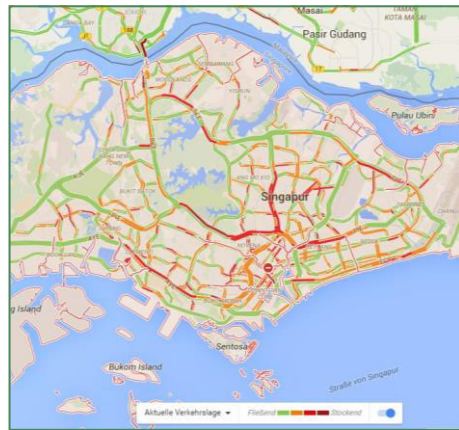


MASTERARBEIT



GEOTECHNISCHE, BAUBETRIEBLICHE UND BAUWIRTSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN ZU EINZELFUNDAMENTEN FÜR HOCHFRAHRWEGE MIT FOKUS AUF KOMBINIERTER PFAHL-PLATTENGRÜNDUNGEN AM BEISPIEL SINGAPURS

Dipl.-Ing. Florian Moser

Vorgelegt am
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Betreuer
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Hofstadler

Mitbetreuende Assistentin
Dipl.-Ing. Roswitha Marius

Graz, am 25. Mai 2016



Dipl.-Ing. Florian Moser

**GEOTECHNISCHE, BAUBETRIEBLICHE UND
BAUWIRTSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN ZU
EINZELFUNDAMENTEN FÜR HOCHFahrWEGE**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen - Bauingenieurwissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler

Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft

Mitbetreuender Projektassistent
Dipl.-Ing. Roswitha Marius

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am
.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz,
date
(signature)

Anmerkung

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. All jene, die hier ungenannt bleiben, ersuche ich um Verständnis und möchte ihnen hiermit ausdrücklich meinen Dank aussprechen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler und bei Frau Dipl.-Ing. Roswitha Marius für Ihre anregenden, motivierenden und auch kritischen Diskussionen. Erst durch ihre Unterstützung wurde es mir ermöglicht, dieses selbstgewählte Thema zu verwirklichen.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich vor allem meinen Eltern danken, da sie mir meine Ausbildung und meinen bisherigen Lebensweg ermöglicht haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meiner Freundin für ihre Unterstützung, ihre Geduld, ihr Verständnis und speziell für ihre aufmunternden Worte bedanken.

Kurzfassung

QUICKWAY ist ein Konzept, das entwickelt wurde, um den täglichen Verkehrsbehinderungen zufolge Überlastungen, und dem stetig anwachsenden Verkehrsaufkommen in Großstädten entgegenzuwirken. QUICKWAY besteht dabei aus Hochfahrwegen, die auch nachträglich in bestehenden Städten errichtet werden können und ausschließlich von autonomen Fahrzeugen genutzt werden. Dieses zusätzliche Verkehrsnetz soll das Verkehrsaufkommen auf dem Boden verringern und somit Verzögerungen und Staus reduzieren.

Der Stadtstaat Singapur, in dem es zu Stoßzeiten regelmäßig zu Verkehrsüberlastungen kommt, bildet ein prädestiniertes Beispiel für eine nachträgliche Errichtung von QUICKWAY und dient als Grundlage für die Betrachtungen in dieser Arbeit. Einen wichtigen Aspekt stellen dabei die Verkehrsbehinderungen während der Errichtungszeit der Hochfahrwege dar, die möglichst gering zu halten sind und daher einen raschen, stetigen Baufortschritt erfordern.

Der Untergrund in Singapur besteht hauptsächlich aus Verwitterungsböden oder marinen Ablagerungen und kann auf großen Teilen der Insel als bindiger Boden mit steifer bis halbfester Konsistenz angesprochen werden. Aufgrund der hohen Vertikallasten und Momente, die aus den Stützen der Hochfahrwege resultieren und in den Untergrund abgeleitet werden müssen, ist eine Fundierung mittels kombinierter Pfahl-Plattengründung mit bewehrten Pfählen erforderlich. Dahingehend eignen sich als Pfahlsysteme Großbohrpfähle, die eine große Mantelfläche zum Lastabtrag aufweisen, oder Fertigteile-Rammpfähle, die rasch und somit in größerer Zahl errichtet werden können.

Es wurden mehrere Konfigurationen und Ausführungsvarianten sowohl mittels FEM-Berechnungen bezüglich ihrer Standsicherheit, als auch kalkulatorisch untersucht und gegenübergestellt. Dabei konnten die folgenden Schlüsse gezogen werden. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im innerstädtischen Raum bietet sich ein Baugrubenverbau mittels Spundwandbohlen an, die folglich als verlorene Schalung beim Betonieren der Fundamentplatte dienen, um die Ausmaße der Baugrube möglichst gering zu halten. Dies treibt zwar den Preis, im Vergleich zur Ausbildung einer freien Böschung, deutlich in die Höhe, reduziert allerdings die Herstellungsdauer. Des Weiteren können Fertigteile-Rammpfähle, gegenüber Großbohrpfählen, rascher und kostengünstiger errichtet werden, was jedoch die Herstellung einer größeren Fundamentplatte erforderlich macht und somit die Gesamtkosten weiter hebt.

Diesbezüglich zeigt sich, dass die Gründungsvariante mit freier Böschung und Großbohrpfählen die langsamste und billigste, jene mit Spundwandverbau und Fertigteile-Rammpfählen die schnellste und teuerste Ausführung ist. Hierbei muss allerdings entschieden werden, ob der schnellere Baufortschritt die Mehrkosten rechtfertigt, da der Zeitunterschied überschaubar ist und sich die zusätzlichen Kosten, aufgrund der großen Anzahl an Fundamenten, vervielfachen.

Abstract

QUICKWAY is a concept, developed to reduce the daily obstruction of traffic in cities, due to congestions and the ongoing increase in volume of traffic. QUICKWAY forms a transport network with elevated roadways, which can be installed supplementary into present cities, and is supposed to be used by autonomous driving vehicles only. This additional transport system should reduce the traffic volume at ground level and therefore minimize delays and jams in traffic.

The city state of Singapore, where it comes to traffic disturbances during rush hours on a regular agenda, forms a predestined example for the supplementary installation of QUICKWAY and is used as an example for the considerations in this thesis. An important aspect was to keep the obstructions in traffic during the construction period of QUICKWAY to a minimum, which makes a rather fast construction process necessary.

The subsoil in Singapore consists mainly of residual soils and marine sediments, which can be described as cohesive soils with a medium to stiff consistency, on major parts of the island. High vertical loadings and bending moments, which result from the pillars of QUICKWAY, have to be deviated into the subsoil. Because of that a foundation, built as piled raft foundations with reinforced piles, is necessary. Therefore, large drilled piles, which exhibit a large lateral surface area to transfer the load into the surrounding soil, or prefabricated driven piles, which can be placed rather quick and consequently in higher quantities, are suitable as a pile system for the present circumstances.

Several configurations and variations of the foundation systems were investigated both costing-based and with FEM calculations, concerning their structural stability, and compared afterwards. In doing so, the following conclusions can be drawn. Due to the limited space offering in city-centre areas, an excavation support with sheet pile walls, which stay in the ground as permanent formwork for the foundation raft, is beneficial for reducing the dimensions of the building pit. Therefore, in comparison to an excavation with unsupported slopes, the costs are significantly higher, whereas the duration of the construction on the other hand is reduced. Furthermore, the implementation of driven piles is faster and cheaper than the construction of large drilled piles. However this requires an increase in the dimensions of the foundation rafts and therefore augments the total costs further on.

In summary it can be said that the construction model with unsupported slopes and large drilled piles is the slowest but cheapest foundation concept, and the model with sheet pile walls and driven piles the fastest but most expensive. Therefore it has to be decided whether the faster construction process justifies the higher costs, because the difference in duration is manageable and the additional costs are getting multiplied due to the high number of required foundations.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Situationsanalyse	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Gliederung und Methodik	4
2	Geologie	6
2.1	Bukit Timah Granite und Gombak Norite	7
2.2	Jurong Formation	9
2.3	Alt-Alluvium	10
2.4	Kallang Formation	11
2.5	Weitere Formationen	13
3	Gründungskonzept	15
3.1	Großbohrpfähle	17
3.2	Fertigteil-Rammpfähle	19
4	Statische Berechnungen der Gründung	24
5	Vergleich der Gründungskonzepte	28
5.1	Geometrie der Baugrube	28
5.2	Arbeitsschritte zur Errichtung der Pfahl-Plattengründung	30
5.2.1	Errichtung der Großbohrpfählen	33
5.2.2	Errichtung der Rammpfähle	35
5.3	Zusammenstellung der Baustelleneinrichtung	37
5.3.1	Baustelleneinrichtung für Großbohrpfähle	41
5.3.2	Baustelleneinrichtung für Fertigteil-Rammpfähle	43
5.3.3	Transport des Raupenkrans zwischen den Baustellen	45
5.4	Organisation und Platzbedarf der Baustelleneinrichtung	45
5.5	Aufwands- und Kostenermittlung der Pfahl-Plattengründung	48
5.5.1	Ermittlung der Arbeitsdauer	49
5.5.2	Ermittlung der Herstellungskosten	56
5.6	Bauablauf	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	70
7	Anhang	75
7.1	Finite-Element-Berechnungen mit <i>Plaxis 3D AE</i>	75
7.1.1	Eingabeparameter	75
7.1.2	Berechnungsergebnisse	76
7.2	Platzbedarf der Baustelleneinrichtung	80
7.2.1	Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung	80
7.2.2	Variante 2: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung	84
7.2.3	Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	87
7.2.4	Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	91
7.3	Kostenermittlung	95
7.3.1	Kalkulation	95
	Glossar	107
	Literaturverzeichnis	108

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1	Aktuelle Verkehrslage in Singapur am Fr. 13.05.2016 um 12:30 Uhr	2
Abb. 1-2	Geplante Anordnung und Verkehrsführung des <i>QUICKWAY</i> -Netzes in einer bestehenden Stadt.....	3
Abb. 1-3	Schematischer Querschnitt mit Fahrebenen	3
Abb. 2-1	Vereinfachte geologische Karte von Singapur.....	6
Abb. 2-2	Vereinfachte geologische Karte von Singapur mit Bodenentnahmestellen.....	8
Abb. 3-1	Übersicht über die nach der DIN EN genormten Pfahlsysteme	15
Abb. 4-1	Draufsicht und Schnitt der Pfahlgründungen	25
Abb. 5-1	Geometrie der Baumaßnahme bei Ausführung der Baugrube mit freier Böschung	28
Abb. 5-2	Geometrie der Baumaßnahme bei Ausführung einer Spundwand als verlorene Schalung	29
Abb. 5-3	Großdrehbohrgerät Bauer BG 20 H mit Kellystange, Schneckenbohrkopf, Drehantrieb und Verrohrung	33
Abb. 5-4	Herstellung von Großbohrpfählen mit verrohrter Bohrung und Kelly- Stange.....	35
Abb. 5-5	Pfahlrammgerät Junttan PM 20 mit Fallbär	36
Abb. 5-6	Pfahlrammgerät Junttan PM 16 mit, an der Rammvorrichtung, montiertem Bohrer.....	44
Abb. 5-7	Herstellung der Großbohrpfähle (Variante 1: Baugrube mit freier Böschung)	46
Abb. 5-8	Herstellung der Fertigteil-Ramppfähle (Variante 2: Baugrube mit freier Böschung)	47
Abb. 5-9	Herstellung der Großbohrpfähle (Variante 3: Baugrube mit Spundwandverbau)	47
Abb. 5-10	Herstellung der Fertigteil-Ramppfähle (Variante 4: Baugrube mit Spundwandverbau)	48
Abb. 5-11	Balkenplan Variante 1: Bohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung	62
Abb. 5-12	Balkenplan Variante 2: Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung	64
Abb. 5-13	Balkenplan Variante 3: Bohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	66
Abb. 5-14	Balkenplan Variante 4: Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	68
Abb. 7-1	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 1	76
Abb. 7-2	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 2	77
Abb. 7-3	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 3	77
Abb. 7-4	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 4	78
Abb. 7-5	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 5	78
Abb. 7-6	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 6	79
Abb. 7-7	Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 7	79

Abb. 7-8	Herrichten des Arbeitsplanums	80
Abb. 7-9	Errichten der Großbohrpfähle – Aushub.....	80
Abb. 7-10	Errichten der Großbohrpfähle – Einbringen der Bewehrung.....	81
Abb. 7-11	Errichten der Großbohrpfähle – Betonieren.....	81
Abb. 7-12	Aushub der Baugrube.....	81
Abb. 7-13	Vorbereiten der Aushubsohle	82
Abb. 7-14	Betonieren der Sauberkeitsschicht.....	82
Abb. 7-15	Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung	82
Abb. 7-16	Aufstellen der Schalung und Einbau der Bewehrung	83
Abb. 7-17	Betonieren der Fundamentplatte	83
Abb. 7-18	Hinterfüllen der Baugrube.....	83
Abb. 7-19	Herrichten des Arbeitsplanums	84
Abb. 7-20	Errichten der Fertigteil-Rammpfähle.....	84
Abb. 7-21	Aushub der Baugrube.....	85
Abb. 7-22	Vorbereiten der Aushubsohle	85
Abb. 7-23	Betonieren der Sauberkeitsschicht.....	85
Abb. 7-24	Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung	86
Abb. 7-25	Aufstellen der Schalung und Einbau der Bewehrung	86
Abb. 7-26	Betonieren der Fundamentplatte	86
Abb. 7-27	Hinterfüllen der Baugrube.....	87
Abb. 7-28	Herrichten des Arbeitsplanums	87
Abb. 7-29	Errichten der Großbohrpfähle – Aushub.....	88
Abb. 7-30	Errichten der Großbohrpfähle – Einbringen der Bewehrung.....	88
Abb. 7-31	Errichten der Großbohrpfähle – Betonieren.....	88
Abb. 7-32	Einbringen der Spundwand	89
Abb. 7-33	Aushub der Baugrube.....	89
Abb. 7-34	Vorbereiten der Aushubsohle	89
Abb. 7-35	Betonieren der Sauberkeitsschicht.....	90
Abb. 7-36	Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung	90
Abb. 7-37	Einbau der Bewehrung	90
Abb. 7-38	Betonieren der Fundamentplatte	91
Abb. 7-39	Herrichten des Arbeitsplanums	91
Abb. 7-40	Errichten der Fertigteil-Rammpfähle.....	91
Abb. 7-41	Einbringen der Spundwand	92
Abb. 7-42	Aushub der Baugrube.....	92
Abb. 7-43	Vorbereiten der Aushubsohle	92
Abb. 7-44	Betonieren der Sauberkeitsschicht.....	93
Abb. 7-45	Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung	93
Abb. 7-46	Einbau der Bewehrung	93
Abb. 7-47	Betonieren der Fundamentplatte	94

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1	Konfigurationen und Ergebnisse der Berechnungen mittels Finite-Element-Programm	26
Tab. 4-2	Charakteristische, äußere Pfahltragfähigkeiten	26
Tab. 5-1	Konfigurationen aus Kubatur der Bodenplatte, Gesamtlänge der Pfähle und Baugrubenverbau	48
Tab. 5-2	Für die Kalkulation angesetzte Leistungswerte	50
Tab. 5-3	Größenordnung der ermittelten Leistungswerte	52
Tab. 5-4	Herstellungsdauer Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung	53
Tab. 5-5	Herstellungsdauer Variante 2: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung	54
Tab. 5-6	Herstellungsdauer Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	54
Tab. 5-7	Herstellungsdauer Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	55
Tab. 5-8	Herstellungskosten Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung	58
Tab. 5-9	Herstellungskosten Variante 2: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung	58
Tab. 5-10	Herstellungskosten Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	59
Tab. 5-11	Herstellungskosten Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau	59
Tab. 6-1	Übersicht der Herstellungsdauer der Varianten	72
Tab. 6-2	Übersicht der Herstellungskosten der Varianten	72
Tab. 7-1	Eingabeparameter der Soil-Materialien für die FEM-Berechnung mit <i>Plaxis 3D AE</i>	75
Tab. 7-2	Eingabeparameter der Embedded pile-Materialien für die FEM-Berechnung mit <i>Plaxis 3D AE</i>	76
Tab. 7-3	Ergebnisse der FEM-Berechnungen mit <i>Plaxis 3D AE</i>	76
Tab. 7-4	Kalkulation der Einzelkosten der Teilleistungen	106

1 Einleitung

Im Folgenden wird ein Überblick über das in dieser Arbeit behandelte Thema gegeben. Dazu werden neben der Situationsanalyse und der Zielsetzung, auch die Gliederung und angewendete Methodik der nachfolgenden Kapitel beschrieben.

1.1 Situationsanalyse

Staus und Verkehrsbehinderungen zufolge Überlastungen der Verkehrswege liegen in der heutigen Zeit, vor allem in Ballungsräumen, an der Tagesordnung. Dies liegt hauptsächlich am privaten PKW-Verkehr, der durchschnittlich nur mit 1,16 Personen pro Fahrzeug ausgelastet ist und neben der Umweltbelastung auch einen hohen Bedarf an öffentlichen Flächen aufweist. Gerade in Großstädten kommt es durch die stetig wachsende Zahl an PKWs oft zu mehrstündigen Verkehrsüberlastungen, gesundheitsschädlicher Umweltbelastung und Knappheit an Park- und Abstellmöglichkeiten. Im weiteren Sinne entstehen dadurch volkswirtschaftlichen Schäden aufgrund Verkehrsverzögerungen.

Im Allgemeinen lässt sich der heutige Verkehr in Personen- und Güterverkehr unterteilen, die alle dieselbe öffentliche Infrastruktur benutzen. Daraus ergeben sich viele Kreuzungs- und somit Konfliktpunkte, die zu einem ineffizienten Stop-and-go-Verkehr und somit zu einem Verkehrschaos führen.¹

Mit einem solchen Verkehrschaos hat auch der Stadtstaat Singapur täglich zu kämpfen, der als Beispiel für die Betrachtungen in dieser Arbeit dient.

Singapur ist ein Insel- und Stadtstaat und liegt an der südlichen Spitze der Malaiischen Halbinsel, zwischen der Johorstraße und der Straße von Singapur. Derzeit umfasst die Insel eine Fläche von ca. 720 km² und besteht aus einer Hauptinsel und 61 kleineren Inseln. Die Bevölkerung beläuft sich dabei auf etwa 5,5 Mio. Einwohner.² (Im Vergleich dazu hat Österreich eine Fläche von ca. 83.900 km² und eine Bevölkerung von ca. 8,5 Mio.).³ Singapur besteht aus einem Central Business District (CBD) im Süden, verschiedenen Wohngebieten, verteilt über die Insel, mehreren Industriegebieten, hauptsächlich in Jurong im Südwesten, und einem Naturreservat in Bukit Timah im Zentrum der Insel.⁴

¹ Vgl. SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 2

² Vgl. <http://www.singstat.gov.sg/statistics/latest-data#14>. Datum des Zugriffs: 05.11.2015

³ Vgl. http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/bundeslaender/index.html. Datum des Zugriffs: 05.11.2015

⁴ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 419

Im Jahr 2015 waren in Singapur insgesamt 957.246 Fahrzeuge zugelassen, wobei seit 2013 ein Rückgang der Zulassungen zu beobachten ist und der Höhepunkt 2013 bei 974.170 lag.⁵ Bezogen auf die Bevölkerungszahl ergibt das in etwa 174 Fahrzeuge pro 1000 Einwohner. Im Vergleich dazu hat Österreich mit ca. 547 Fahrzeugen pro 1000 Einwohner zwar um ungefähr 3,14-mal mehr Fahrzeuge auf 1000 Einwohner, bezogen auf die Grundfläche allerdings um ca. 116,5-mal mehr Platz zur Errichtung von Infrastruktur und Park- bzw. Abstellmöglichkeiten und somit zur Verteilung des aufkommenden Verkehrs.⁶

Die Regierung in Singapur versucht zwar durch strenge Bestimmungen auf Neuzulassungen und hohe Abgaben und Mauten im Stadtverkehr die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge gering zu halten, dennoch kommt es zu Stoßzeiten zu teilweise starken Verkehrsbehinderungen sowohl im Zentrum als auch über die gesamte Insel verteilt (siehe Abb. 1-1).

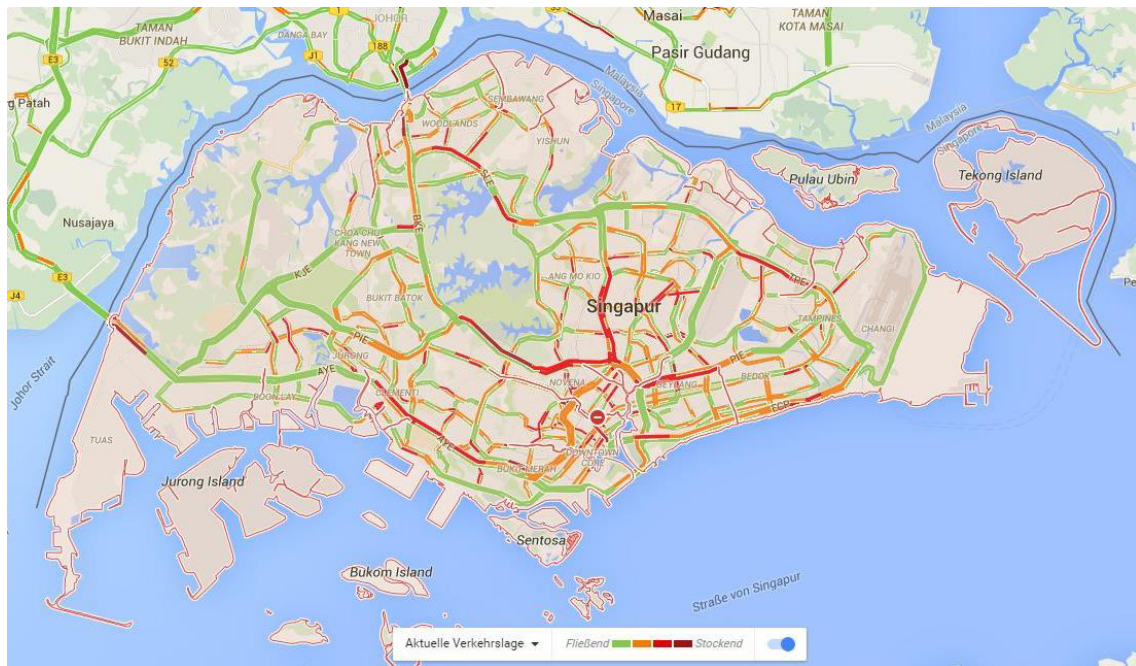


Abb. 1-1 Aktuelle Verkehrslage in Singapur am Fr. 13.05.2016 um 12:30 Uhr⁷

Als mögliche Lösung für das wachsende Verkehrsproblem in Großstädten hat das QUICKTEAM, rund um Lutz Sparowitz, das QUICKWAY-Konzept entwickelt⁸. Das QUICKWAY-System ist ein Modell, bei dem zusätzliche Verkehrsflächen durch die Errichtung von Hochfahrwegen

⁵ Vgl. <http://www.singstat.gov.sg/statistics/browse-by-theme/transport-tables>. Datum des Zugriffs: 13.05.2016

⁶ Vgl. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/index.html. Datum des Zugriffs: 13.05.2016

⁷ Vgl. <https://www.google.at/maps>. Datum des Zugriffs: 13.05.2016

⁸ Vgl. QUICKTEAM, : Virtual Project Singapore. S. 7-11

über den bestehenden Straßen geschaffen werden. Diese, vom herkömmlichen Verkehr getrennten, kreuzungsfreien Hochfahrwege werden von autonomen Fahrzeugen für den Personen- und leichten Güterverkehr befahren, um den Individualverkehr am Boden zu entlasten, die Mobilität der Bevölkerung zu verbessern und die Umweltbelastung zu senken.⁹



Abb. 1-2 Geplante Anordnung und Verkehrsführung des QUICKWAY-Netzes in einer bestehenden Stadt¹⁰

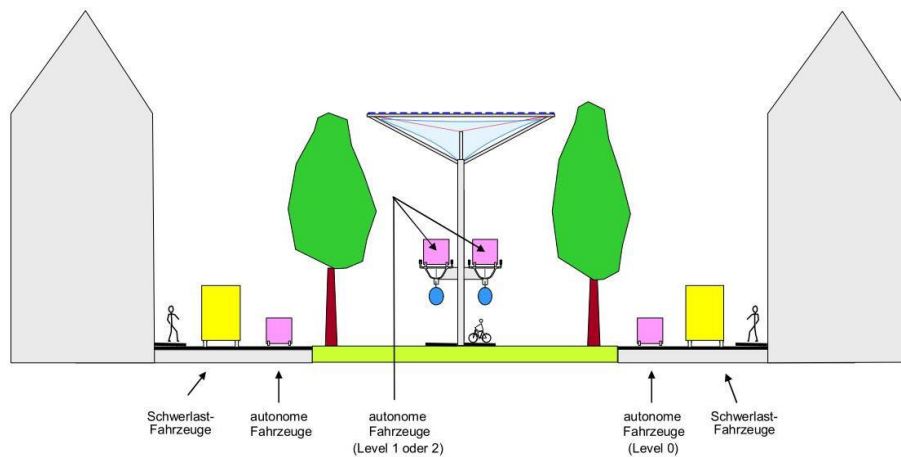


Abb. 1-3 Schematischer Querschnitt mit Fahrebenen¹¹

⁹ Vgl. SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 9-10

¹⁰ SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 11

¹¹ SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 9

1.2 Zielsetzung

Um mit der zukünftigen Städteentwicklung und dem steigenden Verkehrsaufkommen mithalten zu können, ist es notwendig das *QUICKWAY*-System in einem möglichst kurzen Zeitraum errichten zu können. Dabei ist es außerdem wichtig, die Beeinträchtigung des Verkehrs und des Stadtbilds während der Bauphase des *QUICKWAY*-Systems in einem geringen Ausmaß zu halten. Dazu ist vor allem ein rascher und konstanter Baufortschritt erforderlich. Das Konzept des *QUICKTEAM* sieht vor, pro Baustelle und Kalendertag einen Fahrwegsträger zu errichten, was voraussetzt, dass pro Tag eine Gründung fertiggestellt wird.¹²

Das Ziel dieser Arbeit ist es nun die Machbarkeit dieser Vorgabe am Beispiel Singapur zu untersuchen. Dazu werden verschiedene Ausführungsvarianten der Gründungen bezüglich der Dauer und der Kosten der Herstellung, sowie des Bauablaufs bei der Errichtung betrachtet.

1.3 Gliederung und Methodik

Im folgenden Kapitel dieser Arbeit werden die geologischen Verhältnisse in Singapur untersucht, um ein geeignetes Gründungssystem für die lokalen Voraussetzungen zu finden. Dabei wurde auf die vorhandenen Formationen, ihre Ausbreitung und die bodenmechanischen Eigenschaften eingegangen. Als Grundlage dafür dienten unterschiedliche Berichte und Publikationen zur Geologie Singapurs, die im Zuge eines Lokalaußenscheins vor Ort bzw. der Bauausführung verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden müssen.

Auf Grundlage der Untergrundverhältnisse werden in Kapitel 3 verschiedene Varianten für die Gründung diskutiert und verglichen. Neben der angeführten Literatur, floss dabei auch ein Fachgespräch mit Herrn Marcus Obermayr der Firma *3P Geotechnik ZT GmbH* mit ein. Im Vordergrund stand dabei das zu wählende Pfahlssystem, da in den bindigen Böden Singapurs eine Pfahlgründung unumgänglich ist.

In Kapitel 4 werden, mit den in Frage kommenden Ausführungsvarianten, die möglichen Pfahlgründungssysteme festgelegt und die Geometrie und die Abmessungen mit dem Finite-Element-Programm *Plaxis 3D AE* erdstatisch, bezüglich der Standsicherheit und der auftretenden Verformungen, untersucht und gegenübergestellt. Mit den sich ergebenden Pfahlkräften wurde außerdem die charakteristische, äußere Tragfähigkeit der Pfähle betrachtet.

Die verbleibenden Varianten werden folgend in Kapitel 5 miteinander verglichen. Dabei wurde neben den erforderlichen Arbeitsschritten zur Errichtung der Pfahl-Plattengründung auch die Zusammenstellung der

¹² Vgl. SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 68

Baugrubeneinrichtung für die einzelnen Arbeitsvorgänge aufgeführt. Im Weiteren wurden der Platzbedarf, die Arbeitsdauer, die Herstellungskosten und der zeitliche Bauablauf der einzelnen Ausführungsvarianten ermittelt und gegenübergestellt. Die getroffenen Annahmen und angeführten Größen und Werte begründen sich einerseits auf die verwendete Literatur und andererseits auf Fachgespräche mit verschiedenen Personen aus der Lehre, Planung und Ausführung. Auch, wenn in dieser Arbeit das *QUICKWAY*-System am Beispiel Singapur untersucht werden soll, beziehen sich die angegebenen Größenordnungen auf die Situation in Österreich. Dies ist hauptsächlich auf den leichteren Zugang an Daten des österreichischen Marktes, vor allem bei den Kostenkennwerten, zurückzuführen und muss gegebenenfalls an die Verhältnisse in Singapur angepasst werden.

2 Geologie

Die Geologie Singapurs kann im Allgemeinen in vier Hauptformationen unterteilt werden:

- Bukit Timah Granite und Gombak Norite, bestehend aus Vulkan-
gestein
- Jurong Formation, bestehend aus Sedimentgestein
- Alt-Alluvium, bestehend aus quartären Ablagerungen
- Kallang Formation, bestehend aus jungen, angeschwemmten
und marinen Ablagerungen

Es gibt ca. 40 hügelige Gegenden in Singapur mit Erhebungen bis über 40 m Seehöhe, 25 davon befinden sich in den Bukit Timah Graniten und 15 in der Jurong Formation. Diese Hügel haben meist nur eine geringe Überdeckung an lockeren Böden und der intakte Fels steht bereits bei geringer Tiefe an.¹³

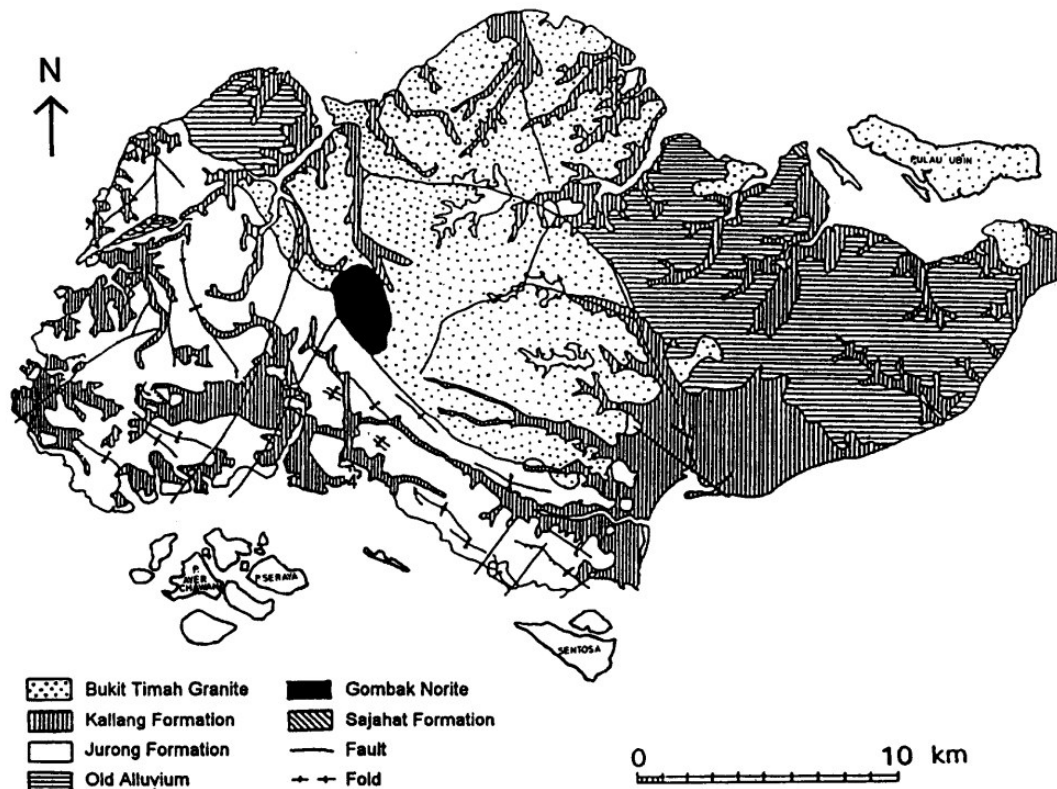


Abb. 2-1 Vereinfachte geologische Karte von Singapur¹⁴

¹³ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

¹⁴ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 420

Durch das feuchte, warme Klima in Singapur, mit Durchschnittstemperaturen um die 27°C, einer mittleren Luftfeuchtigkeit von 84% und einem Niederschlag von 2000 mm bis 2300 mm pro Jahr, ist die Verwitterung des Gesteins allerdings größtenteils sehr weit fortgeschritten. Die Verwitterung reicht dabei bis in eine Tiefe von 100 m, wobei sich das Gestein in den oberen Bereichen bereits zu Verwitterungsböden zersetzt hat. Die bodenmechanischen Eigenschaften dieser Verwitterungsböden hängen sehr stark vom Grad der Verwitterung und von der Zusammensetzung des ursprünglichen Gesteins ab. Aufgrund des heterogenen Untergrunds in Singapur variieren sie daher sehr stark von Region zu Region, was eine individuelle, lokale Baugrunderkundung notwendig macht.¹⁵

2.1 Bukit Timah Granite und Gombak Norite

Die Bukit Timah Granite bedecken ca. ein Drittel von Singapur und die gesamte Insel Pulau Ubin. Auf der Hauptinsel kommen sie vor allem im Zentrum und im Norden der Insel vor. Der Granit ist ein vulkanisches Gestein, das in großer Tiefe aus Magma entstanden und in ältere Formationen eingedrungen ist. Er bildet dabei das Basisgestein von Singapur, da er allen anderen Formationen unterliegt.

