsvorschläge gegeben sowie Einheitskosten der jeweiligen Verfahren ermittelt. Diese gelten als Referenzwerte und dienen der Erstellung von Kostenprognosen für zukünftige Tiefbaumaßnahmen.

In weiterer Folge wurden in Kap. 5 anhand des Fallbeispiels mögliche Problemstellen im Tiefbau bei Brückenbauprojekten untersucht. Hierfür wurde vor allem vor Ort durch eigene Beobachtungen, die Befragung von erfahrenem Projektpersonal und der Recherche in technischen Stellungnahmen Informationen gesammelt. Der erschwerte Zugang zum Bauabschnitt auf einer Flussinsel ist aus baubetrieblicher Sicht von großer Bedeutung. Hierbei muss, wie auch in der Kostenanalyse festgehalten wurde, mit zusätzlichen Kosten für den Transport von Großgerät und Baustoffen mit speziellen Wasserfahrzeugen gerechnet werden. Ebenso wichtig sind bei Projekten in Wasserschutzgebieten erforderliche Zusatzmaßnahmen wie der Einsatz von umweltfreundlichen Baustoffen sowie die Abstimmung mit Behörden bei Angelegenheiten des Grundwassers. Bei Brückenneubauten, welche an derselben Stelle wie die Bestandsbrücke errichtet werden, können bestehende Tiefgründungen die Herstellung der neuen Tiefgründungen behindern. Spezielle Bohrwerkzeuge zur Durchdringung von Stahlbeton schaffen in diesem Fall Abhilfe. Mehrkosten entstehen auch im Bereich von Altlasten, wo Aushubmaterial bzw. geförderttes Bohrgut auf Verwertbarkeit und Deponierbarkeit geprüft werden muss. Dem Kostenaufwand durch die Notwendigkeit einer Entsorgung auf der Deponie kann durch die Wahl geeigneter Tiefbauverfahren ohne Materialförderung begegnet werden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Kostenanalyse und der Problemstellensuche wurden in Kap. 6 Kriterien formuliert, welche es ermöglichen eine Entscheidungsmatrix jeweils für Baugrubensicherungen und für Pfahlgründungen zu erarbeiten. Das Ziel ist es einen raschen Vergleich der Tiefbauverfahren abhängig von den projektspezifischen Anforderungen mit einfachen Methoden zu ermöglichen. Die Auswahlhilfen sollen durch ihre Einfachheit in der Bedienung auch von jenen Personen als Unterstützung eingesetzt werden können, welche keine spezielle Vorbildung in diesen Themenbereichen haben.

### 8.1 Beantwortung der Forschungsfragen

#### **Forschungsfrage 1 – Worin liegen die unterschiedlichen Schwerpunkte bei geotechnischer und baubetrieblicher Betrachtung in der Planungs- und Ausführungsphase des Neckartalübergangs?**

Die Planung einer Brücke wie der Neckartalübergang benötigt mehrere Jahre Vorlaufzeit. Zum einen müssen Wirtschaftlichkeitsstudien gemacht werden, welche über einen Neubau oder eine Sanierung entscheiden. Zum anderen müssen Fragen über den Bestand wie Grundstücksansprüche, Schutz von Wasser und Natur sowie Zuständigkeiten der Wasserbehörden geklärt werden. Der große Zeitraum zwischen Planung und Ausführung stellt ein erhebliches Problem dar. Denn erst durch die spätere Detailplanung für die einzelnen Brückenteile resultieren die konkreten Lasten der Brücke, welche letztendlich in den Untergrund abzutragen sind. Weichen diese Lastaufstellungen von den ursprünglichen Lastannahmen aus der Ausschreibungsphase ab, so muss das Tragwerkskonzept überarbeitet werden. Dies wiederum kann Auswirkungen auf die Gründungsmaßnahmen haben. In der Vorplanung kann dies mit einem ausreichend großen Sicherheitsfaktor bei der Bemessung vermieden werden, führt jedoch zu einer Überdimensionierung der Bauteile und ist unwirtschaftlich. Daher wird diese Methode in der Praxis eher nicht angewendet. Im konkreten Fall des Neckartalübergangs traten zufolge der Ausführungsplanung größere Belastungen auf das Brückentragwerk auf, als in der Ausschreibungsplanung angenommen. Diese Mehrlasten verursachten nach geotechnischen und statischen Untersuchungen eine Änderung der vorgesehenen Gründungsarten, welche Auswirkungen auf den Bauablauf und die Bauzeit haben. So wurden statt der ursprünglich geplanten Ortbetonrammpfähle, die Tiefgründungen als Bohrpfähle ausgeführt. Es mussten die Arbeitsabläufe und damit die verbundenen Termine angepasst werden.