Die Gombak Norite kommen nur sehr vereinzelt, im Zentrum der Insel, im Bereich des Bukit Gombak, Bukit Panjang und den angrenzenden Hügeln vor. Sie bestehen ebenfalls aus Vulkangestein und haben ähnliche mechanische Eigenschaften wie die Granite.¹⁶

Der intakte Fels hat eine sehr hohe Festigkeit von durchschnittlich 190 MPa und eine sehr geringe Durchlässigkeit von $k_f = 10^{-7}$ m/s bis 10^{-9} m/s. Aufgrund des humiden Klimas in Singapur ist das Gestein allerdings in den oberen Schichten weitgehend verwittert. Die Verwitterungsböden haben dabei eine Mächtigkeit von wenigen Metern bis hin zu 70 m. In den meisten Gebieten liegt die Überlagerung im Durchschnitt zwischen 20 m und 50 m. Nahe der Oberfläche besteht der Boden hauptsächlich aus sandigem, tonigem Schluff, wobei die Zersetzung bis zu schluffigem Ton fortgeschritten sein kann. Mit der Tiefe nimmt der Grad der Verwitterung ab, was durch größere Korndurchmesser und einer Verringerung des Tonanteils zu erkennen ist.¹⁷ Die Konsistenz der Böden variiert von weich bis fest, wobei das verwitterte Gestein meist

¹⁵ Vgl. RAHARDJO, H. et al.: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. In: Engineering Geology, 73/2004. S. 158

¹⁶ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

¹⁷ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 421

steif bis halbfest anzutreffen ist. In manchen Gegenden wurden zudem Blöcke aus intaktem Granit in der bindigen Matrix gefunden.¹⁸

Eine in der Yishun Slope durchgeführte Kernbohrung in der Bukit Timah Formation (siehe Abb. 2-2) zeigte auf den ersten 9 m einen komplett verwitterten und transformierten Verwitterungsboden. Das Material wurde als toniger Schluff mit glatt texturierten Bodenpartikeln und mit keinerlei Überresten des ursprünglichen Gesteins angesprochen. In einer Tiefe von 9 bis 21 m zeigte sich ein stark verwitterter Granit mit einer gröberen Textur der Bodenpartikel und einem abnehmenden Feinkornanteil. Die Scherparameter des Bohrkerns variierten zwischen $c = 12 \text{ kPa}$ bis 26 kPa und $\varphi = 27^\circ$ bis 38° , wobei die Kohäsion mit der Tiefe ab- und der Reibungswinkel zunahm, was auf einen kontinuierlichen Rückgang der Verwitterung schließen lässt.¹⁹

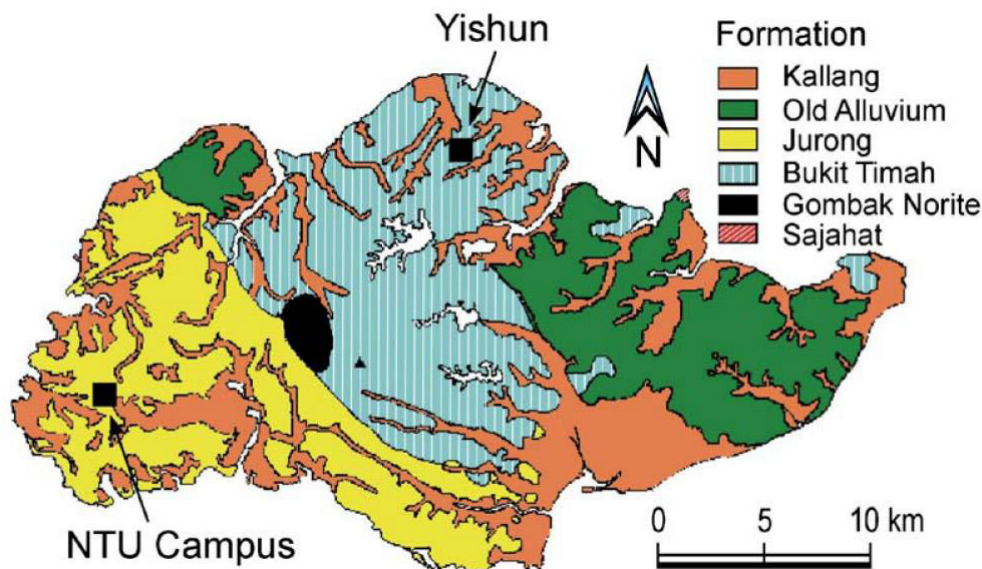


Abb. 2-2 Vereinfachte geologische Karte von Singapur mit Bodenentnahmestellen²⁰

Das intakte Gestein und auch der Verwitterungsboden aus zersetztem Granit eignen sich meist gut für Gründungen, da der Fels eine hohe Festigkeit aufweist und der Boden in den meisten Gegenden steif bis fest ist. Es sind daher, bei trockenen Bedingungen, durchwegs tiefe Baugruben ohne große Sicherungsmaßnahmen möglich.²¹ Bei Tunnelbauwerken liegt die Herausforderung allerdings im Vortrieb durch Wechselzonen

¹⁸ Vgl. HULME, T.; BURCHELL, A.: Tunnelling Projects in Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 409-418/1999. S. 409

¹⁹ Vgl. RAHARDJO, H. et al.: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. In: Engineering Geology, 73/2004. S. 166

²⁰ Vgl. RAHARDJO, H. et al.: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. In: Engineering Geology, 73/2004. S. 158

²¹ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 421

aus weichem Material, durchzogen mit hartem, intaktem Fels. Auch das Bohren von Pfählen und Vorspannanker ist in diesen Schichten erschwert, da der abrasive und harte Granit ein hohes Drehmoment erfordert, was hohe Temperaturen und einen hohen Verschleiß zufolge hat. Außerdem wird das Bohrgestänge aufgrund der hart-weichen Wechselagerung leicht abgelenkt.²²

2.2 Jurong Formation

Die Jurong Formation kommt vor allem im Süden, Südwesten und Westen Singapurs vor und besteht im Allgemeinen aus Sedimentgestein. Die Sedimente älterer, verwitterter Gesteine lagerten in seichten, marinen Becken ab und lithifizierten zu neuem Gestein. Durch spätere tektonische Bewegungen wurde das Sedimentgestein gehoben, gefaltet, gestört und metamorphosiert. Es besteht unter anderem aus Sand- und Tonstein, Konglomeraten, Tuff, Kalkstein, Schiefer und Dolomit, mit magmatischen Einlagerungen aufgrund vulkanischer Aktivität. Die Formation setzt sich aus dünnen, einige Meter mächtigen Schichten unterschiedlichen Gesteins zusammen, die eine starke Varianz der Eigenschaften aufweisen. Aufgrund des geringen Grads an Metamorphose und der tektonischen Aktivität, hat der Fels meist nur eine geringe Festigkeit, eine schwache Struktur und ist stark zerklüftet.²³

Ähnlich der Granite ist die Jurong Formation in Oberflächennähe stark zersetzt und der Verwitterungsboden reicht von wenigen Metern bis in eine Tiefe von 100 m. Im Durchschnitt erreicht der Boden eine Mächtigkeit von ca. 50 m und besteht aus dünnen, verzahnten Schichten aus sandigem Ton bis hin zu tonigem, schluffigem Sand mittlerer Plastizität. Das Material ist kohäsiv und die Konsistenz meist steif bis fest. Die bodenmechanischen Eigenschaften entsprechen zum Großteil jenen eines sandigen, schluffigen Tons mit einer Kohäsion von $c = 10 \text{ kPa}$ bis 40 kPa , einem inneren Reibungswinkel von $\varphi = 24^\circ$ bis 40° und einer Durchlässigkeit von $k_f = 10^{-6} \text{ m/s}$ bis 10^{-9} m/s . Des Weiteren ist der Aufbau des Verwitterungsbodens aufgrund der Vielzahl an Ursprungsgesteinen stark heterogen. In einigen Gegenden wurden harte Sandsteinblöcke mit Durchmessern von bis zu 6 m und größer, innerhalb einer steifen schluffigen, sandigen Ton-Matrix, gefunden. Auch unterhalb großen Teilen des Central Business Districts wurde die blockige Tonschicht, auch „Bouldery Clay“ genannt, in einer Tiefe von ca. 30 m gefunden.²⁴

²² Vgl. KRISHNAN, R.: Tunneling and underground projects in Singapore. In: Tunnels and Underground Structures, Zhao, Shirlaw & Krishnan (eds), 2000. S. 89-90

²³ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

²⁴ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 422

Eine Kernbohrung nahe des NTU Campus (siehe Abb. 2-2) zeigte im obersten Bereich, zwischen 0 m und 2 m, eine schluffige Oberflächenschicht mit komplett verwitterten Gesteinseinlagerungen. Zwischen 2 m und 20 m Tiefe bestand das Gefüge aus stark zersetztem Sandstein mit schluffigen, tonigen Zwischenschichten. Unterhalb davon wurde bis in eine Tiefe von 27 m ein moderat verwitterter, sandiger Schluffstein, mit geringerem Feinkornanteil aufgeschlossen. Der untersuchte Bohrkern zeigte mit $c = 35 \text{ kPa}$ bis 225 kPa und $\varphi = 42^\circ$ bis 51° sehr hohe Scherparameter, was auf hohe Bindungskräfte der faserigen Struktur des Verwitterungsbodens zurückzuführen ist. Während die Kohäsion in den ersten Metern mit der Tiefe abnahm, was auf einen Rückgang der Verwitterung schließen lässt, zeigt der starke Anstieg in größerer Tiefe den Übergang von Lockermaterial zu teilweise intaktem Gestein. Der Reibungswinkel blieb hingegen relativ konstant und nahm mit der Tiefe leicht zu. Im Gegensatz zum Verwitterungsboden im Bukit Timah Granit, der lediglich aus einem Ursprungsgestein besteht und daher einen kontinuierlichen Verlauf der Bodenparameter aufweist, ist das Jurong Sedimentgestein wesentlich heterogener aufgebaut, was deutlich stärker variierende Eigenschaften zur Folge hat.²⁵

Das Ausheben von tiefen Baugruben und das Gründen von schweren Gebäuden in diesem Untergrund bereiten, vor allem durch die starke Variation der Zusammensetzung und der mechanischen Eigenschaften, sowohl in horizontaler, als auch in vertikaler Richtung, große Herausforderungen.²⁶ So reicht das Spektrum von feinkörnigem Tonstein bis zu grobblockigen Konglomeraten, unterschiedlich stark verwittert und mit Störzonen aus lockerem und brüchigem Material. Die oberflächennahen, kohäsiven Böden neigen dazu bei Wasserzutritten aufzuweichen und bei Freilegung abzurutschen.²⁷

2.3 Alt-Alluvium

Das Alt-Alluvium kommt vor allem im Osten Singapurs und in Gebieten im Nordwesten der Insel vor und besteht hauptsächlich aus geologisch jungen Sedimenten und Ablagerungen von Flüssen. Die Mächtigkeit dieser Schicht reicht von einigen Zehnermetern bis über 200 m ²⁸ und das Material besteht hauptsächlich aus mitteldicht bis sehr dicht gelagerten, tonigen Grobsanden und Feinkiesen. Der Boden ist teilweise verfes-

²⁵ Vgl. RAHARDJO, H. et al.: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. In: Engineering Geology, 73/2004. S. 167

²⁶ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 422

²⁷ Vgl. SENTHIL, N.: The Geology of Singapore as Seen by a Civil Engineer. <http://geotechnical.blogspot.co.at/2014/08/the-geology-of-singapore-as-seen-by.html>. Datum des Zugriffs: 07.11.2015

²⁸ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

tigt und zementiert und mit Grobkiesschichten verzahnt bzw. sind Schluff- und Tonlinsen eingelagert. Das Alt-Alluvium hat eine große wirtschaftliche Bedeutung für Singapur, da es die Hauptquelle für Sande bildet, welche in der Industrie und als Schüttmaterial für künstliche Anschüttungen zur Landgewinnung verwendet werden.²⁹

Untergrunderkundungen im Alt-Alluvium haben ergeben, dass die oberste Schicht meist komplett verwittert ist. Bis in eine Tiefe von 8 m wurde toniger Schluff mit steifer bis fester Konsistenz und toniger, schluffiger Sand, welcher locker bis mitteldicht gelagert war, aufgeschlossen. Darunter, zwischen 8 m und 13 m, bestand der Boden aus tonigen und schluffigen Sanden, mit mitteldichtem bis sehr dichtem Sand und steifem bis festem Ton. Unterhalb von 13 m wurde vor allem sehr dicht gelagerter toniger, schluffiger Sand ergründet, welcher teilweise in moderat festen Sandstein überging. Die Wichte des Bodens und der Reibungswinkel blieben mit $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ bis 21 kN/m^3 bzw. $\varphi = 35^\circ$ bis 36° sehr konstant über die Tiefe. Die Kohäsion nahm allerdings deutlich mit der Tiefe zu und reichte von $c = 2 \text{ kPa}$ an der Oberfläche bis 30 kPa . Auch die Schlagzahlen des Standard-Penetration-Tests (SPT) nahmen kontinuierlich von $N_{30} = 25$ im oberen Bereich, bis >100 unterhalb von 13 m zu. Die Durchlässigkeit des Materials lag allerdings überwiegend in der Größenordnung von $k_f = 10^{-7} \text{ m/s}$ bis 10^{-8} m/s .³⁰

Während die Sande und Kiese im Allgemeinen einen guten Baugrund darstellen, sind die bindigen Schichten vor Baubeginn auf ihre Kompressibilität zu untersuchen und gegebenenfalls auszutauschen. Des Weiteren ist die Einbringung und die erreichbare Tragfähigkeit von Pfählen, z.B. für Pfahlfundierungen, aufgrund lokaler Wechsellagerungen schwer vorhersehbar.³¹

2.4 Kallang Formation

Die Kallang Formation kommt verstreut über die Insel Singapur vor und bedeckt hauptsächlich Flusstäler und -ebenen, Flussmündungen und Küstengebiete. Das Material besteht aus Tonen, Sanden, torfigem Schlamm und Korallen, die vom Meer und von Flüssen abgelagert wurden.³²

²⁹ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 425

³⁰ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 425

³¹ Vgl. SENTHIL, N.: The Geology of Singapore as Seen by a Civil Engineer. <http://geotechnical.blogspot.co.at/2014/08/the-geology-of-singapore-as-seen-by.html>. Datum des Zugriffs: 07.11.2015

³² Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

Die Kallang Formation kann, gemäß ihrem Ursprung, in mehrere Gruppen unterteilt werden:³³

- Marine Gruppe: Die marine Gruppe umfasst Sedimente, die im küstennahen Meer abgelagert worden sind. Sie bestehen hauptsächlich aus verwitterten, marinen Tonen, die sehr weich bis steif (SPT N_{30} = 0 bis 8) sind, Korallen und Schalen enthalten und über 55 m mächtig sein können.
- Alluviale Gruppe: Dazu gehören Ablagerungen entlang von Flüssen und Flussmündungen, deren Mächtigkeit meist nicht bekannt ist und, die sowohl bindige als auch rollige Böden bilden. Die bindigen Ablagerungen sind meist weich bis steif (SPT N_{30} = 4 bis 15) und bestehen hauptsächlich aus sandigen Tonen und Schluffen, während das rollige Material in der Regel sehr locker bis mitteldicht (SPT N_{30} = 4 bis 20) gelagert ist und sich aus schluffigem, kiesigem Sand bzw. sandigem Kies zusammensetzt.
- Litorale Gruppe: Die Sedimente, die entlang der Küsten- und Uferlinie mit aktiver Brandung abgelagert worden sind, sind größtenteils sehr locker bis locker, selten auch mitteldicht (SPT N_{30} = 4 bis 12) gelagert. Sie bestehen aus kiesigem Sand bzw. schluffigem, sandigem Kies und bilden Schichten, die weniger als 5 m mächtig sind.
- Transitionale Gruppe: Zur transitionalen Gruppe gehören gemischte, organische Böden, die in Mangroven-Gebieten, Flussmündungen und Sümpfen vorkommen. Ihre Mächtigkeit variiert sehr stark, das Material ist sehr locker bis locker gelagert bzw. hat eine steife Konsistenz (SPT N_{30} = 4 bis 12) und besteht aus organischen Sanden, Schluffen, Tonen und Torf.
- Riff Gruppe: Die Riff Gruppe ist vor allem rund um die Inseln anzutreffen und setzt sich aus tonigen Sanden und Kiesen, mit eingelagerten Korallen und Schalen, zusammen. Das Material ist meist sehr locker bis locker (SPT N_{30} = 4 bis 12) gelagert.

Die Sedimente der Kallang Formation bilden im Allgemeinen sehr weiche Böden, welche, bis auf einige dünne Sand- und Kiesschichten, größtenteils homogen aufgebaut sind. Sie sind charakterisiert durch einen hohen Wassergehalt und eine geringe Festigkeit, weshalb sie große Setzungen bei Bauwerken verursachen können. Neben Gebieten in Downtown und im Central Business District, die auf weichen, tonigen Böden liegen, werden die künstlichen Anschüttungen zur Landgewinnung vor allem auf marinen Tonen, die fast ausschließlich aus Feinstmaterial bestehen,

³³ Vgl. HTOON, A. K.; YU, K.: Late Pleistocene Geology of Singapore for Engineering Geologists. <http://www.mgss.org.sg/cms/index.php/downloads/seminars-files/technical-seminar-no-1/2-late-pleistocene-geology-of-singapore-emphasizing-on-kallang-formation/file>. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

gegründet. Die undrainierte Scherfestigkeit der Tone variiert dabei in den oberen Schichten zwischen $c_u = 10 \text{ kPa}$ bis 30 kPa und in tieferen Schichten zwischen $c_u = 30 \text{ kPa}$ und 60 kPa . Der Reibungswinkel liegt im Durchschnitt zwischen $\varphi = 20^\circ$ und 25° , wobei die Kohäsion, aufgrund des hohen Wassergehalts, außer in stark überkonsolidierten Bereichen, prinzipiell vernachlässigt werden kann. Die Durchlässigkeit der marinen Tone variiert zwischen $k_f = 10^{-8} \text{ m/s}$ und 10^{-10} m/s und nimmt mit der Tiefe ab. Obwohl die weichen Sedimente per se nicht die besten Voraussetzungen für schwere Lasten darstellen, sind bereits einige berühmte Bauvorhaben, wie die Changi Airport Vergrößerung, die Nordost MRTline und der Containerhafen in Pasir Panjang auf künstlichen Anschüttungen errichtet worden.³⁴

2.5 Weitere Formationen

Neben den oben genannten vier geologischen Hauptformationen, gibt es noch weitere, weniger verbreitete Formationen in Singapur. Dazu zählen unter anderem:

- Tekong Formation: Die Tekong Formation besteht aus einer dünnen Schicht aus Sanden und Kiesen litoralen und fluviolen Ursprungs mit gelegentlich torfigen Einlagerungen. Diese Sedimente können dabei meist als sehr locker bis gelegentlich mitteldicht gelagerte, fein- bis grobkörnige, kiesige Sande (SPT $N_{30} = 4$ bis 12) angesprochen werden. Sie kommen unter anderem auf Pulau Tekong und Pulau Tekong Kechil vor und sind vor allem entlang der Küstenlinie und an Flussmündungen zu finden. Die Ablagerungen bilden rund um die Inseln flache, weite Terrassen mit einer Höhe von ca. $3,5 \text{ m}$ bis $5,5 \text{ m}$. Diese Terrassen kommen auch entlang des Sungei Serangoon und des Sungei Selatar im Nordwesten und entlang des Sungei Kranji und Sungei Pandan im Südwesten Singapurs vor. Aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit von maximal $5,5 \text{ m}$ ist die Tekong Formation oft schwer von der litoralen Gruppe der Kallang Formation zu unterscheiden.³⁵
- Sajahat Formation: Die Sajahat Formation kommt unter anderem auf Pulau Tekong, Pulau Sajahat und Punggol im Nordosten Singapurs vor, wurde aber auch an anderen Stellen unterhalb des Alt-Alluviums aufgeschlossen.³⁶ Sie ist die älteste Formation

³⁴ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 427

³⁵ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 427-428

³⁶ Vgl. SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999. S. 425

Singapurs und besteht aus metamorphen Gesteinen aus stark lithifizierten Quarziten, Quarz-Sandsteinen und Argilliten.³⁷

- Fort Canning Boulder Bed: Diese Formation setzt sich aus, bis zu 9 m großen, Sandstein- oder quarzitischen Blöcken innerhalb einer festen, teils zementierten Matrix aus sandigem, tonigem Schluff oder sandigem, schluffigem Ton zusammen. Das Fort Canning Boulder Bed unterliegt Teilen des Central Business Districts.³⁸

³⁷ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course.
http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

³⁸ Vgl. GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering Appreciation Course.
http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf. Datum des Zugriffs: 15.10.2015

3 Gründungskonzept

Da das *QUICKWAY*-System für den innerstädtischen Raum ausgelegt ist, muss bei der Errichtung mit beengten Platzverhältnissen gerechnet werden. Daher hat auch die Gründung auf möglichst engem Raum zu erfolgen. Die Lasten, welche sich aus den Stützen des *QUICKNET* ergeben, werden auf eine Fundamentplatte übertragen und somit in den Boden abgetragen. Jedoch überschreitet die Bodenpressung, aufgrund der hohen Lasten und der begrenzten Abmessungen dieser Bodenplatte, die zulässigen Werte. Dahingehend sind weitere Bodenverbesserungsmaßnahmen unterhalb der Fundamentplatte durchzuführen.

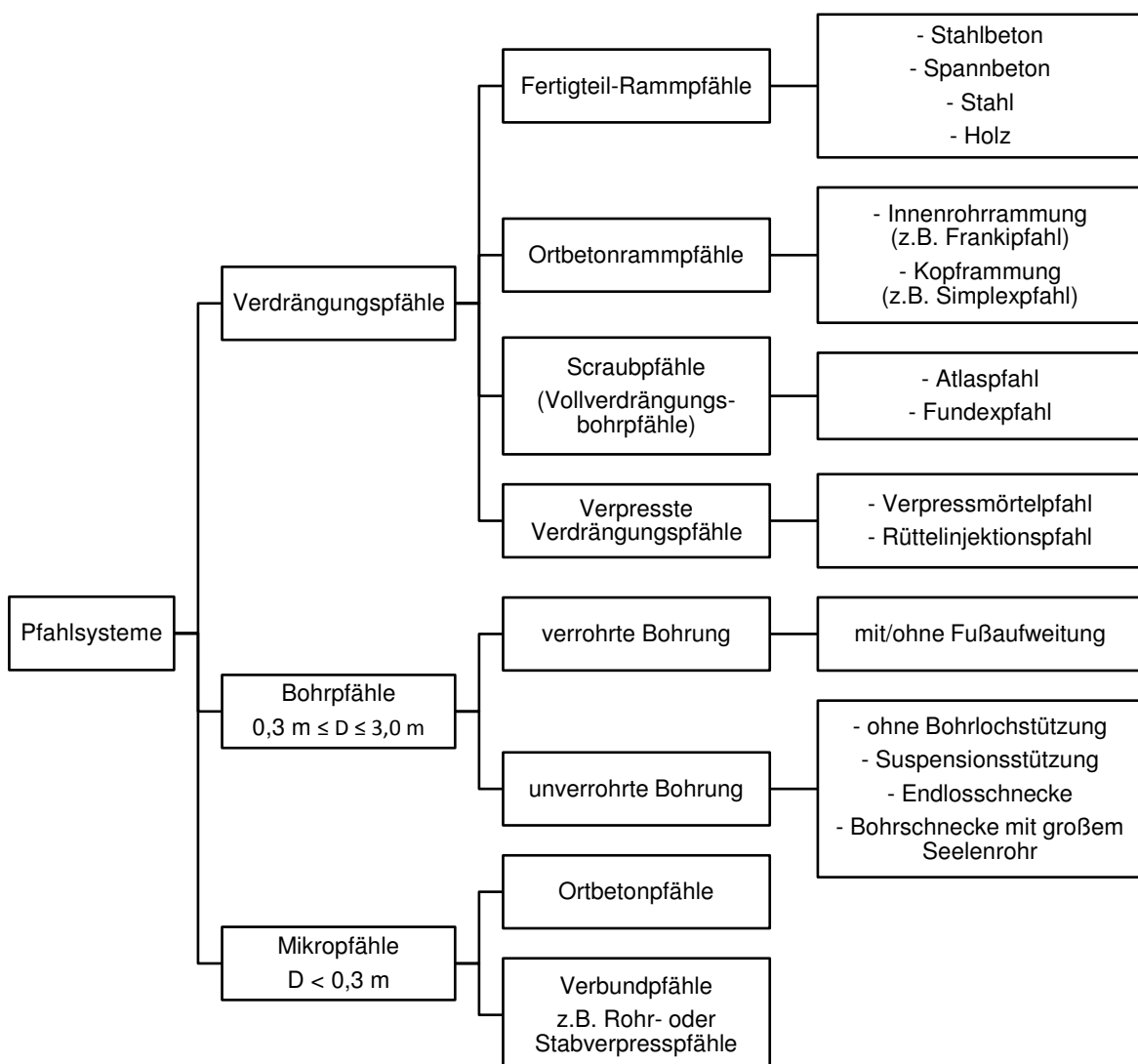


Abb. 3-1 Übersicht über die nach der DIN EN genormten Pfahlsysteme³⁹

³⁹ WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 76

Diese Bodenverbesserungen können unter anderem aus Bodenmischverfahren, DSV-Säulen, Rütteldruck- und Rüttelstopfsäulen bestehen. Aufgrund des hohen Moments, welches sich aus den Wind- und Horizontallasten am Stützenfuß ergibt, ist allerdings auch mit Zugkräften bzw. einer klaffenden Fuge unterhalb der Bodenplatte zu rechnen. Aus diesem Grund bietet sich eine kombinierte Pfahl-Plattengründung mit bewehrten Pfählen an, da die Betonplatte über die Bewehrung kraftschlüssig mit den Pfahlköpfen verbunden werden kann.

Vollverdrängungsbohrpfähle, wie der Atlas- oder Fundexpfahl bieten zwar eine wirtschaftliche, geräuscharme und erschütterungsfreie Alternative zu Rammpfählen, sind allerdings aufgrund ihrer aufwendigeren Baustelleneinrichtung und Herstellung, vor allem leistungsmäßig unterlegen. Da die Verdrängungsbohrpfähle in ihren Abmessungen, im Vergleich zu Großbohrpfählen, stärker begrenzt sind, erreichen sie außerdem nur geringere Pfahlwiderstände und benötigen somit eine größere Gesamtlänge. Dadurch stellt sich allerdings das Problem der nachträglichen Einbringung der Bewehrung in den Frischbeton. Da dies nur bis in eine Tiefe von ca. 15 m möglich ist, wird die Beanspruchbarkeit der Pfähle auf Zug und Biegung reduziert.⁴⁰ Des Weiteren besteht bei entstehenden Pfählen in weichen Böden die Gefahr, dass es aufgrund der vollständigen Verdrängung des Untergrunds zu Beschädigungen von bestehenden Pfählen kommt, die gerade erst betoniert wurden.⁴¹

Systeme, wie Duktile-Rammpfähle, oder Ortbeton-Verdrängungspfähle wie Franki- oder Simplex-Pfähle, welche die Lasten hauptsächlich über Spitzdruck in tiefer liegende, tragfähigere Schichten abtragen⁴², sind aufgrund der geologischen Situation in Singapur nur sehr bedingt bzw. nur in manchen Gebieten geeignet. Wie in Kap. 2 beschrieben besteht der Boden auf einem Großteil der Insel aus stark zersetztem Festgestein und bindigem Verwitterungsboden, der zwischen 50 m und 100 m tief reichen kann. Ein Vordringen bis in tragfähigere Schichten ist in solchen Fällen auszuschließen und die Pfähle werden nicht als Spitzendruckpfähle, sondern als schwimmend gelagerte Reibungspfähle beansprucht.

Während in der heutigen Zeit etliche verschiedene Pfahlsysteme Anwendung finden, bewähren sich im vorliegenden Fall vor allem Großbohrpfähle und Fertigteil-Rammpfähle.

Großbohrpfähle sind sehr individuell ausführbar und können bis zu einem Durchmesser von 300 cm errichtet werden. Dadurch ergibt sich eine große Mantelfläche, über die mittels Reibung die Last in den umgebenden Boden abgetragen werden kann. Die äußere Pfahltragfähigkeit

⁴⁰ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

⁴¹ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 92-94

⁴² Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

wird somit erhöht und die Anzahl an Pfählen kann reduziert und die Bauzeit verringert werden.

Sollen Pfähle mit kleineren Querschnittsabmessungen zum Einsatz kommen, so werden aufgrund der geringeren Mantelfläche mehr Pfähle benötigt. Hierbei bieten sich Fertigteil-Rammpfähle an, da sie im Vergleich zu anderen Pfahlsystemen deutlich schneller und mit geringerem Aufwand bezüglich der Baustelleneinrichtung errichtet werden können.

3.1 Großbohrpfähle

Je nach Untergrundbedingungen können Bohrpfähle auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Schnecken-Ortbeton-Pfähle, welche mit Endlosschnecken gebohrt werden, sind in bindigen Böden gut geeignet und sehr wirtschaftlich. Das Bohrloch wird über das in der Schnecke verbleibende Bohrgut gestützt und es ist somit keine Verrohrung oder Stützflüssigkeit notwendig.

Wird mit einem großen Seelenrohr gebohrt, wird während des Abteufens der anstehende Untergrund teilweise verdrängt. Nach Erreichen der erforderlichen Tiefe wird der Bewehrungskorb durch das Seelenrohr eingestellt und anschließend der Beton bei gleichzeitigem Ziehen der Schnecke eingepresst. Die Bewehrung ist jedoch über den Durchmesser des Seelenrohrs limitiert, wodurch eine Beanspruchung der Pfähle auf Zug und Biegung nur eingeschränkt möglich ist. Kommt hingegen eine Schnecke mit kleinem Seelenrohr zum Einsatz, so wird nach Erreichen der Endtiefe erst die Schnecke gezogen und der Beton durch das Schneckenrohr eingebracht. Anschließend wird der Bewehrungskorb mit Abstandshaltern in den Frischbeton eingerüttelt. Dies ermöglicht zwar die Verwendung eines größeren Bewehrungskorbs, beschränkt allerdings, wie bereits beschrieben, die Einbindung der Bewehrung.

Während Endlosschnecken in weichen, bindigen Böden eine hohe Leistung erzielen und aufgrund der Stützung des Bohrlochs eine geringere Baustelleneinrichtung benötigen, ist eine Anpassung des Bohrkopfs an härtere Zwischenschichten oder Findlinge im Untergrund nur schwer möglich. Dadurch kann das Material beschädigt und eine größere Bohrabweichung hervorgerufen werden.⁴³

In solchen Fällen eignet sich der Einsatz einer Kelly-Stange, da der Bohrkopf leichter ausgetauscht und an die tatsächlich angetroffenen Gegebenheiten angepasst werden kann. Hierbei muss das Bohrloch allerdings selbstständig standfest sein bzw. mit einer Bentonitsuspension oder einer Verrohrung gestützt werden. Da der Grundwasserspiegel in großen Teilen Singapurs bereits nahe unter der Geländeoberfläche liegt, kann es, trotz Verwendung einer Stützflüssigkeit, während des Ziehvor-

⁴³ Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauverfahren des Spezialtiefbaus. S. 217-247

gangs des Bohrkopfs zu Einschwemmungen und Aufweichungen des anstehenden Bodens kommen. Selbst bei sofortiger Auffüllung des Bohrlochs mit Beton ist der Frischbetondruck allein nicht immer in der Lage diese Vorgänge zu verhindern. Dadurch können Setzungen in der direkten Umgebung und eine Verschlechterung der Tragfähigkeit des Bodens hervorgerufen werden.

Um eine hohe Ausführungsqualität der Bohrpfähle unterhalb des Grundwasserspiegels sicherzustellen, ist daher eine verrohrte Bohrung von Vorteil. Die Verrohrung, die mittels eines zusätzlichen Drehtriebes oder einer Verrohrungsmaschine in den Untergrund eingebracht wird und dem Bohrer vorausseilt, verhindert das seitliche Einschwemmen von Material. Des Weiteren hält es den horizontalen Spannungszustand im Untergrund aufrecht und es kommt es zu keiner Auflockerung des anstehenden Bodens. Laut Norm dürfen Bohrpfähle in sehr weichen bindigen Böden mit $c_{u,k} \leq 15 \text{ kN/m}^2$ nicht unverrohrt hergestellt werden. Zudem kann in breiigen Böden trotz Verrohrung eine Stützflüssigkeit erforderlich sein, um einem hydraulischen Grundbruch entgegen zu wirken.⁴⁴

Großbohrpfähle können in allen Böden hergestellt werden und sind vor allem dann von Vorteil, wenn mit unterschiedlich festen Bodenschichten, Fels oder Findlingen, zu rechnen ist. Gleichmäßig anstehende Felschichten erhöhen zwar den Aufwand der Bohrarbeiten, machen diese aber nicht unmöglich. Lockere Gesteinslagen oder einzelne, in den Bohrquerschnitt ragende Findlinge hingegen, blockieren den Vortrieb. Mit Meißeln besetzte Schnecken- oder Kastenbohrer können allerdings auch im Festgestein, oder um Findlinge zu durchhörtern, verwendet werden und benötigen nur eine sehr geringe Anpassung des Bohrvortriebs. Dabei ist allerdings eine verrohrte Bohrung von Vorteil, um die Bohrabweichungen so gering wie möglich zu halten.

Des Weiteren erhält man durch die Förderung des Bohrguts einen direkten Aufschluss des Untergrunds, womit auf die zu erwartende Tragfähigkeit der Pfähle geschlossen werden kann. Damit kann unmittelbar auf die gegebenen Bodenverhältnisse reagiert und eine eventuelle Anpassung der Pfahllänge vorgenommen werden.

Da die Pfähle nahezu ausschließlich in dicht besiedelten Gebieten errichtet werden, hat der Bohrpfahl den Vorteil, dass er sowohl geräuscharm, als auch erschütterungsfrei hergestellt werden kann. Dies reduziert nicht nur die Belastung der Anwohner, sondern verringert außerdem die Gefahr benachbarte, erschütterungsempfindliche Gebäude zu beschädigen.⁴⁵

Ein großer Nachteil der Großbohrpfähle ist die aufwendige und platzintensive Baustelleneinrichtung, die, je nach Ausführung, von Bohrerät

⁴⁴ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 95-97

⁴⁵ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 94-104

und Verrohrung bis hin zu Silo, Pumpe und Aufbereitungsanlage für Beton und Stützflüssigkeit reicht. Dies ist vor allem von Bedeutung, da es sich bei dem geplanten Vorhaben um viele kleine Fundamente handelt, die nahezu über die gesamte Stadt verteilt sind. Dies bringt sowohl ein oftmaliges Auf- und Abbauen und Versetzen der Geräte, als auch ein aufwendiges Anliefern der Bewehrungskörbe und des Betons und Abtransportieren des Bohrguts mit sich.

Außerdem ist für die Herstellung von Großbohrpfählen ein tragfähiges Arbeitsplanum erforderlich. Für das Bohrgerät allein, mit dem Pfähle bis zu 100 cm Durchmesser gebohrt werden können, muss mit einem Betriebsgewicht von ca. 50 t gerechnet werden.⁴⁶ Der kritische Lastfall für den Untergrund stellt allerdings nicht das Bohren der Pfähle, sondern das Ziehen der Verrohrung dar, bei dem sich das Bohrgerät auf zwei Pratzen abstützt und sowohl das Gewicht, als auch die Mantelreibung überwunden werden muss. Gerade auf den weichen Verwitterungsböden, wie sie in Singapur zu finden sind, kann es daher notwendig sein, ein kräftiges Geotextil und eine Schotterschüttung aufzubringen, bevor mit den Bohrarbeiten begonnen werden kann.⁴⁷

3.2 Fertigteil-Rammpfähle

Fertigteil-Rammpfähle können aus Holz, Stahl oder Stahlbeton bestehen, wobei Holz hier aufgrund seiner geringen Dauerhaftigkeit in der Grundwasserwechselzone eine untergeordnete Rolle spielt. Reine Stahl-Rammpfähle andererseits tragen die Lasten hauptsächlich über Spitzen- druck ab, was als Gründungskonzept in Singapur, wie vorher beschrieben, nicht geeignet ist. Zur Erhöhung der Mantelreibung können Stahl-Pfähle zwar verpresst werden, dies macht das System allerdings wieder aufwendig und teuer. Der Stahlbeton-Pfahl vereint hierbei die Vorteile, dass er aufgrund der Überdeckung der Bewehrung sehr widerstandsfähig gegen Grundwasser ist und eine rauere Oberfläche hat, um die eingeleiteten Lasten über Mantelreibung in den anstehenden Boden abzutragen.⁴⁸

Stahlbeton-Rammpfähle sind je nach Anbieter in verschiedenen Ausführungen lieferbar. Sie können als Massiv- oder Hohlpfahl hergestellt werden und einen runden oder quadratischen Querschnitt mit den maximalen Abmessungen von DN45 cm bzw. 40/40 cm haben. Die innere Tragfähigkeit beträgt dabei bis zu 2.000 kN und darüber, wobei die Betongüte und die Bewehrung an die jeweiligen Erfordernisse angepasst werden

⁴⁶ Vgl. http://www.bauer.de/de/bma/products/drilling_rigs/. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

⁴⁷ Vgl. TUM, : Technische Universität München, Zentrum Geotechnik - Tiefgründungen, Pfähle und Anker. <http://www.gb.bgu.tum.de/index.php?id=46>. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

⁴⁸ Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigpfählen. <http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

kann. Die Schusslänge beträgt bis zu 18 m, wobei die Pfähle mittels einer Schweiß- oder Bolzenverbindung gekoppelt werden können und somit Gesamtlängen von bis zu 50 m möglich sind. Die Kupplungen stellen dabei eine kraftschlüssige Verbindung dar und beeinträchtigen die statischen Eigenschaften auf Zug und Biegung, auch bei dynamischen Beanspruchungen, nicht.⁴⁹

Rammpfähle können vertikal oder bis zu einer Neigung von 45° ausgeführt werden. Sie werden mittels Hydraulikbären in den Untergrund gerammt bzw. vibriert, wobei das Vibrieren nur in nicht bindigen Böden, die umgelagert werden können, geeignet ist. Der Boden wird dabei vollkommen im Erdreich verdrängt.

Die Pfähle sollten nach Erreichen der geplanten Tiefe noch einen Überstand von ca. 0,5 m bis 1 m über der Unterkante der Fundamentplatte haben. Nach dem Einbau der Sauberkeitsschicht wird der Überstand an den Pfahlköpfen gekappt und die Bewehrung freigelegt. Nur so kann eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Pfahl und Fundamentplatte hergestellt werden.⁵⁰

Fertigteile-Rammpfähle eignen sich vor allem in mächtigen, weichen Bodenschichten und haben den Vorteil, dass sie schnell eingebaut werden können und nur eine geringe Baustelleneinrichtung benötigen. Neben dem Rammgerät an sich, benötigt man lediglich einen LKW mit Kran für die Anlieferung der Pfähle. Ist die Baustelle dabei für große LKWs schlecht erreichbar, so können kürzere Pfähle geliefert werden, die während des Einbaus vor Ort gekoppelt werden. Dies erleichtert insbesondere das Umstellen der Geräte zwischen den einzelnen Baustellen.

Beim Einbau der Pfähle wird der Untergrund radial verdrängt und es kommt zu einer lokalen Verdichtung des Bodens. Dadurch können höhere Tragfähigkeiten, als bei Bohrpfählen mit vergleichbaren Abmessungen, erzielt werden.⁵¹ Des Weiteren kommt es zu keiner Materialförderung und somit muss kein Bohrgut abtransportiert und in weiterer Folge deponiert werden.

Während des Einrammens können Parameter wie Schlagzahlen, Eindringtiefe, Fallhöhe und Schwingungen aufgezeichnet werden und die Rammenergie, die für die Einbringung der Pfähle benötigt wird, ermittelt werden. Dadurch kann auf die vorhandenen Bodeneigenschaften und die zu erwartenden Pfahltragfähigkeit geschlossen werden und der Rammvorgang gegebenenfalls über Fallhöhe und Schlagfrequenz angepasst werden.⁵²

⁴⁹ Vgl. <http://www.naegele-hochtiefbau.at/index.php?id=4346>. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

⁵⁰ Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigungspfählen. <http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

⁵¹ Vgl. RIPPER, P.; WARDINGHUS, P.; WHITE, D.: Untersuchungen zum Tragverhalten von geramnten Verdrängungspfählen im überkonsolidierten Ton. In: Mitteilung des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 73/2006. S. 174-175

⁵² Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigungspfählen. <http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

In weichen bindigen, wassergesättigten Böden ist allerdings darauf zu achten, dass die Pfähle während des Einbringens vor allem gegen das Grundwasser drücken und somit einen Porenwasserüberdruck erzeugen. Die benötigte Rammenergie wird dadurch erhöht und überschätzt die tatsächliche Tragfähigkeit des Pfahls, da die Mantelreibung und vor allem der Spitzendruck nach Abfall des Porenwasserüberdrucks wesentlich geringer sind.⁵³

Dem gegenüber steht allerdings der zeitabhängige Effekt des sogenannten „Festwachsens“ der Pfähle, der mit den Konsolidierungsvorgängen in bindigen Böden einhergeht. Durch den Abbau des aus dem Rammvorgang resultierenden Porenwasserüberdrucks kommt es zu einer Zunahme der äußeren Pfahltragfähigkeit.⁵⁴ Dies bestätigt auch eine Studie mit durchgeführten dynamischen Pfahlprobelastungen in tonigem, sandigem Schluff mit steifer bis halbfester Konsistenz. Die quadratischen Stahlbeton-Rammpfähle mit einem Querschnitt von 40/40 cm und einer Länge von 23 m bis 25 m wurden zwischen einer Stunde und 21 Tagen nach dem Einbau geprüft. Während sich der Spitzendruck lediglich minimal erhöhte, konnte mit zunehmender Standzeit ein Anstieg der Mantelreibung von mehr als 100% und eine deutliche Reduktion der einhergehenden Setzungen festgestellt werden. Als Grund dafür werden der Abbau des Porenwasserüberdrucks und die Relaxation des Spannungsgewölbes im Boden angesehen, die zu einer Erhöhung der Radialspannungen und somit zum Anstieg der resultierenden Mantelreibung führen.⁵⁵

Pfahlgründungen mit Fertigteile-Rammpfählen bieten zudem den Vorteil, dass sie in gleichbleibender Qualität herstellbar sind. Die Pfähle werden im Fertigteilewerk unter einem hohen Automatisierungsgrad, und daher sehr präzise und einheitlich, hergestellt. Im Vergleich zu anderen Systemen ist somit sichergestellt, dass der Pfahlquerschnitt über die gesamte Länge gleich bleibt und es zu keinen Einschnürungen oder Mehrverbräuchen kommt, was vor allem in weichen Böden von Bedeutung ist.