Eine weitere Herausforderung in der Planung und Ausführung ist die Einhaltung vom Toleranzmaß bei der Pfahlbewehrung im Anschlussbereich. Während die Planerin/ der Planer versucht das Toleranzmaß gering zu halten, um eine höhere Bewehrungsdichte im Querschnitt zu schaffen, wird es in der Ausführung unter erschwerten Arbeitsbedingungen mit zunehmender Bewehrungsdichte schwieriger Toleranzen überhaupt einhalten zu können. Vor allem weil durch die Freilegung von Pfahlköpfen mit einem Aushubgerät die Anschlussbewehrung verbogen werden kann. In der Praxis muss anschließend statisch geprüft werden, ob die Bewehrungslagen geändert werden können. Dies führt zu Verzögerungen beim Einbau und stört den baubetrieblichen Ablauf. Daher sollte seitens der Planung bereits auf ein ausreichend großes Toleranzmaß geachtet werden.

Ebenso ein Problem stellt die Einsatzplanung von Tiefbauverfahren auf Grundlage von vereinzelt Bodenerkundungen dar. In der Praxis erfolgen bodentechnische Untersuchungen meist punktuell an den maßgebenden Stellen, um die Lage und Mächtigkeiten der einzelnen Bodenschichten abschätzen zu können. Aufgrund der stichprobenartigen Erkundungen besteht stets

das Risiko unerwartet auf Bodenhindernisse oder festeren Untergrund zu stoßen. So musste bei den Spundwandarbeiten am Neckartalübergang auf der Neckarinsel vor Einbringen der Spundwandelemente der Boden mit einem Bohrergerät vorgebohrt werden. Auch dies erforderte eine Anpassung des Bauzeitplans und den damit verknüpften Terminen mit den nachfolgenden Gewerken.

**Forschungsfrage 2 – Welche Besonderheiten im Tiefbau birgt ein Brückenbauprojekt unter dem Aspekt des Umwelt- und Wasserschutzes? Welcher wirtschaftliche Aufwand muss betrieben werden, um den Anforderungen des Umwelt- und Wasserschutzes gerecht zu werden?**

In Anbetracht des Umweltschutzes ist vor allem auf geschützte Tierarten zu achten. Das Einnisten von Tieren auf der Baustelle kann sogar zum Stillstand des Bauvorhabens führen. Durch Vergrämungsmaßnahmen können diese in einen neuen Lebensraum überführt werden, jedoch sollte ein plötzlicher Stillstand in der Bauzeitplanung berücksichtigt werden.

In unmittelbarer Nähe von Wohngebieten sind Verfahren mit geringen Lärmemissionen zu wählen. So erfüllt eine Umstellung des Einbringverfahrens von Rammen auf Einrütteln oder Drehbohren zwar diese Anforderungen, ist möglicherweise aber leistungsschwächer.

Liegt das Bauvorhaben in einer Wasserschutzzone ist auf die geeignete Wahl von umweltfreundlichen Baustoffen zu achten, vor allem wenn diese in den Untergrund und im Grundwasser einbinden. Es müssen z. B. umweltverträgliche Spundwandabdichtungen und Pfahlbetonsorten verwendet werden. Ebenso sind umweltschädliche Stoffe sicher zu verwahren und regelmäßig auf Dichtigkeit zu prüfen, das gilt z. B. für Diesel, Schmieröle, Suspension, Chemikalien.