Die Rammpfähle sind prinzipiell unmittelbar nach ihrer Einbringung in den Untergrund belastbar und können mit dem Rammgerät schnell und effektiv vor Ort mittels Pfahlprobelastungen geprüft werden. Dabei kann nicht nur die zu erwartende Pfahltragfähigkeit abgeschätzt, sondern mittels dynamischen Probelastungen auch die Pfahlintegrität festgestellt werden. Diese High-Strain-Integritätsprüfungen können rammbe-

⁵³ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

⁵⁴ Vgl. RIPPER, P.; WARDINGHUS, P.; WHITE, D.: Untersuchungen zum Tragverhalten von geramnten Verdrängungspfählen im überkonsolidierten Ton. In: Mitteilung des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 73/2006. S. 189-190

⁵⁵ Vgl. PLOHMANN, U.; VARINA, L.; WARDINGHUS, P.: Bewertung der axialen Pfahltragfähigkeit durch In-situ Messungen an Fertigteile-Rammpfählen aus Stahlbeton in bindigen Böden unter Berücksichtigung zyklischer Lasteinwirkungen. In: Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 99/2015. S. 518-519

gleitend durchgeführt werden und sichern somit die Ausführungsqualität während des Herstellungsprozesses.⁵⁶

Im Vergleich zu Bohrpfahlgruppen ist bei Verdrängungspfahlgruppen in der Regel ein geringeres Setzungsverhalten zu erwarten. Dies ergibt sich aufgrund der Vorbelastung der Pfahlgruppe durch die Rammenergie und den Verspannungseffekt zwischen den Pfählen.⁵⁷

Da im vorliegenden Fall hauptsächlich in dicht besiedelten Gebieten gebaut wird, stellen die auftretenden Lärm- und Erschütterungsemissionen während des Einrammens der Pfähle in den Boden einen großen Nachteil der Fertigteil-Ramppfähle dar. Während der Lärm vor allem eine Belastung der Anwohner mit sich bringt, entsteht durch die Erschütterung des Untergrunds die Gefahr der Beschädigung von naheliegenden Bestandsgebäuden. Um die Beeinträchtigung der Nachbarschaft zu verringern, können Lärmschutzmaßnahmen wie schallgedämmte Geräte und Motoren, spezielle Rambahären und Ummantelungen mit Schallkaminen vorgesehen werden. Des Weiteren sollten Schwingungsmessungen in der direkten Umgebung durchgeführt werden, um Schäden an bestehenden Gebäuden zu verhindern. Werden die zulässigen Schwingungsgeschwindigkeiten überschritten, so kann das Fallgewicht, die Fallhöhe oder die Schlagfrequenz der Rammung angepasst werden.⁵⁸

Werden während der Rammung andere Bodenverhältnisse angetroffen als angenommen, so ist eine Anpassung des Gründungskonzepts an die tatsächlichen Randbedingungen vor Ort sehr schwierig bzw. mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Wird die erforderliche Rammenergie nicht erreicht und es ist mit einer schlechteren Pfahltragfähigkeiten zu rechnen, kann die Pfahlänge durch die Verwendung längerer Schüsse oder durch den zusätzlichen Aufsatz von kurzen Pfählen noch ausgeglichen werden. Kann der Rammpfahl allerdings aufgrund festen, tragfähigen Schichten nicht bis zur Endteufe abgesenkt werden, so muss der überstehende Teil des Pfahls abgeschnitten werden, was zu einem Materialverlust führt.

Werden jedoch unerwartete, lokale Rammhindernisse angetroffen, so sind weitere Maßnahmen erforderlich. Findlinge und lokale Gesteinschichten können eine Durchörterung unmöglich machen und müssen durch Bohrungen oder Sprengungen zerkleinert werden. Es können allerdings auch bindige Bodenschichten mit sehr fester Konsistenz, oder dicht gelagerte, nicht bindige Zwischenschichten den Einsatz von Einbringhilfen erforderlich machen. Dabei können Auflockerungsbohrungen, Bohrungen mit Bodenaustausch, Lockerungssprengungen oder Wasser-

⁵⁶ Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigpfählen.
<http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

⁵⁷ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 235

⁵⁸ Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigpfählen.
<http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

spülungen herangezogen werden, um die Einbringwiderstände des anstehenden Bodens herabzusetzen, die Rammzeit zu verkürzen und die Lärm- und Erschütterungsbelastung zu reduzieren. Sprengungen sind jedoch in dicht besiedelten Gebieten nicht zu empfehlen und bei Wasserspülungen besteht bei bindigen Böden die Gefahr des Aufweichens des Untergrunds, womit eine Verringerung der Pfahltragfähigkeit riskiert wird. Als geeignete Maßnahme erweist sich im vorliegenden Fall das Vorbohren, wodurch allerdings die Baustelleneinrichtung und der gesamte Arbeitsvorgang deutlich aufwendiger wird.⁵⁹

Um über eventuelle Rammhindernisse bereits im Vorfeld Bescheid zu wissen, empfiehlt es sich im Bereich der Baustellen Druck- und Rammsondierungen durchzuführen. Damit können einerseits die vorhandenen Untergrundverhältnisse und andererseits die Rammbarkeit des Bodens und die zu erwartenden Pfahltragfähigkeit abgeschätzt werden. Die Sondierung ist schnell und einfach durchzuführen und dient als in situ Modellversuch für den Rammpfahl.⁶⁰

Ein besonderes Augenmerk beim Umgang mit Stahlbeton-Rammpfählen ist auf die Lagerung und den Transport der Pfähle zu legen. Bei unsachgemäßer Handhabung können Querrisse und Haarrisse entstehen, die durch den Einbau des Pfahls noch vergrößert werden und die Dauerhaftigkeit der Pfähle deutlich reduzieren können.

Zudem kann es bei Verwendung von ungeeigneten Rammhären, Rammhauben mit hartem Futter oder Durchrammung von weichen Schichten zu Schwingungsreflexionen im Pfahl kommen, was erhebliche Zugkräfte und somit Risse im Beton hervorrufen kann.⁶¹

Für das benötigte Pfahlrammgerät ist mit einem Betriebsgewicht von ca. 60 t bis 70 t zu rechnen.⁶² Daher ist auf den weichen Böden in Singapur, ähnlich wie beim Bohrgerät für Großbohrpfähle, ein geeignetes Arbeitsplanum aus einer Kiesschüttung erforderlich. Die Herausforderung stellen dabei die Umstellung des Ramm- bzw. Bohrgerätes und der Transport zwischen den Baustellen dar, wobei dies bei allen Pfahlgründungssystemen einen ähnlichen Aufwand bedeutet und somit keines der Systeme einen klaren Vorteil bietet.

⁵⁹ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 90-91

⁶⁰ Vgl. TUM, : Technische Universität München, Zentrum Geotechnik - Tiefgründungen, Pfähle und Anker. <http://www.gb.bgu.tum.de/index.php?id=46>. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

⁶¹ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. S. 83

⁶² Vgl. <http://www.centrum.de/leistungen/maschinen>. Datum des Zugriffs: 12.01.2016

4 Statische Berechnungen der Gründung

Wie bereits beschrieben besteht das Fundament des *QUICKWAY*-Systems aus einer Bodenplatte, welche auf Pfählen gegründet ist. Für eine vorläufige Dimensionierung der Gründung und zur Abschätzung der zu erwartenden Pfahlkräfte und Setzungen der Gründungsplatte wurden Berechnungen mit dem Finite-Element-Programm *Plaxis 3D AE* durchgeführt. Berücksichtigt wurden dabei unterschiedliche Bodenarten, Pfahl- und Plattengeometrien, Pfahlanordnungen und Pfahllängen, um verschiedene Gründungskonzepte miteinander vergleichen zu können.

Aufgrund der geologischen Situation in Singapur, der zufolge auf einem Großteil der Insel mit stark verwitterten Böden und tonigen Ablagerungen zu rechnen ist, wurden für die Berechnungen hauptsächlich Bodenparameter gemäß eines tonigen Untergrunds mit steifer Konsistenz gewählt. Des Weiteren wurden auch Berechnungen mit mitteldicht gelagertem Sand durchgeführt, um eventuelle Auswirkungen eines tragfähigeren Bodens zu ermitteln. Der Grundwasserspiegel wurde jeweils auf 2 m unterhalb der Geländeoberfläche gesetzt.

Die Lasten, welche sich aus den Stützen der *QUICKWAY*-Trasse ergeben⁶³, wurden jeweils auf einer quadratischen Betonplatte angesetzt, um die Flächenpressung möglichst gering zu halten. Die Platte ist dabei auf unterschiedlichen Pfählen gelagert, um Großbohrpfähle und Fertigteil-Rammpfähle zu simulieren. Diese kombinierte Pfahl-Plattengründung eignet sich vor allem für setzungsempfindliche Bauwerke in bindigen Böden und wurde daher den weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit zugrunde gelegt.

Aus den Berechnungen haben sich nun die folgenden Konfigurationen als zweckmäßig erwiesen (siehe Abb. 4-1). Die Bodenplatte ist 2 m stark und hat eine Abmessung von 6*6 m bzw. 8*8 m. Die Platte mit 6 m Kantenlänge ist auf 4 Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 100 cm gegründet. Die Platte mit 8 m Kantenlänge hingegen ist auf 9 Rammpfählen gelagert, die einen Durchmesser von 40 cm bzw. eine Querschnittsabmessung von 40/40 cm haben. Die Länge der Pfähle wurde jeweils zwischen 10 m und 15 m variiert.

⁶³ Vgl. OPPENEDER, J.: Projekt Quickway AP 4. S. 25

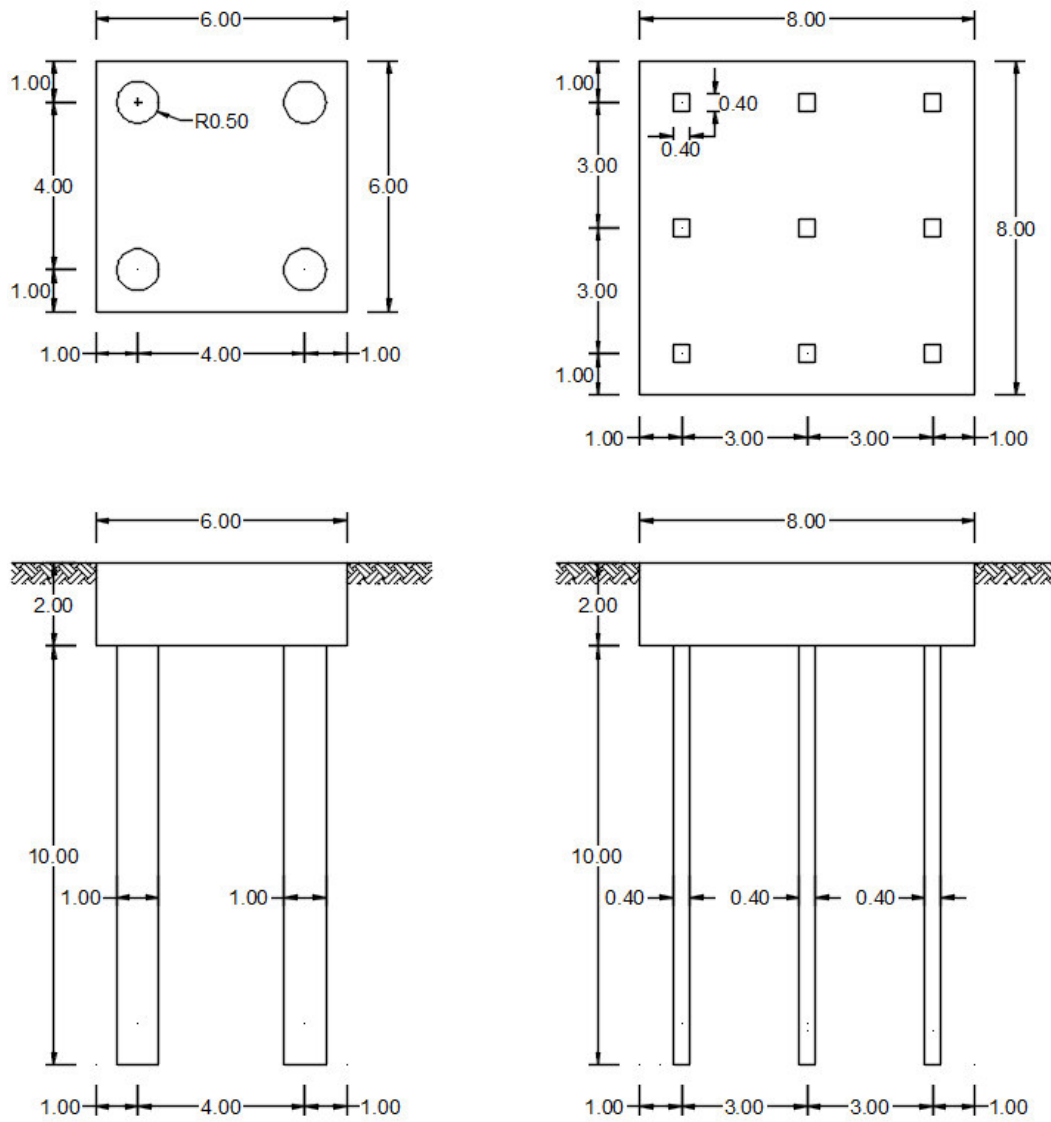


Abb. 4-1 Draufsicht und Schnitt der Pfahlgründungen

Die Eingabeparameter und die Ergebnisse der Finite-Element-Berechnungen sind in Anhang 1 aufgelistet. Die resultierenden Pfahlkräfte und Setzungen der Gründungsplatte haben sich wie folgt ergeben:

Nr.	Boden	Platte	Anzahl Pfähle	Pfahl- querschnitt	Länge [m]	N _{min} [kN]	N _{max} [kN]	S _{min} [mm]	S _{max} [mm]	Δs [mm]
1	Ton	6*6*2m	4 Stk.	DN100	10	-1110	250	-12,37	1,03	13,40
2	Ton	6*6*2m	4 Stk.	DN100	15	-1430	320	-8,74	0,71	9,45
3	Ton	8*8*2m	9 Stk.	DN40	10	-370	-30	-8,76	0,20	8,96
4	Ton	8*8*2m	9 Stk.	DN40	15	-520	-20	-6,65	0,20	6,85
5	Ton	8*8*2m	9 Stk.	40/40	10	-480	-50	-8,01	0,21	8,22
6	Sand	6*6*2m	4 Stk.	DN100	10	-2170	700	-10,87	2,99	13,86
7	Sand	8*8*2m	9 Stk.	DN40	10	-980	70	-5,81	1,31	7,12

Tab. 4-1 Konfigurationen und Ergebnisse der Berechnungen mittels Finite-Element-Programm

Für die Bemessung der äußeren Tragfähigkeit der Gründungspfähle stehen demgegenüber der charakteristische Pfahlsohlwiderstand und die Pfahlmantelreibung gemäß ÖNORM B 1997-1-3.⁶⁴ Die Widerstände laut ÖNORM beziehen sich auf gebohrte Pfähle und die Mantelreibung muss für Rammpfähle entsprechend abgemindert werden. Dies ergibt sich einerseits aus der glatteren Oberflächenbeschaffenheit der Fertigteilpfähle gegenüber Bohrpfählen und andererseits aus einer geringeren Tragfähigkeit des Bodens im Eckbereich von quadratischen Rammpfählen. Obwohl runde Pfähle demnach höhere Pfahlwiderstände aufweisen, werden meist quadratische Querschnitte gewählt, da sie den Transport und die Lagerung erheblich erleichtern. Aus Erfahrungswerten muss der Wert der Mantelreibung für Rammpfähle daher um ca. 15% verringert werden.⁶⁵

Die charakteristischen Pfahlwiderstände für die äußere Tragfähigkeit auf Druck und Zug ergeben sich somit wie folgt:

Nr.	Boden	Pfahl- querschnitt	Länge [m]	R _{c,k} [kN]	R _{t,k} [kN]
1	Ton	DN100	10	-1570,80	942,48
2	Ton	DN100	15	-2042,04	1413,72
3	Ton	DN40	10	-420,97	320,44
4	Ton	DN40	15	-581,19	480,66
5	Ton	40/40	10	-536,00	408,00
6	Sand	DN100	10	-3848,45	2356,19
7	Sand	DN40	10	-1039,87	801,11

Tab. 4-2 Charakteristische, äußere Pfahltragfähigkeiten

⁶⁴ Vgl. ON, : ÖNORM B 1997-1-3, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1-3: Pfahlgründungen. S. 34-36

⁶⁵ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

Die charakteristischen Pfahltragfähigkeiten sind demnach ausreichend und die gewählten Pfahlquerschnitte ergeben sich als zweckmäßig. Auf eine weiterführende Bemessung mit Teilsicherheitsfaktoren und Designwerten bzw. im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird hier verzichtet.

Wie aus den Berechnungen ersichtlich, ist, unabhängig von der Pfahlart, die Errichtung von Pfählen mit einer Länge von 10 m hinlänglich, um die äußere Standsicherheit der Pfahl-Plattengründung zu gewährleisten. Im Weiteren werden daher nur Fundamente mit 10 m langen Pfählen betrachtet, um eine bessere Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit zu erreichen. Der Einsatz von längeren Pfählen kann allerdings notwendig sein, um Setzungen der Betonplatte zu minimieren oder, um auf schlechtere Bodenverhältnisse zu reagieren.

Da außerdem in der Praxis, aufgrund des einfacheren Transports und der Lagerung meist quadratische Rammpfähle zum Einsatz kommen, werden in den folgenden Kapiteln nur jene berücksichtigt.

5 Vergleich der Gründungskonzepte

Die oben angeführten Ausführungsvarianten werden im folgenden Kapitel, bezüglich der Arbeitsschritte bei der Errichtung, der Baustelleneinrichtung, des Platzbedarfs und der Herstellungsdauer und –kosten, näher erläutert und gegenübergestellt.

5.1 Geometrie der Baugrube

Bei der Errichtung der Pfahl-Plattengründungen, deren Geometrie in Abb. 4-1 dargestellt sind, ist der Aushub einer Baugrube für die Herstellung der Bodenplatte notwendig. Die Größe der Baugrube ergibt sich aus den Abmessungen der Fundamentplatte und dem gewählten Verbausystem. Eine Baugrube mit freier Böschung stellt zwar die einfachste Variante dar, ist allerdings aufgrund des großen Platzbedarfs in innerstädtischen Gebieten nicht immer möglich. In diesen Fällen können Spundwände für den Verbau der Baugrube eingebracht werden, die nach dem Aushub als verlorene Schalung für die Fundamentplatte dienen.

Die Abmessungen der verschiedenen Varianten sind in den folgenden Abbildungen ersichtlich.

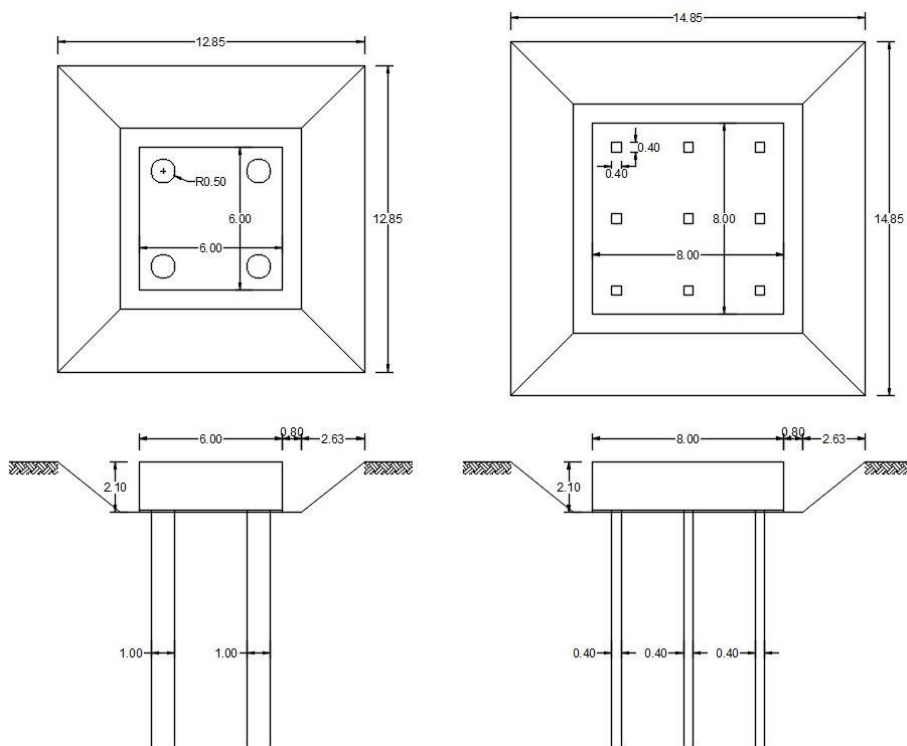


Abb. 5-1 Geometrie der Baumaßnahme bei Ausführung der Baugrube mit freier Böschung

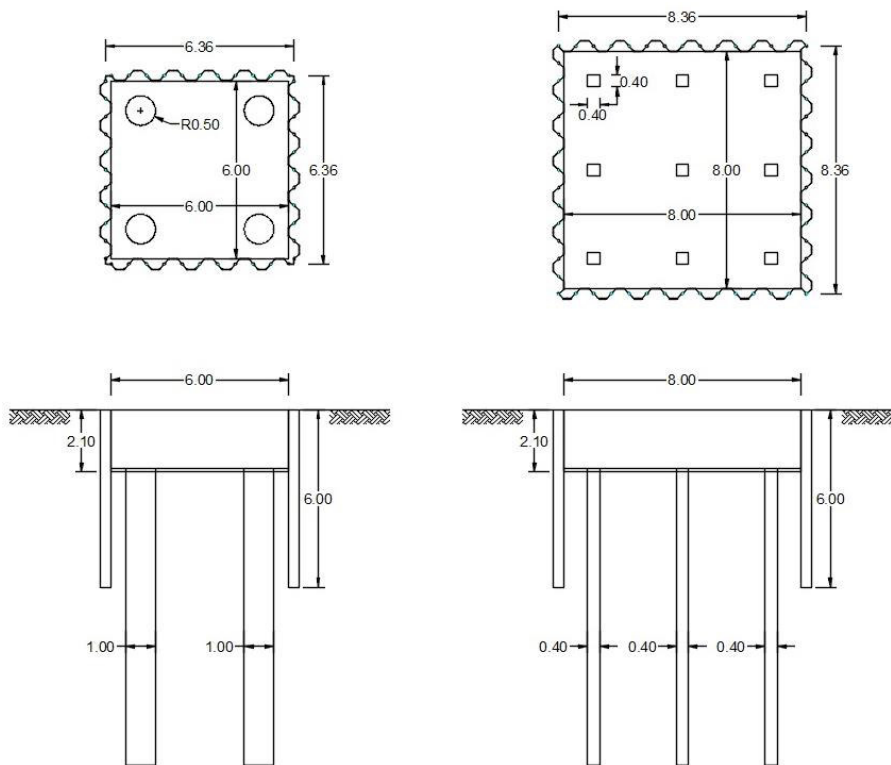


Abb. 5-2 Geometrie der Baumaßnahme bei Ausführung einer Spundwand als verlorene Schalung

Wird die Baugrube mit freien Böschungen ausgeführt, so ist rund um die Betonplatte ein Arbeitsraum von 80 cm eingeplant, um das Aufstellen der Schalung zu ermöglichen. Die Baugrubenböschung ist mit einer Neigung von 1:1,25 ($38,6598^\circ$) auszuführen. Auch wenn der bindige, tonige Boden in Singapur für temporäre Maßnahmen deutlich steiler standfest ist, gilt es die Böschungsneigung bei Einschnitten in gewachsene, bindige Böden bis zu einer Böschungshöhe von 3 m mit 1:1,25 zu neigen.⁶⁶ Die Aushubsohle befindet sich 10 cm unterhalb der Unterkante der Fundamentplatte, um eine Sauberkeitsschicht aus Magerbeton herstellen zu können.

Je nach Ausführung ergibt sich somit ein Aushubvolumen von ca. 225 fm³ bzw. ca. 319 fm³. Im Aushub nicht berücksichtigt wurde ein eventueller Bodenaustausch in der Aushubsohle.

Ist hingegen ein Baugrubenverbau mit Spundwänden vorgesehen, so entfällt der Arbeitsraum rund um die Fundamentplatte, da die Spundwand als verlorene Schalung verwendet wird. Der Aushub beschränkt sich somit lediglich auf den Bereich der Bodenplatte, wobei wiederum

⁶⁶ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 2. S. 11

eine Sauberkeitsschicht zwischen dem anstehenden Boden und dem Beton vorgesehen ist.

Das Aushubvolumen ergibt sich in diesem Fall je nach gewähltem Pfahl-system zu ca. 85 fm³ bzw. ca. 147 fm³, ohne Berücksichtigung eines eventuellen Bodenaustauschs.

5.2 Arbeitsschritte zur Errichtung der Pfahl-Plattengründung

Die Errichtung der Pfahl-Plattengründung kann überblicksmäßig in folgenden Schritten zusammengefasst werden:

- Vorbereiten des Arbeitsplanums
- Errichten der Großbohr- bzw. Rammpfähle
- Ggf. Einbringen der Spundwand
- Aushub der Baugrube
- Vorbereiten der Aushubsohle
- Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung
- Ggf. Aufstellen der Schalung
- Einbau der Bewehrung
- Betonieren der Fundamentplatte
- Ggf. Abbau der Schalung
- Hinterfüllen der Baugrube
- Herrichten der Geländeoberfläche

Da davon auszugehen ist, dass die *QUICKWAY*-Trasse hauptsächlich durch bereits bebauten Gebiet und entlang bestehender Straßen verläuft, ist für das Vorbereiten des Arbeitsplanums lediglich die Entfernung der asphaltierten Deckschicht erforderlich. Die darunterliegende ungebundene Tragschicht bildet bereits ein befahrbares Planum und ist für die Aufnahme der Lasten der Bagger und Raupenkräne geeignet. Sollten einige Fundamente dennoch in unbebautem Gebiet errichtet werden, so ist der Mutterboden abzutragen und ein Geotextil mit Bauvlies und eine ca. 40 cm hohe Kiesschüttung, welche nach dem Einbau verdichtet werden muss, aufzubringen. Diese Zusatzmaßnahme ist erforderlich, da die zulässige Bodenpressung laut ÖNORM, die für bindige Böden, wie sie in einem Großteil von Singapur anzutreffen sind, zwischen 120 kN/m² und 350 kN/m² liegt.⁶⁷ Je nach verwendetem Bohr- bzw. Rammgerät kann

⁶⁷ Vgl. ON, : ÖNORM B 4430-1, Zulässige Belastungen des Baugrundes - Flächengründungen. S. 5

dieser Wert überschritten werden.

Nach Fertigstellung des Arbeitsplanums können die Pfähle, unabhängig von der gewählten Pfahlart, von der Geländeoberfläche aus errichtet werden. Dadurch erhöht sich zwar der Mehrverbrauch, reduziert allerdings das erforderliche Bodenaushubvolumen, da keine Einfahrtsrampe in die Baugrube notwendig ist, und erleichtert das Umstellen des Bohr- bzw. Rammgeräts zur Herstellung der Pfähle. Ein Pfahlüberstand über das Aushubniveau ist ohnehin notwendig, um den kraftschlüssigen Verbund zwischen Pfahl und Platte herstellen zu können. Des Weiteren muss diese Leerbohrung, zwischen Pfahlkopf und Unterkante der Fundamentplatte, nicht vollständig bis zur Geländeoberkante betoniert werden, bzw. kann der Rammpfahl mittels Leerrammung bis unterhalb des Geländes eingebracht werden. Für einen detaillierten Ablauf bei der Herstellung der Bohr- bzw. Rammpfähle, wird auf Kap. 5.2.1 bzw. Kap. 5.2.2 verwiesen.

Je nach lokalem Platzangebot kann die Errichtung einer Spundwand erforderlich sein. Die Spundwand dient einerseits zur Sicherung der Baugrube und andererseits als verlorene Schalung bei den Betonierarbeiten der Fundamentplatte. Die Einbringung der Spundbohlen kann theoretisch mit demselben Raupenkran erfolgen, der für die Pfahlherstellung verwendet wird. Da ein Überfahren der Pfahlköpfe mit einem Raupenkran aber möglichst vermieden werden sollte, um eventuelle Rissbildungen im Beton durch Überbelastungen zu verhindern, muss die abschnittsweise Einbringung der Spundwand bereits abwechselnd mit der Herstellung der Pfähle erfolgen. Dadurch ist allerdings das mehrmalige Wechseln der Mäkleranbauten erforderlich, was vor allem bei begrenzten Platzverhältnissen zu einem erhöhten Aufwand und erheblichen Verzögerungen führt. Des Weiteren sollte bei Großbohrpfählen, um eine Einschnürung oder Beschädigung der Pfahlquerschnitte zu vermeiden, mit dem Einpressen bzw. Einrütteln der Spundbohlen solange gewartet werden, bis der Frischbeton erhärtet ist, wodurch es zu Stillliegezeiten des Raupenkrans kommen kann. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich daher die Spundwand nach Herstellung der Pfähle und mittels einer freireitenden Spundwandpresse einzubringen, die mittels Kranarm geführt und bedient wird. Bei weichen, bindigen Böden können die Spundbohlen in den Untergrund eingepresst werden. Stehen jedoch nicht-bindige Bodenschichten an, müssen die Bohlen in den Untergrund gerüttelt oder gerammt werden, was zu Lärmemissionen und Erschütterungen führt. Bei der Durchörterung von Blöcken oder Gesteinsschichten kann auch ein Vorbohren notwendig werden, um die Spundbohlen einbringen zu können.

Die anschließenden Erdarbeiten haben, aufgrund der bereits bestehenden Pfähle, mit entsprechender Vorsicht zu erfolgen, um eine Beschädigung der Pfahlköpfe zu vermeiden. Da der Abstand zwischen den Pfählen mit 3 m bzw. 4 m groß genug ist, kann ein Hydraulikbagger verwendet werden, der gegebenenfalls personell oder mit Kleingeräten unter-

stützt wird. Der Aushub ist mit Zufahrt von nur einer Seite möglich und kann von der Geländeoberfläche aus erfolgen, wodurch keine Abfahrtsrampe benötigt wird.

Sind die Aushubabreiten abgeschlossen, so muss ein Arbeitsplanum innerhalb der Baugrube hergestellt werden. Dazu muss der freigelegte, gewachsene Boden soweit möglich wieder verdichtet und eine Sauberkeitsschicht aus Magerbeton aufgebracht werden. Da in bindigen, wassergesättigten Böden eine Verdichtung nur schwer zu erreichen ist, kann unterhalb der Sauberkeitsschicht ein geringmächtiger Bodenaustausch mit abgestuftem, nicht bindigem Material sinnvoll sein. Falls erforderlich, sollte dieser Bodenaustausch auf der gesamten Fläche der Baugrubensohle erfolgen, um differentielle Setzungen zu vermeiden. Die Schüttung ist verdichtungsfähig und hat eine höhere Durchlässigkeit als der umgebende Boden. Sie dient daher als Drainage und beschleunigt die spätere Konsolidierung des Untergrunds unter dem zusätzlichen Gewicht der Fundamentplatte und der Aufbauten.

Nachdem die Pfähle freigelegt wurden und das Arbeitsplanum fertig ist, kann mit dem Ablängen der Pfahlköpfe begonnen werden. Wurde aufgrund von Bohr- bzw. Rammhindernissen nicht die gewünschte Endteufe erreicht, so kann der Pfahlüberstand auf der benötigten Kote abgeschnitten werden. Des Weiteren wird der Pfahlkopf geschrämt und der Teil der Pfahlbewehrung, der in die Fundamentplatte hineinreicht, freigelegt und gereinigt.

Nun kann mit dem Aufstellen der Schalung bzw. mit dem Reinigen und Vorbereiten der Spundbohlen als verlorene Schalung und gleichzeitig mit dem Einbau der Bewehrung für die Betonplatte begonnen werden.

Anschließend erfolgen die Betonierarbeiten, wobei der Frischbeton schichtweise eingebracht und auf eine ausreichende Verdichtung geachtet werden muss.

Aufgrund der Mächtigkeit der Fundamentplatte kann es erforderlich sein, die Bewehrung abschnittsweise einzubauen, diesen Abschnitt zu betonieren und, erst nach Erhärten der ersten Lage Frischbeton, mit den weiteren Bewehrungsarbeiten fortzufahren. Dies behindert zwar einen raschen Bauablauf, ermöglicht aber eine bessere Verdichtung des Betons bei engliegender Bewehrung.

Nach Aushärten des Betonfundaments kann gegebenenfalls die Schalung abgebaut und mit der Hinterfüllung der Baugrube begonnen werden. Dabei empfiehlt sich die Verwendung eines gut abgestuften, verdichtungsfähigen Materials, welches lagenweise eingebaut und unmittelbar verdichtet werden kann. Es kann auch der ursprüngliche Aushub für die Hinterfüllung verwendet werden, das bindige Material lässt sich allerdings schlechter verdichten, weshalb mit der Zeit mit Setzungen im Bereich der Hinterfüllung gerechnet werden muss.

Sobald die Baugrube vollständig aufgefüllt ist und der Beton ausreichend abgebunden hat, kann mit den weiteren Schritten zur Herstellung der *QUICKWAY*-Trasse und dem Vorbereiten der Geländeoberfläche bzw.

der Rekonstruktion der ursprünglichen Oberflächenbeschaffenheit begonnen werden.

5.2.1 Errichtung der Großbohrpfählen

Wie bereits beschrieben empfiehlt sich die Herstellung der Großbohrpfähle mittels Raupenkran, der mit einer Kelly-Stange, dem Bohrwerkzeug und einem Drehgetriebe für die Verrohrung ausgerüstet ist.

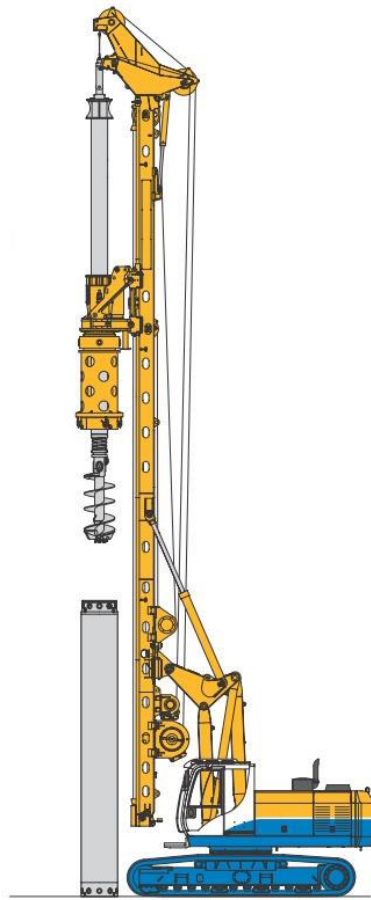


Abb. 5-3 Großdrehbohrgerät Bauer BG 20 H mit Kellystange, Schneckenbohrkopf, Drehantrieb und Verrohrung⁶⁸

Vor Beginn der Bohrarbeiten muss das Drehbohrgerät an der richtigen Stelle aufgestellt und ein Stahlrohr, welches per Kran bereitgestellt wird, aufgenommen werden. Anschließend erfolgt das Abteufen des Bohrrohrs mittels Drehgetriebe, welches die Verrohrung gleichzeitig in den Untergrund eindreht und eindrückt. Über die Kelly-Stange, an der der Bohrer montiert ist, kann der Bohrer abgesenkt und gehoben werden.

⁶⁸ BAUER, : BG 20 H Großdrehbohrgerät 01/2013.
http://www.bauer.de/de/bma/products/drilling_rigs/premium_line/bg20h_bt60.html. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

Dadurch wird das Bohrgut innerhalb der Verrohrung mittels des Schneckenbohrers gefördert und an der Oberfläche entladen. Auf diese Weise wird bis zur Gründungstiefe gebohrt, wobei die Verrohrung gegebenenfalls mit weiteren Stahlrohren verlängert werden muss.

Nach Erreichen der Endteufe wird der Bohrer und das Drehgetriebe aus dem Bohrloch gezogen und der fertige Bewehrungskorb, der mit Abstandhaltern versehen ist, eingehoben. Der Bewehrungskorb kann dabei direkt per LKW-Kran angeliefert und in das Bohrloch eingestellt werden, oder vorab auf der Baustelle gelagert und mit dem Raupenkran angehoben und eingebaut werden.

Anschließend erfolgt das Betonieren des Pfahls, wobei aufgrund der begrenzten Fallhöhe für Frischbeton mittels Betonpumpe und im Falle von Grundwasser im Kontraktorverfahren betoniert werden muss. Während des Betoniervorgangs wird die Verrohrung stückweise gezogen und wieder in den Untergrund gedrückt, um eine Verfüllung des Rindraumes, der durch das Ziehen des Stahlrohres entsteht, und einen gleichmäßigen Verbund zwischen Beton und anstehenden Boden zu gewährleisten. Das Stahlrohr wird beim Ziehen wieder in seine Schüsse zerlegt, gereinigt und für den weiteren Gebrauch vorbereitet.

Nachdem der Pfahl fertig betoniert wurde, wird das Drehbohrgerät umgestellt und es kann mit der Errichtung weitere Pfähle begonnen werden. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass der Raupenkran beim Umstellen nicht zu nahe an die bereits hergestellten Bohrpfähle herankommt. Durch den weichen Frischbeton kann es zu Setzungen des Untergrunds und somit zu Einschnürungen und Beschädigungen der bestehenden Pfähle kommen.

Sind alle Großbohrpfähle eines Fundaments errichtet, muss das Abbinden des Betons abgewartet werden, bevor mit den weiteren Arbeitsschritten zur Herstellung der Bodenplatte begonnen werden kann.

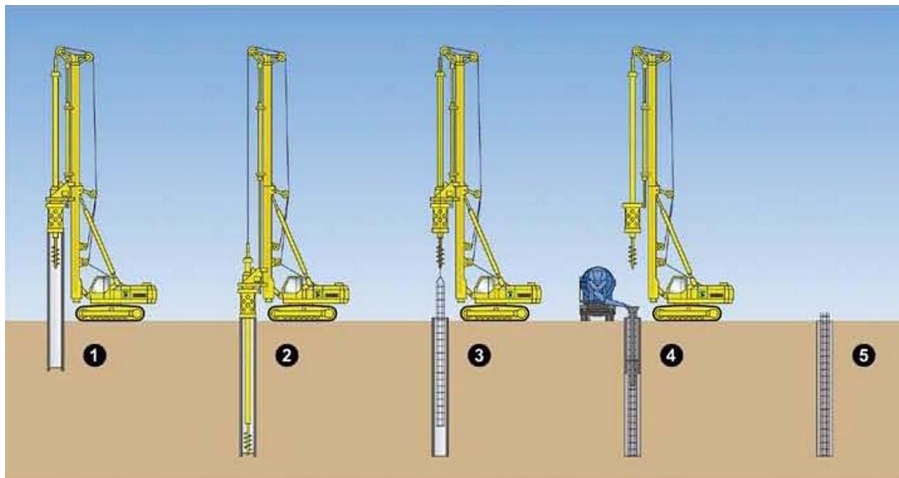


Abb. 5-4 Herstellung von Großbohrpfählen mit verrohrter Bohrung und Kelly-Stange⁶⁹

5.2.2 Errichtung der Rammpfähle

Im Vergleich zu den Großbohrpfählen ist bei der Errichtung von Rammpfählen kein Bodenaushub erforderlich. Daher können die Fertigteilpfähle, sobald das Rammgerät aufgestellt und einsatzbereit ist, per LKW an die Baustelle geliefert und abgeladen werden. Dabei ist allerdings besondere Vorsicht beim Transport und bei der Verladung der Pfähle notwendig, da hier, neben der Rammung selbst, das größte Risiko für eine Beschädigung des Stahlbetons liegt. Durch auftretende Risse kann Wasser eindringen, was zu einer Korrosion der Bewehrung und zu Abplatzungen des Betons führt und die Dauerhaftigkeit der Pfähle beeinträchtigt.⁷⁰

⁶⁹ SPIEKERMANN, : Toleranzen bei Bohrpfählen und Schlitzwände, Spiekermann GmbH Consulting Engineers. <http://www.spiekermann.de/seite/aktuelles/presse.php>. Datum des Zugriffs: 29.01.2016

⁷⁰ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 2. S. 83

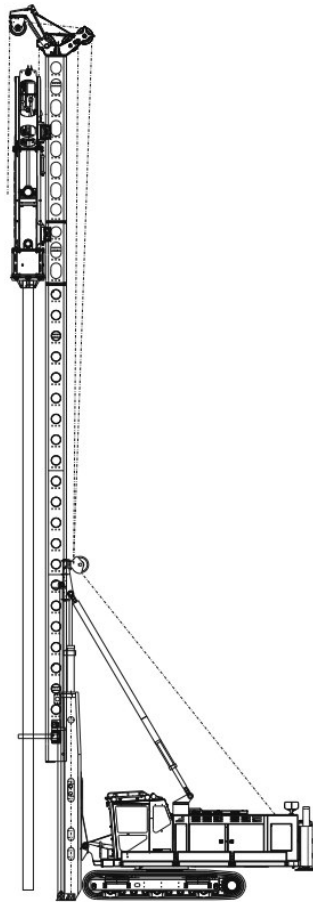


Abb. 5-5 Pfahlrammgerät Junttan PM 20 mit Fallbär⁷¹

Das Rammgerät nimmt und stellt den Pfahl per Seilzug auf und positioniert den Pfahlfuß an der richtigen Stelle. Der Pfahlkopf wird mit der Rammvorrichtung eingespannt und kann über die Neigung des Mäklers zentriert und vertikal gestellt werden. Durch das Anheben und Fallenlassen des Rammhärens wird der Pfahl nun in den Untergrund getrieben, wobei die Schlagzahlen und die benötigte Rammenergie aufgezeichnet werden.

Muss der Ramppfahl durch einen zusätzlichen Schuss verlängert werden, wird der Pfahl soweit eingebracht, bis der Kopf ca. 0,5 m bis 1 m über der Geländeoberkante zu liegen kommt. Anschließend nimmt das Rammgerät einen neuen Schuss auf und positioniert den Pfahlfuß auf dem Kopf des bereits eingebrachten Pfahls. Je nach System werden die Pfähle nun per Schweiß- oder Bolzenverbindung gekuppelt und der Rammvorgang kann fortgesetzt werden.

Sobald der Pfahl bis in die gewünschte Tiefe abgeteuft wurde bzw. eine weitere Einbringung aufgrund von Rammhindernissen nicht mehr mög-

⁷¹ JUNTAN, : Junttan Pile Driving Rig PMx20. http://www.junttan.com/products/pile_driving_rigs/pmx20. Datum des Zugriffs: 28.02.2016

lich ist, kann das Rammgerät umgestellt werden und den nächsten Fertigteilpfahl aufnehmen. Um eine Beschädigung der bereits eingebrachten Pfähle zu vermeiden, sollte darauf geachtet werden, dass mit dem Rammgerät keine Pfahlköpfe überfahren werden.

Im Gegensatz zu Bohrpfählen können die Fertigteil-Rammpfähle unmittelbar nach ihrer Einbringung in den Untergrund belastet werden und es kann ohne Verzögerungen mit den weiteren Arbeitsschritten zur Herstellung der Fundamentplatte begonnen werden.

5.3 Zusammenstellung der Baustelleneinrichtung

Zufolge der Vielzahl an kleinen Baustellen, die über das Stadtgebiet von Singapur verteilt sind, ist in einigen Fällen mit beschränkten Platzverhältnissen und umständlichen Zufahrtsmöglichkeiten zu rechnen. Aus diesem Grund stellen die Größe und die Organisation der Baustelleneinrichtung einen entscheidenden Faktor bei der Wahl der Gründungssysteme dar. Es empfiehlt sich somit möglichst viel auf LKWs zu verlagern bzw. mittels just-in-time Lieferungen an die Baustelle zu bringen, um den Platzbedarf für die Lagerung von Materialien und Geräten vor Ort so gering wie möglich zu halten und einen schnellen und flexiblen Auf- und Abbau der Baustelle zu gewährleisten.

Wie bereits beschrieben wird der Großteil der Stützenfundamente im Bereich bereits bestehender Verkehrswege errichtet. Zur Vorbereitung des Arbeitsplanums ist es daher notwendig die gebundene Tragschicht zu entfernen. Während mit der Absicherung der Baustelle begonnen wird, kann der Asphalt mittels eines Asphalt Schneiders aufgeschnitten und mit einem Bagger, der mit einem Meißel und einem Tieflöffel ausgestattet ist, abgetragen werden. Je nach gewähltem Gründungskonzept wird dabei eine Fläche von ca. 49,0 m² bis 220,5 m² freigelegt, was bei einer durchschnittlichen Asphaltenschicht von 20 cm⁷² einen Aushub von ca. 9,8 fm³ bis 44,1 fm³ bedeutet. Bei einem Gewicht von ca. 1,8 t/m³ ergibt sich somit eine Masse von ca. 17,6 t bis 79,4 t Asphaltbruch, was in etwa 1 bis 5 LKW-Ladungen entspricht.

Sobald das Arbeitsplanum hergestellt ist, kann mit der Errichtung der Pfähle begonnen werden. Für die dazu benötigte Baustelleneinrichtung wird auf Kap. 5.3.1 bzw. Kap. 5.3.2 verwiesen.

Werden Spundwandbohlen als verlorene Schalung eingesetzt, eignet sich, wie vorher beschrieben, eine freireitende Spundwandpresse, die mittels Kranarm geführt und bedient wird. Um einen verformungsarmen Baugrubenverbau zu erzielen, sollten die Spundbohlen in etwa zu zwei Drittel in den Untergrund einbinden, was in diesem Fall eine Bohlenlänge

⁷² Vgl. BRUNNER, P.: Infrastruktur - Straße, Studienblätter zur Vorlesung. S. 14.1.7

von ca. 6 m ergibt. Insgesamt ergibt sich somit, je nach Gründungssystem, eine Spundwandfläche von ca. 153 m² bzw. 201 m². Aufgrund der geringen Baugrubentiefe wurden für den Verbau Spundbohlen mit einem PU12 Profil ausgewählt, wobei hierfür kein statischer Nachweis geführt wurde. Je nach Ausführung der Baugrube sind insgesamt 20 bzw. 28 Doppelbohlen und jeweils 4 ECKELEMENTE für die Umschließung erforderlich. Das Gewicht der Spundbohlen kann mit 110 kg/m² ⁷³ angesetzt werden, wodurch sich die Gesamtmasse der anzuliefernden Spundwandbohlen zu ca. 16,8 t bzw. 22,1 t ergibt. Je nach verwendetem LKW kann der Transport daher mit 1 bis 2 Fuhren durchgeführt werden. Zur Erhöhung der Standsicherheit, bei schlechten Bodenverhältnissen oder drückendem Grundwasser, und zur Reduktion von Verformungen im Nahbereich der Spundwand kann weiters eine Aussteifung mit Stahlprofilen innerhalb der Baugrube vorgesehen werden.

Für den anschließenden Aushub ergibt sich, wie in Kap. 5.1 beschrieben je nach Gründungssystem eine Kubatur von ca. 85 fm³ bis 319 fm³. Der limitierende Faktor hierbei sind sicherlich die eingeschränkten Platzverhältnisse und Zufahrtsmöglichkeiten für die LKWs, die den Aushub abtransportieren müssen. Es wurde daher ein 4-Achs LKW mit Kippmulde, am Beispiel des Mercedes Typ Actros 4144 ausgewählt, der bei einer Fahrzeuglänge von 8,6 m eine Nutzlast von 17,7 t und einen Muldeninhalt von ca. 16 m³ aufweist. ⁷⁴ Für den bindigen Untergrund in Singapur kann ein Gewicht von ca. 2 t/m³ angesetzt werden, wodurch sich eine maximale Beladung des LKW von ca. 8,8 fm³ Boden ergibt. Der Abtransport des Aushubmaterials entspricht daher, je nach Ausführung, 10 bis 37 LKW-Fuhren. Eine Zwischenlagerung des Aushubmaterials auf der Baustelle ist aufgrund des geringen Platzangebots nur bedingt möglich. Außerdem sollte für die Hinterfüllung, wie bereits beschrieben, ein verdichtungsfähiges Material verwendet werden, um spätere Setzungen im Nahbereich der Fundamentplatte zu vermeiden.

Für eine optimierte Beladungszeit des LKW sollte die Mulde in 5 bis 8 Ladespielen des Hydraulikbaggers gefüllt werden können. ⁷⁵ Zudem muss beim Ausheben eine Auflockerung des Materials berücksichtigt werden. Der Auflockerungsfaktor für Ton bzw. stark verwittertes Gestein ergibt sich zu 1,25. ⁷⁶ Die 8,8 fm³ Boden ergeben somit ca. 11 m³ ausgehobenes Material, welches abtransportiert und deponiert werden muss. Es empfiehlt sich somit der Einsatz eines Tieflöffels mit einem Inhalt von 1,6 m³. Indem nun der Grabgefäßinhalt mit 75 multipliziert wird, kann daraus die nötige Motorleistung in Kilowatt überschlagsmäßig ermittelt

⁷³ Vgl. <http://spundwand.arcelormittal.com/page/>. Datum des Zugriffs: 21.04.2016

⁷⁴ Vgl. <http://www.ka-transporte.at/transporte/4-achs-mulde.html>. Datum des Zugriffs: 04.02.2016

⁷⁵ Vgl. PURRER, W.; TUERTSCHER, M.; FLORA, M.: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Vorlesungsskript, Teil 1: Baubetrieb. S. 112

⁷⁶ Vgl. JODL, H.: Bauverfahrenstechnik - Studienblätter zur Vorlesung. S. 54

werden.⁷⁷ Die benötigten 120 kW entsprechen in etwa einem 25 t Hydraulikbagger, wie z.B. dem Liebherr Mobilbagger A 924 Litronic oder dem Raupenbagger R 924 Litronic.⁷⁸ Beide Varianten können mit unterschiedlichen Auslegern und Grabwerkzeugen wie Tieflöffel oder Greifen ausgerüstet werden, um die Aushubarbeiten rund um die bestehenden Pfähle zu erleichtern. Die maximale Grabtiefe liegt bei über 6 m und die Reichweite auf Grundniveau bei ca. 10 m. Es benötigt daher keine Abfahrtsrampe in die Baugrube und der Aushub kann von der Geländeoberkante aus erstellt werden. Die höhere Mobilität des Radbaggers erleichtert ein Umstellen des Fahrzeugs und beschleunigt den Transport zwischen den Baustellen. Des Weiteren hat die Gummibereifung gegenüber Metallraupen den Vorteil, dass der bestehende Asphalt weniger beschädigt wird und es zu einer geringeren Lärmbelastung kommt. In nicht bebauten Gebieten haben die Reifen im weichen Untergrund allerdings den Nachteil der höheren lokalen Flächenpressung und der geringeren Geländegängigkeit. Es ist daher für jede Baustelle individuell zu entscheiden, welcher der beiden Bagger zum Einsatz kommen soll.

Im aufgelockerten Zustand ergibt der Aushub eine Kubatur von ca. 107 m³ bis 399 m³, die abtransportiert und deponiert werden muss.

Das Abziehen der Baugrubensohle sollte möglichst schonend und mit einem Grabenräumlöffel ausgeführt werden, um eine Auflockerung des anstehenden Untergrunds zu vermeiden. Bevor die Sauberkeitsschicht betoniert wird, sollte die Sohle mit einer Grabenwalze, wie z.B. die Ammann Rammax 1575, verdichtet werden. Aufgrund ihres geringen Gewichts kann die Walze mit dem Bagger in die Baugrube gehoben werden und durch ihre Wendigkeit kann sie auch um die freigelegten Pfahlköpfe manövriert werden. Durch die Vibration der Walze und den Kneteffekt der Stampffuß-Bandagen wird auch in bindigen, wassergesättigten Böden eine hohe Verdichtungsleistung erzielt.⁷⁹ Ist dennoch ein Bodenaustausch notwendig, kann die Schüttung ebenfalls mit der Grabenwalze verdichtet werden.

Bei einer Schichtdicke von 10 cm sind für das Betonieren der Sauberkeitsschicht, je nach Größe der Fundamentplatte, ca. 4,0 m³ bis 9,2 m³ Magerbeton notwendig. Bei Verwendung eines 4-achsigen Betonfahrmixers, wie z.B. Liebherr HTM 904⁸⁰, der eine Nennfüllung von 9 m³ Festbeton aufweist, sind 1 bzw. 2 Fahren notwendig. Aufgrund der geringen Abmessungen eignet sich eine Anhängerbetonpumpe zur Verteilung des Lieferbetons. Diese kann zudem für das Betonieren der Fun-

⁷⁷ Vgl. PURRER, W.; TUERTSCHER, M.; FLORA, M.: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Vorlesungsskript, Teil 1: Baubetrieb. S. 163

⁷⁸ Vgl. http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-DE/default_em.wfw/measure-metric. Datum des Zugriffs: 15.02.2016

⁷⁹ Vgl. AMMANN, : Grabenwalze Rammax 1575 und 1585. <http://www.ammann-group.at/es/verdichtungsmaschine/rammax-grabenwalze/rammax-1575/productpage/10742/>. Datum des Zugriffs: 16.02.2016

⁸⁰ Vgl. http://www.liebherr.com/MT/de-DE/region-DE/products_mt.wfw/id-349-0/measure-metric. Datum des Zugriffs: 16.02.2016

damentplatte verwendet werden.

Da die Pfähle von der Geländeoberkante aus erstellt wurden, sind in beiden Fällen ein Ablängen der Leerbohrung bzw. des Rammpfahl und ein Freilegen der Bewehrung erforderlich. Für das Ablängen der Pfahlköpfe und Reinigen der Bewehrung sind neben einem Schrämhammer und Druckluftkompressor vor allem Kleingeräte wie elektrische Winkelschleifer usw. erforderlich. Aufgrund der Länge der überstehenden Pfahlköpfe können die Arbeiten in der Baugrube von einem LKW-Kran vom Rand aus unterstützt werden. Der anfallende Bauschutt wird mittels Greifer eingesammelt und per LKW abtransportiert. Je nach Pfahlsystem fallen maximal bis zu 6,3 m³ bzw. 15,1 t Abbruchmaterial an, was in etwa einer LKW-Fuhre entspricht.

Das Liefern, Einheben und Aufbauen der Schalungselemente und Einbauen der Bewehrung erfolgt ebenfalls mit Hilfe eines LKW-Krans. Wird eine Baugrube mit freier Böschung hergestellt, werden, bei Ausführung der Fundamentplatte mit den Abmessungen von 6*6*2 m, insgesamt 48 m² Schalung benötigt. Bei einem Bewehrungsgrad von 0,15 t/m³ Beton sind zudem ca. 10,8 t Bewehrungsstahl erforderlich. Für das Gründungssystem mit Fertigteile-Rammpfählen, bei dem die Betonplatte eine Abmessung von 8*8*2 m hat, sind gegebenenfalls 64 m² zu schalen. Aufgrund der größeren Fundamentplatte wurde hier ein geringerer Bewehrungsgrad von 0,10 t/m³ angesetzt, wodurch sich ca. 12,8 t Bewehrung ergeben.

Das Betonieren der Fundamentplatte erfolgt wiederum mit Lieferbeton und einer Anhängerbetonpumpe. Je nach Größe der Fundamentplatte werden 72 m³ bis 140 m³ Beton benötigt. Bei dem oben genannten Fahrmischer mit einem Ladevolumen von 9 m³ Festbeton entspricht dies 8 bzw. 16 LKW-Fuhren. Beim Betonieren der Fundamentplatte liegt der limitierende Faktor in der Förderleistung der Betonpumpe bzw. in der zulässigen Steiggeschwindigkeit des Frischbetons. Bei einer maximalen hydrostatischen Druckhöhe von 2,0 m und somit einem Frischbetondruck von 50 kN/m², darf laut dem Frischbetondruckdiagramm der DIN 18218⁸¹ die maximale Steiggeschwindigkeit, selbst bei Verwendung von Fließbeton, bis zu 2,0 m/h betragen. Je nach Größe der Fundamentplatte würde dies eine maximale Förderleistung von 72 m³/h bis 140 m³/h bedeuten. Als verwendete Anhängerbetonpumpe wurde daher die Liebherr THS 80 D gewählt, die stangenseitig eine maximale Fördermenge von 71 m³/h aufweist.⁸² Die Leistung der Betonpumpe kann daher komplett ausgeschöpft werden, ohne den zulässigen Frischbetondruck der Schalung zu überschreiten.

Wird die Baugrube mit freien Böschungen ausgeführt, so werden zum

⁸¹ Vgl. HOFSTADLER, C.: Schalungs- und Rüsttechnik, Frischbetondruck und Bemessung. S. 17

⁸² Vgl. <http://www.liebherr.com/de/dza/produkte/baumaschinen/betontechnik/betonpumpen/station%C3%A4r betonpumpen/details/70929.html>. Datum des Zugriffs: 17.05.2016

Hinterfüllen, im eingebrachten Zustand, $146,6 \text{ fm}^3$ bzw. $181,5 \text{ fm}^3$ verdichtungsfähiges Material benötigt. Berücksichtigt man einen Verdichtungsfaktor von $1,10^{83}$, so ergibt sich für den Antransport ein erforderliches Volumen von $161,3 \text{ m}^3$ bzw. $199,7 \text{ m}^3$. Bei einem Gewicht im aufgelockerten Zustand von ca. $1,9 \text{ t/m}^3$, und somit einer maximalen LKW-Ladung von $9,3 \text{ m}^3$, entspricht dies in etwa 18 bzw. 22 Fuhren mit der oben genannten LKW-Mulde. Das Hinterfüllmaterial kann mittels LKW-Kran und Greifer lagenweise eingebracht und mittels Grabenwalze verdichtet werden.

Nicht berücksichtigt wurden Kleingeräte und zusätzliches Hilfsmaterial, welche für die oben genannten Arbeitsabläufe benötigt werden. Des Weiteren können Pumpen und Ableitungen notwendig sein, falls die Baugrube teilweise im Grundwasser liegt bzw. wenn sich Niederschlagswässer an der Baugrubensohle sammeln. Das Erfordernis und die Auslegung der Pumpen können allerdings nicht pauschal bestimmt und muss für jede Baustelle individuell ermittelt werden.

5.3.1 Baustelleneinrichtung für Großbohrpfähle

Die Baustelleneinrichtung für die Errichtung von Großbohrpfählen besteht unter anderem aus folgenden Geräten:

- Drehbohrgerät: Raupenkran mit Mäkler, Kelly-Stange, Bohrkopf und Drehgetriebe
- Muldenkipper, Radlader oder Container und LKW für den Abtransport des Bohrguts
- LKW mit Kranarm zum Liefern und Einheben der Bewehrungskörbe
- Betonfahrmischer und Betonpumpe zum Betonieren der Pfähle

Zur Herstellung der Bohrpfähle kann z.B. ein Großbohrgerät wie die Bauer BG 20 H mit einer Motorleistung von 205 kW verwendet werden, das einen maximalen Bohrdurchmesser bei Verwendung einer Kelly-Stange von 1,20 m aufweist. Die Fahrwerkslänge beträgt 5,6 m und die Breite zwischen 3,0 m und 4,3 m. Die Gesamtlänge des Bohrgerätes inklusive Mäkler, Kelly-Stange und Drehgetriebe liegt bei ca. 9,0 m. Das Transportgewicht des Gerätes beläuft sich ohne Ausrüstung auf ca. 58,5 t und die maximale Bodenpressung beträgt, je nach Ausrüstung und Ausladung des Mäklers zwischen 320 kPa und 470 kPa.^{84 85}

⁸³ Vgl. JODL, H.: Bauverfahrenstechnik - Studienblätter zur Vorlesung. S. 54

⁸⁴ Vgl. BAUER, : BG 20 H Großdrehbohrgerät 01/2013.
http://www.bauer.de/de/bma/products/drilling_rigs/premium_line/bg20h_bt60.html. Datum des Zugriffs: 11.01.2016

⁸⁵ Vgl. BAUER, : Auszug Betriebsanleitung 3391 BG20H V01. S. 90-95

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, ist die Verwendung einer Kelly-Stange beim Bohren aufgrund des flexibleren Einsatzes, im Vergleich zu einer Endlosschnecke, vorzuziehen. Da in manchen Gebieten Singapurs mit Gesteinsschichten bzw. Blöcken und Findlingen im Untergrund gerechnet werden muss, ist in diesen Fällen ein weiterer Bohrkopf mit entsprechenden Felsmeißeln mitzuführen und gegebenenfalls auszutauschen.

Die Stützung des Bohrlochs übernimmt dabei eine Verrohrung, die gleichzeitig mit dem Bohrer abgeteuft wird. Dies benötigt zwar ein zusätzliches Drehgetriebe zur Einbringung der Rohre, und den An- und Abtransport von Stahlrohren in entsprechender Länge, ist aber bei Pfählen mit Durchmessern von bis zu 100 cm und bis in eine Tiefe von 40 m wirtschaftlicher als die Verwendung einer Stützflüssigkeit. Vor allem in weichen Böden empfiehlt es sich ohnehin den obersten Abschnitt zu verrohren, um Setzungen und Einbrüche zufolge des Eigengewichts des Raupenkrans zu vermeiden.⁸⁶ Zudem erspart man sich dabei das Silo und die Wiederaufbereitungsanlage für die Stützflüssigkeit. Da diese mindestens auf das 1,2-fache Volumen eines Pfahls ausgelegt werden sollte, ist bei einem 10 m langen Pfahl mit 2 m Leerbohrung bereits 11,4 m³ Suspension nötig, wodurch die Anlage eine beachtliche Größe erreichen würde.

Pro Bohrpfahl werden ca. 9,5 m³ Bohrgut gefördert, welches vom Bohrkopf mittels Schneckenputzer entweder direkt über der Schaufel eines Radladers, einem Muldenkipper oder aber einfach auf dem Arbeitsplanum abgelassen wird, wo es anschließend per LKW-Kran mittels Greifer aufgesammelt werden kann. Das stark aufgelockerte Bodenmaterial hat ein Volumen von ca. 11,9 m³ und eine Masse von ca. 19 t. Bei vier Bohrpfählen ergibt dies einen deponierbaren Aushub von insgesamt 47,6 m³ bzw. 76 t.

Um Zudem die Eisenbiege- und Schweißarbeiten nicht vor Ort durchführen zu müssen bzw. so gering wie möglich zu halten, empfiehlt es sich die Schüsse der Bewehrungskörbe bereits vorab im Werk herzustellen und mittels LKW bei Bedarf auf die Baustelle liefern zu lassen. Auf der Baustelle werden die Schüsse dann miteinander verbunden und können eingehoben werden. Dies erschwert zwar die Anpassung der Bewehrung bei abweichenden Pfahllängen, reduziert allerdings den Platzbedarf auf der Baustelle und beschleunigt die Herstellung der Bohrpfähle.

Pro 10 m Pfahl wird eine Mindestbetonmenge von 7,9 m³ benötigt. Zudem ist allerdings ein eventueller Mehrverbrauch und, da die Pfähle von der Geländeoberkante aus erstellt werden, eine teilweise Verfüllung der Leerbohrung zu berücksichtigen. Es können daher bis zu 9,0 m³ Beton und mehr notwendig sein, was bei der Verwendung von Lieferbeton mit

⁸⁶ Vgl. GIRMSCHIED, G.: Bauverfahren des Spezialtiefbaus. S. 220

dem oben genannten Fahrmischer, 1 bis 2 LKW-Ladung pro Bohrpfahl notwendig macht. Bei 4 Bohrpfählen ergibt sich somit eine gesamte Betonmenge von ca. 36 m³ im eingebauten Zustand und inklusive Mehrverbräuchen.

Des Weiteren ist die Verwendung einer Anhängerbetonpumpe inklusive Leitungen erforderlich, da die Bohrpfähle teilweise im Grundwasser errichtet werden und daher im Kontraktorverfahren betoniert werden müssen.

5.3.2 Baustelleneinrichtung für Fertigteil-Rammpfähle

Für die Errichtung von Fertigteil-Rammpfählen wird unter anderem, folgende Baustelleneinrichtung benötigt:

- Pfahlrammgerät: Raupenkrane mit Mäkler, Rammvorrichtung und Rammbar
- LKW mit Kranarm zum Liefern und Abladen der Pfahlschüsse

Als Pfahlrammgerät kann z.B. die Junttan PM 20 mit einer Motorleistung von 179 kW eingesetzt werden, die Pfähle mit einer Gesamtlänge von bis zu 20 m aufnehmen und einrammen kann. Das Fahrwerk hat eine Breite von 3,20 m bis 4,70 m und die Gesamtlänge des Rammgeräts inklusive Mäkler und Rammvorrichtung beträgt ca. 11 m.⁸⁷ Das Transportgewicht des Rammgeräts beläuft sich auf ca. 49,6 t und das standardmäßige Betriebsgewicht bei Verwendung eines 6 t Fallgewichts ergibt sich zu ca. 66 t. Der maximale Flächendruck wird mit 330 kPa angegeben⁸⁸, allerdings kann der dynamische Bodendruck bei Rammgeräten dieser Größe bis zu 500 kPa betragen.⁸⁹

Fertigteil-Rammpfähle haben den Nachteil, schwere Rammhindernisse nicht durchrörtern zu können. Ist mit hartem Fels oder massiven Blöcken zu rechnen, kann der Findling ausgegraben bzw. muss an den entsprechenden Stellen vorgebohrt werden. Das Ausheben von Blöcken ist nur bei geringen Tiefen wirtschaftlich. Das Vorbohren kann hingegen mit einem eigenen Bohrgerät, oder aber mit einem Bohraufsatz, der an den Mäkler des Rammgeräts montiert werden kann, erfolgen. Während ein zusätzliches Bohrgerät den Platzbedarf auf der Baustelle vergrößert, verzögert der Umbau des Rammgerätes den Bauablauf erheblich. Sind hingegen nur weiches Gestein oder teilweise verwitterte Findlinge zu erwarten, die einfacher durchbohrt werden können, wie es in großen Teilen Singapurs der Fall ist, kann die Bohrung mit einem Bohrer erfol-

⁸⁷ JUNTAN, : Junttan Pile Driving Rig PMx20. http://www.junttan.com/products/pile_driving_rigs/pmx20. Datum des Zugriffs: 28.02.2016

⁸⁸ Vgl. CENTRUMPFÄHLE, : Junttan PM 20/4 Maschinendatenblatt. <http://www.centrum.de/download/maschinen/>. Datum des Zugriffs: 21.11.2015

⁸⁹ Fachgespräch mit Herrn Juha Vierros, Business Development Director, Firma Junttan Oy, am 27.01.2016

gen, der direkt an die Rammvorrichtung des Rammgeräts montiert ist (siehe Abb. 5-6). Damit kann in schwer rammbaren Böden und bei leichten Rammhindernissen vorgebohrt werden, um das Einbringen der Pfähle zu erleichtern.⁹⁰



Abb. 5-6 Pfahlrammgerät Junttan PM 16 mit, an der Rammvorrichtung, montiertem Bohrer⁹¹

Die Schüsse der Fertigteil-Rammpfähle werden per LKW-Kran an die Baustelle transportiert und abgeladen. Da die maximale Länge der Schüsse, wie vorher beschrieben, bei 20 m liegt, kann mit einem Schuss pro Pfahl gearbeitet werden. Je nach Zufahrtsmöglichkeit für den LKW und Lagerungsplatz auf der Baustelle können allerdings auch kürzere Schusslängen geliefert und während des Rammvorgangs gekoppelt werden. Bei einem Gewicht der 40/40 cm Pfähle von ca. 0,4 t/lfm, ergibt sich pro Pfahl, inklusive 1 m Überstand über die Aushubsohle, eine Masse von ca. 4,4 t und pro Fundament eine Masse von ca. 39,6 t, die an die Baustelle geliefert werden muss. Je nach verwendetem LKW entspricht dies 2 bis 3 Fuhren.

⁹⁰ Fachgespräch mit Herrn Juha Vierros, Business Development Director, Firma Junttan Oy, am 27.01.2016

⁹¹ Vgl. http://www.junttan.com/products/pile_driving_rigs/pm16. Datum des Zugriffs: 17.02.2016

5.3.3 Transport des Raupenkrans zwischen den Baustellen

Ein entscheidender Faktor für den zeitlichen Bauablauf ist der Transport des Raupenkrans zwischen den Baustellen. Da die Spannweite der *QUICKWAY*-Elemente in etwa zwischen 30 m und 50 m liegt, sind durchschnittlich alle 40 m Stützen samt Fundamente erforderlich. Das Umstellen des Großbohr- bzw. Pfahlrammgeräts mittels Tiefladers würde dabei einen enormen zeitlichen Aufwand und einen hohen Platzbedarf darstellen.

Wie vorhergehend beschrieben bringt das Großbohr- bzw. Pfahlrammgerät eine Last von ca. 320 kN/m² bis 500 kN/m² während des Betriebs auf den Untergrund auf. Das Umstellen des Raupenkrans auf bereits bestehenden Straßen dürfte daher, auch ohne Abbau des Bohrkopfs und des Drehgetriebes bzw. des Rammjärs und ohne Umlegen des Mäklers, kein Problem darstellen. Der Untergrund ist dennoch auf empfindliche Einbauten zu überprüfen und im Falle können Stahlfahrplatten zur lokalen Verstärkung der Oberfläche ausgelegt werden.

Sind entlang der *QUICKWAY*-Trasse Oberleitungen gespannt oder beschränkte Durchfahrtshöhen gegeben, so ist für das Umstellen des Geräts dennoch das Abbauen der Ausrüstung und Umlegen des Mäklers erforderlich.

Ist die Errichtung der Fundamente in noch unbebautem Gebiet geplant, so muss das Arbeitsplanum, wie vorhergehend beschrieben, für den Raupenkran vorbereitet werden. Die zulässige Bodenpressung laut ÖNORM⁹², die zwischen 120 kN/m² und 350 kN/m² für bindige Böden und zwischen 200 kN/m² und 500 kN/m² für nicht bindig Böden liegt, wird durch die oben angeführten Raupenkräne teilweise überschritten.

5.4 Organisation und Platzbedarf der Baustelleneinrichtung

Da die *QUICKWAY*-Trasse zum Großteil durch dicht besiedeltes Gebiet verläuft, ist es maßgebend den Platzbedarf der Baustellen zur Herstellung der Pfahl-Plattengründungen so gering wie möglich zu halten. Die Lagerung von Baustoffen vor Ort ist nur begrenzt möglich, weshalb der An- und Abtransport von Rohstoffen und Fertigteilen in just-in-time Lieferungen erfolgen muss. Zudem können immer nur eine limitierte Anzahl an Geräten auf der Baustelle stehen, was dazu führt, dass die verschiedenen Arbeitsschritte zur Herstellung der Fundamente hintereinander angeordnet werden müssen, um die jeweilige Baustelleneinrichtung möglichst klein zu halten.

⁹² Vgl. ON, : ÖNORM B 4430-1, Zulässige Belastungen des Baugrundes - Flächengründungen. S. 5

Der Platzbedarf der einzelnen Arbeitsschritte ist im Anhang 2 dargestellt. Der Arbeitsschritt mit der größten Baustelleneinrichtung stellt dabei die Errichtung der Pfähle dar, da das Drehbohr- bzw. Pfahlrammgerät den meisten Platz in Anspruch nimmt (siehe Abb. 5-7 bis Abb. 5-10).

Die Zufahrt zur Baustelle und die Bedienung der Baugrube durch die Geräte erfolgt immer von der gleichen Seite, um die Auswirkungen auf den anliegenden Verkehr möglichst gering zu halten.

Eine Optimierung des Baustelleneinrichtungsplans kann dabei allerdings erst vor Ort unter Berücksichtigung der tatsächlichen lokalen Gegebenheiten erstellt werden.

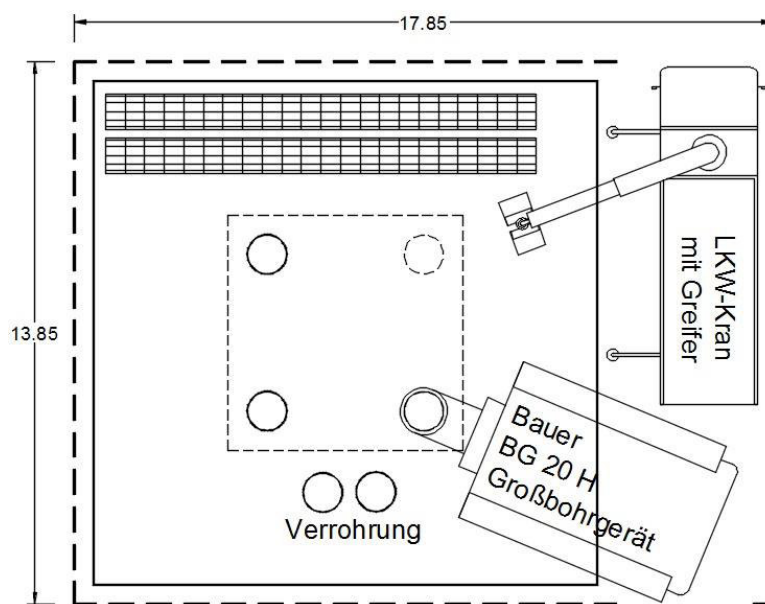


Abb. 5-7 Herstellung der Großbohrpfähle (Variante 1: Baugrube mit freier Böschung)

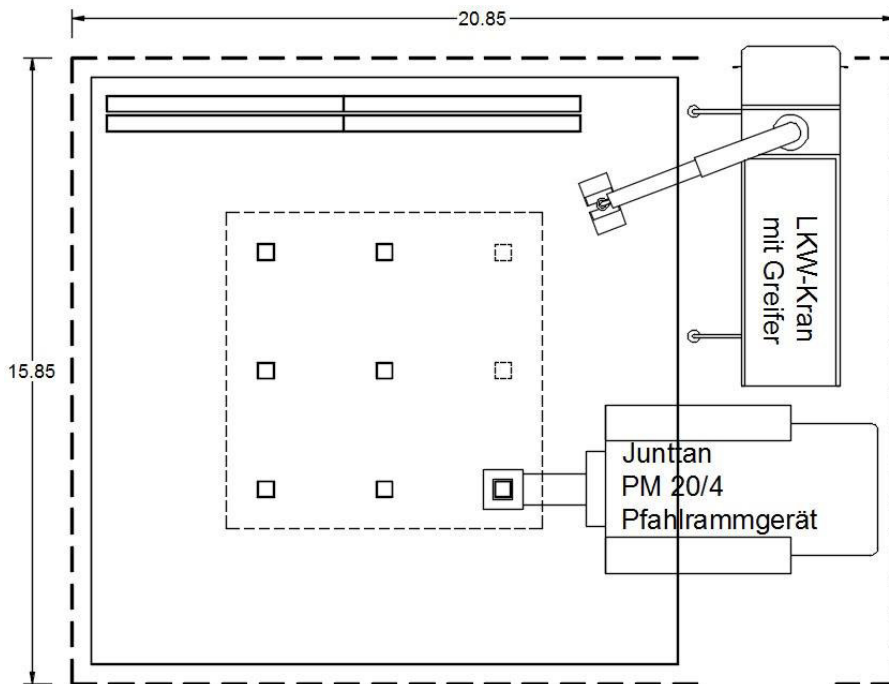


Abb. 5-8 Herstellung der Fertigteil-Rammpfähle (Variante 2: Baugrube mit freier Böschung)

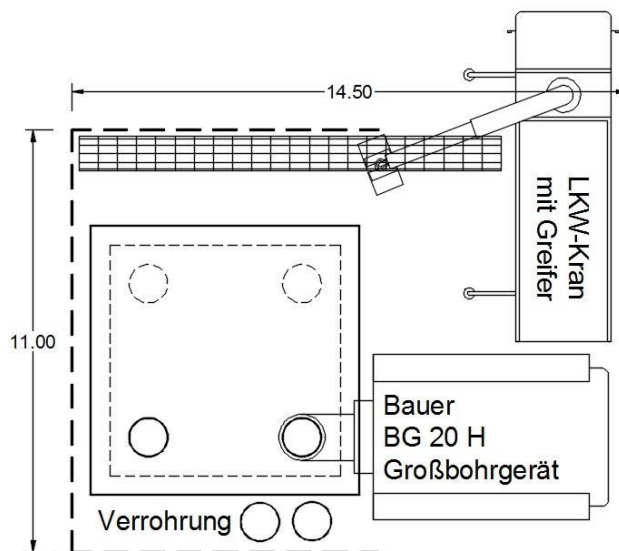


Abb. 5-9 Herstellung der Großbohrpfähle (Variante 3: Baugrube mit Spundwandverbau)

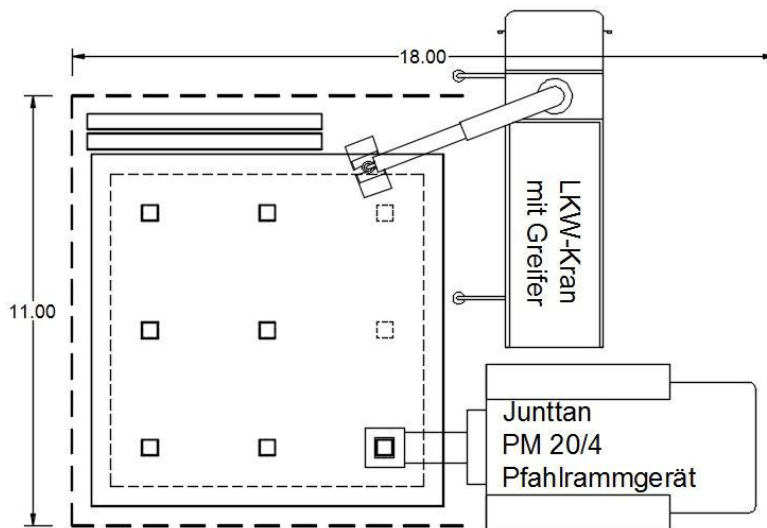


Abb. 5-10 Herstellung der Fertigteil-Rammpfähle (Variante 4: Baugrube mit Spundwandverbau)

Aufgrund der größeren Fundamentabmessungen benötigen die Varianten mit Fertigteil-Rammpfählen jeweils mehr Platz, als die Baustellen mit Großbohrpfähle. Dazu kommt außerdem, dass das Pfahlrammgerät, am Beispiel einer Junttan PM 20, im Betrieb mit einer Gesamtlänge von ca. 11 m deutlich größer ist, als ein Drehbohrgerät, wie die Bauer BG 20 H, mit ca. 9 m.