Bei Tiefbaumaßnahmen, welche in das Grundwasser einbinden ist vor Baubeginn eine Genehmigung der zuständigen Wasserbehörde erforderlich. Dieses Genehmigungsverfahren erfordert eine ausreichende Vorlaufzeit und muss ebenfalls im Bauzeitplan berücksichtigt werden. Dies kann durch die Wahl von alternativen Verfahren wie die geböschte Baugrube, bei welcher kein Fremdmaterial in Kontakt mit Grundwasser kommt, vermieden werden.

**Forschungsfrage 3 – Welche Erkenntnisse des aktuellen Baufortschritts hinsichtlich Tiefbau, Geotechnik und Gründungsmaßnahmen können aus der Seitenlage der Brücke gewonnen werden und inwiefern kann gewonnenes Know-how die anschließende Bauphase optimieren?**

Die Kostenanalyse aus Kap. 4 hat gezeigt, dass im Vergleich von geböschten Baugruben, Spundwandverbauten und Bohrpfählen, der Großteil der Gesamtkosten durch die Herstellung der Bohrpfähle (52 %) verursacht wird. Die übrigen Kosten teilen sich die Spundwandverbauten (31 %) und die geböschten Baugruben (17 %). In weiteren Untersuchungen der einzelnen Verfahren wurden die Kostenanteile für Personal, Gerät, Material und speziell erforderlichen Wasserfahrzeuge ermittelt. Aus den Resultaten wurde ersichtlich, dass vor allem die Materialkosten bei den Bohrpfählen (49 %) und Spundwänden (48 %) die kostentreibenden Faktoren sind, während bei den geböschten Baugruben die Gerätekosten (51 %) dominieren. Bei Betrachtung der Kosten je Achse wird deutlich, dass die Kosten an den Brückenwiderlagern und im Uferbereich des Fluss Neckars besonders hoch sind. Während dies bei den Widerlagern auf die verhältnismäßig größere Leistungsmenge zurückzuführen ist, ist vor allem auf der Neckarinsel der Einsatz von speziellen Wasserfahrzeugen ein Mitgrund für die höheren Kosten.

Für die Tiefbaumaßnahmen in der anschließenden Bauphase soll der Fokus der Kostenoptimierung daher gezielt auf diese Faktoren gerichtet sein. Vorschläge zur Reduzierung von Material-

und Gerätekosten wurden in Kap. 4.5.3 gegeben. Unter anderem wurde auch die Empfehlung gegeben, ein Tiefgründungsverfahren mit Bodenverdrängung einzusetzen. Die Kosten für die Verfuhr und Entsorgung des gelösten Bodenmaterials blieben erspart. Außerdem wurden anhand der Kostenanalyse Einheitskosten ermittelt, mit welchen eine Kostenprognose für zukünftige Tiefbaumaßnahmen erstellt werden kann.

Anhand der Entscheidungsmatrizen für Baugrubensicherungen und Pfahlgründungen aus Kap. 6 ist es außerdem möglich einen schnellen Überblick und Vergleich über verschiedene Tiefbauverfahren zu erhalten. Diese Auswahlhilfen dienen zukünftigen Projekten und der nächsten Bauphase des Neckartalübergangs als Unterstützung bei der Wahl geeigneter Verfahren.

## 8.2 Ausblick

### **Forschungsfrage 4 – Analyse mit Ausblick auf Potenziale durch Digitalisierung**

In Zukunft wird die Digitalisierung in der Baubranche zunehmen und nicht mehr wegzudenken sein. Die modernen Entwicklungen in Kap. 7.1 zeigen einerseits neue Herausforderungen, die es noch zu überwinden gilt und andererseits erhebliche Erleichterungen im alltäglichen Baubetrieb, wie die papierlose Datenverwaltung, digitaler Datenaustausch, einfachere Kommunikation und die Analyse durch Visualisierungen. Das Ziel den Großteil der Daten auf Bauprojekten zu verknüpfen, damit das redundante Eintragen und Erfassen von Daten an verschiedenen Stellen vermieden wird ist bloß einer der zahlreichen Möglichkeiten die Effizienz von Arbeitsabläufen durch digitale Prozesse zu steigern.