Obwohl die Ausführung der Baugrube mit freier Böschung die einfachste Variante darstellt, kann der Platzbedarf der Baustelle durch den Einsatz eines Spundwandverbaus deutlich verkleinert werden. Des Weiteren ergibt sich bei den Varianten mit Spundwand aufgrund der verringerten Geländeoberfläche, Aushubkubatur usw. sowohl ein zeitlicher, als auch wirtschaftlicher Vorteil (siehe Kap. 5.5).

5.5 Aufwands- und Kostenermittlung der Pfahl-Plattengründung

Für die Aufwands- und Kostenermittlung ergeben sich, wie vorher beschrieben, die folgenden Ausführungsvarianten der Pfahl-Plattengründung.

Variante	Platte [m²]	Pfahl- querschnitt	Anzahl Pfähle	Pfahllänge [m]	Gesamtlänge [m]	Baugruben- verbau
1	72	DN100	4 Stk.	10	40	Böschung
2	128	40/40	9 Stk.	10	90	Böschung
3	72	DN100	4 Stk.	10	40	Spundwand
4	128	40/40	9 Stk.	10	90	Spundwand

Tab. 5-1 Konfigurationen aus Kubatur der Bodenplatte, Gesamtlänge der Pfähle und Baugrubenverbau

Kommen Großbohrpfähle zum Einsatz, so besteht das Fundament aus einer Bodenplatte mit den Abmessungen 6*6*2 m, welche auf 4 Bohrpfählen gelagert ist, die einen Durchmesser von 100 cm und eine Länge von 10 m aufweisen. Werden hingegen Fertigteil-Rammpfähle verwendet, so hat die Betonplatte eine Abmessung von 8*8*2 m und ist auf 9 Pfählen mit einer Länge von 10 m und einer Querschnittsabmessung von 40/40 cm gegründet.

Die Baugrube wird dabei jeweils einmal mit freier Böschung bzw. mit einem Spundwandverbau als verlorene Schalung hergestellt.

Die Ermittlung der Aufwands- und Kostenwerte erfolgt aufgrund von Erfahrungswerten und Angaben aus der Literatur, wobei zu berücksichtigen ist, dass es sich hierbei um österreichische bzw. mitteleuropäische Kostenansätze handelt und diese voraussichtlich nicht auf die Verhältnisse in Singapur übertragen werden können.

Nicht berücksichtigt wurden hingegen die nachfolgenden Punkte. Da hierzu nähere Informationen zu den lokalen Gegebenheiten erforderlich sind, können im Zuge dieser Arbeit keine allgemeinen Annahmen dazu getroffen werden.

- Der An- und Abtransport und das Aufstellen der Baustelleneinrichtung, die je nach Ausführungsvariante sowohl kosten- als auch zeit- und platzintensiv ist. Vor allem durch die vielen kleinen Baustellen kann es daher zu einem erheblichen wirtschaftlichen Unterschied zwischen den Gründungssystemen kommen.
- Eventuelle Erschwernisse aufgrund lokaler Untergrundverhältnisse oder zusätzliche Maßnahmen zur Verlegung oder temporären Sicherung von Leitungen, Kanälen oder Einbauten im Untergrund im Nahbereich der geplanten Fundamente.
- Die Herstellung der Fertigteile, da keine Informationen zu lokaler Verfügbarkeit bzw. Herstellungsmöglichkeit bekannt sind.

5.5.1 Ermittlung der Arbeitsdauer

Für die Ermittlung der Dauer der Arbeitsschritte wurden die folgenden Aufwands- bzw. Leistungswerte in der Berechnung angesetzt.

Arbeitsschritt	Aufwandswert	Personal	Geräte	Leistungswert
Aufbau des Bauzauns	0,07 Std/lfm	2,00 Std/h	-	30,00 lfm/h
Abbruch des Asphalts	-	-	1,00 Stk	10,00 m ² /h
Herstellen der Bohrpfähle	-	-	1,00 Stk	5,00 lfm/h
Herstellen der Rammpfähle	-	-	1,00 Stk	27,50 lfm/h
Einbringen der Spundwand	-	-	1,00 Stk	37,50 m ² /h
Aushub der Baugrube	-	-	1,00 Stk	95,00 fm ³ /h
Verdichten der Baugrubensohle	-	-	1,00 Stk	100,00 m ² /h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	0,33 Std/m ³	2,00 Std/h	-	6,00 m ³ /h
Ablängen der Bohrpfähle	-	-	1,00 Stk	1,00 Stk/h
Ablängen der Rammpfähle	-	-	1,00 Stk	2,00 Stk/h
Aufbau der Schalung	0,50 Std/m ²	4,00 Std/h	-	8,00 m ² /h
Einbauen der Bewehrung	10,00 Std/t	4,00 Std/h	-	0,40 t/h
Betonieren der Fundamentplatte	-	-	1,00 Stk	71,00 m ³ /h
Abbau der Schalung	0,25 Std/m ²	4,00 Std/h	-	16,00 m ² /h
Hinterfüllen der Baugrube	-	-	1,00 Stk	50,00 fm ³ /h
Herrichten der Geländeoberfläche	-	-	1,00 Stk	10,00 m ² /h
Abbau des Bauzauns	0,04 Std/lfm	2,00 Std/h	-	50,00 lfm/h

Tab. 5-2 Für die Kalkulation angesetzte Leistungswerte

Auch bei personalintensiven Arbeitsschritten, wie z.B. Aufbau der Schalung, Einbau der Bewehrung oder Betonieren der Fundamentplatte, bei denen normalerweise der Aufwandswert in Stunden pro Einheit angegeben wird, ist im Weiteren der Keh- bzw. Leistungswert in Einheiten pro Stunde angegeben, um eine bessere Übersichtlichkeit zu gewähren.

Die Leistung bei der Errichtung von Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 100 cm kann in bindigem Untergrund, ähnlich den Verwitterungsböden in Singapur, zwischen ca. 4,0 lfm/h und 6,0 lfm/h pro Bohrgerät abgeschätzt werden. Bei Stahlbeton-Rammpfählen mit einem Querschnitt von 40/40 cm kann hingegen von einer Leistung von ca. 25,0 lfm/d bis 30,0 lfm/d pro Rammgerät ausgegangen werden.^{93 94 95 96}

Für das gegebenenfalls erforderliche Einbringen der Spundwandbohlen in bindigem Untergrund kann mit einer Tagesleistung von ca. 300 m²/d gerechnet werden.⁹⁷

⁹³ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

⁹⁴ Fachgespräch mit Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte, Leiter des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, am 13.01.2016

⁹⁵ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Bauing. ETH/SIA Renè Schmidli, Geschäftsleiter Tief- und Spezialtiefbau, Firma JMS RISI AG, am 14.01.2016

⁹⁶ Fachgespräch mit Herrn Ing. Walter Schopf, Spartenbereichsleiter, Firma Keller Grundbau Ges.mBH, am 27.01.2016

⁹⁷ Fachgespräch mit Herrn Ferdinand Ehrhart, Geschäftsführer, Firma Ehrhart GmbH, am 10.03.2016

Die erreichbare Leistung des Hydraulikbaggers beim Aushub der Baugrube wurde nach der Systematik von *Girmscheid* ermittelt. Dabei wird von einer theoretischen Leistung der Maschine ausgegangen und verschiedene Bedingungen und Erschwernisse über Einflussfaktoren berücksichtigt.^{98 99}

Die angesetzte Leistung des Baggers wurde dabei wie folgt ermittelt.

$$Q_D = \frac{3600}{t_s} * V_{SAE} * \alpha_L * \phi * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * \eta_1 * \eta_2 * \eta_G$$

$$= \frac{3600}{20} * 1,6 * 0,8 * 1,05 * 0,85 * 1 * 1 * 0,9 * 1 * 1 * 0,85 * 0,6$$

$$= 94,39 \approx 95,0 [fm^3/h]$$

- Mit:
- t_s ... Spielzeit in s
 - V_{SAE} ... Nenninhalt des Grabgefäßes in m³
 - α_L ... Auflockerungsfaktor des Aushubmaterials
 - ϕ ... Füllfaktor des Grabgefäßes
 - f_1 ... Faktor für den Schwenkwinkel
 - f_2 ... Faktor für die Grabtiefe
 - f_3 ... Faktor für den Zustand des Baggers
 - f_4 ... Faktor für die Entladeart
 - f_5 ... Faktor für das Verhältnis Grab- zu Transportgefäßinhalt
 - η_1 ... Bedienungsfaktor
 - η_2 ... Betriebsfaktor
 - η_G ... Geräteausnutzungsgrad

Die Spielzeit und Faktoren die die Situation vor Ort und der Baustelle berücksichtigen, wie z.B. die Auflockerung des Bodens und der Schwenkwinkel, wurden an die tatsächlichen Verhältnisse der vorhingehend beschriebenen Baugrube angepasst. Einflussfaktoren die hingegen den Zustand des Hydraulikbaggers bzw. die Fähigkeit des Baggerfahrers einbeziehen wurden mit 1,0 belegt und bleiben somit unberücksichtigt.

Das Ablängen des Pfahlkopfs bzw. das Freilegen der Bewehrung kann je nach Abmessung des Pfahlquerschnitts mit ca. 1 Stk/h bzw. 2 Stk/h angesetzt werden.¹⁰⁰

Aufgrund der einfachen Geometrie der Fundamentplatte können die Leistungswerte für die Stahlbetonarbeiten verhältnismäßig hoch angesetzt werden.

Für den Aufbau der Schalung wurde bei einer Personalstärke von 4 Mann mit einem Wert von 7,0 m²/h bis 9,0 m²/h gerechnet. Beim Abbau der Schalung wurde hingegen eine Leistung von 14,0 m²/h bis 18,0 m²/h

⁹⁸ Vgl. GIRMSCHIED, G.: Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse. S. 255-268

⁹⁹ Vgl. PURRER, W.; TUERTSCHER, M.; FLORA, M.: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Vorlesungsskript, Teil 1: Baubetrieb. S. 159-165

¹⁰⁰ Fachgespräch mit Herrn Ing. Walter Schopf, Spartenbereichsleiter, Firma Keller Grundbau Ges.mbH, am 27.01.2016

angesetzt.

Der Leistungswert für das Einlegen der Bewehrung wurde mit 0,3 t/h bis 0,5 t/h angesetzt, wobei ebenfalls ein Personal von 4 Mann berücksichtigt wurde.

Für die Arbeiten zum Betonieren der Sauberkeitsschicht wurde mit einer Leistung von 5,0 m³/h bis 7,0 m³/h gerechnet und für die Fundamentplatte wurden 60,0 m³/h bis 80,0 m³/h angenommen. Bei den Betonierarbeiten wurden jeweils 2 Mann Personal angesetzt. Da bei der Sauberkeitsschicht das Verteilen und Begradigen des Magerbetons im Vordergrund steht, wurde in der Kalkulation dafür der Aufwandwert berücksichtigt. Beim Betonieren der Fundamentplatte hingegen liegt der limitierende Faktor, wie vorher beschrieben, in der Steiggeschwindigkeit des Frischbetons. Um den zulässigen Frischbetondruck auf die Schalung nicht zu überschreiten, wurde daher die maximale Förderleistung der Betonpumpe angesetzt.

Im Folgenden werden die ermittelten Größenordnungen angegeben, in denen sich die angesetzten Leistungswerte in etwa bewegen.

Arbeitsschritt	Leistungswerte			
	Minimum	gewählt	Maximum	
Aufbau des Bauzauns	25,00	30,00	35,00	lfm/h
Abbruch des Asphalts	8,00	10,00	12,00	m ² /h
Herstellen der Bohrpfähle	4,00	5,00	6,00	lfm/h
Herstellen der Ramppfähle	25,00	27,50	30,00	lfm/h
Einbringen der Spundwand	30,00	37,50	45,00	m ² /h
Aushub der Baugrube	80,00	95,00	110,00	fm ³ /h
Verdichten der Baugrubensohle	80,00	100,00	120,00	m ² /h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	5,00	6,00	7,00	m ³ /h
Ablängen der Bohrpfähle	0,90	1,00	1,10	Stk/h
Ablängen der Ramppfähle	1,80	2,00	2,20	Stk/h
Aufbau der Schalung	7,00	8,00	9,00	m ² /h
Einbauen der Bewehrung	0,30	0,40	0,50	t/h
Betonieren der Fundamentplatte	60,00	71,00	80,00	m ³ /h
Abbau der Schalung	14,00	16,00	18,00	m ² /h
Hinterfüllen der Baugrube	40,00	50,00	60,00	fm ³ /h
Herrichten der Geländeoberfläche	8,00	10,00	12,00	m ² /h
Abbau des Bauzauns	45,00	50,00	55,00	lfm/h

Tab. 5-3 Größenordnung der ermittelten Leistungswerte

Je nach Angaben und Unterlagen variieren die Leistungsansätze, vor allem für Bohr- und Ramppfähle, unterschiedlich stark, weshalb hier in etwa die Mittelwerte für die Kalkulation angesetzt wurden. Die Gesamtdauer für die Herstellung der Pfahl-Plattengründung in den 4 verschiedenen Ausführungsvarianten ist in den folgenden Tabellen ersichtlich.

Arbeitsschritt	Massen		Leistung		Dauer	
Vorbereiten des Arbeitsplanums						
Aufstellen des Bauzaun	63,40	lfm	30,00	lfm/h	2,11	h
Abbruch und Verladen des Asphalts	33,02	m ³	2,00	m ³ /h	16,51	h
Errichtung der Bohrpfähle						
Herstellen der Bohrpfähle	44,00	lfm	5,00	lfm/h	8,80	h
Aushärten des Betons	-		-		16,00	h
Aushub der Baugrube	224,38	fm ³	95,00	fm ³ /h	2,36	h
Vorbereiten der Aushubsohle						
Verdichten der Baugrubensohle	57,76	m ²	100,00	m ² /h	0,58	h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	5,78	m ³	6,00	m ³ /h	0,96	h
Aushärten des Magerbetons	-		-		8,00	h
Ablängen der Bohrpfähle	4,00	Stk.	1,00	Stk/h	4,00	h
Aufstellen der Schalung	48,00	m ²	8,00	m ² /h	6,00	h
Einbauen der Bewehrung	10,80	t	0,40	t/h	27,00	h
Betonieren der Fundamentplatte						
Einbringen des Betons	72,00	m ³	71,00	m ³ /h	1,01	h
Aushärten des Betons	-		-		16,00	h
Abbau der Schalung	48,00	m ²	16,00	m ² /h	3,00	h
Hinterfüllen der Baugrube	146,60	fm ³	50,00	fm ³ /h	2,93	h
Herrichten der Geländeoberfläche	129,12	m ²	10,00	m ² /h	12,91	h
Abbau des Bauzauns	63,40	lfm	50,00	lfm/h	1,27	h
Gesamtdauer					123,45	h
					15,43	AT

Tab. 5-4 Herstellungsdauer Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung

Arbeitsschritt	Massen		Leistung		Dauer	
Vorbereiten des Arbeitsplanums						
Aufstellen des Bauzaun	71,40	lfm	30,00	lfm/h	2,38	h
Abbruch und Verladen des Asphalts	44,10	m ³	2,00	m ³ /h	22,05	h
Errichtung der Rammpfähle						
Einbringen der Rammpfähle	99,00	lfm	27,50	lfm/h	3,60	h
Aushub der Baugrube	318,67	fm ³	95,00	fm ³ /h	3,35	h
Vorbereiten der Aushubsohle						
Verdichten der Baugrubensohle	92,16	m ²	100,00	m ² /h	0,92	h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,22	m ³	6,00	m ³ /h	1,54	h
Aushärten des Magerbetons	-		-		8,00	h
Ablängen der Rammpfähle	9,00	Stk.	2,00	Stk/h	4,50	h
Aufstellen der Schalung	64,00	m ²	8,00	m ² /h	8,00	h
Einbauen der Bewehrung	12,80	t	0,40	t/h	32,00	h
Betonieren der Fundamentplatte						

Einbringen des Betons	128,00	m ³	71,00	m ³ /h	1,80	h
Aushärten des Betons	-		-		16,00	h
Abbau der Schalung	64,00	m ²	16,00	m ² /h	4,00	h
Hinterfüllen der Baugrube	181,45	fm ³	50,00	fm ³ /h	3,63	h
Herrichten der Geländeoberfläche	156,52	m ²	10,00	m ² /h	15,65	h
Abbau des Bauzauns	71,40	lfm	50,00	lfm/h	1,43	h
Gesamtdauer					120,86	h
					15,11	AT

Tab. 5-5 Herstellungsdauer Variante 2: Fertigteile-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung

Arbeitsschritt	Massen	Leistung	Dauer
Vorbereiten des Arbeitsplanums			
Aufstellen des Bauzaun	51,00 lfm	30,00 lfm/h	1,70 h
Abbruch und Verladen des Asphalts	9,80 m ³	2,00 m ³ /h	4,90 h
Errichtung der Bohrpfähle			
Herstellen der Bohrpfähle	44,00 lfm	5,00 lfm/h	8,80 h
Aushärten des Betons	-	-	16,00 h
Errichtung der Spundwand	152,64 m ²	37,50 m ² /h	4,07 h
Aushub der Baugrube	84,94 fm ³	95,00 fm ³ /h	0,89 h
Vorbereiten der Aushubsohle			
Verdichten der Baugrubensohle	57,76 m ²	100,00 m ² /h	0,58 h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	5,78 m ³	6,00 m ³ /h	0,96 h
Aushärten des Magerbetons	-	-	8,00 h
Ablängen der Bohrpfähle	4,00 Stk.	1,00 Stk/h	4,00 h
Einbauen der Bewehrung	10,80 t	0,40 t/h	27,00 h
Betonieren der Fundamentplatte			
Einbringen des Betons	80,90 m ³	71,00 m ³ /h	1,14 h
Aushärten des Betons	-	-	24,00 h
Herrichten der Geländeoberfläche	13,00 m ²	10,00 m ² /h	1,30 h
Abbau des Bauzauns	51,00 lfm	50,00 lfm/h	1,02 h
Gesamtdauer			104,36 h
			13,05 AT

Tab. 5-6 Herstellungsdauer Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

Arbeitsschritt	Massen		Leistung		Dauer	
Vorbereiten des Arbeitsplanums						
Aufstellen des Bauzaun	58,00	lfm	30,00	lfm/h	1,93	h
Abbruch und Verladen des Asphalts	16,20	m ³	2,00	m ³ /h	8,10	h
Errichtung der Rammpfähle						
Einbringen der Rammpfähle	99,00	lfm	27,50	lfm/h	3,60	h
Errichtung der Spundwand	200,64	m ²	37,50	m ² /h	5,35	h
Aushub der Baugrube	146,77	fm ³	95,00	fm ³ /h	1,54	h
Vorbereiten der Aushubsohle						
Verdichten der Baugrubensohle	92,16	m ²	100,00	m ² /h	0,92	h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,22	m ³	6,00	m ³ /h	1,54	h
Aushärten des Magerbetons	-		-		8,00	h
Ablängen der Rammpfähle	9,00	Stk.	2,00	Stk/h	4,50	h
Einbauen der Bewehrung	12,80	t	0,40	t/h	32,00	h
Betonieren der Fundamentplatte						
Einbringen des Betons	139,78	m ³	71,00	m ³ /h	1,97	h
Aushärten des Betons	-		-		24,00	h
Herrichten der Geländeoberfläche	17,00	m ²	10,00	m ² /h	1,70	h
Abbau des Bauzauns	58,00	lfm	50,00	lfm/h	1,16	h
Gesamtdauer					96,31	h
					12,04	AT

Tab. 5-7 Herstellungsdauer Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

Wie aus Tab. 5-4 bis Tab. 5-7 ersichtlich, benötigen die Varianten 1 und 2, bei denen eine Baugrube mit freier Böschung zur Ausführung kommt, mit 15,43 AT bzw. 15,11 AT deutlich länger als Variante 3 und 4 mit Spundwandverbau und einer Dauer von 13,05 AT bzw. 12,04 AT. Dies liegt nicht nur an der verringerten Kubatur des Aushubs und der Hinterfüllung, sondern vor allem an der geringeren Geländeoberfläche, die freigelegt und wiederhergestellt werden muss. Außerdem kann beim Einbringen der Spundwandbohlen in bindigem Untergrund eine erheblich größere Tagesleistung erzielt werden, als beim Auf- und Abbauen der Schalung.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei gleichem Baugrubenverbau die Fundamente mit Großbohrpfähle jeweils etwas länger in der Herstellung benötigen als jene mit Fertigteil-Rammpfählen. So benötigt, bei Ausführung einer Böschung, Variante 1 mit Bohrpfählen in etwa 2,6 h länger als Variante 2 mit Rammpfählen und, bei Ausführung einer Spundwand, Variante 3 ca. 8,1 h länger als Variante 4. Dies liegt dabei ausschließlich an der längeren Errichtungs- und Aushärtungszeit der Bohrpfähle. Trotz der größeren Abmessung der Fundamentplatte, wenn mit Rammpfählen gegründet wird, wodurch neben dem erhöhten Aushub, vor allem die größere Menge an Schalung, Bewehrung und Beton deutlich ins Gewicht fallen, bilden die Varianten 2 und 4 die jeweils schnellere Alternative. Bei

der Errichtung der Pfähle benötigt das Einbringen der Ramppfähle trotz der mehr als doppelt so großen Pfahlgesamtlänge weniger als halb so lange wie die Herstellung der Bohrpfähle. Dazu kommt, dass der Beton der Bohrpfähle erst aushärten muss, bevor mit den nächsten Arbeitsschritten begonnen werden kann, während die Ramppfähle sofort nach ihrer Einbringung in den Untergrund belastbar sind. Dieser Vorteil in der Errichtungsdauer ist daher bereits bei der geringen Anzahl an Pfählen pro Fundament maßgebend.

Eine Reduzierung der Herstellungsdauer der Gründungen kann neben der Wahl des Pfahlsystems aber vor allem durch eine Optimierung der Abmessungen der Betonplatte erreicht werden, da diese das zeitaufwändigste Bauteil darstellt.

5.5.2 Ermittlung der Herstellungskosten

Je nach Quelle und Gewerk variieren die Angaben zu den Kostenkennwerten unterschiedlich stark. Die Kosten für die Herstellung eines Großbohrpfahls mit einem Durchmesser von 100 cm liegen etwa in einer Größenordnung von ca. 200 €/lfm bis 300 €/lfm. Für einen Fertigteil-Ramppfahl mit den Querschnittsabmessungen von 40/40 cm können hingegen 60 €/lfm bis 80 €/lfm im eingebauten Zustand angesetzt werden. Zusätzlich dazu kommt noch das Ablängen des Pfahlkopfs und das Freilegen der Bewehrung, was unabhängig von der Pfahlart mit etwa 90 €/Stk angesetzt werden kann.^{101 102 103 104}

Für den Spundwandverbau kann eine Preisspanne für neue Spundbohlen von ca. 700 €/t bis 800 €/t angesetzt werden, was bei Verwendung von PU12 Profilen einen Materialpreis von 77 €/m² bis 88 €/m² ergibt. Da die Spundwand als verlorene Schalung im Untergrund verbleibt, können die Kosten durch den Einsatz gebrauchter Spundbohlen deutlich reduziert werden. Aufgrund fehlender Informationen zu Verfügbarkeit und Preis gebrauchter Bohlen kann hierzu allerdings keine Annahme getroffen werden.^{105 106 107}

Bei den Stahlbetonarbeiten können folgende Werte für Materialkosten berücksichtigt werden. Die Schalung kommt in etwa auf 5 €/m². Für die

¹⁰¹ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Ing. Marcus Obermayr, Bereichsleiter Westösterreich, Firma 3P Geotechnik ZT GmbH, am 11.12.2015

¹⁰² Fachgespräch mit Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte, Leiter des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, am 13.01.2016

¹⁰³ Fachgespräch mit Herrn Dipl.-Bauing. ETH/SIA René Schmidli, Geschäftsleiter Tief- und Spezialtiefbau, Firma JMS RISI AG, am 14.01.2016

¹⁰⁴ Fachgespräch mit Herrn Ing. Walter Schopf, Spartenbereichsleiter, Firma Keller Grundbau Ges.mbH, am 27.01.2016

¹⁰⁵ Fachgespräch mit Herrn Friedrich Hirnböck, Geschäftsführung, Firma Hirnböck Stabau GmbH, am 17.04.2016

¹⁰⁶ Fachgespräch mit Herrn Udo Kowarschik, Vertretungsberechtigter Geschäftsführer, Firma SSH Spundwand- und Stahlhandel GmbH, am 18.04.2016

¹⁰⁷ Fachgespräch mit Herrn Johannes Hafner, Kundenbetreuer Innendienst, Firma Frankstahl Rohr- und Sahlhandels-ges.m.b.H., am 18.04.2016

Bewehrung können ca. 600 €/t, und für den Beton ca. 80 €/m³ angesetzt werden.¹⁰⁸

Eine Aufstellung der gewählten Kostenkennwerte ist in Anhang 3 ersichtlich, wobei für die Kalkulation in etwa mit dem Mittelwert der Erfahrungswerte der Herstellungskosten gerechnet wurde. Die Neuwerte der Geräte, sowie die Abschreibung, Verzinsung und Reparatur wurden der *Österreichischen Baugeräteliste (ÖBGL)*, herausgegeben von der *Geschäftsstelle Bau der Wirtschaftskammer Österreich*, aus dem Jahr 2009 entnommen.¹⁰⁹ Die Werte beziehen sich somit auf 2008 und müssen für das jeweilige Jahr, indem die Bauarbeiten erfolgen, angepasst werden. Da der Großhandelspreisindex für 2015 auf Basis von 2008 allerdings nur ca. 100,70 %¹¹⁰ beträgt, wurde bei der Kalkulation auf eine Anpassung der Werte verzichtet, um eine bessere Übersichtlichkeit der Zahlen zu gewährleisten. Die Reparaturkosten wurden gemäß Empfehlung der *ÖNORM B 2110:2009* zu 50 % auf Lohn- und 50 % auf Stoffkosten aufgeteilt.¹¹¹

Für die Kalkulation wurde ein Mittellohn von 23,50 €/Std bei einer Arbeitszeit von 170 h/Monat angesetzt. Bei den Geräten wurde mit einem Verbrauch an Betriebsstoffen von 0,24 l/kWh gerechnet, wobei der Preis für Diesel der Einfachheit halber mit 1,00 €/l angenommen wurde.

Es ergeben sich somit, für die oben genannten Ausführungsvarianten, bezogen auf ein Bohr- bzw. Rammgerät, die folgenden Herstellungskosten.

Arbeitsschritt	Lohn		Sonst		Massen		Positionskosten	
Vorbereiten des Arbeitsplanums								
Aufstellen des Bauzaun	1,57	€/lfm	2,50	€/lfm	63,40	lfm	257,83	€
Abbruch und Verladen des Asphalts	-	€/m ³	100,00	€/m ³	33,02	m ³	3.302,45	€
Errichtung der Bohrpfähle	26,20	€/lfm	218,24	€/lfm	44,00	lfm	10.755,05	€
Aushub der Baugrube	0,94	€/fm ³	0,94	€/fm ³	224,38	fm ³	420,29	€
Vorbereiten der Aushubsohle								
Verdichten der Baugrubensohle	0,26	€/m ²	0,13	€/m ²	57,76	m ²	22,31	€
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,28	€/m ³	59,76	€/m ³	5,78	m ³	398,76	€
Ablängen der Bohrpfähle	-	€/Stk.	90,00	€/Stk.	4,00	Stk.	360,00	€
Aufbau der Schalung	11,75	€/m ²	4,96	€/m ²	48,00	m ²	802,08	€
Einbauen der Bewehrung	235,00	€/t	650,00	€/t	10,80	t	9.558,00	€

¹⁰⁸ Vgl. HOFSTADLER, C.: Kalkulation von Stahlbetonarbeiten. <http://christianhofstadler.at/wp-content/uploads/2011/06/Kalkulation-Stahlbetonarbeiten-Hofstadler-2011.pdf>. Datum des Zugriffs: 13.01.2016

¹⁰⁹ Vgl. WKÖ, : ÖBGL Österreichische Baugeräteliste. S.

¹¹⁰ Vgl. http://www.stat.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/grosshandelspreisindex/index.html. Datum des Zugriffs: 08.04.2016

¹¹¹ Vgl. ON, : ÖNORM B 2110, Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen - Werkvertragsnorm. S. 30

Betonieren der Fundamentplatte	0,79	€/m³	80,83	€/m³	72,00	m³	5.876,52	€
Abbau der Schalung	5,88	€/m²	-	€/m²	48,00	m²	282,00	€
Hinterfüllen der Baugrube	0,52	€/fm³	4,76	€/fm³	146,60	fm³	772,95	€
Herrichten der Geländeoberfläche	-	€/m²	50,00	€/m²	129,12	m²	6.456,13	€
Abbau des Bauzauns	0,94	€/lfm	-	€/lfm	63,40	lfm	59,60	€
Gesamtkosten							39.323,96	€

Tab. 5-8 Herstellungskosten Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung

Arbeitsschritt	Lohn		Sonst		Massen		Positionskosten	
Vorbereiten des Arbeitsplanums								
Aufstellen des Bauzaun	1,57	€/lfm	2,50	€/lfm	71,40	lfm	290,36	€
Abbruch und Verladen des Asphalts	-	€/m³	100,00	€/m³	44,10	m³	4.410,45	€
Errichtung der Rammpfähle	4,24	€/lfm	64,27	€/lfm	99,00	lfm	6.782,73	€
Aushub der Baugrube	0,94	€/fm³	0,94	€/fm³	318,67	fm³	596,91	€
Vorbereiten der Aushubsohle								
Verdichten der Baugrubensohle	0,26	€/m²	0,13	€/m²	92,16	m²	35,60	€
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,28	€/m³	59,76	€/m³	9,22	m³	636,25	€
Ablängen der Rammpfähle	-	€/Stk.	60,00	€/Stk.	9,00	Stk.	540,00	€
Aufbau der Schalung	11,75	€/m²	4,96	€/m²	64,00	m²	1.069,44	€
Einbauen der Bewehrung	235,00	€/t	650,00	€/t	12,80	t	11.328,00	€
Betonieren der Fundamentplatte	0,79	€/m³	80,83	€/m³	128,00	m³	10.447,15	€
Abbau der Schalung	5,88	€/m²	-	€/m²	64,00	m²	376,00	€
Hinterfüllen der Baugrube	0,52	€/fm³	4,76	€/fm³	181,45	fm³	956,69	€
Herrichten der Geländeoberfläche	-	€/m²	50,00	€/m²	156,52	m²	7.826,13	€
Abbau des Bauzauns	0,94	€/lfm	-	€/lfm	71,40	lfm	67,12	€
Gesamtkosten							45.362,82	€

Tab. 5-9 Herstellungskosten Variante 2: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung

Arbeitsschritt	Lohn		Sonst		Massen		Positionskosten	
Vorbereiten des Arbeitsplanums								
Aufstellen des Bauzaun	1,57	€/lfm	2,50	€/lfm	51,00	lfm	207,40	€
Abbruch und Verladen des Asphalts	-	€/m³	100,00	€/m³	9,80	m³	980,00	€
Errichtung der Bohrpfähle	26,20	€/lfm	218,24	€/lfm	44,00	lfm	10.755,05	€
Errichtung der Spundwand	1,74	€/m²	85,87	€/m²	152,64	m²	13.372,74	€
Aushub der Baugrube	0,94	€/fm³	0,94	€/fm³	84,94	fm³	159,11	€
Vorbereiten der Aushubsohle								
Verdichten der Baugrubensohle	0,26	€/m²	0,13	€/m²	40,45	m²	15,62	€
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,28	€/m³	59,76	€/m³	4,04	m³	279,25	€
Ablängen der Bohrpfähle	-	€/Stk.	90,00	€/Stk.	4,00	Stk.	360,00	€

Einbauen der Bewehrung	235,00	€/t	650,00	€/t	10,80	t	9.558,00	€
Betonieren der Fundamentplatte	0,79	€/m ³	80,83	€/m ³	80,90	m ³	6.602,86	€
Herrichten der Geländeoberfläche	-	€/m ²	50,00	€/m ²	13,00	m ²	650,00	€
Abbau des Bauzauns	0,94	€/lfm	-	€/lfm	51,00	lfm	47,94	€
Gesamtkosten							42.987,97	€

Tab. 5-10 Herstellungskosten Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

Arbeitsschritt	Lohn	Sonst	Massen	Positionskosten
Vorbereiten des Arbeitsplanums				
Aufstellen des Bauzaun	1,57 €/lfm	2,50 €/lfm	58,00 lfm	235,87 €
Abbruch und Verladen des Asphalts	- €/m ³	100,00 €/m ³	16,20 m ³	1.620,00 €
Errichtung der Rammpfähle	4,24 €/lfm	64,27 €/lfm	99,00 lfm	6.782,73 €
Errichtung der Spundwand	1,74 €/m ²	85,87 €/m ²	200,64 m ²	17.578,00 €
Aushub der Baugrube	0,94 €/fm ³	0,94 €/fm ³	146,77 fm ³	274,92 €
Vorbereiten der Aushubsohle				
Verdichten der Baugrubensohle	0,26 €/m ²	0,13 €/m ²	69,89 m ²	26,99 €
Betonieren der Sauberkeitsschicht	9,28 €/m ³	59,76 €/m ³	6,99 m ³	482,50 €
Ablängen der Rammpfähle	- €/Stk.	60,00 €/Stk.	9,00 Stk.	540,00 €
Einbauen der Bewehrung	235,00 €/t	650,00 €/t	12,80 t	11.328,00 €
Betonieren der Fundamentplatte	0,79 €/m ³	80,83 €/m ³	139,78 m ³	11.408,55 €
Herrichten der Geländeoberfläche	- €/m ²	50,00 €/m ²	17,00 m ²	850,00 €
Abbau des Bauzauns	0,94 €/lfm	- €/lfm	58,00 lfm	54,52 €
Gesamtkosten				51.182,08 €

Tab. 5-11 Herstellungskosten Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

Die Gesamtkosten der Varianten mit Ausführung der Baugrube mit freier Böschung sind jeweils geringer als jene mit einem Spundwandverbau. So kostet die Variante 1 mit Bohrpfählen und freier Böschung ca. 39.324 € und Variante 3 mit Bohrpfählen und Spundwandverbau ca. 42.988 €. Analog dazu, bei Verwendung von Rammpfählen, kostet Variante 2 mit freier Böschung ca. 45.363 € und Variante 4 mit Spundwandverbau ca. 51.182 €. Die Spundwandherstellung macht dabei die größte Kostenstelle aus. Dies bedeutet, dass der Kauf und das Einbringen der Spundbohlen teurer ist, als der ansonsten erforderliche, zusätzliche Aushub, das Auf- und Abbauen der Schalung, die Hinterfüllung und die Wiederherstellung der Geländeoberfläche. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Neupreis der Spundwandbohlen angesetzt wurde und die Gesamtkosten bei Verwendung gebrauchter Bohlen deutlich reduziert werden können.

Des Weiteren sind jene Varianten, bei denen Großbohrpfähle zur Ausführung kommen, unabhängig von der Baugrubenverbauart, jeweils ca. 6.039 € bis 8.194 € günstiger, als die Varianten mit Fertigteil-

Rammpfählen. Dies liegt jedoch an den größeren Abmessungen der Fundamentplatte, die bei der Verwendung von Rammpfählen errichtet werden. Vor allem der deutlich höhere Verbrauch an Bewehrung und Beton machen die größere Fundamentplatte sichtlich teurer. Die Errichtung der Rammpfähle ist hingegen pro Fundament, trotz der größeren Pfahlanzahl, um ca. ein Drittel günstiger als die Herstellung der Bohrpfähle. Dies würde allerdings erst bei größeren Pfahlgesamtlängen maßgebend werden.

Eine Senkung der Kosten kann daher vor allem durch eine Optimierung der Fundamentplatte erreicht werden, da diese den größten Anteil der Kosten verursacht.

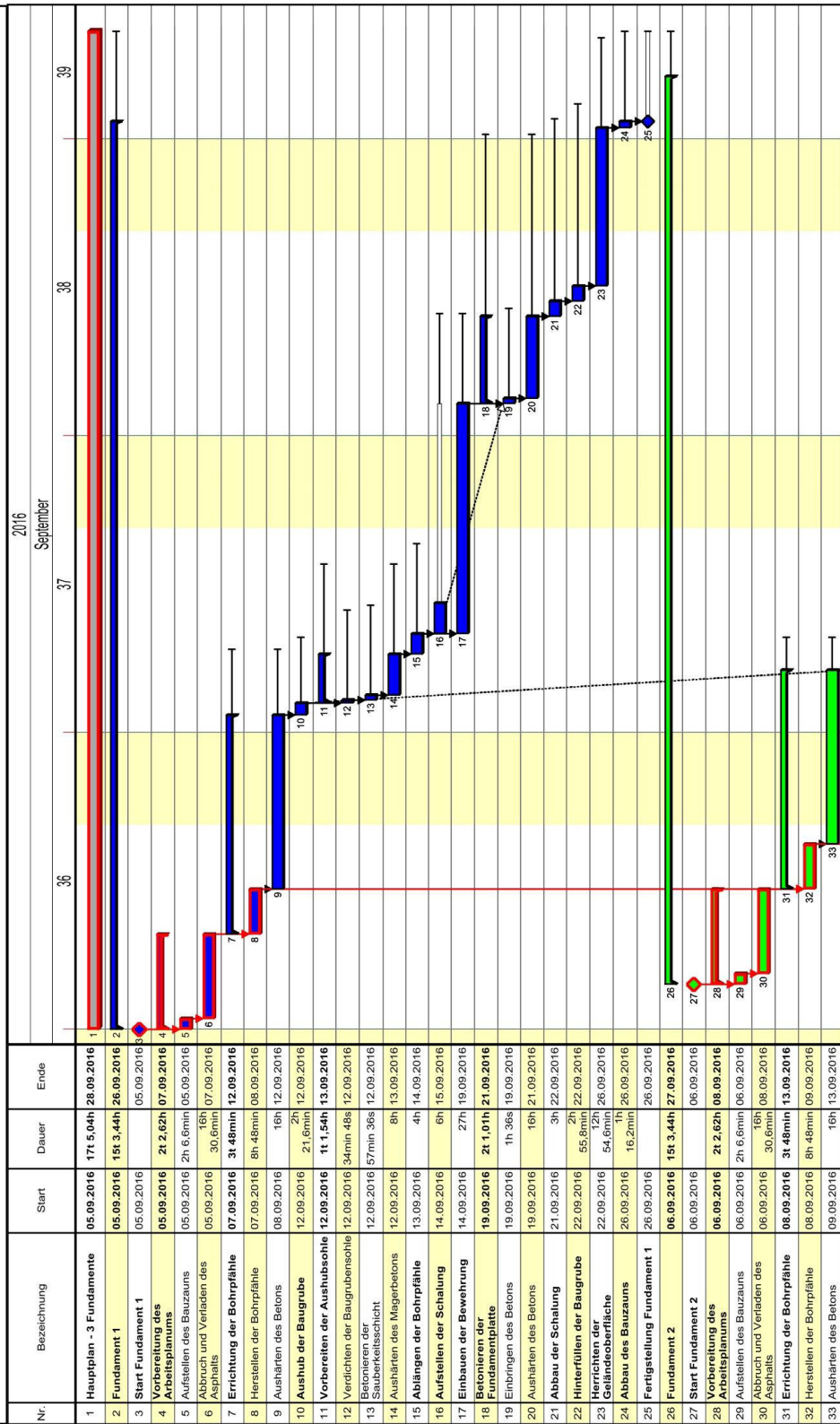
5.6 Bauablauf

Um die Herstellung der Fundamente entlang der *QUICKWAY*-Trasse möglichst ressourcenschonend abzuwickeln, sollten die Arbeiten an den einzelnen Baustellen zeitlich so aufeinander abgestimmt werden, dass die maßgebende Baustelleneinrichtung möglichst wenig an- und abtransportiert werden muss. Aufgrund der Größe des Raupenkrans und der Komplexität des Arbeitsvorgangs bei der Herstellung der Großbohr- und Fertigteil-Rammpfähle, wurde das Drehbohr- bzw. Rammgerät als Leitgerät ausgewählt. Idealerweise werden die Arbeitsschritte, die der Pfahlherstellung vorhergehen, bei hintereinander folgenden Baustellen so angeordnet, dass der Raupenkran nach Fertigstellung der Pfähle eines Fundaments direkt zur nächsten Baustelle umgestellt werden kann, um dort mit der Einbringung der Pfähle von Neuem zu beginnen. In solchen Fällen kann das Drehbohr- bzw. Rammgerät, wie bereits erwähnt, bei entsprechenden Platzverhältnissen unmittelbar über den Verkehrsweg bewegt werden und es ist kein Verladen und Transportieren per Tieflader erforderlich.

Die zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte dreier hintereinander folgenden Baustellen, bei Verwendung eines Drehbohr- bzw. Rammgeräts, ist, für alle vier Ausführungsvarianten, in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die Balkendiagramme wurden auf Grundlage einer Fünftagewoche mit 8 Arbeitsstunden pro Tag erstellt. Eine deutliche Erhöhung der Arbeitsfortschritte kann somit bei Arbeiten im Schichtbetrieb oder am Wochenende erreicht werden, was allerdings aufgrund von Ruhezeiten und Arbeitsgesetzen individuell betrachtet werden muss. Nicht berücksichtigt wurde dabei das Umstellen des Raupenkrans selbst, da dies aufgrund der lokalen Verkehrs- und Zugangssituation stark variieren und aufgrund von mittleren Abständen zwischen den Baustellen von 40 m bis 50 m generell vernachlässigt werden kann.

Pfahl-Platten-Gründung - Variante 1

Balkenplanansicht



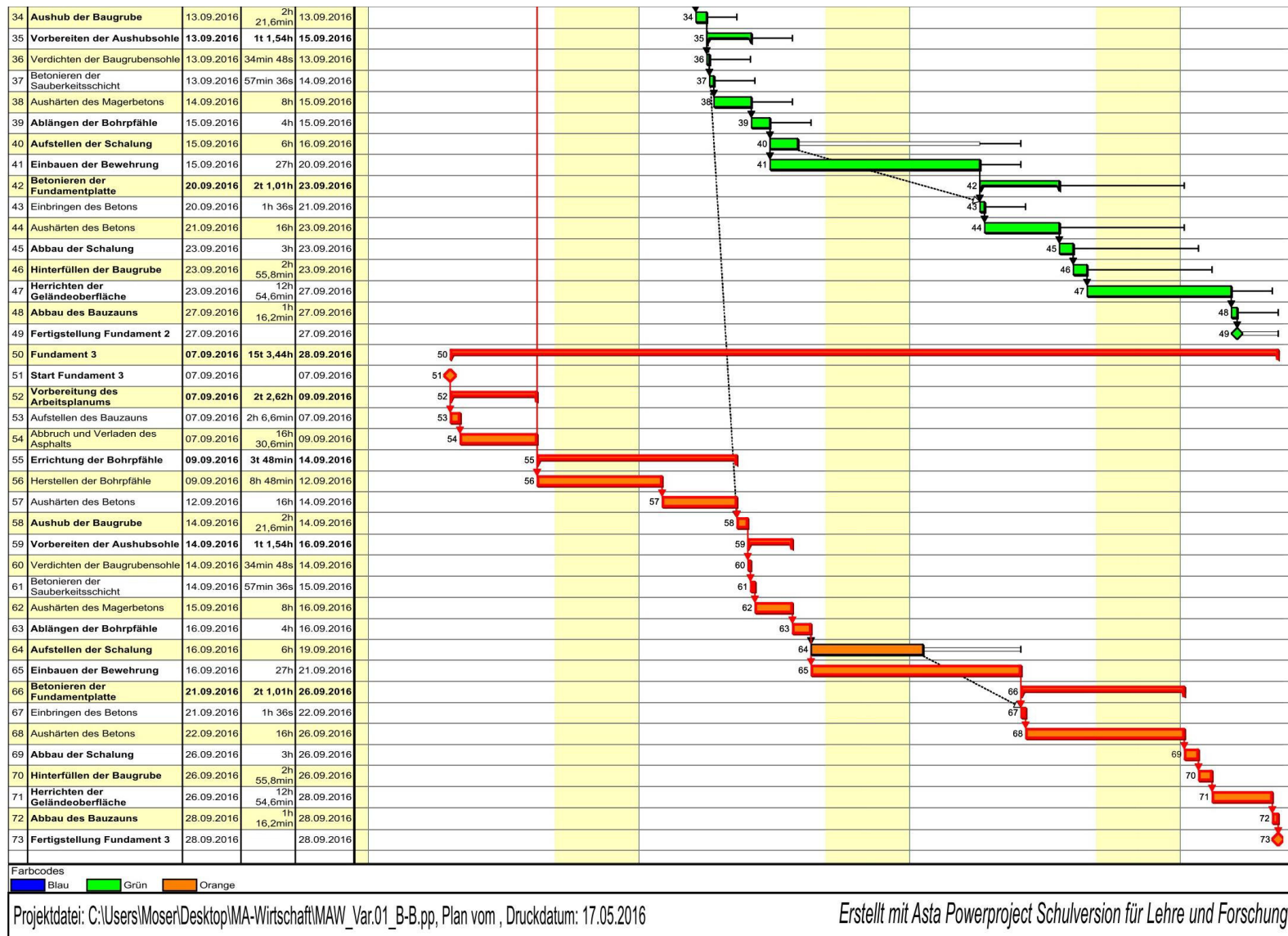
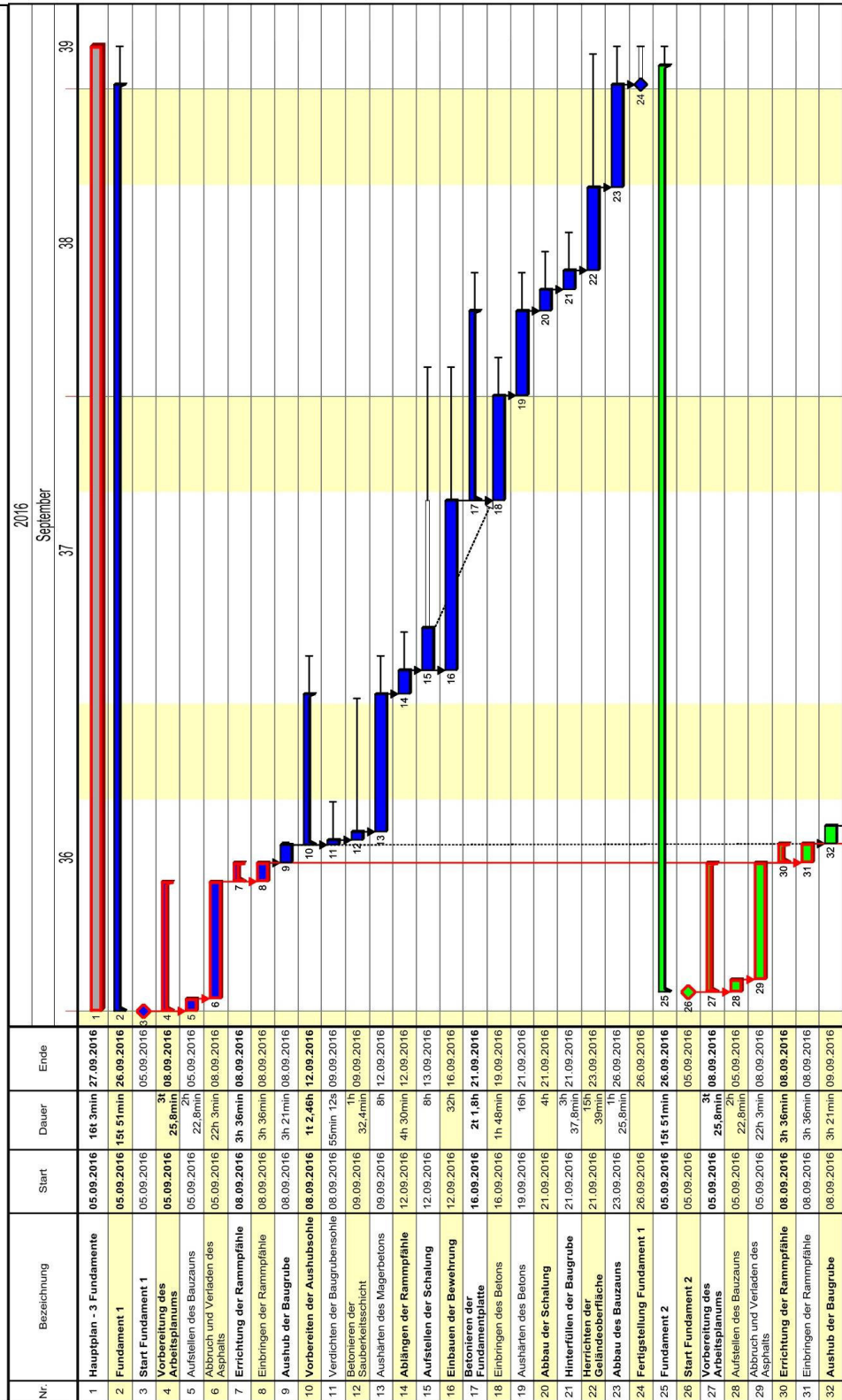


Abb. 5-11 Balkenplan Variante 1: Bohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung

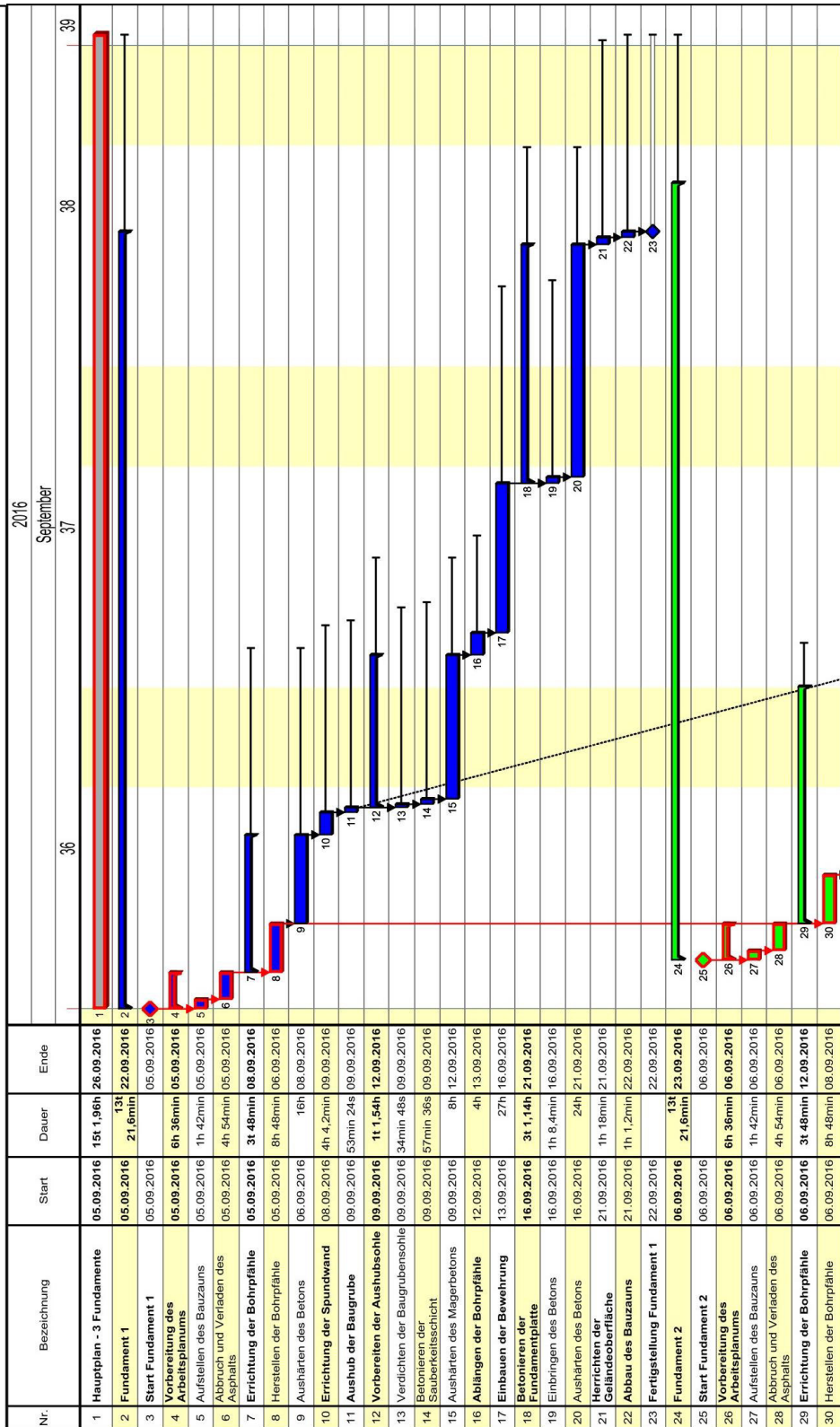
Pfahl-Platten-Gründung - Variante 2

Balkenplanansicht



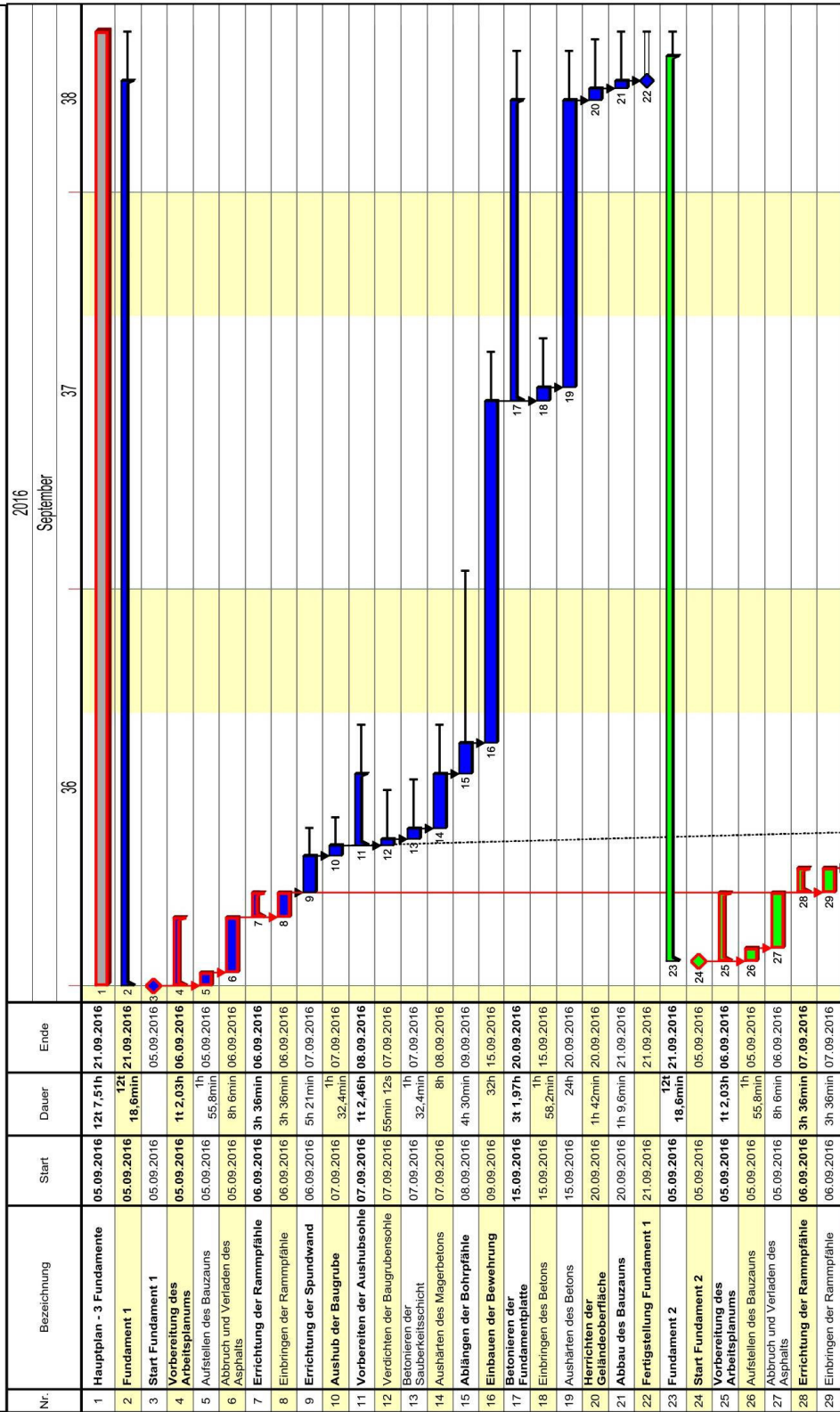
Pfahl-Platten-Gründung - Variante 3

Balkenplanansicht



Pfahl-Platten-Gründung - Variante 4

Balkenplanansicht



Wie aus den Balkenplänen ersichtlich, kann von der Herstellungsdauer einer Pfahl-Plattengründung nicht automatisch auf den gesamten Bauablauf geschlossen werden.

Die Ausführung dreier Fundamente der Varianten 3 und 4 mit Spundwandverbau benötigen, analog zur Herstellung eines einzelnen Fundaments, weniger lange als die Varianten 1 und 2 mit freier Böschung. Je nach verwendetem Pfahlsystem können durch den Einsatz einer Spundwand bei der Herstellung der Baugrube ca. 19,1 h bzw. 24,5 h eingespart werden.

Kommen weiters Fertigteil-Rammpfähle zum Einsatz, so kann, aufgrund der schnelleren Pfahlherstellung, das letzte Fundament bereits früher abgeschlossen werden, als bei der Ausführung von Großbohrpfählen. So kommen drei Fundamente der Variante 2 mit Rammpfählen und einer Baugrube mit freier Böschung auf ca. 128,1 h, während beim Einsatz von Bohrpfählen, trotz geringerer Pfahlanzahl und kleineren Betonplattenabmessungen, die drei Fundamente der Variante 1 bereits ca. 141,0 h benötigen. Analog dazu, bei Variante 3 und 4 mit Verbau der Baugrube mittels Spundwandbohlen, kommen drei Fundamente bei Ausbildung von Bohrpfählen auf ca. 122,0 h und bei Rammpfählen nur auf ca. 103,5 h.

Da die Errichtung der Spundwand und der Aushub der Baugrube nicht die maßgebenden Arbeitsschritte darstellen, kann hierdurch zwar die Dauer der einzelnen Baustellen beeinflusst werden, der gesamte Bauablauf hängt davon allerdings nur in geringem Maße ab. Im Gegensatz dazu summieren sich die Zeiteinsparungen bei der Pfahlherstellung und verkürzen somit den gesamten Bauablauf umso mehr, je größer die Anzahl der Baustellen ist, die hintereinander ausgeführt werden. Die Errichtung der Pfähle stellt somit den leitenden Arbeitsschritt dar. Verzögerungen bei vorhergehenden Arbeiten oder bei der Pfahlherstellung selbst liegen daher auf dem kritischen Pfad im Balkenplan und wirken sich auch auf den Fertigstellungstermin der folgenden Baustellen aus.

Des Weiteren ist aus den Balkenplänen ersichtlich, dass die Errichtung einer Gründung innerhalb eines Arbeitstages, wie vom *QUICKTEAM* vorgesehen¹¹², mit den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen und gewählten Systemen nicht realisierbar ist. Bei entsprechender Vorbereitung und zeitlich nebeneinander laufenden Baustellen ist es allerdings möglich, nachfolgende Baustellen innerhalb eines Tages bzw. sogar noch am selben Tag fertigzustellen. Dies erfordert zwar viele gleichzeitig geführte Baustellen und bedeutet somit Verkehrsbehinderungen entlang der *QUICKNET*-Trasse, ermöglicht aber den angedachten Fortschritt bei der Errichtung der Stützen und des Fahrwegs.

¹¹² Vgl. SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. S. 68

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der heutigen Zeit stehen Staus und Verkehrsbehinderungen, vor allem in Großstädten, an der Tagesordnung. Zu Stoßzeiten sind die vorhandenen Verkehrsnetze überlastet und mit Fahrzeugen im Stop-and-go-Betrieb verstopft, was zu einer starken Umweltbelastung und durch den Zeitverlust zu einem volkswirtschaftlichen Schaden führt.

Um dem bestehenden Verkehrschaos und einer weiteren Verschlimmerung durch eine stetig steigende Bevölkerungszahl entgegenzuwirken hat sich das *QUICKTEAM*, rund um Lutz Sparowitz, das *QUICKWAY*-Konzept überlegt. *QUICKWAY* bildet ein Verkehrsnetz aus Hochfahrwegen, welches nachträglich in bereits bestehende Großstädte, die mit Verkehrsüberlastungen zu kämpfen haben, errichtet werden kann. Diese Hochfahrwege werden von autonomen Fahrzeugen des Personen- und leichten Güterverkehrs befahren und entlasten somit die Straßen auf Bodenniveau. Dadurch soll sowohl das Verkehrschaos, als auch die Umweltbelastung in Großstädten deutlich reduziert werden.

Einer dieser Ballungsräume, indem es täglich zu Behinderungen aufgrund von Verkehrsüberlastung kommt, ist der Stadtstaat Singapur. Mit einer Bevölkerung von ca. 5,5 Mio. Einwohnern und einer Grundfläche von lediglich ca. 720 km² ist Singapur einer der am dichtesten besiedelten Staaten weltweit. Im Vergleich dazu hat Österreich eine Bevölkerung von 8,5 Mio. und eine Grundfläche von 83.900 km². Die Regierung Singapurs versucht zwar mit strengen Bestimmungen auf Neuzulassungen und hohen Abgaben und Steuern die Zahl der zugelassenen Fahrzeuge niedrig zu halten, doch kann dadurch ein tägliches Verkehrschaos nicht verhindert werden. Singapur bildet daher ein prädestiniertes Modell für das *QUICKWAY*-Konzept und dient als Beispiel in dieser Arbeit.

Um die Verkehrsbehinderungen in den bereits überfüllten Straßen in einem erträglichen Ausmaß zu halten, ist es notwendig, einen schnellen und konstanten Baufortschritt bei der Errichtung des *QUICKNET* zu erzielen. Das erfordert weiters, dass die Gründungen der Trasse möglichst rasch und platzsparend hergestellt werden können.

Der Untergrund Singapurs lässt sich geologisch zwar in 4 große Formationen unterteilen, besteht nahe der Oberfläche allerdings aufgrund starker Verwitterung bzw. sedimentärer Ablagerungen hauptsächlich aus bindigen Böden mit steifer bis halbfester Konsistenz. Die Fundamente des *QUICKNET*, die aufgrund der innerstädtischen Lage möglichst platzsparend ausgeführt werden müssen, sollten daher auf Pfählen gegründet werden, um Setzungen gering zu halten. Besonders um differenzielle Verformungen des Untergrunds und somit ein Schiefstellung der Stützen zu vermeiden, empfiehlt sich die Ausbildung einer kombinierten Pfahl-Plattengründung. Aufgrund der hohen Konstruktion der Stützen müssen nicht nur Vertikallasten, sondern auch Biegemomente von den Fundamenten in den Untergrund abgetragen werden, weshalb die Pfähle auch auf Zug beansprucht werden können und folglich bewehrt ausgeführt

werden müssen. Da der bindige Boden großteils bis in eine Tiefe von durchschnittlich 50 m und mehr reicht, werden die errichteten Pfähle nicht auf Spitzendruck beansprucht, sondern sind schwimmend gelagert und tragen die Lasten hauptsächlich über Mantelreibung ab. Als mögliches Pfahlsystem ergeben sich somit Großbohrpfähle, die aufgrund der großen Oberfläche hohe Lasten pro Pfahl abtragen können, bzw. Fertigteil-Rammpfähle, die vor Ort rasch errichtet werden können und somit eine größere Pfahlanzahl in kurzer Zeit möglich machen.

Mit den eben genannten Pfahlsystemen wurden verschiedene Geometrien und Abmessungen der Pfahl-Plattengründungen untersucht und erdstatisch mit einem FEM-Programm berechnet. Aus den Berechnungen haben sich die folgenden Konfigurationen als zweckmäßig erwiesen. Die Bodenplatte ist 2 m stark und hat eine Abmessung von 6*6 m bzw. 8*8 m. Die Platte mit 6 m Kantenlänge ist auf 4 Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 100 cm gegründet. Die Platte mit 8 m Kantenlänge hingegen ist auf 9 Rammpfählen gelagert, die eine Querschnittsabmessung von 40/40 cm haben. Die Länge der Pfähle wurde jeweils mit 10 m gewählt.

Da die Platzverhältnisse meist sehr begrenzt sind, eignet sich im innerstädtischen Raum, aufgrund des geringeren Platzbedarfs wegen der kleineren Fundamentplatte, das System mit Großbohrpfählen. Hierbei müsste in weiterführenden Berechnungen allerdings noch untersucht werden, ob mit Rammpfählen, bei gleichen Plattenabmessungen, nicht ein gleichwertiges Ergebnis erzielbar ist. Dazu könnten verschiedene Anordnungen unterschiedlich vieler Pfähle berücksichtigt werden, was den Aufwand dieser Arbeit jedoch überstiegen hätte. Weiters erweist sich ein Verbau der Baugrube mit Spundwandbohlen, im Vergleich zur Ausbildung einer freien Böschung, als sinnvoll, um die Ausdehnung der Baugrube zu reduzieren. Verbleiben die Spundwandbohlen dabei im Untergrund, können sie als verlorene Schalung verwendet werden, wodurch auf den Arbeitsraum und die Errichtung einer einseitigen Schalung verzichtet werden kann. Dies verringert weiters den Platzbedarf der Baugrube und reduziert die Herstellungsdauer und –kosten der Gründungen.

Die Dauer und Kosten der 4 Varianten sind in den folgenden Tabellen ersichtlich.

Arbeitsschritt	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Vorbereiten des Arbeitsplanums				
Aufstellen des Bauzaun	2,11 h	2,38 h	1,70 h	1,93 h
Abbruch und Verladen des Asphalts	16,51 h	22,05 h	4,90 h	8,10 h
Errichtung der Pfähle				
Herstellen der Pfähle	8,80 h	3,60 h	8,80 h	3,60 h
Aushärten des Betons	16,00 h	- h	16,00 h	- h
Errichtung der Spundwand	- h	- h	4,07 h	5,35 h

Aushub der Baugrube	2,36 h	3,35 h	0,89 h	1,54 h
Vorbereiten der Aushubsohle				
Verdichten der Baugrubensohle	0,58 h	0,92 h	0,58 h	0,92 h
Betonieren der Sauberkeitsschicht	0,96 h	1,54 h	0,96 h	1,54 h
Aushärten des Magerbetons	8,00 h	8,00 h	8,00 h	8,00 h
Ablängen der Pfähle	4,00 h	4,50 h	4,00 h	4,50 h
Aufstellen der Schalung	6,00 h	8,00 h	- h	- h
Einbauen der Bewehrung	27,00 h	32,00 h	27,00 h	32,00 h
Betonieren der Fundamentplatte				
Einbringen des Betons	1,01 h	1,80 h	1,14 h	1,97 h
Aushärten des Betons	16,00 h	16,00 h	24,00 h	24,00 h
Abbau der Schalung	3,00 h	4,00 h	- h	- h
Hinterfüllen der Baugrube	2,93 h	3,63 h	- h	- h
Herrichten der Geländeoberfläche	12,91 h	15,65 h	1,30 h	1,70 h
Abbau des Bauzauns	1,27 h	1,43 h	1,02 h	1,16 h
Gesamtdauer	123,45 h	120,86 h	104,36 h	96,31 h
	15,43 AT	15,11 AT	13,05 AT	12,04 AT

Tab. 6-1 Übersicht der Herstellungsdauer der Varianten

Arbeitsschritt	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Vorbereiten des Arbeitsplanums				
Aufstellen des Bauzaun	257,83 €	290,36 €	207,40 €	235,87 €
Abbruch und Verladen des Asphalts	3.302,45 €	4.410,45 €	980,00 €	1.620,00 €
Errichtung der Pfähle	10.755,05 €	6.782,73 €	10.755,05 €	6.782,73 €
Errichtung der Spundwand	- €	- €	13.372,74 €	17.578,00 €
Aushub der Baugrube	420,29 €	596,91 €	159,11 €	274,92 €
Vorbereiten der Aushubsohle				
Verdichten der Baugrubensohle	22,31 €	35,60 €	15,62 €	26,99 €
Betonieren der Sauberkeitsschicht	398,76 €	636,25 €	279,25 €	482,50 €
Ablängen der Pfähle	360,00 €	540,00 €	360,00 €	540,00 €
Aufbau der Schalung	802,08 €	1.069,44 €	- €	- €
Einbauen der Bewehrung	9.558,00 €	11.328,00 €	9.558,00 €	11.328,00 €
Betonieren der Fundamentplatte	5.876,52 €	10.447,15 €	6.602,86 €	11.408,55 €
Abbau der Schalung	282,00 €	376,00 €	- €	- €
Hinterfüllen der Baugrube	772,95 €	956,69 €	- €	- €
Herrichten der Geländeoberfläche	6.456,13 €	7.826,13 €	650,00 €	850,00 €
Abbau des Bauzauns	59,60 €	67,12 €	47,94 €	54,52 €
Gesamtkosten	39.323,96 €	45.362,82 €	42.987,97 €	51.182,08 €

Tab. 6-2 Übersicht der Herstellungskosten der Varianten

Wie aus Tab. 6-1 ersichtlich hat die Ausführungsvariante 4, mit Fertigteil-Rammpfählen und Verbau der Baugrube mit Spundwandbohlen, mit ca.

12,0 Arbeitstagen die geringste Herstellungsdauer pro Fundament. Als zweites folgt Variante 3, mit Großbohrpfählen und Spundwandverbau, die mit ca. 13,0 Arbeitstagen bereits einen Tag mehr benötigt. Die Herstellung der Varianten 1 und 2, die jeweils mit freier Böschung ausgeführt werden, benötigt mit ca. 15,4 AT bzw. 15,1 AT noch einmal deutlich länger. Dies ist einerseits auf die rasche Einbringung der Spundwandbohlen, und andererseits auf den verringerten Aushub und das Wegfallen der Schalung zurückzuführen. Zudem benötigen die Rammpfähle bei der Einbringung in den Untergrund, trotz größerer Pfahlanzahl, weniger als halb so lange wie die Herstellung der Bohrpfähle. Dazu kommt außerdem, dass die Rammpfähle keine Zeit zur Aushärtung des Betons benötigen und sofort belastbar sind.

Diese Reihenfolge zeigt sich auch beim Bauablauf dreier hintereinander liegenden Baustellen. Die Errichtung von drei Gründungen, bei Verwendung des Raupenkrans zur Pfahlherstellung als Leitgerät, benötigt bei Ausführung der Variante 4 in Summe ca. 12,9 AT. Variante 3 liegt mit ca. 15,3 AT noch an zweiter Stelle, wobei der Unterschied zu Variante 4 bereits deutlich größer wurde. Variante 2 konnte mit ca. 16,0 AT auf Variante 3 aufholen und den Abstand zu Variante 1 mit ca. 17,6 AT erheblich vergrößern. Dies bedeutet, dass die Varianten 1 und 3, in Abhängigkeit der Anzahl an hintereinander errichteten Gründungen, zeitlich immer weiter zurückfallen und im Endeffekt, bei mehreren Baustellen, länger als Variante 2 und 4 benötigen.

Bei den Herstellungskosten stellt Variante 4, wie in Tab. 6-2 ersichtlich, hingegen die teuerste Ausführung dar. Mit ca. 51.200 € ist sie um ca. 11.900 € teurer als die billigste Variante mit ca. 39.300 €. Die Varianten 2 und 3 liegen mit ca. 45.400 € und 43.000 € dazwischen. Dies ist vor allem auf die Kosten der Spundwand zurückzuführen, wobei berücksichtigt werden muss, dass der Neupreis der Spundbohlen angesetzt wurde. Die Verwendung von gebrauchten Bohlen bietet hier noch einiges an Einsparungspotenzial. Während die Errichtung der Fertigteil-Rammpfähle zwar um ca. 4.000 € günstiger ist als die Herstellung der Großbohrpfähle, stehen demgegenüber die Kosten der größeren Fundamentplatte, die bei der Gründung auf Rammpfählen zur Ausführung kommt. Die Herstellung der Betonplatte kostet bei Variante 2 und 4 im Schnitt ca. 6.600 € mehr als bei Variante 1 und 3. Dazu kommt außerdem der größere Umfang der Baugrube und die damit verbundene Vergrößerung der Spundwandfläche, die die Variante 4 zur teuersten Ausführung macht.

Für die Umsetzung des *QUICKWAY*-Konzepts muss daher entschieden werden, ob die Dauer oder die Kosten der Herstellung der Gründungen maßgebend für die Auswahl der Ausführungsvariante sind. Variante 1, mit freier Böschung und Großbohrpfählen, stellt mit einer Herstellungsdauer von ca. 15,4 AT pro Fundament und Kosten von ca. 39.300 €, die langsamste und billigste Variante dar. Variante 4 hingegen, mit Spundwandverbau und Fertigteil-Rammpfählen, ist mit ca. 12,0 AT und

51.200 € die schnellste und teuerste Ausführung. Zudem benötigt die Baugrube der Variante 4, aufgrund der Spundwand, weniger Platz als Variante 1, was vor allem im innerstädtischen Raum von großer Bedeutung ist. Da das *QUICKNET* in bereits bestehenden Städten installiert werden soll, ist die Variante 4 vorzuziehen, um die Behinderung des Verkehrs durch den Bauablauf möglichst gering zu halten. Hierbei muss allerdings entschieden werden, ob der schnellere Baufortschritt die Mehrkosten, die im Vergleich zu den anderen Varianten entstehen, rechtfertigt, da der Zeitunterschied bei einer Baustelle mit ca. 3,4 AT überschaubar ist und sich der Kostenunterschied aufgrund der Vielzahl an Fundamenten vervielfacht.

Die Errichtung einer Gründung innerhalb eines Arbeitstages, wie vom *QUICKTEAM* vorgesehen, ist nicht realisierbar. Bei entsprechender Vorbereitung und zeitlich nebeneinander laufenden Baustellen ist es allerdings möglich, nachfolgende Baustellen innerhalb eines Tages bzw. sogar noch am selben Tag fertigzustellen. Dies erfordert zwar viele gleichzeitig geführte Baustellen und bedeutet somit Verkehrsbehinderungen entlang der *QUICKNET*-Trasse, ermöglicht aber den angedachten Fortschritt bei der Errichtung der Stützen und des Hochfahrwegs.

Als weiterführende Untersuchungen könnten exakte Baugrundaufschlüsse vor Ort durchgeführt werden, um die tatsächlichen Untergrundverhältnisse zu ergründen. Dies wird allerdings erst bei der Umsetzung des Projekts relevant und kann somit mittels Vorkundungen im Zuge der Ausführung durchgeführt werden.

Mit den genaueren Untergrundbedingungen könnten dann bessere Modelle für die erdstatischen Berechnungen erstellt und weiterführende FEM-Berechnungen durchgeführt werden, um einerseits die Abmessungen der Gründungen zu optimieren und andererseits das Setzungsverhalten der Fundamente zu untersuchen. Dabei kann zudem die Rahmenwirkung der Säulen entlang der *QUICKWAY*-Trasse berücksichtigt werden.

In Bezug auf die Kalkulation wäre vor allem eine Anpassung der Geräte-, Materialpreise und Lohnkosten an die Verhältnisse in Singapur sinnvoll. Weiters sollte die Verfügbarkeit der Baustelleneinrichtung und die geschätzten Leistungs- und Erfahrungswerte von Baufirmen vor Ort abgefragt und die Ausführungsvarianten und die Kalkulation darauf angepasst werden, um bessere Ergebnisse für eine Umsetzung des *QUICKWAY*-Konzepts in Singapur zu erzielen.