In Kap. 7.2 und Kap. 7.3 wurden anhand des Fallbeispiels Neckartalübergang die Potenziale der Massenermittlung und der Datennutzung von Transportgeräten im Erdbau aufgezeigt. Mithilfe von Drohnen können komplexe Massenänderungen aufgezeichnet werden. Mit den gesammelten Daten über die Änderung der Geländeoberfläche können Rückschlüsse auf die Tagesleistung von Erdarbeiten, wie Aushub von Baugruben oder Aufschüttung von Dämmen gemacht werden. Das Sammeln von Daten wie Betriebsstunden, Kraftstoffverbrauch, zurückgelegte Kilometer und Nutzlasten von Transportgeräten bei der Verfuhr von Bodenmaterial trägt ebenfalls zur einfacheren Leistungserfassung bei. Die gezielte Analyse und Auswertung dieser Daten ermöglichen eine bessere Nutzung des Equipments. Durch die Ermittlung der zurückgelegten Strecke und der Betriebsstunden können die Wartungsintervalle angepasst werden und plötzliche Ausfallzeiten der Geräte verringert werden. Durch digitale Arbeitsabläufe und die Vernetzung von Daten können der Fortschritt der Baustelle sowie die tatsächliche Arbeitsleistung für die Arbeitskalkulation einfacher erfasst werden. Folglich bedeutet das auch eine wesentliche Entlastung für das Baustellenpersonal auf Seiten der ausführenden Unternehmen und auf Auftraggeberseite. In zukünftiger Forschung bleibt zu klären wie mit der gesetzlichen Einschränkung bei der Massenermittlung mit Drohnen über öffentlichen Gebäuden umzugehen ist. Des Weiteren müssen Algorithmen entwickelt werden, welche das automatisierte Filtern von Störobjekten wie Baugeräte und Baumaterialien auf dem zu vermessenden Gelände ermöglichen.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Forschungsmethodik . . . . .	2
2.1	Überblick über Bauverfahren im Tiefbau (modifiziert nach [37]) . . . . .	5
2.2	Arten der Baugrubensicherung (modifiziert nach [37]) . . . . .	6
2.3	Überblick über Baugrubensicherungen (modifiziert nach [37]) . . . . .	6
2.4	Ausbildung der Baugrubenwand (modifiziert nach [9, 38]) . . . . .	8
2.5	Schlagrammen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [31]) . . . . .	14
2.6	Einrütteln von Spundwandprofilen (modifiziert nach [32]) . . . . .	15
2.7	Freireitendes Einpressen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [3]) . . . . .	16