7 Anhang

7.1 Finite-Element-Berechnungen mit *Plaxis 3D AE*

7.1.1 Eingabeparameter

Cluster		Clay	Sand	Concrete	
Material model		HS small	HS small	linear-elastic	[-]
Drainage type		undrained B	drained	non-porous	[-]
Specific weight	γ_{unsat}	19	20	25	[kN/m ³]
	γ_{sat}	20	22	–	[kN/m ³]
Stiffness	E'	–	–	30.000.000	[kN/m ²]
	E_{50}^{ref}	15.000	30.000	–	[kN/m ²]
	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	7.500	30.000	–	[kN/m ²]
	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	45.000	90.000	–	[kN/m ²]
Power	m	1,0	0,55	–	[-]
Poisson's ratio	ν_{ur}	0,2	0,2	0,2	[-]
Reference pressure	p_{ref}	100	100	–	[kN/m ²]
Earth pressure coeff. in normal consolidation	K_0^{nc}	0,5774	0,4264	–	[-]
Cohesion	c'	–	0	–	[kN/m ²]
Friction angle	φ'	–	35	–	[°]
Undrained shear strength	$c_{\text{u,ref}}$	50	–	–	[kN/m ²]
Dilatancy angle	ψ	0	10	–	[°]
Shear strain	$\gamma_{0,7}$	0,00015	0,00020	–	[-]
Shear modulus	G_0^{ref}	56.250	112.500	–	[kN/m ²]
Permeability	k	10 ⁻⁹	10 ⁻⁵	–	[m/d]
Interface strength	R_{inter}	1	1	1	[-]
Earth pressure coeff. for initial stress state	K_0	0,5774	0,4264	–	[-]

Tab. 7-1 Eingabeparameter der Soil-Materialien für die FEM-Berechnung mit *Plaxis 3D AE*

Soil		Clay			Sand		
		DN100	DN40	40/40	DN100	DN40	
Dimension		DN100	DN40	40/40	DN100	DN40	
Stiffness	E	30 * 10 ⁶	30 * 10 ⁶	30 * 10 ⁶	30 * 10 ⁶	30 * 10 ⁶	[kN/m ²]
Specific weight	γ	25	25	25	25	25	[kN/m ³]
Pile type		Massive circular pile	Massive circular pile	Massive square pile	Massive circular pile	Massive circular pile	[-]
Diameter/Width		1,0	0,4	0,4	1,0	0,4	[m]
Skin resistance		linear	linear	linear	linear	linear	[-]

	$T_{top,max}$	78,54	31,42	40,0	235,62	94,25	[kN/m]
	$T_{bot,max}$	78,54	31,42	40,0	235,62	94,25	[kN/m]
Base	F_{max}	500	75	100	1200	200	[kN]

Tab. 7-2 Eingabeparameter der Embedded pile-Materialien für die FEM-Berechnung mit *Plaxis 3D AE*

7.1.2 Berechnungsergebnisse

Nr.	Boden	Platte	Anzahl Pfähle	Pfahl- querschnitt	Länge [m]	N_{min} [kN]	N_{max} [kN]	s_{min} [mm]	s_{max} [mm]	Δs [mm]
1	Ton	6*6*2m	4 Stk.	DN100	10	-1110	250	-12,37	1,03	13,40
2	Ton	6*6*2m	4 Stk.	DN100	15	-1430	320	-8,74	0,71	9,45
3	Ton	8*8*2m	9 Stk.	DN40	10	-370	-30	-8,76	0,20	8,96
4	Ton	8*8*2m	9 Stk.	DN40	15	-520	-20	-6,65	0,20	6,85
5	Ton	8*8*2m	9 Stk.	40/40	10	-480	-50	-8,01	0,21	8,22
6	Sand	6*6*2m	4 Stk.	DN100	10	-2170	700	-10,87	2,99	13,86
7	Sand	8*8*2m	9 Stk.	DN40	10	-980	70	-5,81	1,31	7,12

Tab. 7-3 Ergebnisse der FEM-Berechnungen mit *Plaxis 3D AE*

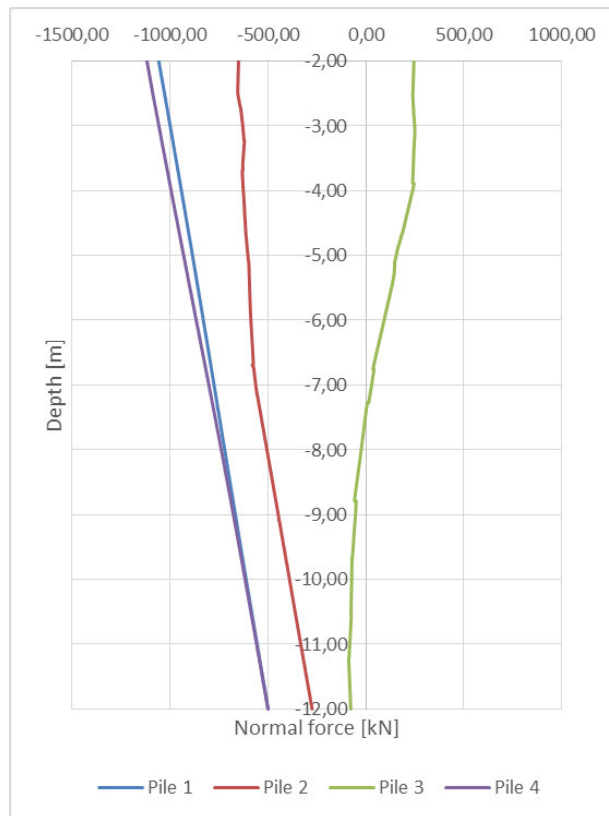


Abb. 7-1 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 1

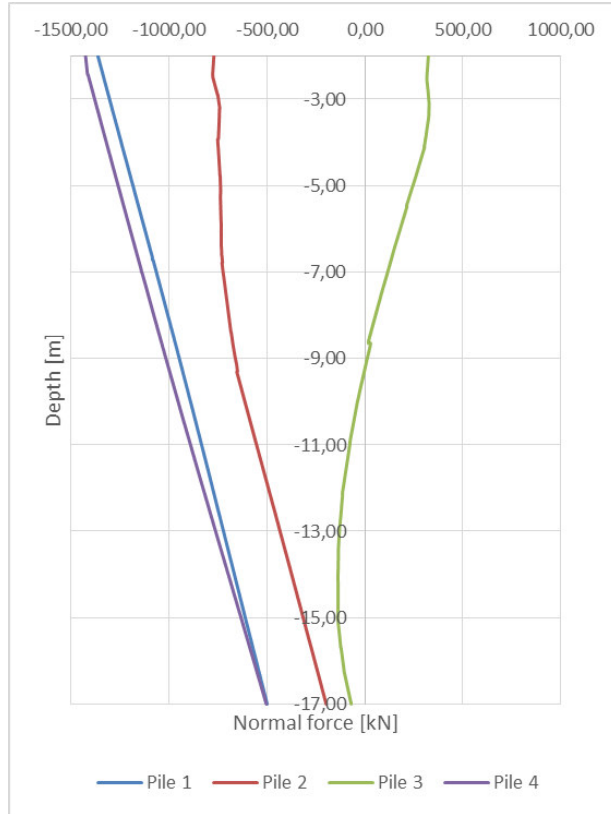


Abb. 7-2 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 2

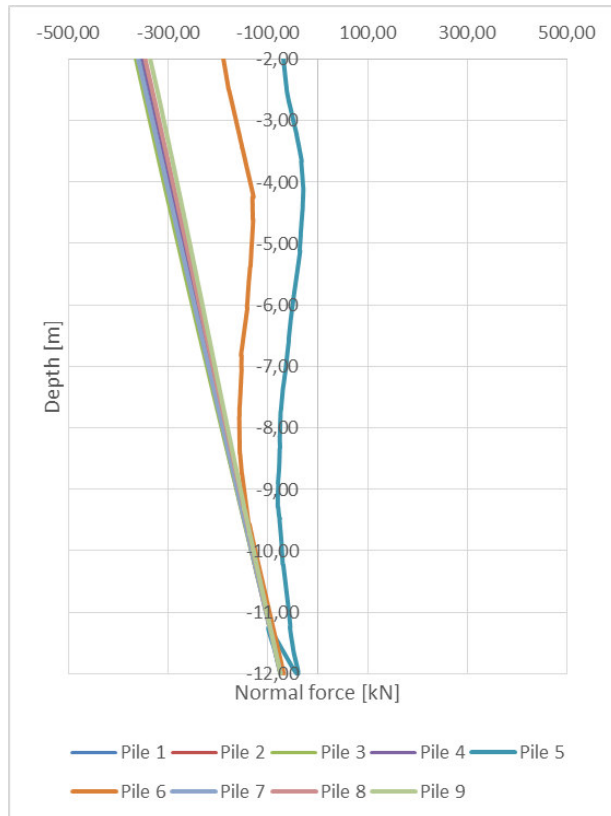


Abb. 7-3 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 3

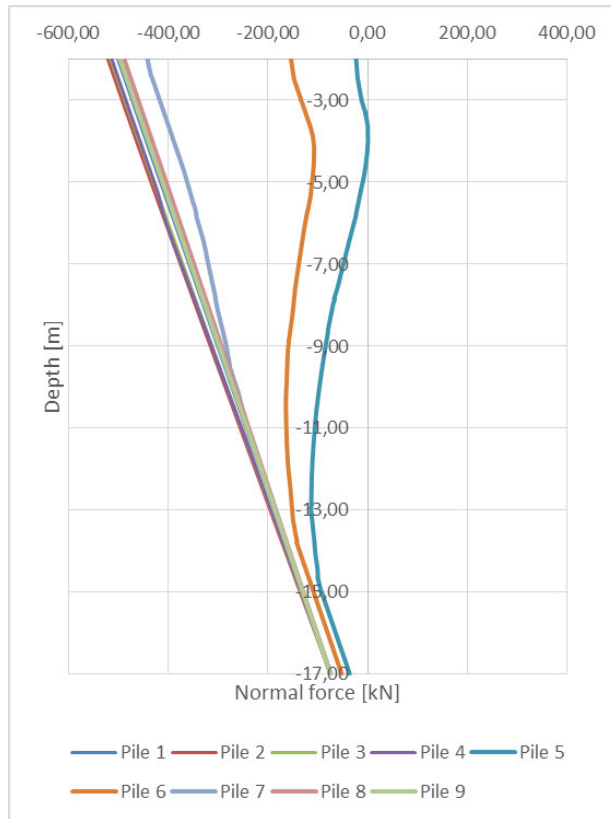


Abb. 7-4 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 4

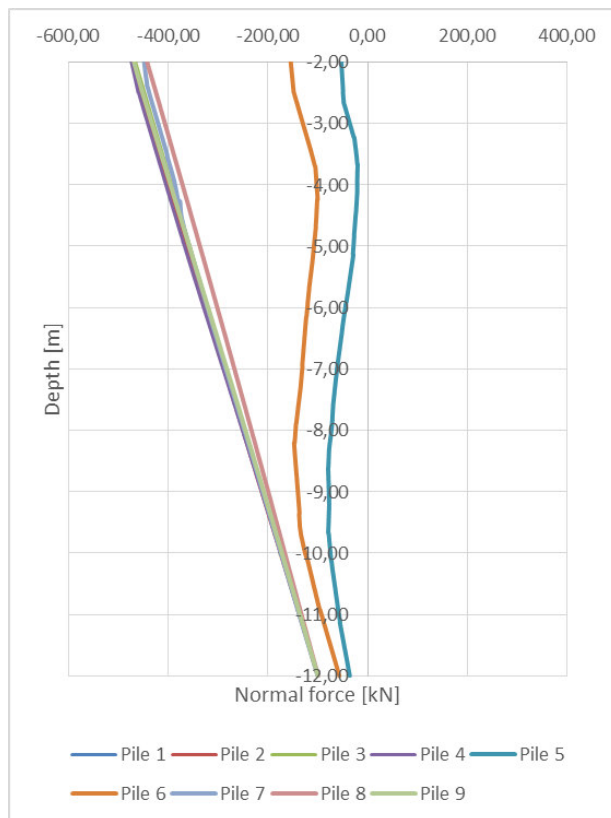


Abb. 7-5 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 5

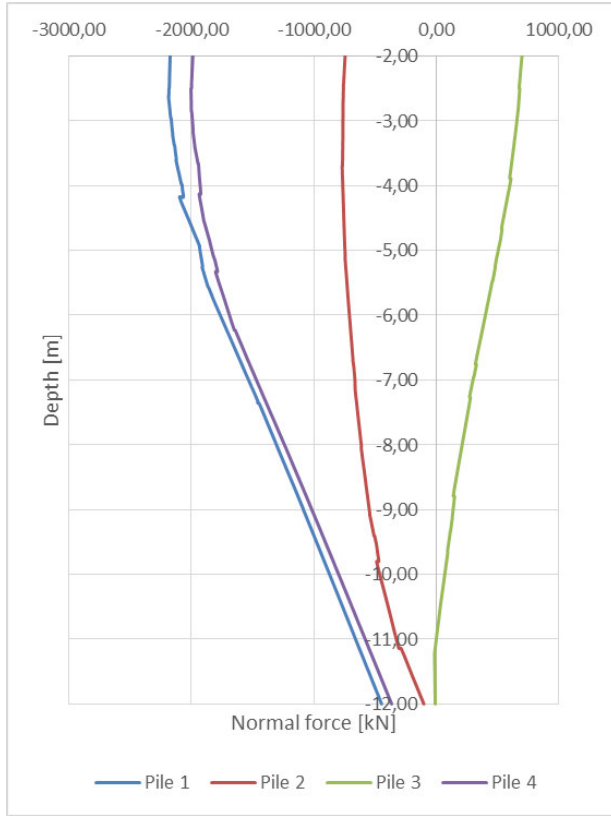


Abb. 7-6 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 6

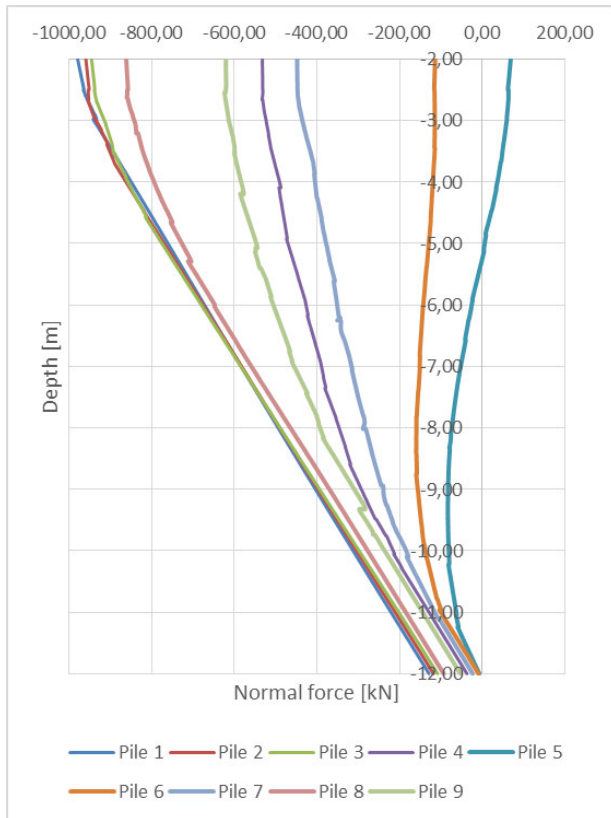


Abb. 7-7 Pfahlkräfte Konfiguration Nr. 7

7.2 Platzbedarf der Baustelleneinrichtung

7.2.1 Variante 1: Großbohrpfähle und Baugrube mit freier Böschung

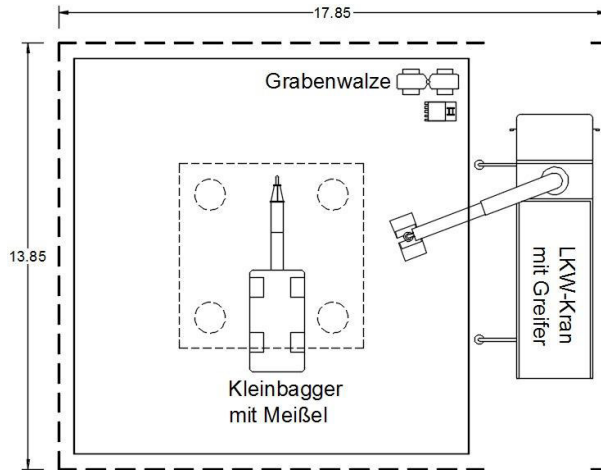


Abb. 7-8 Herrichten des Arbeitsplanums

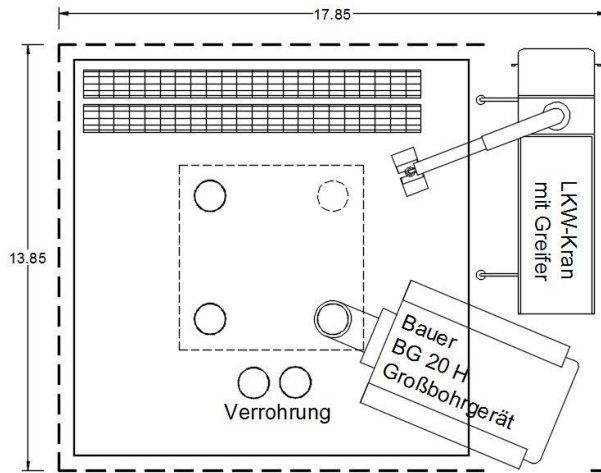


Abb. 7-9 Errichten der Großbohrpfähle – Aushub

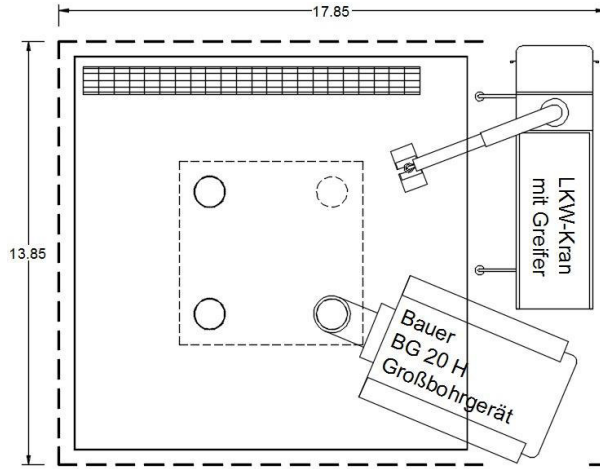


Abb. 7-10 Errichten der Großbohrpfähle – Einbringen der Bewehrung

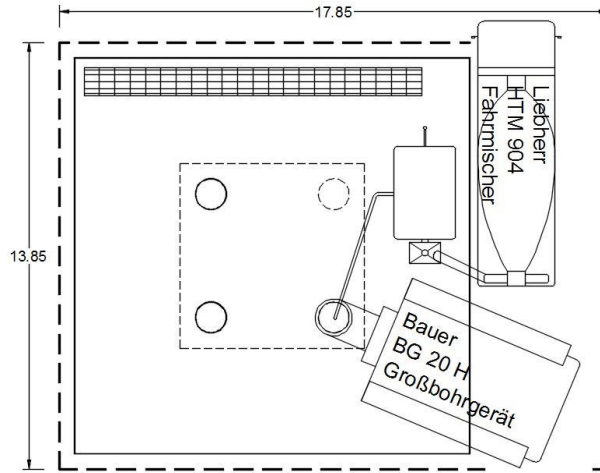


Abb. 7-11 Errichten der Großbohrpfähle – Betonieren

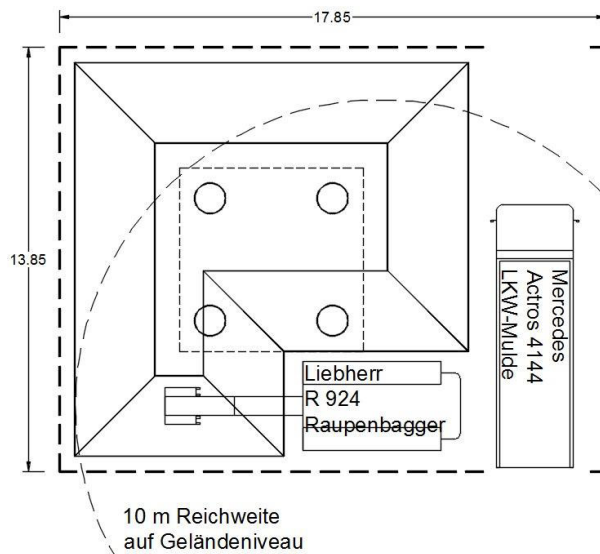


Abb. 7-12 Aushub der Baugrube

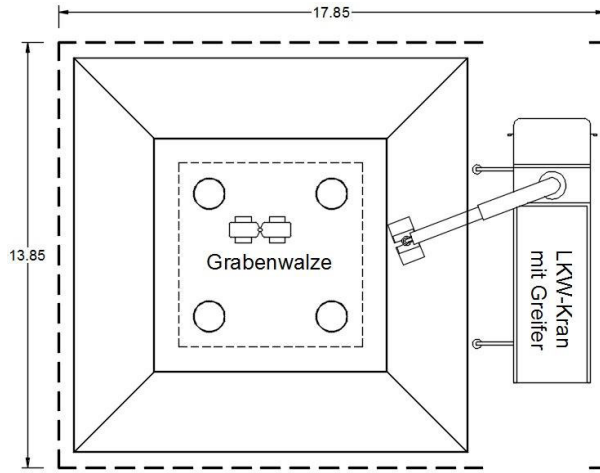


Abb. 7-13 Vorbereiten der Aushubsohle

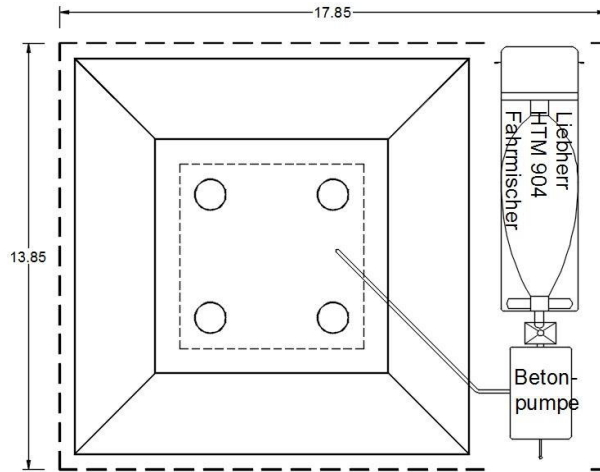


Abb. 7-14 Betonieren der Sauberkeitsschicht

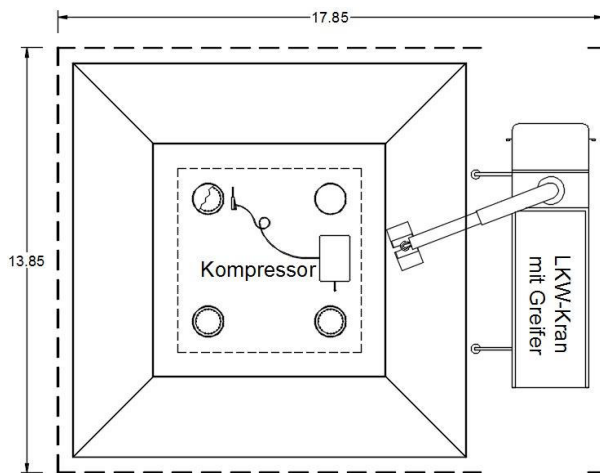


Abb. 7-15 Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung

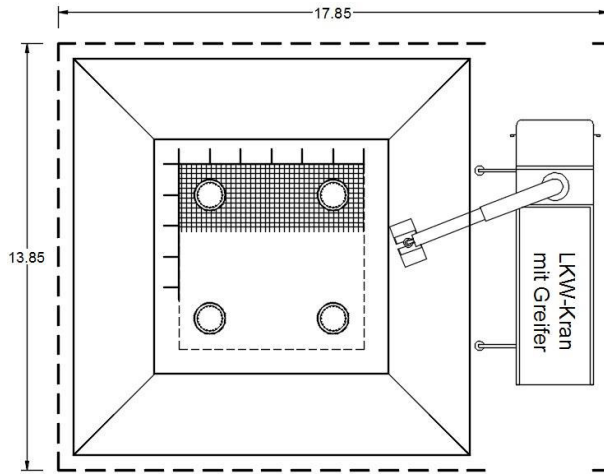


Abb. 7-16 Aufstellen der Schalung und Einbau der Bewehrung

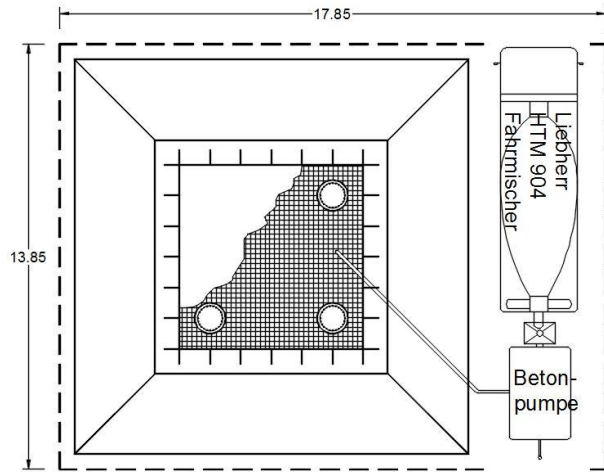


Abb. 7-17 Betonieren der Fundamentplatte

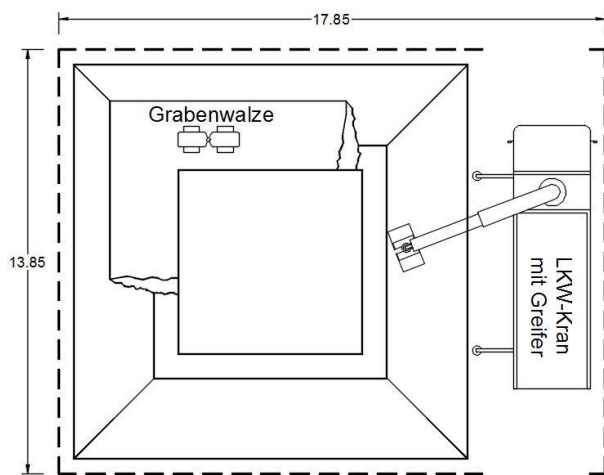


Abb. 7-18 Hinterfüllen der Baugrube

7.2.2 Variante 2: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit freier Böschung

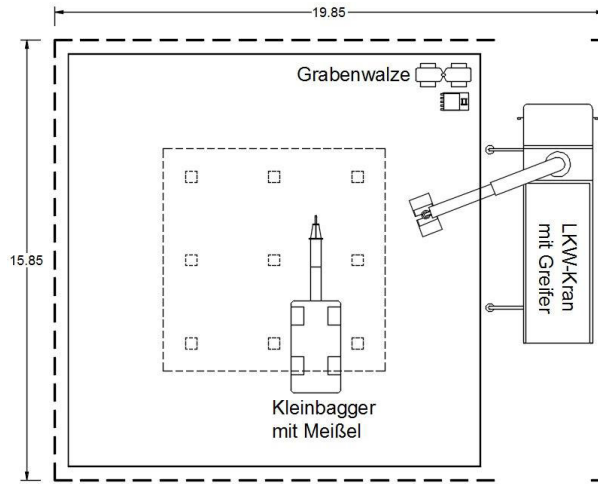


Abb. 7-19 Herrichten des Arbeitsplanums

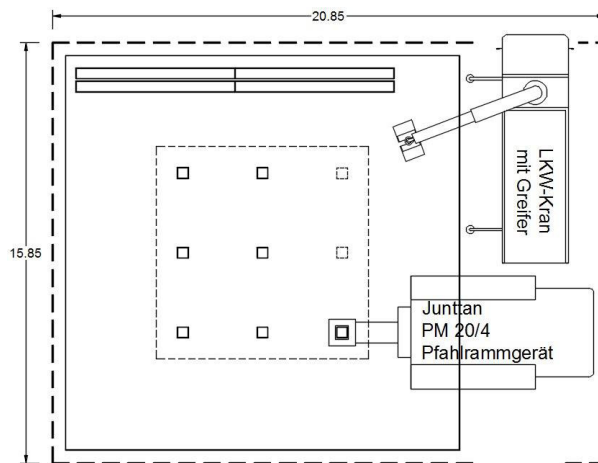


Abb. 7-20 Errichten der Fertigteil-Rammpfähle

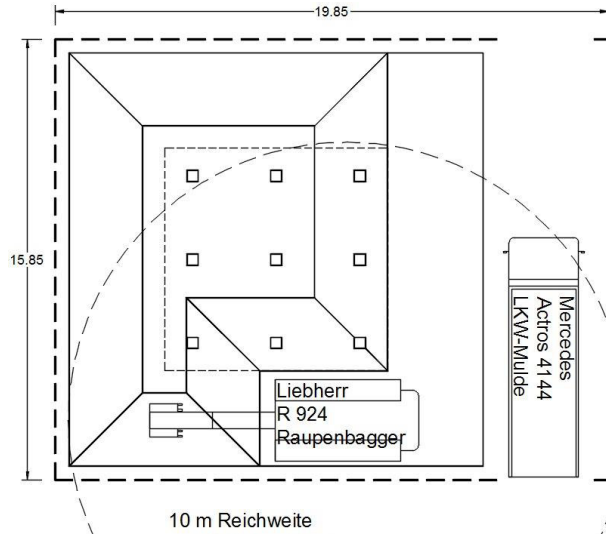


Abb. 7-21 Aushub der Baugrube

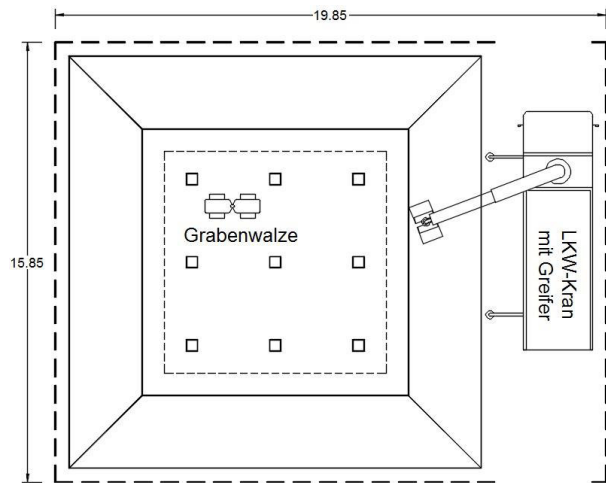


Abb. 7-22 Vorbereiten der Aushubsohle

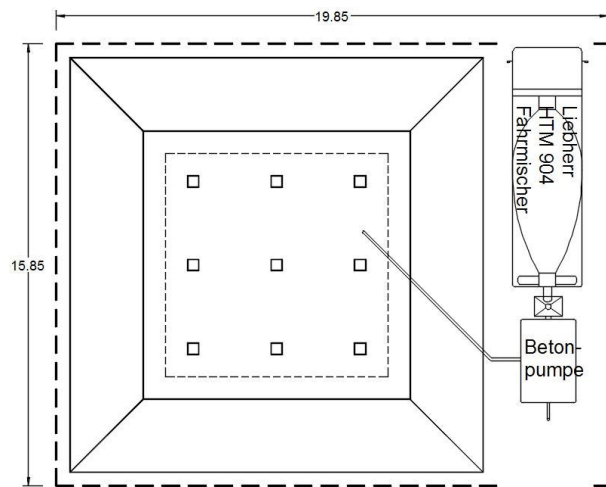


Abb. 7-23 Betonieren der Sauberkeitsschicht

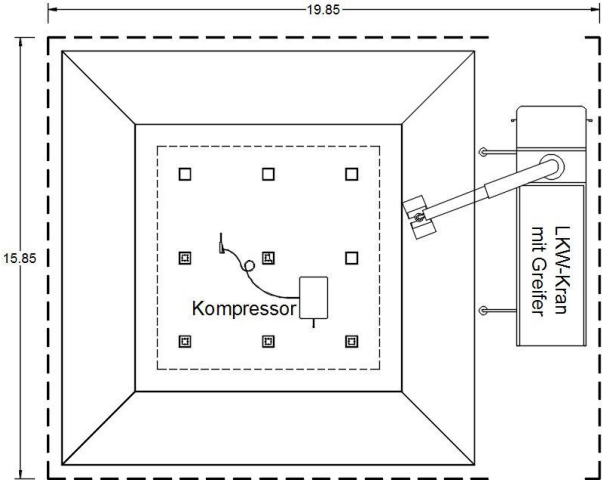


Abb. 7-24 Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung

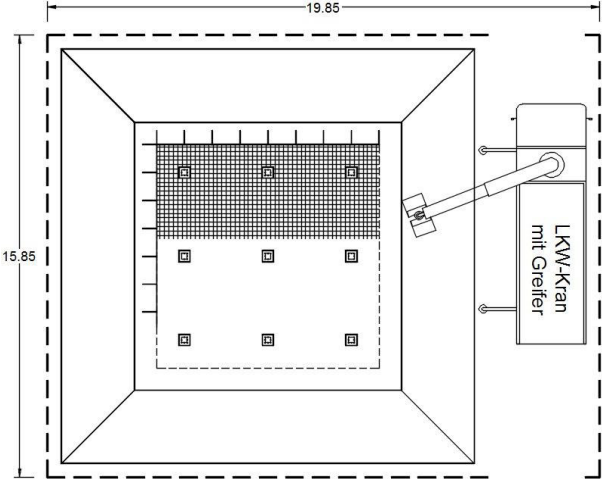


Abb. 7-25 Aufstellen der Schalung und Einbau der Bewehrung

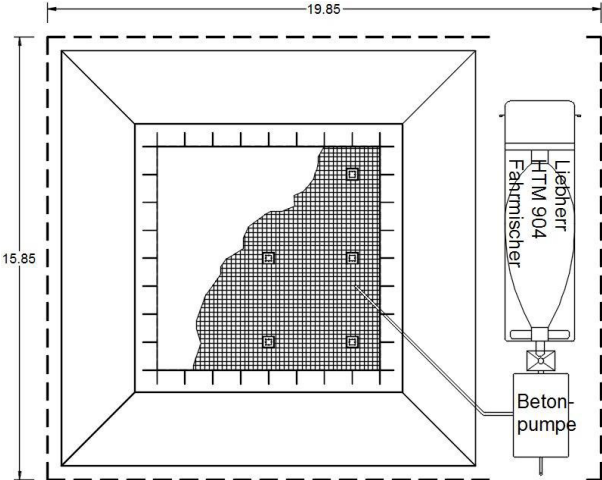


Abb. 7-26 Betonieren der Fundamentplatte

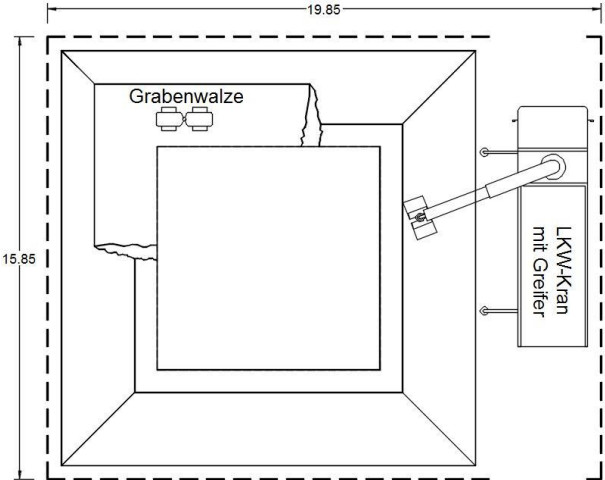


Abb. 7-27 Hinterfüllen der Baugrube

7.2.3 Variante 3: Großbohrpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

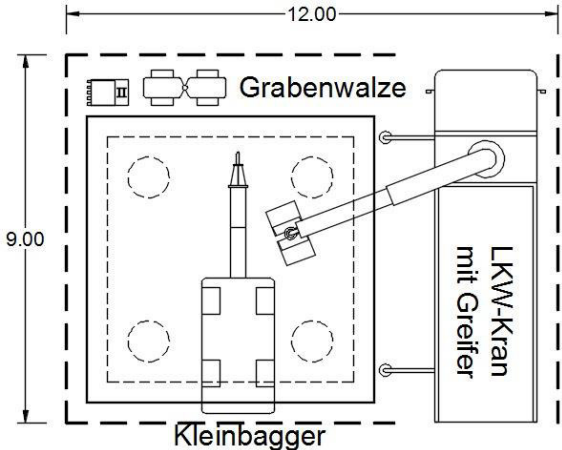


Abb. 7-28 Herrichten des Arbeitsplanums

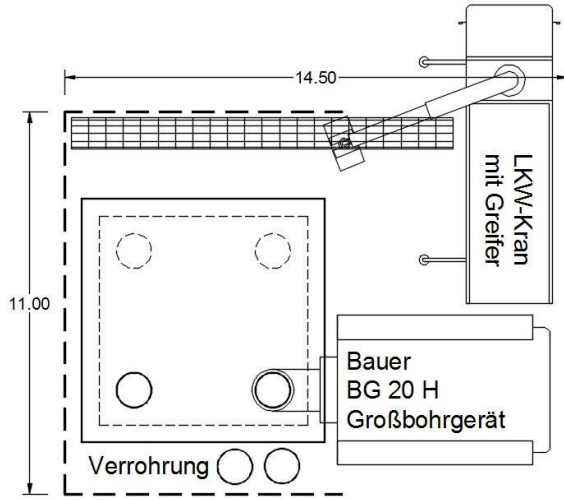


Abb. 7-29 Errichten der Großbohrpfähle – Aushub

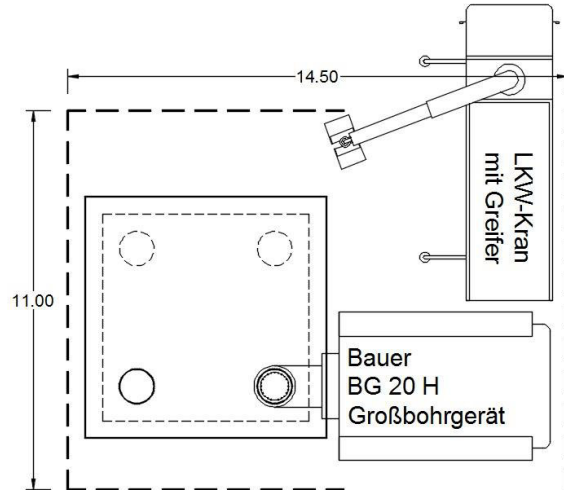


Abb. 7-30 Errichten der Großbohrpfähle – Einbringen der Bewehrung

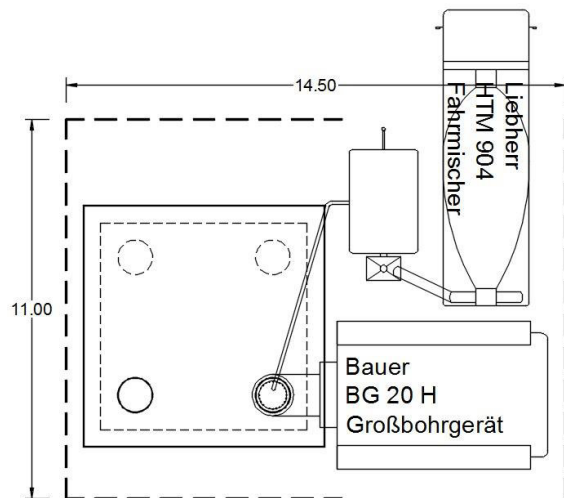


Abb. 7-31 Errichten der Großbohrpfähle – Betonieren

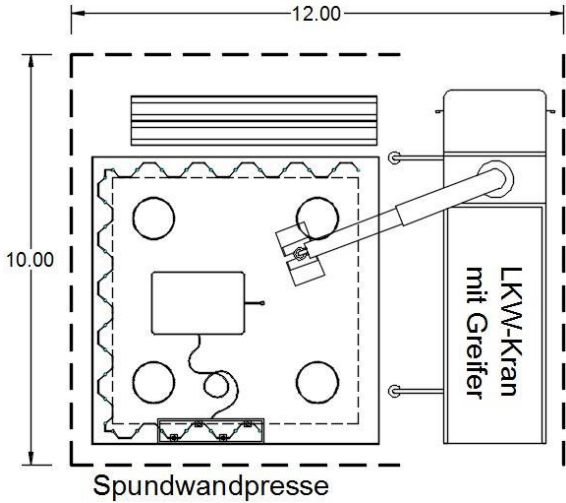


Abb. 7-32 Einbringen der Spundwand

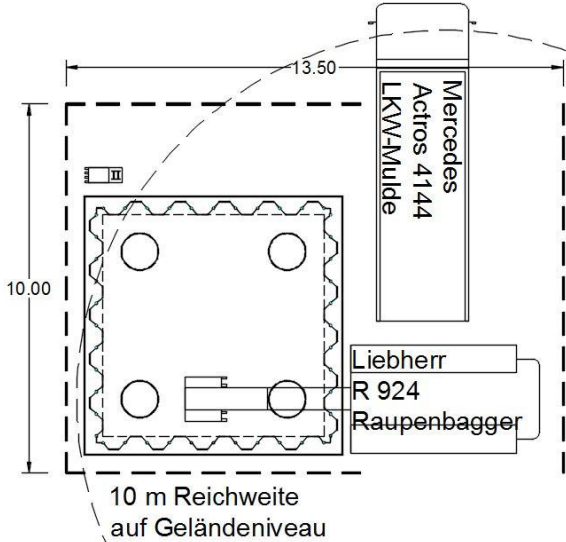


Abb. 7-33 Aushub der Baugrube

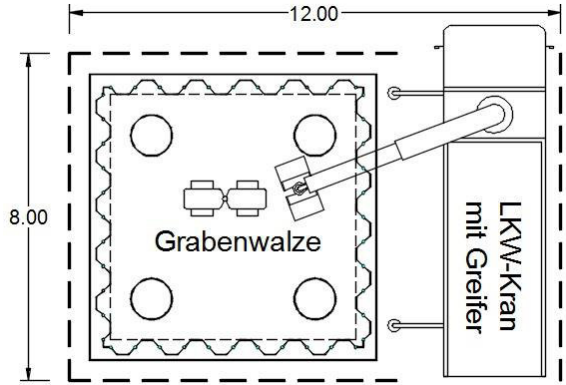


Abb. 7-34 Vorbereiten der Aushubsohle

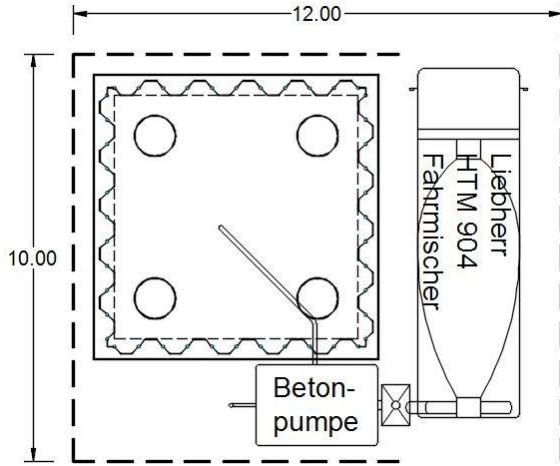


Abb. 7-35 Betonieren der Sauberkeitsschicht

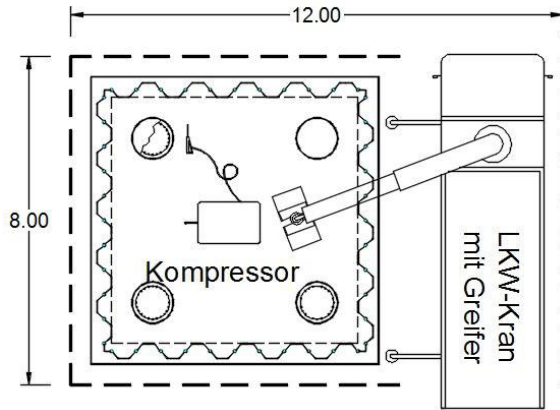


Abb. 7-36 Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung

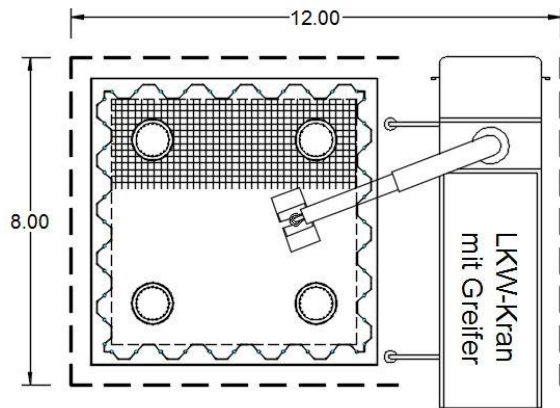


Abb. 7-37 Einbau der Bewehrung

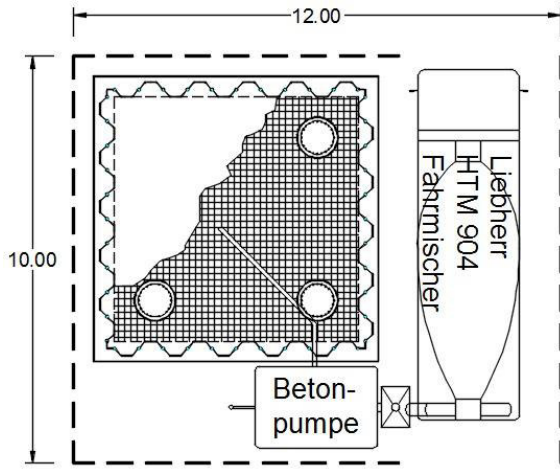


Abb. 7-38 Betonieren der Fundamentplatte

7.2.4 Variante 4: Fertigteil-Rammpfähle und Baugrube mit Spundwandverbau

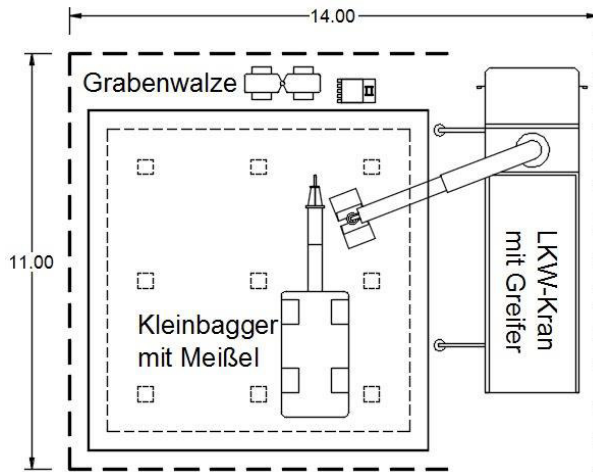


Abb. 7-39 Herrichten des Arbeitsplanums

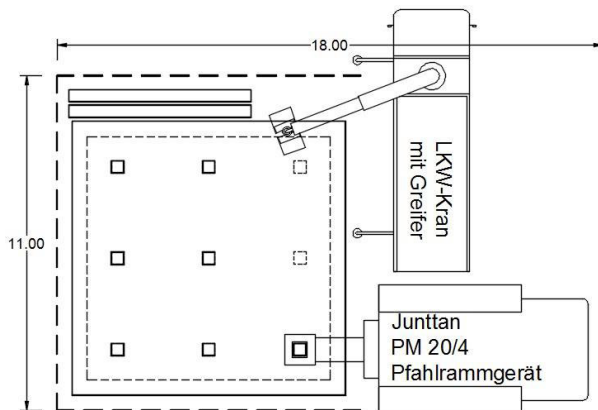


Abb. 7-40 Errichten der Fertigteil-Rammpfähle

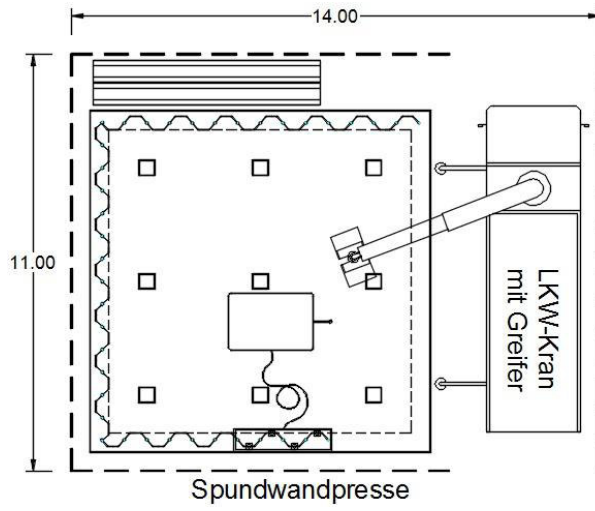


Abb. 7-41 Einbringen der Spundwand

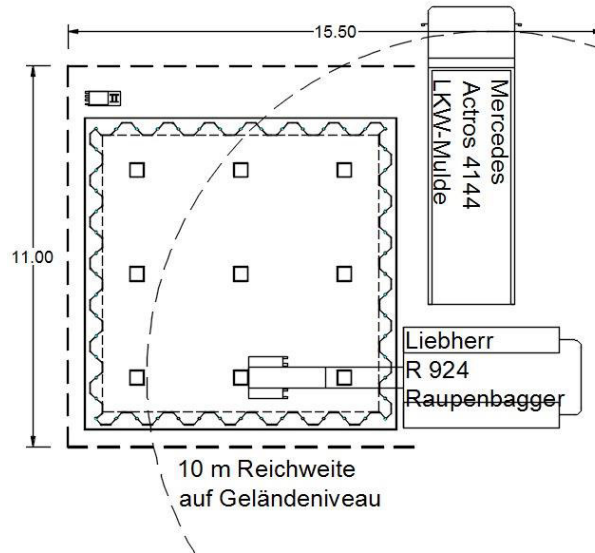


Abb. 7-42 Aushub der Baugrube

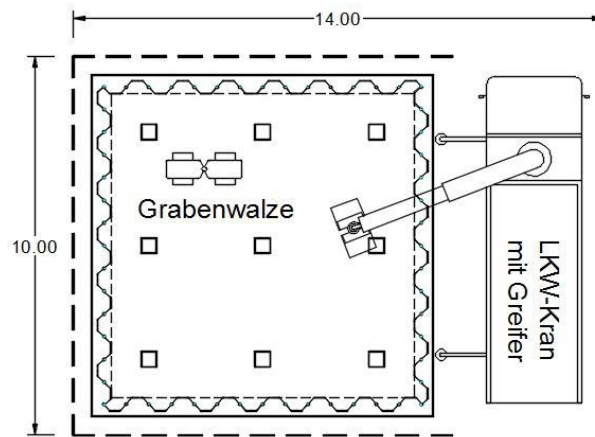


Abb. 7-43 Vorbereiten der Aushubsohle

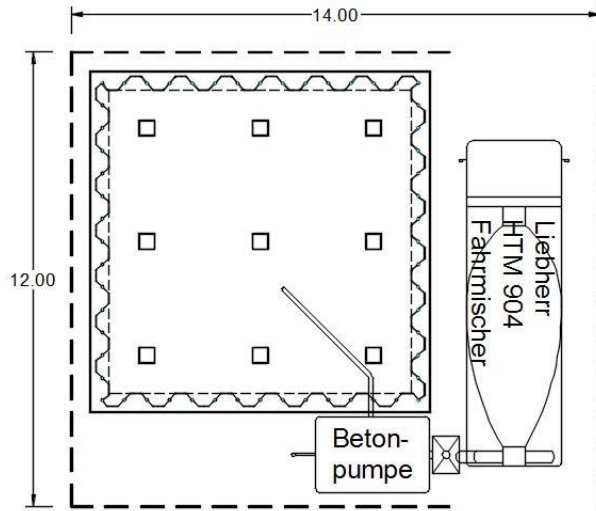


Abb. 7-44 Betonieren der Sauberkeitsschicht

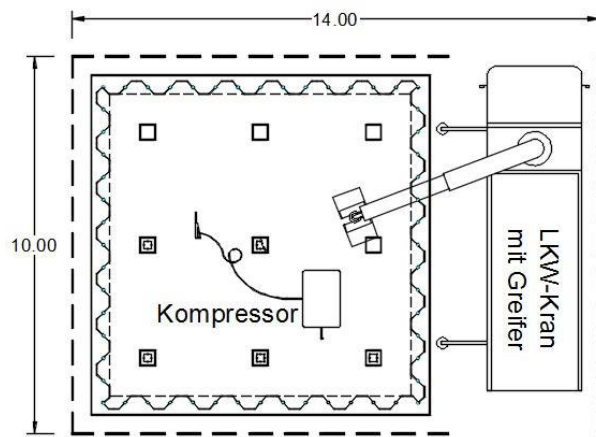


Abb. 7-45 Ablängen der Pfähle und Freilegung der Bewehrung

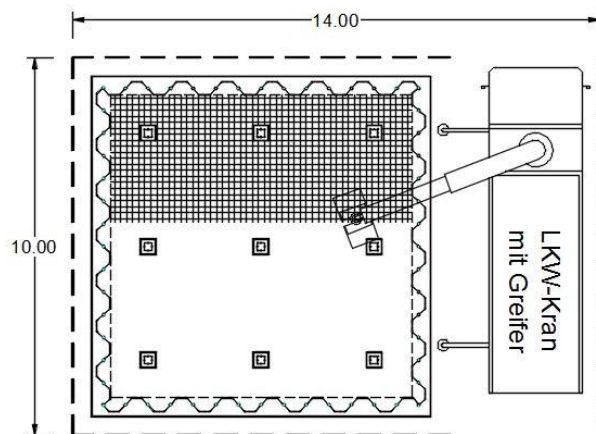


Abb. 7-46 Einbau der Bewehrung

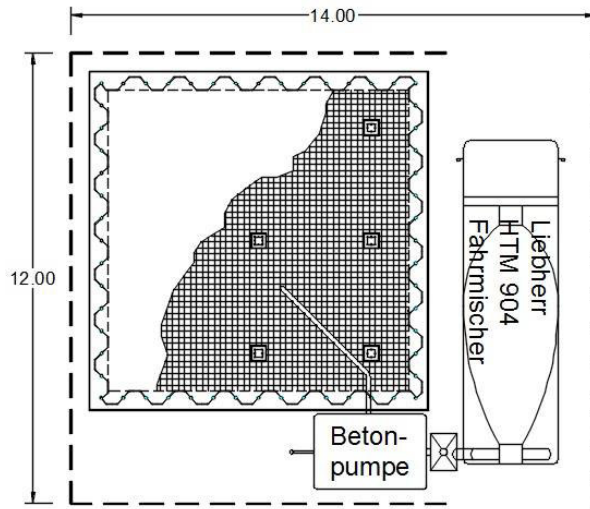


Abb. 7-47 Betonieren der Fundamentplatte

7.3 Kostenermittlung

7.3.1 Kalkulation

Kostenentwicklung			Lohn [€/E]	Stoff [€/E]	Gerät [€/E]	Fremdl. [€/E]	Sonst. [€/E]
Aufbau Bauzaun:	30,00	lfm/h					
Personal							
2 Personen:	2,00	Std/h					
2,0 Std/h / 30 lfm/h * 23,50 €/Std			1,57				
Material:	2,50	€/lfm		2,50			
EKT: Aufbau Bauzaun [€/lfm]			1,57	2,50	-	-	2,50
Abbruch und Verladung des Asphalts:	2,00	m³/h					
Abbruch und Verladung:	100,00	€/m³				100,00	
EKT: Abbruch und Verladung des Asphalts [€/m²]			-	-	-	100,00	100,00
Herstellung Bohrpfähle:	40,00	lfm/d					
Bauer BG 20 H: 58,5 t; 205 kW							
Neuwert:	833.500,00	€					

Abschreibung + Verzinsung:	23.300,00	€/Mo				
23.300,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h						27,41
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	21.700,00	€/Mo				
21.700,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h			12,76	12,76		
Abstreifer für Bohrkopf						
Neuwert:	8.335,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	233,00	€/Mo				
233,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h						0,27
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	217,00	€/Mo				
217,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h			0,13	0,13		
Kraftdrehkopf						
Neuwert:	90.700,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	2.540,00	€/Mo				
2.540,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h						2,99
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	2.360,00	€/Mo				
2.360,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h			1,39	1,39		
Druckrohr						
Neuwert:	5.350,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	203,00	€/Mo				
203,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h						0,24
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	203,00	€/Mo				
203,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h			0,12	0,12		
Teleskop-Kellystange, 2-fach mit Schalldämmung						
Neuwert:	54.285,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	2.058,00	€/Mo				
2.058,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h						2,42

Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff): 1.732,50 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h	1.732,50	€/Mo	1,02	1,02	
Bohrrohr, doppelwandig, 4 m	3,00	Stk			
Neuwert:	11.200,00	€			
Abschreibung + Verzinsung: 3 Stk. * 426,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h	426,00	€/Mo			1,50
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff): 3 Stk. * 426,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h	426,00	€/Mo	0,75	0,75	
Bohrschnecke					
Neuwert:	6.450,00	€			
Abschreibung + Verzinsung: 283,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h	283,00	€/Mo			0,33
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff): 264,00 €/Mo / 170 h/Mo / 5 lfm/h	264,00	€/Mo	0,16	0,16	
Betriebsstoffe					
Verbrauch:	0,24	l/kWh			
Kosten: 205 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 5 lfm/h	1,00	€/l		9,84	
Personal					
1 Fahrer:	1,10	Std/h			
1 Helfer:	1,00	Std/h			
2,1 Std/h / 5 lfm/h * 23,50 €/Std			9,87		
Material					
Bewehrungskorb:	70,00	€/lfm		70,00	
Unterwasserbeton C30/37 für Bohrpfähle:	110,00	€/m³			

110,00 €/m³ * 0,79 m³/lfm			86,90				
EKT: Bohrpfähle [€/lfm]			26,20	183,07	35,17	-	218,24
Herstellung Rammfähle:	220,00	lfm/d					
Junttan PM 20: 49,6 t; 179 kW							
Neuwert:	726.000,00	€					
Abschreibung + Verzinsung:	20.300,00	€/Mo					
20.300,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h					4,34		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	18.900,00	€/Mo					
18.900,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h			2,02	2,02			
Hydraulik-Freifallbär							
Neuwert:	125.000,00	€					
Abschreibung + Verzinsung:	3.990,00	€/Mo					
3.990,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h					0,85		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	3.620,00	€/Mo					
3.620,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h			0,39	0,39			
Rammhaube							
Neuwert:	11.500,00	€					
Abschreibung + Verzinsung:	334,00	€/Mo					
334,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h					0,07		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	334,00	€/Mo					
334,00 €/Mo / 170 h/Mo / 27,5 lfm/h			0,04	0,04			
Betriebsstoffe							
Verbrauch:	0,24	l/kWh					
Kosten:	1,00	€/l					

179 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 27,5 lfm/h			1,56			
Personal						
1 Fahrer:	1,10	Std/h				
1 Helfer:	1,00	Std/h				
2,1 Std/h / 27,5 lfm/h * 23,50 €/Std			1,79			
Material						
Fertigteile-Rammpfahl:	55,00	€/lfm		55,00		
EKT: Rammpfähle [€/lfm]			4,24	59,01	5,27	-
Herstellung Spundwand:	300,00	m ² /d				
Giken Silent Piler ECO700S: 230 kW						
Neuwert:	362.500,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	9.050,00	€/Mo				
9.050,00 €/Mo / 170 h/Mo / 37,5 m ² /h					1,42	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	6.150,00	€/Mo				
6.150,00 €/Mo / 170 h/Mo / 37,5 m ² /h			0,48	0,48		
Betriebsstoffe						
Verbrauch:	0,24	l/kWh				
Kosten:	1,00	€/l				
230 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 37,5 lfm/h				1,47		
Personal						
2 Personen:	2,00	Std/h				
2,0 Std/h / 37,5 m ² /h * 23,50 €/Std			1,25			

Material						
Spundwand Profil PU12:	82,50	€/m ²		82,50		
EKT: Spundwand [€/m²]			1,74	84,45	1,42	-
Aushubarbeiten:	760,00	m ³ /d				
Liebherr R 924: 25 t; 120 kW						
Neuwert:	272.500,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	6.000,00	€/Mo				
6.000,00 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h					0,37	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	4.080,00	€/Mo				
4.080,00 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h			0,13	0,13		
Monoblockausleger						
Neuwert:	34.800,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	765,00	€/Mo				
765,00 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h					0,05	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	520,00	€/Mo				
520,00 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h			0,02	0,02		
Tieflöffel mit Auswerfer, Schwenkeinrichtung und Schnellwechseleinrichtung: 0,15 m ³ ; 0,16 t						
Neuwert:	5.040,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	115,50	€/Mo				
115,50 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h					0,01	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	176,75	€/Mo				
176,75 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm ³ /h			0,01	0,01		
Tieflöffel mit Auswerfer, Schwenkeinrichtung und						

Schnellwechseleinrichtung: 1,6 m³; 1,4 t						
Neuwert:	26.052,17 €					
Abschreibung + Verzinsung:	521,04 €/Mo					
521,04 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm³/h					0,03	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	521,04 €/Mo					
521,04 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm³/h		0,02	0,02			
Grabenräumlöffel mit Schwenkeinrichtung und Schnellwechseleinrichtung: 0,35 m³; 0,25 t						
Neuwert:	4.250,00 €					
Abschreibung + Verzinsung:	122,50 €/Mo					
122,50 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm³/h					0,01	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	148,75 €/Mo					
148,75 €/Mo / 170 h/Mo / 95,0 fm³/h		0,00	0,00			
Betriebsstoffe						
Verbrauch:	0,24 l/kWh					
Kosten:	1,00 €/l					
120 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 95,0 fm³/h				0,30		
Personal						
1 Fahrer:	1,10 Std/h					
2 Helfer:	2,00 Std/h					
3,1 Std/h / 95,0 fm³/h * 23,50 €/Std		0,77				
EKT: Aushubarbeiten [€/fm³]		0,94	0,47	0,47	-	0,94
Verdichten der Baugrubensohle:						
	100,00 m²/h					
Ammann Rammax 1575: 1,4 t; 15,1 kW						

Neuwert:	30.500,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	1.160,00	€/Mo				
1.160,00 €/Mo / 170 h/Mo / 100 m²/h					0,07	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	795,00	€/Mo				
795,00 €/Mo / 170 h/Mo / 100 m²/h			0,02	0,02		
Betriebsstoffe						
Verbrauch:	0,24	l/kWh				
Kosten:	1,00	€/l				
15,1 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 100 fm³/h				0,04		
Personal						
1 Fahrer:	1,00	Std/h				
1,0 Std/h / 100 m²/h * 23,50 €/Std			0,24			
EKT: Verdichten [€/fm³]			0,26	0,06	0,07	-
						0,13
Betonieren der Sauberkeitsschicht:	6,00	m³/h				
Liebherr THS 80 D mit Dieselmotor und Fahrgestell: 5,3 t; 115 kW						
Neuwert:	140.550,00	€				
Abschreibung + Verzinsung:	3.789,90	€/Mo				
3.789,90 €/Mo / 170 h/Mo / 6,0 m³/h					3,72	
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	2.946,40	€/Mo				
2.946,40 €/Mo / 170 h/Mo / 6,0 m³/h			1,44	1,44		
Betriebsstoffe						
Verbrauch:	0,24	l/kWh				
Kosten:	1,00	€/l				
115 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 6,0 fm³/h				4,60		

Personal						
2 Arbeiter:	2,00	Std/h				
2,0 Std/h / 6,0 m³/h * 23,50 €/Std			7,83			
Material						
Beton C8/10:	50,00	€/m³		50,00		
EKT: Sauberkeitsschicht [€/m³]			9,28	56,04	3,72	-
Ablängen der Bohrpfähle:	1,00	Stk/h				
Ablängen der Pfähle:	90,00	€/Stk			90,00	
EKT: Ablängen der Bohrpfähle [€/Stk]			-	-	-	90,00
Ablängen der Ramppfähle:	2,00	Stk/h				
Ablängen der Pfähle:	60,00	€/Stk			60,00	
EKT: Ablängen der Ramppfähle [€/Stk]			-	-	-	60,00
Aufbau der Schalung:	8,00	m²/h				
Personal						
4 Arbeiter:	4,00	Std/h				
4,0 Std/h / 8,0 m²/h * 23,50 €/Std			11,75			
Material						
Schalungselemente und Geräte:	4,60	€/m²			4,60	

Schalöl:	0,36	€/m²		0,36			
EKT: Aufbau der Schalung [€/m²]			11,75	0,36	4,60	-	4,96
Bewehrungsarbeiten:	0,40	t/h					
Personal							
4 Arbeiter:	4,00	Std/h					
4,0 Std/h / 0,4 t/h * 23,50 €/Std			235,00				
Material							
Bewehrungsstahl:	600,00	€/t		600,00			
Kleinmaterial (Abstandshalter usw.):	50,00	€/t		50,00			
EKT: Bewehrung [€/t]			235,00	650,00	-	-	650,00
Betonierarbeiten:	71,00	m³/h					
Liebherr THS 80 D mit Dieselmotor und Fahrgestell: 5,3 t; 115 kW							
Neuwert:	140.550,00	€					
Abschreibung + Verzinsung:	3.789,90	€/Mo					
3.789,90 €/Mo / 170 h/Mo / 71,0 m³/h					0,31		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	2.946,40	€/Mo					
2.946,40 €/Mo / 170 h/Mo / 71,0 m³/h			0,12	0,12			
Elektrischer Innenrüttler							
Neuwert:	1.470,00	€					
Abschreibung + Verzinsung:	65,00	€/Mo					
65,00 €/Mo / 170 h/Mo / 71,0 m³/h					0,01		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	50,00	€/Mo					

50,00 €/Mo / 170 h/Mo / 71,0 m³/h			0,00	0,00		
Betriebsstoffe						
Verbrauch:	0,24	l/kWh				
Kosten:	1,00	€/l				
115 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 71,0 fm³/h				0,39		
Personal						
2 Arbeiter:	2,00	Std/h				
2,0 Std/h / 71,0 m³/h * 23,50 €/Std			0,66			
Material						
Beton C25/30:	80,00	€/m³		80,00		
EKT: Beton [€/m³]			0,79	80,51	0,32	-
						80,83
Abbau der Schalung:	16,00	m²/h				
Personal						
4 Arbeiter:	4,00	Std/h				
4,0 Std/h / 16,0 m²/h * 23,50 €/Std			5,88			
EKT: Abbau der Schalung [€/m²]			5,88	-	-	-
Hinterfüllen des Arbeitsraums:	50,00	fm³/h				
Hinterfüllung mit LKW-Greifer:	4,50	€/fm³			4,50	
Ammann Rammax 1575: 1,4 t; 15,1 kW						
Neuwert:	30.500,00	€				

Abschreibung + Verzinsung:	1.160,00	€/Mo					
1.160,00 €/Mo / 170 h/Mo / 50 fm³/h					0,14		
Reparatur (50% Lohn, 50% Stoff):	795,00	€/Mo					
795,00 €/Mo / 170 h/Mo / 50 fm³/h			0,05	0,05			
Betriebsstoffe							
Verbrauch:	0,24	l/kWh					
Kosten:	1,00	€/l					
15,1 kW * 0,24 l/kWh * 1,00 €/l / 50,0 fm³/h				0,07			
Personal							
1 Fahrer:	1,00	Std/h					
1,0 Std/h / 50 fm³/h * 23,50 €/Std			0,47				
EKT: Hinterfüllen und Verdichten [€/fm³]			0,52	0,12	0,14	4,50	4,76
Wiederherstellen des Oberfläche:	10,00	m²/h					
Herstellen des Unterbau und der Deckschicht						50,00	
EKT: Herstellung der Oberfläche [€/m²]			-	-	-	50,00	50,00
Abbau Bauzaun:	50,00	lfm/h					
Personal							
2 Personen:	2,00	Std/h					
2,0 Std/h / 50 lfm/h * 23,50 €/Std			0,94				
EKT: Abbau Bauzaun [€/lfm]			0,94	-	-	-	-

Tab. 7-4 Kalkulation der Einzelkosten der Teilleistungen

Glossar

Standard Penetration Test (SPT)

Der Standard Penetration Test (SPT) ist eine Form der Rammsondierung, bei der ein Probenentnahmegesetz mit einem Außendurchmesser von 51 mm und einem Innendurchmesser von 35 mm in den Boden eingerammt wird. Dabei schlägt ein Rammhämmer mit einer Masse von 63,5 kg aus 76 cm Höhe auf einen Amboss. Die Anzahl der Schläge, die notwendig ist, um das Entnahmegesetz 30 cm in den ungestörten Boden einzubringen, wird als der Eindringwiderstand N_{30} bezeichnet. Der Standard Penetration Test ist dabei vor allem darauf ausgelegt, an der Sohle eines Bohrloches durchgeführt zu werden.¹¹³

¹¹³ Vgl. WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 1. S. 69-74

Literaturverzeichnis

<http://www.centrum.de/leistungen/maschinen>. Datum des Zugriffs: 12.01.2016.

<http://www.naegele-hochtiefbau.at/index.php?id=4346>. Datum des Zugriffs: 11.01.2016.

http://www.bauer.de/de/bma/products/drilling_rigs/. Datum des Zugriffs: 11.01.2016.

http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/bundeslaender/index.html. Datum des Zugriffs: 05.11.2015.

http://www.liebherr.com/MT/de-DE/region-DE/products_mt.wfw/id-349-0/measure-metric. Datum des Zugriffs: 16.02.2016.

http://www.junttan.com/products/pile_driving_rigs/pm16. Datum des Zugriffs: 17.02.2016.

http://www.stat.at/web_de/statistiken/wirtschaft/preise/grosshandelspreisindex/index.html. Datum des Zugriffs: 08.04.2016.

<http://spundwand.arcelormittal.com/page/>. Datum des Zugriffs: 21.04.2016.

<https://www.google.at/maps>. Datum des Zugriffs: 13.05.2016.

<http://www.singstat.gov.sg/statistics/browse-by-theme/transport-tables>. Datum des Zugriffs: 13.05.2016.

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/index.html. Datum des Zugriffs: 13.05.2016.

<http://www.liebherr.com/de/dza/produkte/baumaschinen/betontechnik/betonpumpen/station%C3%A4r/betonpumpen/details/70929.html>. Datum des Zugriffs: 17.05.2016.

AMMANN: Grabenwalze Rammax 1575 und 1585. <http://www.ammann-group.at/es/verdichtungsmaschine/rammax-grabenwalze/rammax-1575/productpage/10742/>. Datum des Zugriffs: 16.02.2016.

BAUER: BG 20 H Großdrehbohrgerät 01/2013.

http://www.bauer.de/de/bma/products/drilling_rigs/premium_line/bg20h_bt60.html. Datum des Zugriffs: 11.01.2016.

BAUER: Auszug Betriebsanleitung 3391 BG20H V01. Bauer Maschinen GmbH, 2015.

BRUNNER, P.: Infrastruktur - Straße, Studienblätter zur Vorlesung. Innsbruck. Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Straßenbau und Verkehrsplanung, Universität Innsbruck, 2010.

- CENTRUMPFÄHLE: Junttan PM 20/4 Maschinendatenblatt.
<http://www.centrum.de/download/maschinen/>. Datum des Zugriffs:
 21.11.2015.
- CENTRUMPFÄHLE: Tiefgründungen mit Stahlbetonfertigpfählen.
<http://www.centrum.de/media/doc/technikbroschuere.pdf>. Datum des
 Zugriffs: 21.11.2015.
- DIN: DIN ISO 9245:1995-01 Erdbaumaschinen - Leistung der Maschinen
 - Begriffe, Formelzeichen und Einheiten. Deutsches Institut für Normung,
 1995.
- FRANKI: Bohrpfahl, FRANKI Grundbau GmbH & Co.KG.
<http://www.franki.de/de/bohrpfaehle-ia.php>. Datum des Zugriffs:
 26.11.2015.
- GANG, C.: Geology of Singapore - Geotechnical Engineering
 Appreciation Course. http://www.srmeg.org.sg/docs/N13072012_2.pdf.
 Datum des Zugriffs: 15.10.2015.
- GIRMSCHEID, G.: Bauverfahren des Spezialtiefbaus. ETH Zürich.
 Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement, 2013.
- GIRMSCHEID, G.: Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen
 und Bauprozesse. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2005.
- <http://www.ka-transporte.at/transporte/4-achs-mulde.html>. Datum des
 Zugriffs: 04.02.2016.
- HOFSTADLER, C.: Kalkulation von Stahlbetonarbeiten.
[http://christianhofstadler.at/wp-content/uploads/2011/06/Kalkulation-
 Stahlbetonarbeiten-Hofstadler-2011.pdf](http://christianhofstadler.at/wp-content/uploads/2011/06/Kalkulation-Stahlbetonarbeiten-Hofstadler-2011.pdf). Datum des Zugriffs: 13.01.2016.
- HOFSTADLER, C.: Schalungs- und Rüsttechnik, Frischbetondruck und
 Bemessung. Technische Universität Graz, 2016.
- HTOON, A. K.; YU, K.: Late Pleistocene Geology of Singapore for
 Engineering Geologists.
[http://www.mgss.org.sg/cms/index.php/downloads/seminars-
 files/technical-seminar-no-1/2-late-pleistocene-geology-of-singapore-
 emphasizing-on-kallang-formation/file](http://www.mgss.org.sg/cms/index.php/downloads/seminars-files/technical-seminar-no-1/2-late-pleistocene-geology-of-singapore-emphasizing-on-kallang-formation/file). Datum des Zugriffs: 15.10.2015.
- HULME, T.; BURCHELL, A.: Tunnelling Projects in Singapore: an
 Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14,
 No. 4, pp. 409-418/1999.
- JODL, H.: Bauverfahrenstechnik - Studienblätter zur Vorlesung.
 Technische Universität Wien, 2010.
- JUNTAN: Junttan Pile Driving Rig PMx20.
http://www.junttan.com/products/pile_driving_rigs/pmx20. Datum des
 Zugriffs: 28.02.2016.

- KRISHNAN, R.: Tunneling and underground projects in Singapore. In: Tunnels and Underground Structures, Zhao, Shirlaw & Krishnan (eds), 2000.
- http://www.liebherr.com/EM/de-DE/region-DE/default_em.wfw/measurement. Datum des Zugriffs: 15.02.2016.
- ON: ÖNORM B 1997-1-3, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik, Teil 1-3: Pfahlgründungen. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, Ausgabe 2012-09-06.
- ON: ÖNORM B 2110, Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen - Werkvertragsnorm. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, Ausgabe 2009-01-01.
- ON: ÖNORM B 4430-1, Zulässige Belastungen des Baugrundes - Flächengründungen. Wien. Österreichisches Normungsinstitut, 1974.
- OPPENEDER, J.: Projekt Quickway AP 4. Prof. Dr.-Ing. Nguyen Viet Tue, Institut für Betonbau, TU-Graz, 2015.
- PLOHMANN, U.; VARINA, L.; WARDINGHUS, P.: Bewertung der axialen Pfahltragfähigkeit durch In-situ Messungen an Fertigteilrammpfählen aus Stahlbeton in bindigen Böden unter Berücksichtigung zyklischer Lasteinwirkungen. In: Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 99/2015.
- PURRER, W.; TUERTSCHER, M.; FLORA, M.: Baubetrieb und Bauwirtschaft - Vorlesungsskript, Teil 1: Baubetrieb. Innsbruck. i3b Arbeitsbereich für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Universität Innsbruck, WS 2010/11.
- QUICKTEAM: Virtual Project Singapore. www.quickteam.at, 2014.
- RAHARDJO, H. et al.: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. In: Engineering Geology, 73/2004.
- RIPPER, P.; WARDINGHUS, P.; WHITE, D.: Untersuchungen zum Tragverhalten von geramnten Verdrängungspfählen im überkonsolidierten Ton. In: Mitteilung des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft Nr. 73/2006.
- SCRIVENOR, J.: The Geology of Singapore Island. In: Journal Malayan Branch - Royal Asiatic Society, Vol. II/1924.
- SENTHIL, N.: The Geology of Singapore as Seen by a Civil Engineer. <http://geo-technical.blogspot.co.at/2014/08/the-geology-of-singapore-as-seen-by.html>. Datum des Zugriffs: 07.11.2015.
- SHARMA, J.; CHU, J.; ZHAO, J.: Geological and Geotechnical Features of Singapore: an Overview. In: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, No. 4/1999.

<http://www.singstat.gov.sg/statistics/latest-data#14>. Datum des Zugriffs: 05.11.2015.

SPAROWITZ, L.; QUICKTEAM, : QUICKWAY - ein neues Mobilitätssystem für Städte. Graz. 2014.

SPIEKERMANN: Toleranzen bei Bohrpfählen und Schlitzwände, Spiekermann GmbH Consulting Engineers.
<http://www.spiekermann.de/seite/aktuelles/presse.php>. Datum des Zugriffs: 29.01.2016.

STANDOP, E.; MEYER, M. L.: Die Form der wissenschaftlichen Arbeit : ein unverzichtbarer Leitfaden für Studium und Beruf. Wiebelsheim. Quelle und Meyer, 2004.

TUM: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik - Tiefgründungen, Pfähle und Anker.
<http://www.gb.bgu.tum.de/index.php?id=46>. Datum des Zugriffs: 11.01.2016.

WARDINGHUS, P.: CPS - Das Centrum Pfahlsystem. Hamburg-Harburg. Centrum Pfähle GmbH, 2014.

WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 1. Berlin. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008 Ernst & Sohn.

WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 2. Berlin. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2011 Ernst & Sohn.

WITT, K. J.; ET.AL., : Grundbau-Taschenbuch Teil 3. Berlin. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2009 Ernst & Sohn.

WKÖ: ÖBGL Österreichische Baugeräteliste. Wien. Österreichischer Wirtschaftsverlag, 2009.