2.8	Freischreitendes Einpressen von Spundwandprofilen (modifiziert nach [3]) . . . . .	16
2.9	Überblick über Baugrundverbesserungsverfahren (modifiziert nach [37]) . . . . .	20
2.10	Bodenaustauschverfahren (modifiziert nach [37]) . . . . .	21
2.11	Anordnung der Rüttelstopfsäulen unter einem Fundament (modifiziert nach [27]) . . . . .	22
2.12	Herstellung einer Rüttelstopfverdichtung mit Schleusenrüttler [27] . . . . .	23
2.13	Frostgewölbe im Tunnelbau (li.) und Grundprinzip eines Gefrierrohrs (re.) [36] . . . . .	24
2.14	Bodenvereisung mit Sole (modifiziert nach [36]) . . . . .	25
2.15	Bodenvereisung mit Stickstoff (modifiziert nach [36]) . . . . .	25
2.16	Einsatzbereiche von Pfahlgründungen (modifiziert nach [37]) . . . . .	29
2.17	Überblick über Pfahlgründungsverfahren (modifiziert nach [2]) . . . . .	30
2.18	Herstellung eines Franki-Pfahles (modifiziert nach [17]) . . . . .	32
2.19	Herstellung eines Simplex-Pfahles (modifiziert nach [18]) . . . . .	32
2.20	Herstellung eines verrohrten Bohrpfahls (modifiziert nach [1]) . . . . .	38
2.21	Herstellung eines hydraulisch gestützten Bohrpfahles (modifiziert nach [1]) . . . . .	38
2.22	Greiferbohrverfahren (modifiziert nach [1]) . . . . .	39
2.23	Drehbohrverfahren mit langer Schnecke (modifiziert nach [1]) . . . . .	39
2.24	Doppelkopfdrehverfahren (modifiziert nach [1]) . . . . .	40
3.1	Übersichtskarte (modifiziert nach [25]) . . . . .	45
3.2	Brückenquerschnitt in Seitenlage (modifiziert nach [26]) . . . . .	46
3.3	Taktschiebeverfahren (li.), Vorschubrüstung (re.) [52] . . . . .	47
3.4	Übersicht Vorlandbrücke (modifiziert nach [26]) . . . . .	48
3.5	Übersicht Neckarbrücke (modifiziert nach [26]) . . . . .	49
3.6	Bauphasen des Neckartalübergangs, Grundriss (modifiziert nach [25]) . . . . .	50
3.7	Geologischer Geländeschnitt (modifiziert nach [51]) . . . . .	53
3.8	Übersichtsskizze geböschte Baugrube (modifiziert nach [26]) . . . . .	54
3.9	Herstellen einer geböschten Baugrube bei A150 [22] . . . . .	55
3.10	Übersichtsskizze Spundwandverbau (modifiziert nach [26]) . . . . .	56
3.11	Herstellen eines Spundwandverbaus bei A270/271 [22] . . . . .	56
3.12	Übersichtsskizze Bohrpfähle (modifiziert nach [26]) . . . . .	57
3.13	Herstellen von Bohrpfählen bei A260/261 und A290 [22] . . . . .	58
4.1	Kostenanteile je Bauverfahren und Achse . . . . .	69

4.2	Kostenanteile je Bauverfahren . . . . .	69
4.3	Kostenanteile der geböschten Baugruben je Achse . . . . .	72
4.4	Kostenanteile der Spundwandverbauten je Achse . . . . .	72
4.5	Kostenanteile der Bohrpfahlgründungen je Achse . . . . .	72
4.6	Kostenanteile aller geböschten Baugruben . . . . .	73
4.7	Kostenanteile aller Spundwandverbauten . . . . .	73
4.8	Kostenanteile aller Bohrpfahlgründungen . . . . .	73
5.1	Karte der Wasserschutz-zonen im Bereich des Neckartalübergangs [30] . . . . .	78
5.2	Baustellensituation Neckarinsel [22] . . . . .	81
5.3	Anlieferung mit Wasserfahrzeugen [22] . . . . .	81
5.4	Betonanlieferung über Druckleitung [22] . . . . .	82
5.5	Übersicht Alt-Bestand (modifiziert nach [26]) . . . . .	83
7.1	Informationskette bei Massenermittlung mit Drohnen . . . . .	112
7.2	Informationskette bei Datennutzung von Transportgeräten . . . . .	114



# Tabellenverzeichnis

2.1	Schloss- und Profilformen von Stahlspundbohlen (modifiziert nach [53]) . . . . .	11
2.2	Vor- und Nachteile der Baugrubensicherungen [2, 37, 56] . . . . .	18
2.3	Herstellung einer geböschten Baugrube [23, 37] . . . . .	19
2.4	Herstellung eines Spundwandverbau [23, 37] . . . . .	19
2.5	Gegenüberstellung der Baugrundverbesserungsverfahren [2, 7, 37] . . . . .	27
2.6	Herstellung eines Bodenaustausches [37] . . . . .	28
2.7	Herstellung einer Rüttelstopfverdichtung [37] . . . . .	28
2.8	Vor- und Nachteile der Pfahlgründungsarten [2, 29, 37] . . . . .	41
2.9	Herstellung eines Ortbetonrammpfahles [37] . . . . .	42
2.10	Herstellung eines Bohrpfahles [37] . . . . .	43
3.1	Daten der Vorland- und Neckarbrücke . . . . .	47
3.2	Bauphasen des Neckartalübergangs . . . . .	50
3.3	Rammfähigkeit der Böden im Bereich des Neckartalübergangs [24] . . . . .	54
3.4	Massenermittlung geböschte Baugrube . . . . .	55
3.5	Massenermittlung Spundwandverbau . . . . .	57
3.6	Massenermittlung Bohrpfähle . . . . .	58
4.1	Gerätekalkulation Planierraupe . . . . .	61
4.2	Gerätekalkulation Lastkraftwagen . . . . .	61
4.3	Gerätekalkulation Hydraulikbagger . . . . .	62
4.4	Gerätekalkulation Flächenrüttler . . . . .	62
4.5	Gerätekalkulation Rammgerät mit Bohreinrichtung . . . . .	63
4.6	Gerätekalkulation Rammgerät mit Rammereinrichtung . . . . .	63
4.7	Gerätekalkulation Drehbohrgerät . . . . .	64
4.8	Kostenanteile der angewandten Bauverfahren . . . . .	71
5.1	Verteilung der Einstufungen für Verwertbarkeit und Deponierbarkeit . . . . .	84
6.1	Technische Parameter . . . . .	86
6.2	Technischer Parameter – Einsatztiefe . . . . .	88
6.3	Ökologische & ökonomische Parameter . . . . .	89
6.4	Art der Ausschlusskriterien . . . . .	92
6.5	Bewertungsschema für die Zielerfüllungskriterien . . . . .	93
6.6	Entscheidungsmatrix Baugrubensicherung ohne Gewichtung . . . . .	94
6.7	Entscheidungsmatrix Baugrubensicherung mit Gewichtung . . . . .	96
6.8	Vergleich der Rangfolgen . . . . .	96
6.9	Technische Parameter . . . . .	97
6.10	Technischer Parameter – Pfahldurchmesser . . . . .	98
6.11	Technischer Parameter – Einsatztiefe . . . . .	98
6.12	Ökologische & ökonomische Parameter . . . . .	100
6.13	Art der Ausschlusskriterien . . . . .	101

6.14	Entscheidungsmatrix Pfahlgründungsverfahren ohne Gewichtung . . . . .	103
6.15	Entscheidungsmatrix Pfahlgründungsverfahren mit Gewichtung . . . . .	104
6.16	Vergleich der Rangfolgen . . . . .	104

# Literaturverzeichnis

- [1] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *Ortbeton-Bohrpfähle; 905.015.1 11/2011*. 2011. URL: [https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bst/print/905\\_015\\_1\\_Ortbeton-Bohrpfaehle.pdf](https://www.bauer.de/export/shared/documents/pdf/bst/print/905_015_1_Ortbeton-Bohrpfaehle.pdf) (Zugriff am 01.07.2018).
- [2] Boley, C. *Handbuch Geotechnik*. 1. Auflage. München: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 978-3-8348-0372-6.
- [3] Boley, C., Englert, K., Bastian, F. und Günther, S. *Baurecht-Taschenbuch: Sonderbauverfahren Tiefbau*. 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2010. ISBN: 978-3433029664.
- [4] Borrmann, A., König, M., Koch, C. und Beetz, J. *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2015. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- [5] BRZ - Organisation und Bauinformatik. *Studie: IT-Trends in der Baubranche 2016 – Status quo und Perspektiven*. Studie. 2016.
- [6] Buja, H. O. *Bautechnik Spezial - Der Spezialtiefbau: Aktueller Stand der Geräte- und Verfahrenstechnik*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2004. ISBN: 0932-8351.
- [7] Buja, H. O. *Handbuch der Baugrunderkennung: Geräte und Verfahren*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009. ISBN: 978-3-8348-0544-7.
- [8] Buja, H. O. *Spezialtiefbautechnik von A-Z: Grundlagen - Gerätetechnik - Anwendungstechnik*. 2. Auflage. Norderstedt: Books on Demand, 2013. ISBN: 978-3844893748.
- [9] *DIN 4124:2012-12: Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2012.
- [10] *DIN EN 12063:1999-05: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Spundwandkonstruktionen*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Mai 1999.
- [11] *DIN EN 12699:2015-07: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verdrängungspfähle*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 2015.
- [12] *DIN EN 14199:2015-07: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Juli 2015.
- [13] *DIN EN 14731:2005-12: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Dez. 2005.
- [14] *DIN EN 1536:2015-10: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrspfähle*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Okt. 2015.
- [15] *DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Norm. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Jan. 2011.

- [16] Fachverband der Bauindustrie der Wirtschaftskammer Österreich. *ÖBGL Österreichische Baugeräteliste 2015*. 1. Auflage. Wien: Bauverlag BV GmbH, 2015. ISBN: 978-3-7625-3671-0.
- [17] FRANKI Grundbau GmbH. *Frankipfahl NG*. 2017. URL: [http://www.franki.de/pdf/Frankipfahl\\_NG\\_2015.pdf](http://www.franki.de/pdf/Frankipfahl_NG_2015.pdf) (Zugriff am 08.07.2018).
- [18] FRANKI Grundbau GmbH. *Simplexfahl*. 2017. URL: [http://www.franki.de/pdf/Franki\\_Simplexfahl.pdf](http://www.franki.de/pdf/Franki_Simplexfahl.pdf) (Zugriff am 08.07.2018).
- [19] Fuchs, F. „Grabenlose Sanierung von Kanalhaltungen im nicht begehbaren Bereich“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017.
- [20] Goger, G., Piskernik, M. und Urban, H. *Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen – Empfehlungen für zukünftige Forschung und Innovationen*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und Wirtschaftskammer Österreich, Dez. 2017.
- [21] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. *BGL Baugeräteliste 2015*. 1. Auflage. Berlin: Bauverlag BV GmbH, 2015. ISBN: 978-3-7625-3670-3.
- [22] Hochtief Infrastructure GmbH. München.
- [23] Hoffmann, M. *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. 7. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2006. ISBN: 978-3519652205.
- [24] IFB Eigenschenk GmbH. *Geotechnischer Untersuchungs- und Entwurfsbericht: Verfügbarkeitsmodell A6, Neckarbrücke - BW 6821-644 - Seitenlage, Wiesloch-Weinsberg*. Deggendorf, 17. Feb. 2017.
- [25] Ingenieurgesellschaft LAP-BUNG-Schüßler-Plan: Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG & BUNG GmbH & Schüßler-Plan GmbH.
- [26] K+S Ingenieur-Consult GmbH & Co. KG. Nürnberg.
- [27] Keller Grundbau GmbH. *Die Tiefenrüttelverfahren*. 2002. URL: <http://www.kellergrundbau.at/itemacms/content/files/broschueren/Tiefenruettelverfahren.pdf> (Zugriff am 09.09.2018).
- [28] Kolymbas, D. *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2016. ISBN: 3-662-53593-9.
- [29] König, H. *Maschinen im Baubetrieb*. 4., aktualisierte Auflage. Augsburg: Springer Vieweg Verlag, 2014. ISBN: 978-3-658-03288-3.
- [30] Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. *Karte der Wasserschutzgebietszonen*. 2018. URL: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Seiten/Startseite.aspx> (Zugriff am 19.02.2019).
- [31] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Einrammen von Spundwandprofilen*. 2018. URL: <https://www.liebherr.com/de/che/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/verfahren/rammen/rammen.html> (Zugriff am 27.08.2018).
- [32] Liebherr-International Deutschland GmbH. *Einrütteln von Spundwandprofilen*. 2018. URL: <https://www.liebherr.com/de/che/produkte/baumaschinen/spezialtiefbau/anbaugeraete/ruettler/details/lv20.html> (Zugriff am 31.08.2018).
- [33] Luhmann, T. „Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion – Möglichkeiten und Grenzen“. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89*. Hrsg. von DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, 2018, S. 31–44. ISBN: 978-3-95786-146-7.

- [34] Luhmann, T. *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden, Beispiele*. 4. Auflage. Berlin: Wichmann VDE Verlag, 2018. ISBN: 978-3-87907-640-6.
- [35] Luhmann, T. und Christina, S. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Berlin: Wichmann VDE Verlag, 2017. ISBN: 978-3879076253.
- [36] Max Bögl Bauservice GmbH und Co. KG. *Bodengefrieretechnik*. URL: <https://www.max-boegl.de/downloads/19-infrastruktur-bodengefrieretechnik/file.html> (Zugriff am 14.09.2018).
- [37] Maybaum, G., Mieth, P., Oltmanns, W. und Vahland, R. *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau*. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Hildesheim / Mainz / Braunschweig / Holzminden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8348-1614-6.
- [38] *ÖNORM B 2205:2000-11-01: Erdarbeiten – Werkvertragsnorm*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Nov. 2000.
- [39] *ÖNORM B 4710-1:2018-01-01: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Jan. 2018.
- [40] *ÖNORM EN 12036:1999-08-01: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Spundwandkonstruktionen*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Aug. 1999.
- [41] *ÖNORM EN 12069:2015-09-01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verdrängungspfähle*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Sep. 2015.
- [42] *ÖNORM EN 14199:2016-10-15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Mikropfähle*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Okt. 2016.
- [43] *ÖNORM EN 14731:2006-10-01: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Okt. 2006.
- [44] *ÖNORM EN 1536:2015-12-01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle*. Norm. Wien: Österreichisches Normungsinstitut, Dez. 2015.
- [45] Prinz, H. und Strauß, R. *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8274-2472-3.
- [46] Przybilla, H.-J., Bäumker, M. und Vieten, J. „Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund“. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89*. Hrsg. von DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, 2018, S. 61–79. ISBN: 978-3-95786-146-7.
- [47] Research Concepts Ltd. *Stahlpreisentwicklung*. URL: <https://www.stahlpreise.eu> (Zugriff am 14.03.2019).
- [48] *Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten (RiStWag)*. Richtlinie. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2016.
- [49] Roland Berger GmbH. *Studie: Think Act – Digitalisierung der Bauwirtschaft*. Studie. 2016.
- [50] Schmidt, H.-H., Buchmaier, R. F. und Vogt-Breyer, C. *Grundlagen der Geotechnik*. 5. Auflage. Stuttgart: Springer Vieweg Verlag, 2017. ISBN: 978-3-658-14930-7.
- [51] Smolczyk & Partner GmbH. *Baugrund- und Gründungsgutachten: Neckarsulm, BAB A6, Ersatzneubau Neckarbrücke*. Stuttgart, 3. Dez. 2012.

- [52] Südwestrundfunk. Stuttgart.
- [53] ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH. *Spundwandhandbuch*. 2007. URL: <http://www.budau.com/unternehmen/downloads/Spundwandhandbuch.pdf> (Zugriff am 05.09.2018).
- [54] Umweltministerium Baden-Württemberg. *Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial*. Verwaltungsvorschrift. März 2007.
- [55] *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung– DepV)*, BGBl.I, Nr. 22. Apr. 2009.
- [56] Zilch, K., Diederichs, C. J., Katzenbach, R. und Beckman, K. J. *Handbuch für Bauingenieure*. 2. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-14449-3.